

*Análisis markoviano de las sucesiones
de abanicos aluviales de la cuenca de Madrid
y de la depresión intermedia
(Madrid y Guadalajara, España central)*

T. TORRES, F. J. COELLO, M. GARCÍA-SANUDO,
T. NESTARES, J. E. ORTIZ, A. PELÁEZ

Departamento de Ingeniería Geológica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Minas de Madrid, Ríos Rosas 21, 28003 Madrid.

RESUMEN

En este trabajo se aplica el análisis por cadenas de Markov a sucesiones estratigráficas del Neógeno de la Cuenca de Madrid y de la Depresión Intermedia. Los datos proceden de sondeos mecánicos de reconocimiento que atraviesan depósitos de abanico aluvial y de playa fangosa. El análisis por cadenas de Markov permite determinar la aparición de procesos repetitivos en el espacio y en el tiempo y, en el caso que nos ocupa, detectar aquellos estados (facies), cuya aparición dependa sólo del estado (facies) anterior. El método comprende el cálculo de matrices de contaje, matrices de frecuencias esperadas, matrices de diferencias proporcionales y aplicación del test de Chi-cuadrado. Para cada sondeo se han determinado las sucesiones de facies significativamente ligadas, eliminándose las otras.

Palabras clave: Neógeno, abanico aluvial, llanura fangosa, análisis Markoviano.

ABSTRACT

We have applied Markov chain analysis to Neogene stratigraphical successions from Madrid and Depresion Intermedia basins. Data were obtained from borehole lithologs comprising alluvial fan and mud flat playa deposits. Markov chain analysis allows to determine repetitive process through time and space and, in this case, to detect stages (facies) which apparence is linked

to the immediately preceding stage (facies). The method comprises transition-count matrix, independent trials matrix and proportional difference matrix calculation, as well as Chi-square test calculation. For each borehole litholog significant facies succession were calculated and described, others were rejected.

Key words: Neogene, alluvial fan, mud flat, Markov analysis.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se aplica el análisis por cadenas de Markov a las sucesiones obtenidas en seis sondeos representativos de los sistemas aluviales neógenos de la Cuenca de Madrid y de la Depresión Intermedia (Fig.1) que en la década de los setenta fueron perforados durante la realización de varios proyectos de investigación minera dentro del Plan Nacional del Uranio. Datos sobre estos proyectos pueden consultarse en los informes ENUSA (1984 a, b). En la mayor parte de los casos se analizan las sucesiones de facies provenientes del litolog del sondeo, realizadas por el geólogo de pozo; en algún caso, especialmente cuando se hace necesario diferenciar arenas con mucha matriz, se emplean los registros geofísicos de los pozos, que fueron reconocidos con las herramientas siguientes: Gamma ray, Potencial Espontáneo, Resistividad normal (N16) y Resistividad de electrodo único.

SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La zona elegida en la Cuenca de Madrid se sitúa en la vecindad del Pueblo de Paracuellos de Jarama, situado entre las hojas números 534 (Colmenar Viejo) y 559 (Madrid) del M.T.N. a escala 1:50.000. Los sondeos seleccionados se sitúan en ambas márgenes del río Jarama (Fig.1) y tienen las numeraciones y denominaciones siguientes: 534/2-Alcobendas I (X = 449092 m, Y = 4487760 m, Z = 622 m), 534/4-Paracuellos 4 (X = 452578 m, Y = 4484839 m, Z = 579 m) y 559/7-Paracuellos (X = 454541 m, Y = 4482422 m, Z = 572 m).

El área correspondiente a la Depresión Intermedia está situada al norte del Embalse de Buendía (provincia de Cuenca) (Fig.1), en las hojas del M.T.N. escala 1:50.000 números 538 (Valdeolivas) y 562 (Sacedón); los sondeos seleccionados se emplazan en las cercanías de las localidades de Valdeolivas, Millana y Salmeroncillos de Abajo. Sus denominaciones y coordenadas son las siguientes: 538/2-Salmeroncillos de Abajo (X = 540950 m, Y = 4484523 m, Z = 780 m), 538/4-Valdeolivas (X = 547073 m, Y = 4484005 m, Z = 920 m) y 562/13-Peña de D. Benito (X = 537310 m, Y = 4482780 m, Z = 782 m).

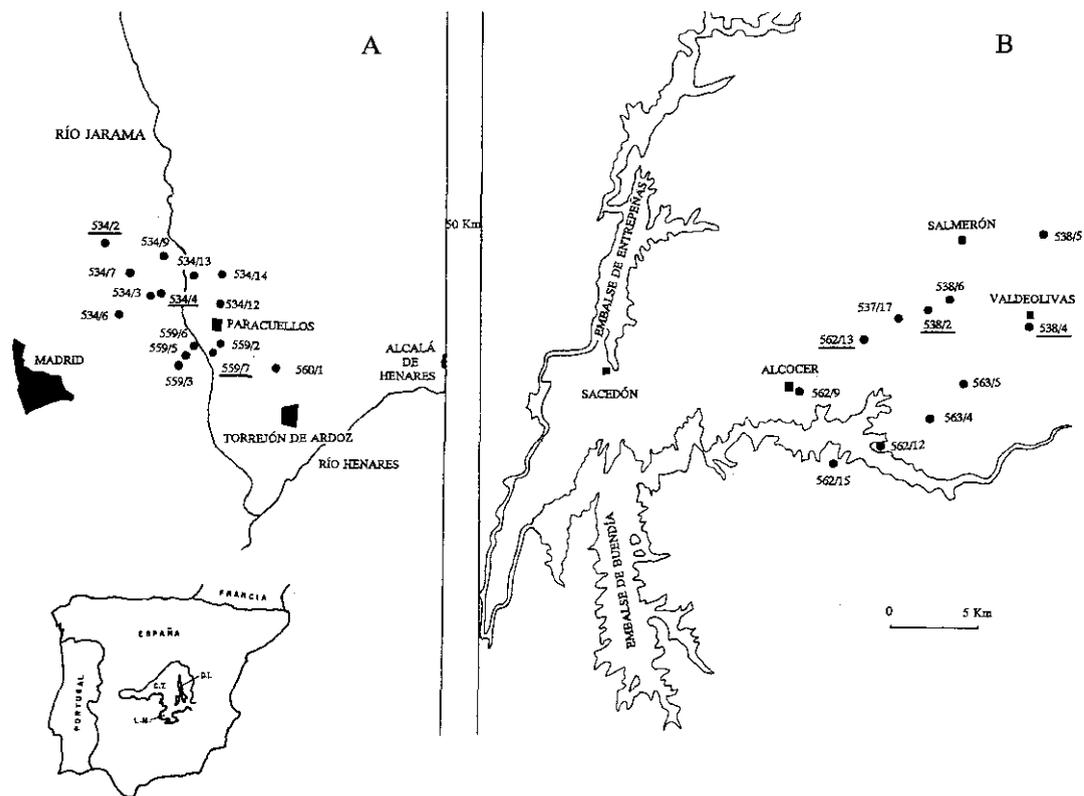


Fig. 1.—Situación de las zonas de estudio, con indicación de la posición de los sondeos descritos en este trabajo. A) Cuenca de Madrid (CT); B) Depresión Intermedia (DI). LM La Mancha. Las líneas en el centro de la figura marcan la distancia entre las áreas de estudio.
 Fig. 1.—Situation of the studied areas, with the position of borehole described in this work. A) Madrid basin (CT), B) Depresión Intermedia basin (DI), LM-La Mancha. The lines on the central part of the figure, indicate the distance between the studied areas.

