

# Diagénesis y estratigrafía secuencial de la arenisca «U» de la Fm Napo del Oriente, Ecuador

Diagenesis and sequence stratigraphy of the "U" sandstone from the Napo Formation, Oriente basin, Ecuador

J. Estupiñán <sup>(1)</sup>, R. Marfil <sup>(1)</sup> y A. Permanyer <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de C.C Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Avd. Jose Antonio Novais, s/n, 28040-Madrid, Spain. jestupin@geo.ucm.es, marfil@geo.ucm.es

<sup>(2)</sup> Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, 08028-Barcelona, Spain. albert.permanyer@ub.edu

## ABSTRACT

*The Napo Formation of Cretaceous age in the Oriente basin, Ecuador, is an important sandstone reservoir. The «U» sandstone is one oil interval within the Napo Formation. It is buried at a depth of 1500 m in the eastern part of the basin and down to 3100 m in the western part. This sandstone display higher porosity values (av. 20%) than other reservoirs in the region. The sandstone was deposited in fluvial, transitional and marine environments, and their correlation with the sequence stratigraphy is related to HST, LST, TS. «U» sandstone is fine to medium grained quartzarenite and subordinate subarkose. The principal cements are carbonates, quartz overgrowth and kaolin, with scarce amounts of pyrite and chlorite. Carbonate cements include: Eogenetic siderite (S1), mesogenetic and post-compactional calcite, Fe-dolomite, ankerite and siderite (S2). Early siderite helped to retain porosity by supporting the sandstone framework against compaction. Dissolution of feldspars and mesogenetic carbonate cements is the main mechanism for secondary porosity development during mesodiagenesis. The stable isotope composition of the S1 siderite are consistent with precipitation from meteoric waters. The anomalous low  $\delta^{18}O\%$  values of some of these carbonate phases could reflect the replacement and recrystallization from S1 to S2 siderite at deep burial and high temperature. However, due to this higher Mg content, siderite S2 could have precipitated as a result of the thermal decarboxilation of the Mg rich organic matter. The last carbonate cements to precipitate were dolomite/ankerite. The negative  $\delta^{18}O\%$  in these cements is related to the continued precipitation at higher temperature and burial depth.*

**Key words:** Diagenesis, Carbonate cement, Sequence stratigraphy, Oriente Basin, Ecuador.

*Geogaceta*, 40 (2006), 283-288  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La estratigrafía secuencial permite dividir a la arenisca «U» en intervalos de marea baja (Lowstand System Tract) y transgresivos (Transgressive System Tract). Combinando los conocimientos sobre la distribución espacial y temporal de las alteraciones diagenéticas en rocas siliciclásticas con la secuencia estratigráfica se puede predecir la calidad del reservorio (Hart *et al.*, 1992; Tang *et al.*, 1994; Taylor *et al.* 2000; Morad *et al.*, 2000; Ketzer *et al.*, 2003). El objetivo de este trabajo es discutir la distribución de las alteraciones diagenéticas en la arenisca «U», correlacionándola con la secuencia estratigráfica de edad Cretácica influenciada por los ambientes fluviales, transicionales y marinos.

## Marco Geológico

La Cuenca Oriente es parte de una unidad morfo-estructural conocida como

parte superior de la Cuenca Amazónica, se encuentra limitada al oeste por la Cordillera de los Andes y al Oriente por el escudo Guyanés (Fig.1). El Oriente cubre aproximadamente 100 km<sup>2</sup>. La Fm Napo (H>700 metros de espesor) fue depositada durante el Cretácico en la Cuenca oriente del Ecuador. Descansa sobre la Fm Hollín y se apoya sobre la Fm Tena. La Fm Napo comprende varias unidades estratigráficas, una de ellas es la arenisca «U» que corresponde a un importante intervalo de petróleo (Fig. 2). Al este del Oriente la arenisca «U» presenta un espesor de H>70 m que se adelgaza hacia el oeste de la Cuenca (Fig. 2), esta arenisca basal al este de la cuenca se interpreta como un abanico aluvial y/o sistema de abanicos de deltas, creados por un sistema de drenaje que proceden desde las partes más altas de las montañas, desde el este del Escudo Guyanés. La parte oeste de la cuenca está representada por facies marinas (Ramirez *et al.*, 1995).