SITUACIÓN GEOLÓGICA

En ambas cuencas la sedimentación vino configurada por una distribución centrípeta de facies según el esquema siguiente (Fig.2): abanico aluvial-llanura fangosa, en tránsito a *sabkhas*, en el caso de la Cuenca de Madrid, o a lagos salinos en la Depresión Intermedia. Entre las dos cuencas existe un aspecto netamente diferenciador basado en las características de las cuencas de recepción hidrográfica y área fuente de sedimentos:

Los materiales aportados por los sistemas de abanicos aluviales de la Cuenca de Madrid, especialmente en la zona elegida para este estudio, proceden, en buena parte, de la alteración, erosión y transporte de los extensos afloramientos de granitoides y rocas paleozoicas en el Sistema Central. Estos condicionantes litológicos de la cuenca de recepción hidrográfica fueron poco adecuados para el mantenimiento de una inercia hidrológica; ello explicaría el desarrollo de sistemas de canales, con organización radial, abanicos, muy penetrativos pero efímeros, con poco encajamiento y apilamiento multiépisdico, expuestos a condiciones de oxidación. Distalmente gradan a llanuras fangosas y zonas hipersalinas donde se sedimentaron arcillas de neoformación, esmectitas magnesianas según Alonso *et al.* (1986), sulfatos y cloruros.

La Depresión Intermedia presenta un panorama distinto: el área fuente está formada por rocas sedimentarias mesozoicas. La Fm. Arenas de Utrillas, mayoritariamente, y los materiales arenosos del Paleógeno fueron las principales fuentes de arena de cuarzo, mientras que las arenas de la facies Buntsandstein no parecen haber contribuido de forma muy marcada a la sedimentación arenosa del Neógeno. Los sulfatos del tránsito Cretácico-Paleógeno y del Lías fueron disueltos y reprecipitados, mientras que la contribución de las evaporitas del Keuper parece haber sido poco importante (Utrilla *et al.*, 1987), aunque hay zonas en las que en las arenas del Mioceno se observan jacinchos de Compostela resedimentados. El carácter que la diferencia de la Cuenca de Madrid radica en las características de la cuenca de recepción hidrológica, mayoritariamente compuesta por rocas carbonatadas. La intensa karstificación neógena de los carbonatos mesozoicos, que continúa en la actualidad, favoreció el desarrollo de sistemas fluviales con inercia hidrológica.

De acuerdo con los datos que se poseen, los sondeos correspondientes a la zona de la Cuenca de Madrid cortan fundamentalmente materiales de las denominadas Unidad Inferior y Unidad Intermedia del Neógeno (Alberdi *et al.*, 1983; Junco y Calvo, 1983; Hoyos *et al.*, 1985).

Los sondeos correspondientes a la Depresión Intermedia cortaron materiales del Paleógeno y Neógeno. Los registros paleógenos atravesados por los sondeos, correspondientes a equivalentes lacustres de la Unidad Detrítica Superior *pro parte* de Díaz-Molina y López Martínez (1979) o Unidad Paleógena de Torres y Zapata (1986-87), datados mediante micromamíferos (López Martínez y Torres, 1992), han sido omitidos. Los materiales neógenos atra-

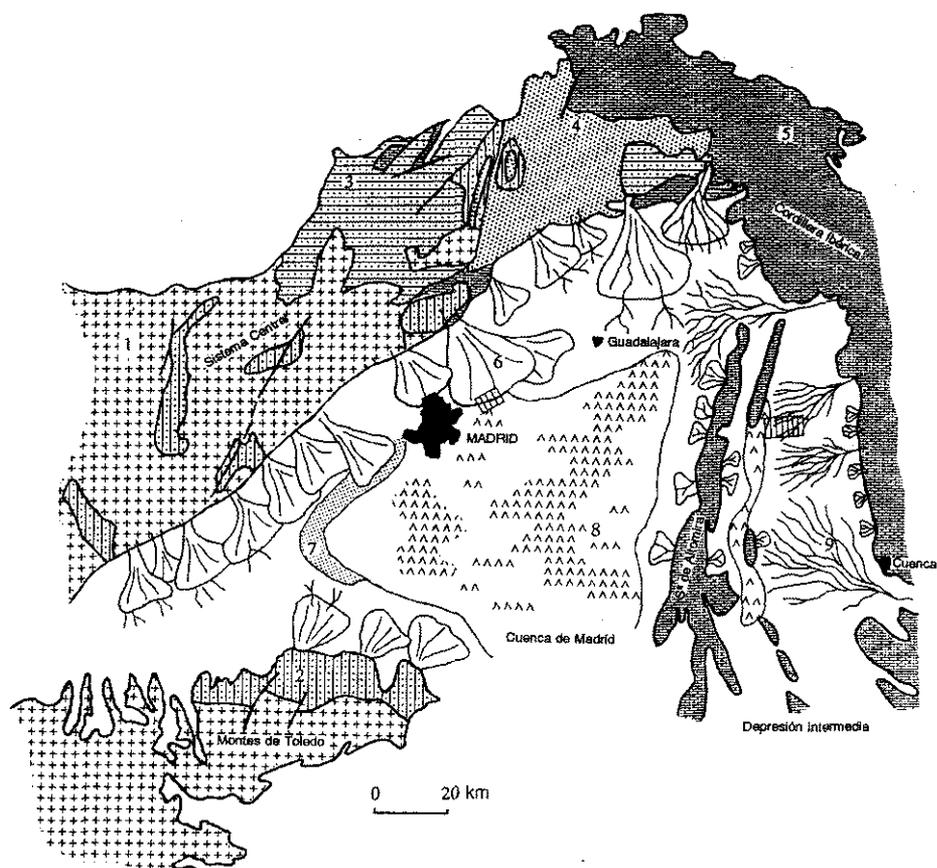


Fig. 2.—Esquema paleogeográfico de la Cuenca de Madrid (Unidad Inferior del Neógeno) y Depresión Intermedia (Primer Ciclo Neógeno), y situación de las zonas de estudio enmarcadas en rectángulos. Modificado de Ordoñez *et al.* (1991) y Torres y Zapata (1986-87). 1. Rocas plutónicas, 2. Pizarras, mármoles, cuarcitas y neises, 3. Pizarras y grauwacas, 4. Pizarras, cuarcitas y metavulcanitas, 5. Rocas químicas del Mesozoico y Paleógeno, 6. Abanicos aluviales de la Cuenca de Madrid, 7. Arenas micáceas, 8. Anhídritas y lutitas yesíferas (Cuenca de Madrid) y yesos (Depresión Intermedia), 9. Abanicos aluviales de la Depresión Intermedia.

Fig. 2.—Palaeogeographical diagram of the Madrid basin (Lower Neogene Unit) and the Depresión Intermedia basin (First Neogene Cycle) and the studied areas location (rectangles). Modified from Ordoñez *et al.* (1991) and Torres and Zapata (1986-87). 1. Plutonic rocks, 2. Shales, marbles, quartzites and gneisses, 3. Shales and greywackes, 4. Shales, quartzites and metavolcanic rocks, 5. Mesozoic and Paleogene chemical deposits, 6. Alluvial fans from the Madrid basin, 7. Micaceous sands, 8. Anhydrite and gypsumiferous lutites (Madrid basin) and gypsum (Depresión Intermedia basin), 9. Alluvial fans from the Depresión Intermedia basin.

vesados por los sondeos corresponden al Primer Ciclo Neógeno y al Segundo Ciclo Neógeno (Torres y Zapata, 1986-87) *pro parte*.

La Unidad Inferior del Mioceno de la Cuenca de Madrid tiene una edad Ageniense-Aragoniense medio y su sedimentación estuvo regida por sistemas de abanicos aluviales gradando distalmente a zonas lacustres con depósitos evaporíticos. El Primer Ciclo Neógeno de la Depresión Intermedia tiene una edad Ageniense superior-Aragoniense inferior y su sedimentación estuvo controlada por sistemas de abanicos aluviales de alta eficiencia de transporte que, distalmente, se conectaban con lagos salinos. El Segundo Ciclo Neógeno abarca parte del Aragoniense medio al Vallesiense y su registro sedimentario estuvo controlado por sistemas de abanicos aluviales similares a los del ciclo anterior, pero distalmente ligados a lagos con sedimentación carbonatada y sulfatada cálcica. Entre estas unidades se reconoce una ruptura sedimentaria bien marcada (Junco y Calvo, 1983; Ordoñez *et al.*, 1991). Pese a la aparente diferencia de las edades del techo de las dos primeras unidades miocenas de ambas cuencas, hay un notable paralelismo en su funcionamiento (Torres *et al.*, 1984).

Los sondeos de la Cuenca de Madrid (Fig.2) se sitúan en la parte distal de un importante abanico aluvial cuyo ápice estaba situado en el saliente de Colmenar Viejo, cuya evolución espacial durante el Mioceno se conoce a través de sondeos (Chica *et al.*, 1995).

Por su parte, los sondeos de la Depresión Intermedia (Fig.2) se sitúan sobre dos ejes radiales del denominado Abanico aluvial húmedo del Guadiela.

El biombo de correlación correspondiente a los sondeos de la Cuenca de Madrid (Fig.3) muestra la gradación entre los materiales predominantemente arenosos del sondeo 534/2 y los del sondeo 559/7 en los que hay abundantes lutitas, localmente con depósitos de arcillas neoformadas, mientras que el sondeo 534/4 situado en una zona intermedia, participa de ambas características.

La correlación de los sondeos de la Depresión Intermedia (Fig.4) permite observar la gradación de los detríticos del sondeo más cercano al ápice del Abanico del Guadiela (538/4), compuestos por arenas y lutitas, a las lutitas yesíferas con algunas intercalaciones arenosas en el más distal (562/13).

DESCRIPCIÓN DE LOS SONDEOS

A continuación se van a describir brevemente las columnas estratigráficas de cada uno de los sondeos analizados por cadenas de Markov. Esta descripción se hará en sentido proximal a distal, y de muro a techo. En el caso de los sondeos de la Depresión Intermedia, sólo se describirá la porción neógena de los mismos, dejando al margen del análisis los materiales infrayacentes dados de forma indudable como Oligoceno.

Sondeo 534/2: Alcanzó una profundidad final de 275 m; en la columna predominan netamente las arenas, que se presentan en niveles pluridecámetricos, con tres intercalaciones lutíticas, también de potencia pluridecámetrica, pero que no suponen ni el 20% del total de la serie. En el resto del sondeo, a techo, predominan las lutitas con frecuentes intercalaciones métricas de arena.

Sondeo 534/4: Este sondeo tiene una profundidad total de 395 m. Los primeros 55 m están formados por alternancias plurimétricas de arenas de grano medio-fino y lutitas bioturbadas, negras o grises. Sobre estas alternancias aparecen 25 m de lutitas yesíferas, ocasionalmente arenosas. A continuación hay 100 m de lutitas, algún nivel más arenoso, y pasadas de carbonatos pedogenéticos, nodulosos a techo. Le siguen 50 m de alternancias de arenas y lutitas arenosas, bioturbadas y con nódulos carbonatados, y a continuación 50 m de lutitas muy carbonatadas, finas intercalaciones de calizas y calizas con sílex. El final del sondeo corresponde a lutitas arenosas con cemento carbonatado e intercalaciones arenosas, éstas más frecuentes a muro.

Sondeo 559/7: Este pozo de un total de 250 m de profundidad, está caracterizado por la escasa presencia de material de tamaño superior a limo. Se descompone en varios niveles: en la base hay 120 m de arcillas con contenidos variables en yeso, ocasionalmente con niveles definidos de este material, en las que son característicos los colores blancos, grises y negros (reducidos), con esporádicas intercalaciones fuertemente oxidadas, que son indicativas de exposición aérea; también son frecuentes la bioturbación y niveles de suelos con raíces bien definidas. El tramo intermedio, de unos 20 m de potencia, es lutítico, bioturbado, con pasadas muy finas de arena y fangos arenosos. Le siguen 40 m de arcillas similares a las de la base. A continuación aparecen 35 m de arcillas negras muy sepiolíticas, bioturbadas, con niveles oxidados, que a techo tienen una costra silicificada que las separa del tramo final, formado por unos 25 m de lutitas masivas, muy carbonatadas, fuertemente bioturbadas, generalmente de color pardo.

Sondeo 538/4: Este sondeo alcanzó una profundidad de 365 m, de los que sólo los 10 m finales corresponden a carbonatos lacustre-palustres de la Unidad Paleógena. Este sondeo es el único en el que se detecta la separación entre el Primer Ciclo y el Segundo Ciclo Neógenos. Al Primer Ciclo Neógeno corresponden los primeros 230 m de serie y se inician con una alternancia, de 50 m de espesor, de niveles métricos de areniscas con cemento carbonatado y lutitas, muy frecuentemente limos, bioturbadas y con nódulos de carbonato. Por encima se sitúan 110 m de alternancia de niveles plurimétricos de areniscas y lutitas; las arenas suelen mostrar granoselección positiva y cemento carbonatado; las lutitas, frecuentemente limos, muestran ripples y bioturbación. Una pasada de 5 m de yesos masivos bioturbados, correlacionable con afloramientos en la hoja de Priego (Torres, en prensa), marca el techo del Primer Ciclo Neógeno. El Segundo Ciclo Neógeno está representado por 125 m de

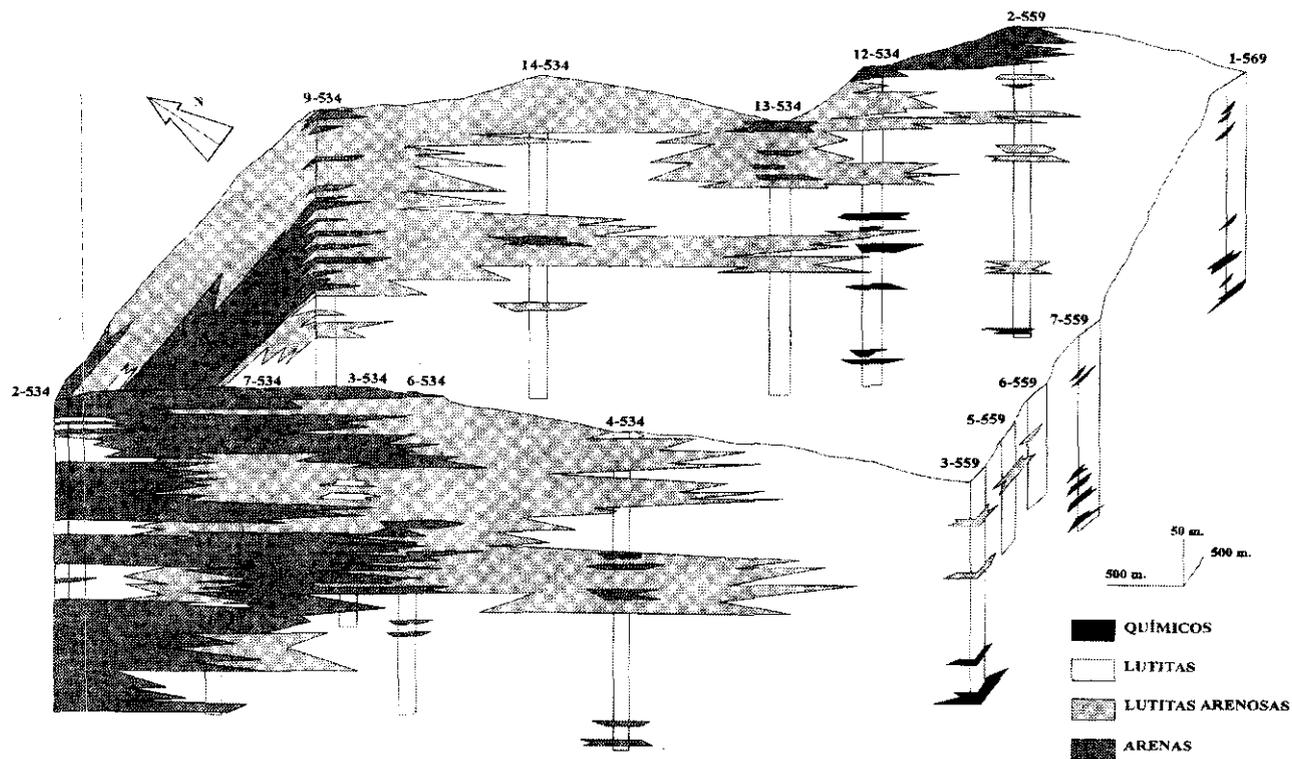


Fig. 3.—Correlación de litofacies de los sondeos de la Cuenca de Madrid. La posición de los sondeos es la señalada en la Fig.1.
 Fig. 3.—Lithofacies correlation of Madrid basin borehole lithologies. Drill hole situation appears on Fig.1.