## Metodología

La composición petrológica de la Arenisca «U» se determinó en base al estudio petrográfico estándar de las láminas delgadas impregnadas al vacío con resina de poliéster coloreada de azul. Se realizó el análisis modal sobre las muestras para determinar la composición y su clasificación según el triángulo de Pettijhon *et al.*, 1972. Asimismo, se realizaron análisis químicos mediante microsonda electrónica a fin de conocer las diferencias composicionales de los cementos carbonáticos y la posible sucesión o cronología de estos cementos. Otra porción de las muestras fue disgregada para su estudio mediante difracción de rayos X (DRX). Se realizaron análisis mediante MEB, sobre la muestra en fractura natural. Para el estudio geoquímico de los cementos carbonáticos se utilizó un equipo Jeol JZA-8900 M con 4 detectores. Además, se analizaron los isótopos estables del carbono y del oxígeno de los cementos carbonáticos utilizando un espectrómetro de masa Finnigan MAT 251.

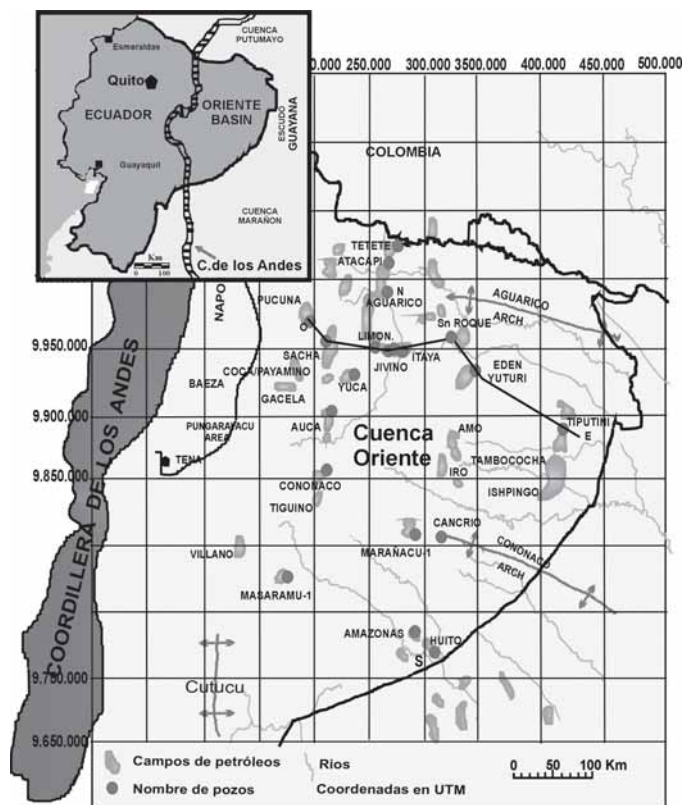


Fig. 1.- Mapa esquemático de la zona de estudio mostrando los principales campos de hidrocarburos y pozos donde se han tomado las muestras de sondeos (White et al., 1995)

Fig. 1.- Sketch map showing the main hydrocarbon fields and the sampled wells (White et al., 1995).

**Estratigráfica Secuencial de la arenisca «U»**

La influencia relativa de la caída y levantamiento del nivel del mar es evidente en cada una de las secuencias de sedimentación dentro de la Fm Napo. La caída del mar es la responsable de la sedimentación de la arenisca «U». Los cambios del nivel del mar se manifiestan por el traslado de la línea de costa, jugando un rol importante en la sedimentación de las areniscas en valles encajados y marino somero en la parte centro y oeste de la Cuenca Oriente (Fig. 2). El ciclo de sedimentación empieza con la canalización de las areniscas transportadas desde la parte oriental del Oriente. Una vez que los depósitos de estuario se han sedimentado, los aportes sucesivos reflejan la transgresión de facies marinas ocurridas hacia el este de la cuenca (Ramirez et al., 1995). En el intervalo de la arenisca «U» se puede encontrar areniscas, intercaladas con gruesos espesores de lutitas y delgadas capas de calizas. La base de la arenisca «U» progresa sobre lutitas y calizas de plataforma marina de la Napo media. Sobre la arenisca «U» principal descansa la «U» superior que tiene una consistencia vertical de facies en toda la cuenca. Este intervalo representa un sistema transgresivo regional (TS) que descansa directamente sobre el «Lowstand incise valley» de la arenisca «U» inferior (Fig. 2). La arenisca «U» superior esta formada en su parte basal por areniscas lenticulares con intercalaciones de lutitas.