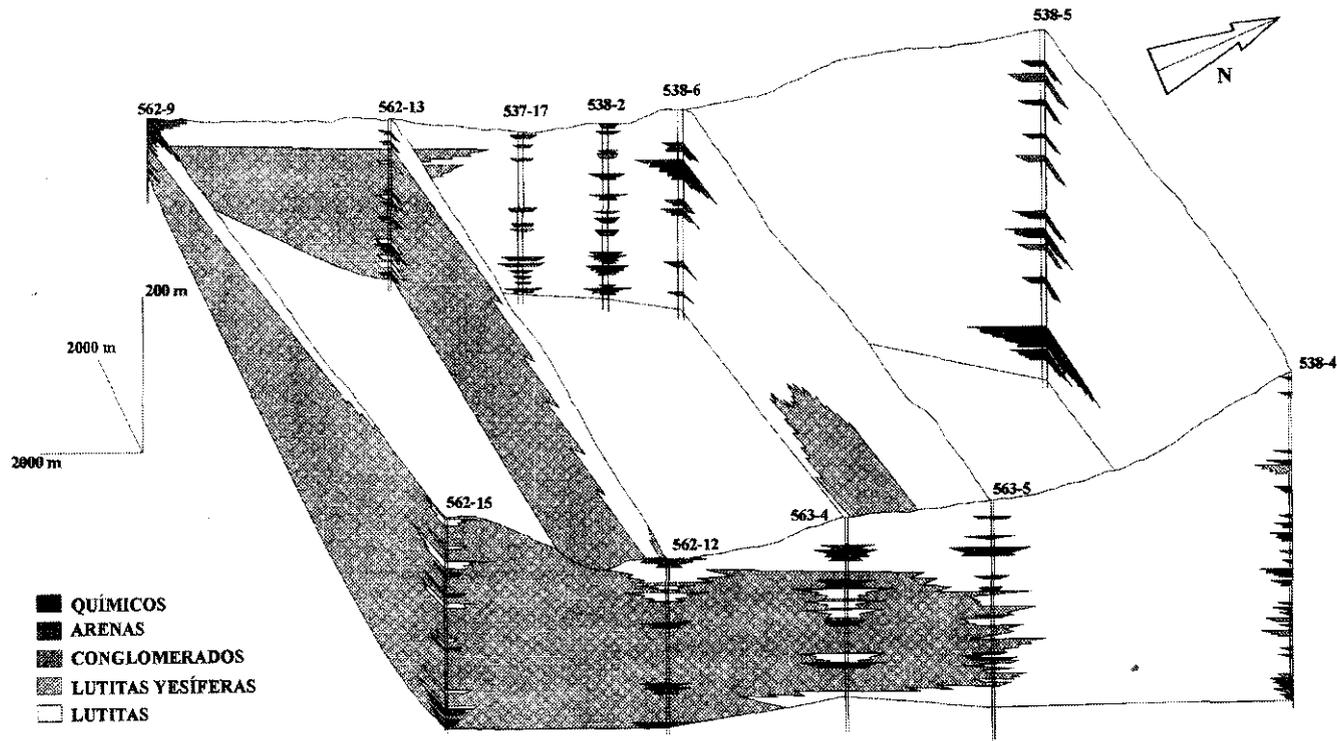


Fig. 4.—Correlación de litofacies de los sondeos de la Depresión Intermedia. La posición de los sondeos es la señalada en la Fig. 1.
Fig. 4.—Lithofacies correlation of Depresión Intermedia basin borehole litologs. Drill hole situation appears on Fig. 1.

serie predominantemente lutítica, con intercalaciones arenosas que, con una única excepción, no superan 1 m de potencia. Las intercalaciones carbonatadas, generalmente por debajo de 1 m de potencia, se hacen más frecuentes hacia el techo del sondeo.

Sondeo 562/13: Este sondeo tiene 300 m de profundidad, de los que 175 m corresponden a la Segunda Unidad Paleógena. Los materiales neógenos, presumiblemente todos del Primer Ciclo, se pueden agrupar en tres unidades: una inferior, compuesta por pasadas plurimétricas de arenas con cemento carbonatado, granodecrecientes a techo, con intercalaciones de lutitas y lutitas arenosas, y ocasionalmente episodios palustres con colores negros, restos de gasterópodos y plantas. El segundo tramo, de 85 m de potencia, es predominantemente lutítico con intercalaciones, generalmente métricas, de arenas con cemento carbonatado; las lutitas son siempre carbonatadas y domina el tamaño limo, tienen ripples, bioturbación y deformaciones hidroplásticas. El tramo final, de 60 m, es similar al descrito, pero las intercalaciones arenosas son más potentes. Se observa que estas arenas se organizan, al menos en un caso, en varias secuencias positivas y llegan a tener gravas en la base.

Sondeo 538/2: Este pozo alcanzó una profundidad de 395 m, aunque los 210 m de la base pertenecen al Segundo Ciclo Paleógeno; en los 185 m restantes de serie sólo está representado el Primer Ciclo Neógeno que, a tenor de lo conocido en sondeos cercanos, está prácticamente completo. En este caso, el inicio de la sedimentación neógena viene marcado por 20 m de areniscas canalizadas, organizadas en secuencias positivas de bastantes metros de espesor, separadas por intercalaciones de lutitas arenosas, lutitas con ripples y lutitas bioturbadas. Le siguen casi 60 m de alternancias de lutitas carbonatadas, a veces con ripples, y arenas cementadas por carbonatos con granoselección positiva. Un nivel de 5 m de areniscas, similares a las descritas, marca la base de un nivel de 25 m de lutitas con finas intercalaciones areniscosas. El sondeo finaliza con potentes alternancias de areniscas con cemento carbonatado y granoselección positiva, y lutitas fuertemente cementadas por carbonato.

PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS POR CADENAS DE MARKOV

Un proceso o cadena de Markov es una secuencia (Powers y Easterling, 1982) en la que la aparición de un estado determinado está influenciado o depende sólo del inmediatamente anterior. El análisis Markoviano es una técnica estadística que permite detectar procesos repetitivos en el espacio o el tiempo (Miall, 1973).

El análisis por cadenas de Markov ha sido empleado desde hace mucho tiempo (Vistelius, 1949) para el estudio de sucesiones de facies. El trabajo con secciones estratigráficas comienza con la elaboración de una matriz de

contaje (*Transition-count Matrix*) cuyos términos registran las transiciones de una litofacies a la suprayacente, de forma que un término genérico O_{ij} registraría el número de veces que, en la sección estratigráfica considerada, la facies «j» aparece sobre la «i». Para ello, se suelen adoptar dos metodologías básicamente distintas (Miall, 1973): se toman las litofacies a intervalos regulares, con lo que el número de transiciones diferenciadas dependerá del tamaño del intervalo elegido, o se toman en consideración todos los cambios de facies detectables, con independencia de su potencia, lo que obliga a que la diagonal principal de la matriz sea cero. Este segundo método se conoce como análisis de Markov embebido de primer orden (*First-order embedded Markov analysis*) y es el que vamos a emplear en este trabajo.

De acuerdo con los supuestos de Le Roux (1994), se desarrolló un programa en visual-Basic para el análisis según cadenas de Markov utilizando una matriz de diferencias proporcionales (*Proportional Difference Matrix*) y un método iterativo (Powers y Easterling, 1982) para la construcción de la matriz de frecuencias esperadas (*Independent Trials Matrix*), que se calcula a partir de la matriz contadora.

Con las matrices de las frecuencias observadas y las esperadas, se calcula el estadístico Chi-cuadrado y se comprueba la aceptabilidad de la hipótesis nula o de cuasi-independencia. En caso de rechazo de la hipótesis nula se determinan aquellas transiciones que toman un valor superior en la matriz de diferencias proporcionales y que, por lo tanto, más contribuyen a la falta de cuasi-independencia.

El proceso es el siguiente: las celdas con el valor más alto son eliminadas progresivamente hasta que el estadístico Chi-cuadrado, para la matriz que queda (*Residual Independent Trials Matrix*), satisfaga el requisito de cuasi-independencia (i. e. hasta que la hipótesis nula sea aceptada). Las celdas así eliminadas representan las transiciones significativas, a partir de las cuales se puede construir un modelo de sucesión de facies.

En este caso, se va a aplicar el análisis a las sucesiones estratigráficas encontradas al perforar mediante sondeo mecánico dos abanicos aluviales de una cronología similar pero con condicionantes de cuenca de recepción hidrológica, área fuente de sedimentos y cuenca sedimentaria marcadamente distintos, como sucede con la Cuenca de Madrid y la Depresión Intermedia. Tal como se ha indicado al principio de este trabajo, los datos provienen de la reinterpretación de los datos de sondeos realizados por la Empresa Nacional del Uranio S.A. (ENUSA) dentro del Plan Nacional del Uranio.

Para el análisis por cadenas de Markov se separaron los grupos de facies siguientes:

1. Gravas.
2. Arenas.
3. Limos.
4. Lutitas arenosas/arenas muy lutíticas.

5. Lutitas (limo+arcila) masivas.
6. Lutitas yesíferas.
7. Lutitas con suelos (calcimórficos-raíces, caliches, bioturbación).
8. Químicos (carbonatos y sulfatos).

A continuación se van a describir las sucesiones de facies significativas en cada uno de los sondeos de la Cuenca de Madrid y de la Depresión Intermedia. Para ello, de acuerdo con la sistemática descrita en el apartado anterior, se van a emplear las matrices de transiciones significativas y los diagramas de flujo que derivan de ellas.

Tal y como se ha citado, se ha seleccionado un transecto de la Depresión Intermedia, representado por el biombo de correlación de la Fig.4, que refleja la evolución longitudinal de facies en el Abanico aluvial de alta eficiencia del Guadiela; los sondeos elegidos, en orden proximal a distal son los siguientes: Valdeolivas (538/4), Salmeroncillos de Abajo (538/2) y Peña de Don Benito (562/13) (Fig.1). El análisis de las transiciones significativas de facies y del diagrama de flujo representativo queda como sigue:

En el sondeo de Valdeolivas (538/4) tal y como se ha indicado anteriormente, aparece completo el Primer Ciclo Neógeno, mientras que del Segundo Ciclo Neógeno sólo está representada su parte inferior, predominantemente detrítica, estando ausentes los potentes depósitos de materiales químicos, carbonatos, predominantemente, y sulfatos, que marcan su techo. Del análisis del diagrama de flujo, se desprenden claramente las relaciones siguientes (Fig.5):

Entre gravas (1) y arenas (2) existe una relación claramente unívoca: las segundas aparecen siempre a techo, y se interpretan como barras o depósitos de carga residual.

Se dan relaciones unívocas entre arenas (2) y limos, estos típicamente con ripples (3), lutitas arenosas (4) y lutitas yesíferas (6), marcando estas relaciones una gradación en la magnitud de la pérdida de energía del canal hasta su abandono final.

Entre arenas (2) y lutitas masivas (5) aparecen relaciones bidireccionales, que indican claramente las alternancias más frecuentes, a su vez completadas por la relación biunívoca existente entre lutitas masivas (5) y lutitas arenosas (4), lo que viene a indicar la estrecha relación que existe entre las lutitas de llanura aluvial y las arenas canalizadas depositadas en la Depresión Intermedia.

Existe una relación biunívoca muy estrecha entre lutitas (5) y químicos (8), lo que pone de relieve las alternancias entre episodios de encharcamiento y desecación en la llanura aluvial. No es fácil interpretar la relación unívoca entre químicos (8) y limos con ripples (3), aunque el número de transiciones significativas es bajo.

En la Fig.6, aparece el diagrama de flujo correspondiente al Primer Ciclo Neógeno completo del sondeo 538/4 (Valdeolivas). Es evidente, en este caso, que las relaciones entre facies aparecen mucho más depuradas:

Análisis del sondeo 538/4 (1^{er} y 2^o ciclos)

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	6	0	0	1	0	0	0
2	2	-	12	9	47	6	8	2
3	0	9	-	0	13	0	1	3
4	1	6	0	-	6	1	0	0
5	3	53	11	4	-	0	0	11
6	0	3	0	1	1	-	0	2
7	1	8	0	0	0	0	-	0
8	0	1	3	0	14	0	8	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	2.9	0.6	0.3	2.6	0.1	0.2	0.4
2	2.9	-	11.3	5.9	51.4	2.9	3.7	7.6
3	0.6	11.4	-	1.2	10.1	0.6	0.7	1.5
4	0.3	5.9	1.2	-	5.2	0.3	0.4	0.8
5	2.6	51.6	10.1	5.2	-	2.6	3.3	6.8
6	0.1	2.9	0.6	0.3	2.6	-	0.2	0.4
7	0.2	3.7	0.7	0.4	3.3	0.2	-	0.5
8	0.4	7.7	1.5	0.8	6.8	0.4	0.5	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
2	-0.01	-	0.03	0.11	-0.83	0.08	0.14	-0.05
3	0.00	-0.09	-	0.00	0.15	0.00	0.00	0.02
4	0.00	0.00	0.00	-	0.02	0.00	0.00	0.00
5	0.01	0.29	0.04	-0.02	-	0.00	0.00	0.18
6	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-	0.00	0.01
7	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00
8	0.00	-0.03	0.02	0.03	0.40	0.00	0.00	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*

$\chi^2 = 21.63$ 23 df $p = 0.54$

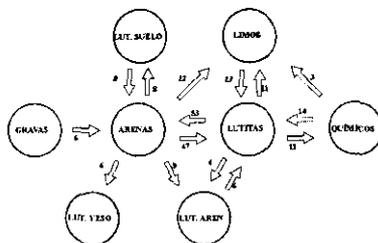


Fig. 5.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 538/4 (Valdeolivas) correspondientes al primer y segundo ciclo neógenos. Clave de facies en las matrices representadas en esta y en las figuras siguiente: 1-gravas, 2-arenas, 3-limos, 4-lutitas arenosas (Depresión Intermedia), arenas lutíticas (Cuenca de Madrid), 5-lutitas masivas, 6-lutitas yesíferas, 7-lutitas con paleosuelos, 8-depósitos químicos.

Fig. 5.—Matrix and flow diagrams of the First and Second Neogene Cycles facies from 538/4 (Valdeolivas) borehole. Facies key in the matrix in this figure and the next ones: 1-gravel, 2-sand, 3-silt, 4-lutite, 5-massive lutite, 6-gypsiferous lutites, 7-lutites with paleosols, 8-chemical rocks.

Se mantiene la relación unívoca entre gravas (1) y arenas (2), y aparecen relaciones biunívocas entre arenas (2) y limos (3), arenas (2) y lutitas masivas (5) y arenas (2) y lutitas con suelo (7), representando, las dos primeras, alternancias de episodios de distintos niveles de energía en los canales y la tercera episodios de abandono prolongado de los canales, con reactivaciones subsiguientes.

Entre arenas (2) y lutitas arenosas (4) la relación es claramente unívoca y entre estas últimas y las lutitas masivas (5) es biunívoca, pudiéndose interpretar como la parte terminal de un proceso de abandono de canal, aunque el número de transiciones significativas no es muy elevado.

Finalmente, se observa una relación unívoca de las arenas (2) con las lutitas yesíferas (6) y de éstas con los depósitos químicos (8), que reflejan la indefinición geométrica que en la Depresión Intermedia se da entre los sistemas de canales estables y las zonas de lagos salinos y/o sus aureolas de lutitas yesíferas.