**Composición de la arenisca «U»**

La arenisca «U» (Fig. 2) tiene una composición de cuarzoarenita (Q<sub>94,9</sub> F<sub>2,6</sub> FR<sub>2,5</sub>; Fig. 3) con subarcosas subordinadas. La selección va de moderadamente a bien seleccionada y el tamaño de los granos de fino a grueso. El feldespato potásico oscila entre un 0-5% en toda la facies deposicionales, los fragmentos líticos son principalmente cuarzos metamórficos y en menor porcentaje los volcánicos (<1%). La biotita y moscovita están presente en todos los ambientes (<1%). El porcentaje de los minerales pesados no sobrepasa el 1% siendo los más frecuentes el circón y óxidos de hierro. Los granos de glauconita (0-5,7%) se encuentran en la zona de transgresión (TS) y en aquellas areniscas influenciadas por mareas (HST). La pseudomátriz que está formada por la deformación de los granos dúctiles de los clastos arcillosos y es más frecuente en las areniscas deltaicas que en las fluviales.

**Petrología, Geoquímica y distribución de los minerales diagenéticos**

El cemento de calcita se encuentra en forma de parches esporádicos >80 mm en todos los ambientes (HST, LST, TS) (Fig. 4A). También se observa como la calcita reemplaza parcialmente a los feldespatos y en los ambientes de TS reemplaza a la glauconita y es posterior al cemento de cuarzo (Fig. 4A). La composición química

de la calcita es prácticamente pura y el porcentaje en MgCO<sub>3</sub> es (prom. 1,5 mol%), MnCO<sub>3</sub> (prom. 0,9 mol%) y FeCO<sub>3</sub> (2,2 mol%). La composición isotópica del oxígeno y del carbono realizado dió como resultado un rango de δ<sup>18</sup>O<sub>PDB</sub> de -13,8‰ a -6,71‰, δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> -12,69‰ a -1,29‰.

El cemento de dolomita-Fe/ankerita se encuentra en forma de parches irregulares (Fig. 4B). Presenta una textura en forma de cristales tipo *saddle* con tamaños que oscilan entre las 100 a 200 mm, y pequeños rombos zonados con tamaños que oscilan entre los 50 y 150 mm. Este cemento se encuentra en las zonas influenciadas por los sistemas HST y TS. El cemento de dolomita-Fe/ankerita en casi todas las secuencias es post-cemento de cuarzo, se encuentra reemplazando a la siderita S1 (Fig. 4C), y en otros casos englobada por la siderita S2 (Fig. 4B). La composición química de la dolomita-Fe en todos los ambientes es cálcica (prom. 75 mol% CaCO<sub>3</sub>) y ferrosa (15,9 mol% FeCO<sub>3</sub>) y con menor contenido en Mn (prom. 0,5 mol% MnCO<sub>3</sub>). Las relaciones texturales sugieren que precipitó antes que la siderita S2. Los análisis isotópicos de la dolomita-Fe muestran un amplio rango de δ<sup>18</sup>O<sub>PDB</sub> desde -14,19‰ a -4,62‰, δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> -7,07‰ a -3,32‰.