El análisis de la parte del Segundo Ciclo Neógeno representada en el sondeo 538/4 (Valdeolivas) (Fig.7), está dominado por la frecuencia elevada de transiciones significativas entre lutitas (5) y arenas (2), seguida de las alternancias lutitas (5)-depósitos químicos (8) y depósitos químicos (8)-lutitas(5); también aparecen transiciones significativas entre limos (3) y depósitos químicos (8). Aunque en esta parte del sondeo faltan casi todos los términos químicos propios del techo del Segundo Ciclo Neógeno, del diagrama de flujo parece desprenderse que el emplazamiento paleogeográfico de este punto era algo distinto, ya que en el análisis aparece una dominancia de las facies lutíticas sobre las arenosas, lo que parece estar relacionado con el hecho de que, durante este ciclo, los abanicos aluviales de alta eficiencia de transporte parecen ser menos penetrativos.

El sondeo 538/2 (Salmeroncillos de Abajo) es un genuino representante de las partes medias de los abanicos aluviales de alta eficiencia de transporte desarrollados en la Depresión Intermedia. Del diagrama de facies obtenido a partir de este sondeo se pueden definir los siguientes aspectos sobresalientes (Fig.8):

La evolución de facies gravita esencialmente alrededor de las lutitas (5), que están biunívocamente relacionadas con las arenas (2), limos (3) y lutitas arenosas (4). Hay una relación unívoca entre arenas (2) y lutitas arenosas (4). Entre limos (3) y lutitas (5), la relación más frecuente es la que implica selección positiva, esto es de arcillas sobre limos; los casos inversos responden a alternancias habituales de la llanura de inundación (ENUSA, 1984b). No aparecen transiciones significativas a lutitas con suelos (7) ni a depósitos químicos (8). Se trata de una zona con canales, relativamente estable y una llanura aluvial muy bien preservada que fosiliza antiguos sistemas de canales, siendo incidiada por nuevos sistemas de canales, lo que explica el predominio de transiciones significativas en el sentido lutitas masivas-arena.

Análisis del sondeo 538/4(1^{er} ciclo)

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	4	0	0	0	0	0	0
2	2	-	8	9	30	5	8	0
3	0	7	-	0	4	0	1	0
4	1	6	0	-	4	1	0	0
5	0	33	4	2	-	0	0	0
6	0	3	0	1	0	-	0	2
7	1	8	0	0	0	0	-	0
8	0	1	0	0	0	0	0	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	2.7	0.2	0.2	0.7	0.1	0.1	0.0
2	2.7	-	8.4	8.4	30.5	4.1	6.2	1.3
3	0.2	8.4	-	0.6	2.1	0.3	0.4	0.1
4	0.2	8.4	0.6	-	2.1	0.3	0.4	0.1
5	0.7	31.4	2.1	2.1	-	1.0	1.6	0.3
6	0.1	4.1	0.3	0.3	1.0	-	0.2	0.0
7	0.1	6.2	0.4	0.4	1.5	0.2	-	0.1
8	0.0	0.7	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-0.01	-	-0.02	0.04	-0.10	0.03	0.10	0.00
3	0.00	-0.07	-	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
4	0.01	-0.10	0.00	-	0.05	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.37	0.05	0.00	-	0.00	0.00	0.00
6	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.03
7	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	4	*	*	*	*	*	*
2	*	*	8	9	30	5	8	*
3	*	7	*	*	4	*	*	*
4	*	*	*	*	4	*	*	*
5	*	33	4	2	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	2
7	*	8	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*

$\chi^2 = 8.92$ 11 df ps= 0.63

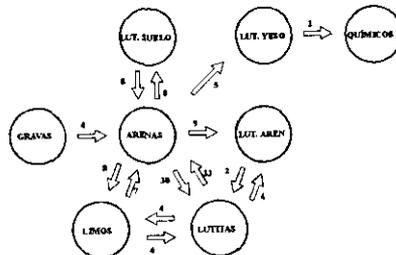


Fig. 6.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 538/4 (Valdeolivas), correspondientes al Primer Ciclo Neógeno, que aparece completo en la columna del sondeo.

Fig. 6.—Matrix and flow diagram of the First Neogene Cycle facies from 538/4 (Valdeolivas).

Análisis del sondeo 538/4 (2º ciclo)

A. Matriz censadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	2	0	0	1	0	0	0
2	0	-	4	0	17	1	0	2
3	0	2	-	0	9	0	0	3
4	0	0	0	-	2	0	0	0
5	3	20	7	2	-	0	0	11
6	0	0	0	0	1	-	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-	0
8	0	0	3	0	13	0	0	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.5	0.3	0.0	1.9	0.0	-	0.3
2	0.5	-	2.4	0.3	18.1	0.2	-	2.7
3	0.3	2.4	-	0.2	9.7	0.1	-	1.5
4	0.0	0.3	0.2	-	1.3	0.0	-	0.2
5	1.9	18.0	9.7	1.3	-	0.6	-	11.2
6	0.0	0.2	0.1	0.0	0.6	-	-	0.1
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0.3	2.7	1.5	0.2	11.3	0.1	-	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.03	0.00	0.00	-0.01	0.00	-	0.00
2	0.00	-	0.06	0.00	-0.18	0.01	-	-0.01
3	0.00	-0.01	-	0.00	-0.06	0.00	-	0.04
4	0.00	0.00	0.00	-	0.01	0.00	-	-0.02
5	0.03	0.39	-0.18	0.01	-	0.00	-	-0.02
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0.00	0.00	0.04	0.00	0.22	0.00	-	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	9	*	*	3
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	20	*	2	*	*	*	11
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	3	*	13	*	*	*

$$\chi^2 = 8.94 \quad 16 \text{ df} \quad p = 0.92$$

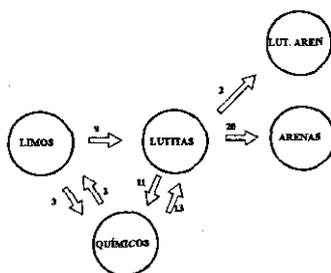


Fig. 7.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 538/4 (Valdeolivas), correspondientes al Segundo Ciclo Neógeno *p.p.*
 Fig. 7.—Matrix and flow diagram of the Second Neogene Cycle *pro parte* facies from 538/4 (Valdeolivas).

Análisis del sondeo 538/2

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1	0	0	0	0	0	0
2	0	-	8	9	8	0	6	0
3	0	6	-	1	12	0	4	0
4	0	4	3	-	6	0	1	0
5	0	14	8	4	-	0	2	0
6	0	0	0	0	0	-	0	0
7	1	7	4	0	1	0	-	0
8	0	0	0	0	0	0	0	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.3	0.2	0.1	0.3	-	0.1	-
2	0.3	-	9.2	5.0	11.7	-	4.6	-
3	0.2	9.4	-	3.2	7.3	-	2.9	-
4	0.1	5.2	3.2	-	4.0	-	1.6	-
5	0.3	12.3	7.5	4.1	-	-	3.8	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0.1	4.7	2.9	1.6	3.7	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.01	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-
2	0.00	-	-0.09	0.32	-0.27	-	0.07	-
3	0.00	-0.19	-	-0.02	0.51	-	0.04	-
4	0.00	-0.04	0.00	-	0.11	-	-0.01	-
5	0.00	0.21	0.03	0.00	-	-	-0.03	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0.01	0.14	0.04	0.00	-0.02	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

D. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	9	8	*	*	*
3	*	*	*	12	*	*	*	*
4	*	*	*	6	*	*	*	*
5	*	14	8	4	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*

$\chi^2 = 7.04$ 12 df ps 0.86

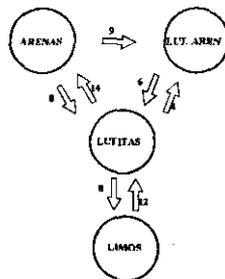


Fig. 8.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 538/2 (Salmeroncillos), correspondientes al Primer Ciclo Neógeno.
 Fig. 8.—Matrix and flow diagram of the First Neogene Cycle facies from 538/2 (Salmeroncillos).