Se han distinguido dos generaciones de siderita, la primera siderita S1 aparece como pequeños cristales lenticulares de 10-50 mm que se disponen reemplazando cantos blandos arcillosos y/o feldespatos y con formas romboédricas que rellenan la porosidad intergranular y rodean a los granos detríticos (Fig. 4C). La siderita S1 se presenta con mayor frecuencia en las areniscas de ambientes fluviales cercana a las zonas TS, y en menor porcentaje o frecuencia en las zonas de las areniscas de los valles encajados en relación LST. La siderita S2 se encuentra como grandes cristales romboédricos que sobrecrecen a la dolomita-Fe (Fig. 4B) y glauconita. Siderita S2 se encuentra con mayor porcentaje en la zona de los valles encajados (LST). Siderita S1 es anterior al cemento de cuarzo, mientras que siderita S2 es posterior. Los valores promedio de la composición química para la siderita (prom. 20,1 mol% MgCO<sub>3</sub>, 12,3 mol% CaCO<sub>3</sub>, 66,9 mol% FeCO<sub>3</sub> y 0,7 mol% MnCO<sub>3</sub>). En los análisis isotópicos se pueden observar dos grupos bien definidos, considerándose los valores para S1 de δ<sup>18</sup>O<sub>PDB</sub> -2‰ a -6‰ y para la siderita S2 δ<sup>18</sup>O<sub>PDB</sub> -10‰ a -14‰, para siderita S1 los valores para δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> -2‰ a -4‰ y para siderita S2 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> -4‰ a -10‰.

El cemento de cuarzo oscila entre 7-16% del volumen total de la roca, se presenta en forma enhedral y como

## Efecto de la caída del nivel del mar en Basal U

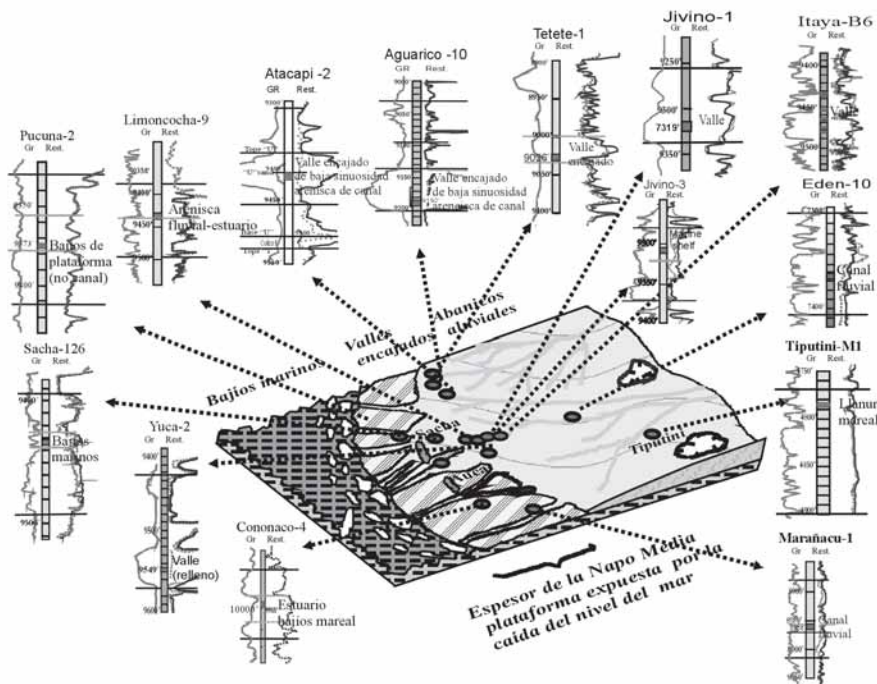


Fig. 2.- Distribución regional y secuencial de los pozos analizados en la arenisca «U» (análisis de facies por Ramírez et al., 1995).

Fig. 2.- Regional and sequential distribution of the studied wells in the "U" sandstone (Facies analysis from Ramírez et al., 1995).

sobrecrecimiento alrededor del grano detrítico. Bajo microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido se observa que el cemento de cuarzo es pre cemento carbonático y de caolinita (Fig. 4D). Este cemento se encuentra en las areniscas de todos los ambientes. Los feldespatos en la mayoría de las muestras analizadas se encuentran albitizados, son reemplazados por los cementos carbonáticos y están en fase de disolución. Los feldespatos están más alterados en las areniscas LST con influencia de marea (HST) y más abundantes en las areniscas TS.

Dentro de los minerales de arcillas el más común es el caolín, la presencia de clorita no sobrepasa el 2,7% y solo está presente en las areniscas de ambientes transicionales. Este mineral se encuentra en forma de *coating* alrededor de los granos detríticos de cuarzo y precediendo al cemento de cuarzo. El caolín se encuentra como *porfilling*. Este cemento temprano de caolinita tiene una textura vermicular. El caolín que precipita en profundidad, es post-cemento de cuarzo y en la mayoría de los casos muestra corrosión sobre los cementos. Las láminas de caolín se agrupan para transformarse en dickita, presentan espesores de 5 a 15 mm de diámetro, el caolín se encuentra en zonas muy cercanas a intervalos de arcillas y en mayor porcentaje en areniscas de HST. Las moscovitas

se encuentran alterándose a caolín entre sus láminas de exfoliación.

La pirita (0-2,3%) se encuentra como pequeñas cristales cúbicos y como agregados framboidales rellenando la porosidad intergranular. La pirita es común en las areniscas de TS. Pequeñas cantidades de óxidos de hierro (<1%) alrededor de los granos detríticos de cuarzo se observan en las areniscas de LST.

La porosidad intergranular primaria, oscila entre el 4 y 15%. La porosidad secundaria esta relacionada con la disolución de los feldespatos y carbonatos (calcita, dolomita, siderita), formando poros agrandados, su porcentaje varía entre el 3-y 16%. Sus valores (8-16%), son mayores en aquellas areniscas de LST, que en aquellas areniscas de HST (3-8%). En las areniscas de TS la porosidad primaria oscila entre 1-3%. La porosidad total (suma de porosidad primaria y secundaria) en la arenisca «U» alcanza hasta un 22%.

### Discusión

Aunque no es posible determinar con exactitud el tiempo de las alteraciones diagnéticas que ocurrieron en la arenisca «U», las relaciones texturales estudiadas mediante el microscopio electrónico de barrido, microsonda, y los análisis isotópicos de los cementos carbonáticos,

permiten establecer una secuencia aproximada para los tres tipos de areniscas. El factor más importante para la pérdida de porosidad inicial es la cementación, independiente del ambiente sedimentario (LST, TS, HST).

La eodiagénesis en la arenisca «U», da como resultado la formación de pirita framboidal, de óxidos de hierro y compactación mecánica. El *coating* de clorita es el primero en precipitar, en areniscas de ambientes transicionales, precediendo al cemento de cuarzo. En areniscas con influencias fluviales la siderita S1 es el primer cemento carbonático en precipitar. La escasa precipitación de los cementos carbonáticos como también de la caolinita favorecería la preservación de la porosidad primaria en la arenisca «U» durante su enterramiento somero. Durante la mesodiagénesis, se produce el sobrecrecimiento del cuarzo seguido por la precipitación de calcita y dolomita así como la albitización de los feldespatos. Estos episodios de cementación en la mesodiagénesis produce una reducción de la porosidad (sistema fluvial y valles encajados). El cemento de cuarzo acontece en las areniscas de todos los ambientes, pero en las areniscas fluviales, valles encajados, influenciados por mareas es donde el sobrecrecimiento es mayor. Los análisis de las inclusiones fluidas en el cemento de cuarzo, indican que la temperatura de precipitación oscila en valores comprendidos entre los 80-100°C (Estupiñán, 2006). La siderita S2 es el último cemento carbonático en precipitar, la similitud de los valores isotópicos del oxígeno y del carbono en la mayoría de los cementos carbonáticos hace impreciso distinguir el

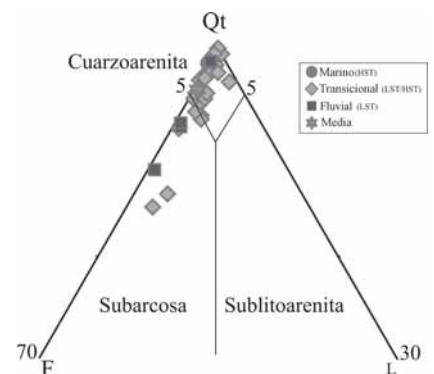


Fig. 3.- Composición de la Arenisca «U» (Q-F-L) según Pettijhon et al., (1972), mostrando los diferentes ambientes de sedimentación de las muestras analizadas.