El último sondeo analizado en la Depresión Intermedia es el 562/13 (Peña de Don Benito). Corresponde al Abanico de alta eficiencia de transporte del Guadiela. De acuerdo con la matriz de significación y diagrama de flujo (Fig.9), está caracterizado por el predominio de relaciones biunívocas, especialmente entre términos detríticos de grano fino, aunque la sucesión más significativa es arenas (2)-limos (3)-lutitas con rasgos edáficos (7). Existen transiciones significativas entre limos (3) y lutitas yesíferas (6) pero, paradójicamente, faltan entre lutitas yesíferas (6) y depósitos químicos (8); las facies más frecuentes son las lutitas yesíferas. Este predominio de transiciones significativas entre términos de grano fino habla ya de una zona de pie de abanico en la que las facies de llanura fangosa se interdigitan con las de orla de lago salino, representada por lutitas yesíferas (6). La estabilidad de los sistemas de canales, que se traduce en una notable penetratividad hasta las áreas lacustres, conlleva una alta abundancia de arenas (2), pero en esta zona distal las caídas de energía no se reflejan en la aparición de lutitas arenosas a techo de episodios canalizados con transporte de material arenoso.

Debido a la gran extensión de la Cuenca de Madrid y al desigual reparto de sondeos de exploración de uranio, se ha elegido para el análisis markoviano de facies, una zona pequeña, centrada en la localidad de Paracuellos del Jarama, en la que se han seleccionado tres sondeos representativos de las facies más proximales. Estos sondeos son los señalados como 534/2 (Alcobendas I), 534/4 (Paracuellos 4) y 559/7 (Paracuellos) (Fig.1). El análisis markoviano, matrices de transiciones significativas y diagramas de flujo, es el siguiente:

En el sondeo 534/2 (Alcobendas-I), el más proximal, sólo aparecen representadas tres facies significativas: arenas (2), arenas muy lutíticas/lutitas muy arenosas (4) y lutitas masivas (5) (Fig.10). La distribución de facies gravita sobre las arenas muy lutíticas/ lutitas muy arenosas (4) que se alternan con arenas, posiblemente reflejando momentos con gradientes hidráulicos y/o confinamiento distintos. La presencia de la facies de arena (2) sobre las lutitas masivas (5) refleja la superposición de los canales sobre la llanura fangosa de pie de abanico. Estas sucesiones se pueden interpretar como ciclos que comienzan con depósitos transportados por corrientes tractivas de baja eficiencia o de escaso confinamiento que depositan las arenas lutíticas/lutitas muy arenosas (4), seguidos por sistemas más organizados y penetrativos, canales, responsables de los cuerpos de naturaleza arenosa (2), que incidirán los depósitos de lutitas de decantación (5).

El análisis de facies del sondeo 534/4 (Paracuellos-4) a través de la matriz de transiciones significativas y de los diagramas de flujo (Fig.11) es muy interesante, dado que aparecen dos diagramas de flujo sin conexión. Uno de ellos implica la relación biunívoca entre lutitas arenosas/arenas lutíticas (4) a muro, y arenas (2); esto se explicaría como resultado de la entrada en partes más externas de la llanura fangosa de canales de los abanicos aluviales. El

Análisis del sondeo 562/13

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1	0	0	0	0	0	0
2	0	-	6	0	2	3	2	1
3	0	5	-	0	4	5	6	0
4	0	0	0	-	0	0	0	0
5	0	2	3	0	-	1	6	0
6	1	4	4	0	1	-	7	0
7	0	2	7	0	6	7	-	0
8	0	0	0	0	0	0	1	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.2	0.2	-	0.1	0.2	0.3	0.0
2	0.2	-	3.9	-	2.2	3.0	4.6	0.2
3	0.2	3.9	-	-	2.2	3.0	4.6	0.2
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.1	2.1	3.3	-	-	2.5	3.8	0.1
6	0.2	3.1	5.0	-	2.8	-	5.7	0.2
7	0.3	4.6	7.3	-	4.1	5.5	-	0.3
8	0.0	0.2	0.2	-	0.1	0.2	0.3	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.01	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	-	0.14	-	-0.01	0.00	-0.06	0.01
3	0.00	0.06	-	-	0.02	0.02	-0.09	0.00
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.00	0.00	-0.01	-	-	-0.02	0.15	0.00
6	0.01	0.04	-0.04	-	-0.02	-	0.10	0.00
7	0.00	-0.06	-0.02	-	0.13	0.12	-	0.00
8	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.01	-

D. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	6	*	*	*	*	*
3	*	5	*	*	4	5	6	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	3	*	*	*	6	*
6	*	*	4	*	*	*	7	*
7	*	*	7	*	6	7	*	*
8	*	*	*	*	*	*	1	*

$\chi^2 = 4.77$ 11 df $p = 0.94$

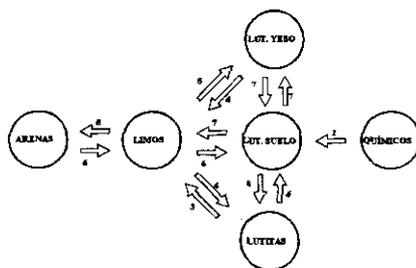


Fig. 9.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 562/13 (Peña de Don Benito), correspondientes al Primer Ciclo Neógeno.

Fig. 9.—Matrix and flow diagram of the First Neogene Cycle facies from 562/13 (Peña de Don Benito).

Análisis del sondeo 534/2

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0	0	0	1	0	0	0
2	0	-	0	22	10	0	0	0
3	0	0	-	0	0	0	0	0
4	0	24	0	-	2	0	0	0
5	1	8	0	4	-	0	0	0
6	0	0	0	0	0	-	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-	0
8	0	0	0	0	0	0	0	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.6	-	0.3	0.1	-	-	-
2	0.6	-	-	21.9	9.0	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.3	22.2	-	-	3.9	-	-	-
5	0.1	9.1	-	3.8	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.00	-	0.00	0.01	-	-	-
2	0.00	-	-	0.03	0.13	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.00	0.59	-	-	-0.05	-	-	-
5	0.01	-0.13	-	0.01	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	22	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	24	*	*	*	*	*	*
5	*	8	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*

$$\chi^2 = 0.053 \quad 2 \text{ df} \quad p = 0.97$$

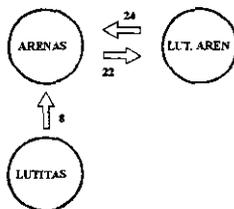


Fig. 10.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 534/2 (Alcobendas I), correspondientes a la Unidad Inferior del Neógeno.

Fig. 10.—Matrix and flow diagram of the Lower Neogene Unit facies from 534/2 (Alcobendas I).

Análisis del sondeo 534/4

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0	0	0	1	0	0	0
2	0	-	0	11	6	0	2	0
3	0	0	-	1	1	0	0	0
4	0	12	0	-	10	1	2	1
5	2	7	2	8	-	1	23	23
6	0	0	0	0	2	-	0	0
7	0	0	0	5	19	0	-	1
8	0	0	0	1	23	0	1	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.1	0.0	0.1	0.6	0.0	0.1	0.1
2	0.2	-	0.2	2.4	11.5	0.2	2.3	2.3
3	0.0	0.2	-	0.2	1.1	0.0	0.2	0.2
4	0.2	2.4	0.2	-	16.4	0.2	3.3	3.3
5	1.1	11.5	1.1	16.4	-	1.1	15.7	15.7
6	0.0	0.2	0.0	0.2	1.1	-	0.2	0.2
7	0.2	2.3	0.2	3.3	15.7	0.2	-	3.1
8	0.2	2.3	0.2	3.3	15.7	0.2	3.1	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	-	0.00	0.58	-0.20	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.71	0.00	-	-0.39	0.00	-0.02	-0.01
5	0.01	-0.20	0.01	-0.41	-	0.00	0.53	1.03
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.05	0.39	0.00	-	-0.01
8	0.00	0.00	0.00	-0.01	1.04	0.00	-0.01	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	11	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	12	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	20	23
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	19	*	*	*
8	*	*	*	*	23	*	*	*

$\chi^2 = 16.95$ 35 df $p = 0.99$

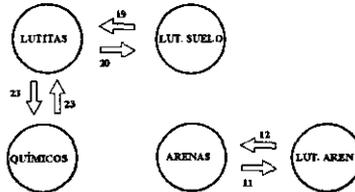


Fig. 11.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 534/4 (Paracuellos 4), correspondientes a la Unidad Inferior del Neógeno.