Fig. 3.- Compositional plot of the "U" sandstone (Q-F-L components after Pettijhon et al., 1972) showing the different sedimentary environment of the analysed samples.

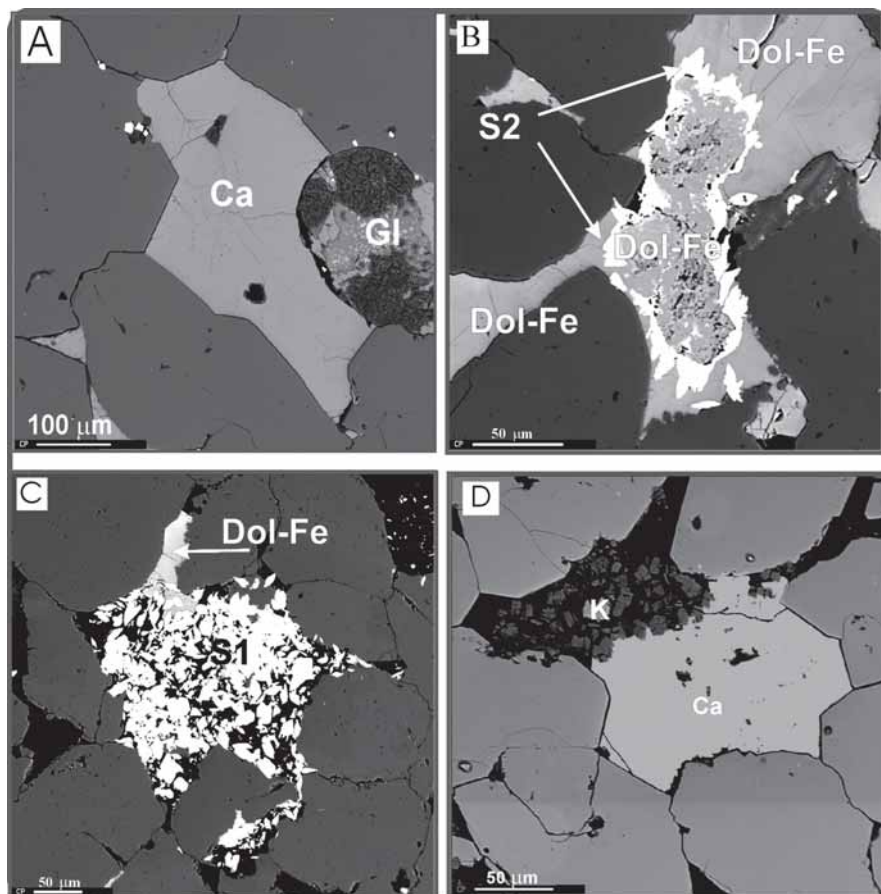


Fig. 4.- Imagen mediante BSE. A) Cemento de calcita rellenando la porosidad intergranular primaria, reemplazando parcialmente a la glauconita. B) Cemento de dolomita-Fe englobada por siderita S2. C) Finos cristales lenticulares de siderita S1, parcialmente reemplazada por dolomita-Fe. D) Cemento de calcita y *poREFILLING* de caolinita, reemplazando parcialmente al cemento de cuarzo.

Fig. 4.- BSE images showing: A) Calcite cement filling the primary intergranular porosity and partially replacing glauconite grains; B) Fe-dolomite engulfed in siderite S2; C) Thin lenticular siderite crystals S1 partially replaced by Fe-dolomite; D) Calcite cement and kaolin pore filling partially replacing quartz cement.

tiempo de precipitación de estos cementos pero observaciones texturales en microscopio óptico como en el microscopio electrónico de barrido permiten establecer que la siderita S2 fue el último cemento en precipitar.

Las alteraciones eodiagenéticas en el sistema transgresivo están representadas por la eodiagenética siderita S1, al tope del canal fluvial. Los finos cristales romboédricos de la siderita S1 que se encuentran alrededor de los granos detríticos, precipitaron en barra tidales (Ramirez *et al.*, 1995). En la mesodiagénesis la siderita S2 es el último cemento carbonático en precipitar con valor de  $\delta^{18}\text{O}$  de -11,35‰ a -10,34‰. El tiempo de precipitación de los otros cementos carbonáticos no es bien claro, pero por análisis texturales se puede ver que el cemento de calcita es pre-cemento de ankerita. Los valores  $\delta^{18}\text{O}$  para la calcita

es -10,52‰ a -11,01‰ y para la ankerita  $\delta^{18}\text{O}$  es -7,43‰ a -10,61‰. Los valores del  $\delta^{18}\text{O}$  de todos los cementos carbonáticos indican que precipitaron a temperaturas  $> 75^\circ\text{C}$ . De los datos obtenidos de las inclusiones fluidas en el cemento de cuarzo (Estupiñán, 2006) se puede deducir que la temperatura de precipitación de los cementos carbonáticos ha sido superior a la del cemento de cuarzo, debido a que todos ellos a excepción de la siderita S1 son post-cemento de cuarzo.

### Conclusiones

La distribución espacial y temporal de las alteraciones diagenéticas en la arenisca «U» es muy similar en todos los ambientes deposicionales. En la etapa de eodiagénesis y en todos los ambientes, la cementación es muy escasa, precipitando únicamente el *coating* de clorita y la

caolinita como *poREFILLING* o reemplazando a los feldespatos. En la mesodiagénesis, los sedimentos que están principalmente influenciados por el LST son escasamente cementados por carbonatos con relación a aquellas areniscas que se encuentran influenciadas por un ambiente de HST. Asimismo, la pérdida de porosidad intergranular primaria en la etapa eodiagenética en todos los ambientes (HST, LST, TS) fue principalmente por compactación mecánica. Durante la mesodiagénesis se produce la precipitación de los cementos de cuarzo seguido por los cementos de siderita S2, dolomita/ankerita y calcita.

### Agradecimiento

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto BTE2003-06915 del Ministerio de Educación y Ciencia.

### Referencias

- Estupiñán, J. (2006). *Control diagenético sobre la calidad de los reservorios de las areniscas «U» y «T» de la Fm Napo del Cretácico de la cuenca Oriente, Modelización térmica y su relación con la generación del hidrocarburo*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 242 pp.
- Hart, B.S., Longstaffe, F.J., y Plint, A.G. (1992). *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 40, 52-59.
- Ketzer, J.M., Morad, S., y Amorosi, A. (2003). En: *Mineral distribution in Spatial siliciclastic rocks within a sequence stratigraphic framework*, (R. Worden y S. Morad, Eds.). Clay mineral cementation in Sandstones: International Association of Sedimentologists, Special Publication, 34, 43-61.
- Morad, S., Ketzer, J.M., y De Ros, L.F. (2000). *Sedimentology*, 47, 95-120
- Pettijohn, F. J., Potter, P.E., y Siever, R. (1972). *Sand and sandstone*. Springer-Verlag, 618 pp
- Ramirez, F.J. y White, E.H. (1995). *Reservoir technology Oryx Energy Company Dallas, Texas, USA*. 220 pp
- Tang, Z., Parnell, J., Ruffell, A.H. (1994). *Journal of Paleolimnology*, 11, 67-90
- Taylor, K.G., Gawthorpe, R.L., Curtis, C.D., Marshall, J.D. y Awwiller, D.N. (2000). *Journal of Sedimentary Research*, 70, 360-372.
- White, E.H., Skopec, R.A., Ramirez, F.A., Rodas, J.A. y Bonilla, G. (1995). *Petroleum Basin of South American, AAPG memoir*, 62, 573-596.