Fig. 11.—Matrix and flow diagram of the Lower Neogene Unit facies from 534/4 (Paracuellos 4).

Análisis del sondeo 559/7

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-	0	0	3	0	1	0
3	0	0	-	0	0	0	0	0
4	0	1	0	-	0	0	3	0
5	0	2	0	1	-	12	38	6
6	0	0	0	0	11	-	5	0
7	0	1	0	3	39	4	-	1
8	0	0	0	0	5	0	1	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	0.1	2.2	0.3	1.3	0.1
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	0.1	-	-	2.2	0.3	1.3	0.1
5	-	2.1	-	2.1	-	9.0	37.6	3.7
6	-	0.3	-	0.3	9.6	-	5.7	0.6
7	-	1.4	-	1.4	40.6	5.8	-	2.4
8	-	0.1	-	0.1	3.4	0.5	2.0	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	0.01	-	-	0.00	0.00	0.04	0.00
5	-	0.00	-	-0.01	-	0.26	0.12	0.10
6	-	0.00	-	0.00	0.11	-	-0.03	0.00
7	-	0.00	-	0.04	-0.44	-0.05	-	-0.01
8	-	0.00	-	0.00	0.06	0.00	-0.01	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	12	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	5	*	*	*

$$\chi^2 = 23.07 \quad 17 \text{ df} \quad p = 0.15$$



Fig. 12.—Matrices y diagrama de flujo de las facies del sondeo 559/7 (Paracuellos), correspondientes a la Unidad Inferior del Neógeno.

Fig. 12.—Matrix and flow diagram of the Lower Neogene Unit facies from 559/7 (Paracuellos)

otro diagrama de flujo refleja que desde una facies dominante de lutitas (5) se pasa a lutitas con procesos edáficos (7) y a depósitos químicos (8), que en este sondeo son mayoritariamente carbonatos. Esta relación permite pensar en un ambiente de playa fangosa («mud flat playa»), con períodos prolongados de exposición atmosférica, durante los que se desarrollan fenómenos edáficos y áreas con encharcamientos que depositan materiales carbonatados en condiciones muy someras, siendo a su vez sometidos a procesos edáficos (carácter palustre).

El análisis de facies del sondeo 559/7 (Paracuellos), pese a estar situado en una zona algo más central de la Cuenca de Madrid, vuelve a poner de manifiesto (Fig. 12) la desconexión existente entre las facies de depósitos químicos (8) y las lutitas yesíferas (6), que en la vertical suceden a las lutitas masivas (5). Estas a su vez, siempre aparecen a techo de los sedimentos químicos (8).

CONCLUSIONES

El análisis de sucesiones litológicas por cadenas de Markov se revela como un interesante instrumento para el análisis de asociaciones de facies. Permite pasar de un plano subjetivo que explica sucesiones lógicas, basadas en el conocimiento personal del geólogo de campo, a un plano relativamente objetivo en el que se manejan tests de hipótesis, mediante los que se seleccionan las transiciones significativas con distintos niveles de significación. Como se deduce de los resultados de este trabajo, dichas transiciones implican en algunos casos la superposición de fenómenos ligados a paleoambientes distintos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBERDI, M. T., HOYOS, M., JUNCO, F., LÓPEZ MARTÍNEZ, N., MORALES, J., SESE, C. y SORRIA, D. (1983), «Biostratigraphie et évolution sédimentaire de l'aire de Madrid», *Abstract Interin Coll. on Mediterranean. Neogene Continental Paleoclimatic Evolution. Montpellier, Abril*, 18-23.
- ALONSO, M. A., CALVO, J. P. y GARCÍA DEL CURA, M. C. (1986), «Sedimentología y petrología de los abanicos aluviales y facies adyacentes en el Neógeno de Paracuellos del Jarama (Madrid)», *Estudios Geol.*, 42, 79-101.
- CHICA, T., TORRES, T., MALDONADO, A., QUEROL, R. y ZAMORA, I. (1995), «Evolución en el subsuelo de los sistemas de abanicos aluviales del Mioceno de la Cuenca de Madrid (España)», *Geogaceta*, 18, 56-58.
- DÍAZ-MOLINA, M. y LÓPEZ MARTÍNEZ, N. (1979), «El Terciario Continental de la Depresión Intermedia (Cuenca). Bioestratigrafía y Paleotopografía», *Estudios Geol.*, 35, 146-167.

- ENUSA, (1984a), *Exploración de uranio Cuenca del Tajo* (Informe inédito).
- (1984b), *Exploración de uranio en la Depresión Intermedia (Tajo oriental)* (Informe inédito).
- HOYOS, M., JUNCO, F., PLAZA, J. R., RAMÍREZ, A. y RUIZ, J. (1985), «El Mioceno de Madrid», en M. T. Alberdi (coord.), *Geología y Paleontología del Terciario continental de la provincia de Madrid*, CSIC, Madrid, 9-16.
- JUNCO, F. y CALVO, J. P. (1983), «Cuenca de Madrid», *Geología de España*, tomo II, IGME, 534-543.
- LE ROUX, J. P. (1994), «Spreadsheet procedure for modified first-order embedded Markov analysis of cyclicity in sediments», *Computers & Geosciences*, 20, 1, 17-22.
- LÓPEZ MARTÍNEZ, N. y TORRES, T. (1992), «La microfauna de los sondeos de ENUSA en la Depresión Intermedia (provincias de Cuenca y Guadalajara)», *Rev. Esp. Micropal.*, 26, 117-140.
- MIALL, A. D. (1973), «Markov chain analysis applied to an ancient alluvial plain succession», *Sedimentology*, 20, 347-364.
- ORDÓÑEZ, S., CALVO, J. P., GARCÍA DEL CURA, M. A., HOYOS, M. y ALONSO ZARZA, A. M. (1991), «Sedimentology of sodium sulphate deposits and special clays from the Tertiary Madrid Basin (Spain)», en Anadón, P., Cabrera, L. y Kelts, K. (ed.), *Lacustrine facies analysis, Spec. Publ. int. Ass. Sediment*, 13, 55-73.
- POWERS, D. W. y EASTERLING, R. G. (1982), «Improved methodology for using embedded Markov chains to describe cyclical sediments», *J. Sediment. Petrol.*, 52, 913-923.
- TORRES, T., JUNCO, F., ZAPATA, J. L. y PLAZA, J. M. (1984), «Similitud de procesos sedimentarios del Neógeno de la Cuenca del Tajo y de la Depresión Intermedia», *I Congr. Esp. Geol. (Segovia)*, I, 285-300.
- TORRES, T. y ZAPATA, J. L. (1986-87), «Evolución Cenozoica de la Depresión Intermedia (Cuenca-Guadalajara)», *Acta Geol. Hisp.*, 21-22, 437-442.
- TORRES, T. (1995), «Hoja Geológica Magna núm. 563 (Priego)», *ITGE. Min. Industria y Energía* (en prensa).
- UTRILLA, R., PIERRE, C., ORTÍ, F., ROSELL, L., INGLÉS, M. y PUEYO, J. J. (1987), «Estudio isotópico de los sulfatos de formaciones evaporíticas mesozoicas marinas y terciarias continentales. Aplicación a la Cuenca del Tajo», *II Congr. Geoquím. (Soria)*, 90-94.
- VISTELIUS, A. B. (1949), «On the question of the mechanism of formation of strata», *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 65, 191-194.

Manuscrito recibido: 23-5-1996

Manuscrito aceptado: 15-7-1996