

Modelos 3D de análogos de reservorios sedimentarios: Aplicación al sistema de abanico costero eoceno de Sant Llorenç del Munt (Cuenca del Ebro)

P. Cabello, M. López-Blanco, O. Falivene, P. Arbués, E. Ramos, Ll. Cabrera y M. Marzo

Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Grup de Geodinàmica i Anàlisi de Conques, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona. pcabello@ub.edu

ABSTRACT

3D reservoir characterizations of analogues based on outcrop studies provide geological information that can be used for reducing uncertainty in subsurface reservoir modelling to predict interwell areas. 3D reservoir-scale models of a 133 m thick transgressive-regressive sequence (Vilomara composite sequence), in the Sant Llorenç del Munt fan-delta complex (Eocene, Ebro foreland basin), reproduce heterogeneity scales which potentially influence flow simulation predictions. Three scales were recognized and modelled: (a) transgressive and regressive tracts in which the sedimentary record is structured; (b) stacking and interfingering of facies belts and (c) sedimentary bodies which provide sedimentological variability along facies belts. In order to solve the different stacking trend of transgressive and regressive tracts by using different modelling strategies, models were compartmentalized into several sections by means of modelling bounding surfaces (maximum regression and flooding surfaces). The depositional trend of facies belts for each tract was reproduced considering the stacking angle and interfingering measures obtained from outcrop studies, while the last modelling step in this work describes the geometry, arrangement and spatial relations of sedimentary bodies observed in field. All these models are stochastic simulations built applying different statistics algorithms provided by Roxar Reservoir Modelling System.

Key words: *reservoir analogue, facies model, sedimentary heterogeneities, fan-delta system.*

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de modelización 3D de reservorios aplicando métodos estadísticos se han convertido en una nueva y potente herramienta para optimizar la estimación y explotación de hidrocarburos.

Los modelos estáticos de reservorios describen la geometría externa, la distribución de facies y las propiedades petrofísicas de las rocas en subsuelo. Puesto que en reservorios clásticos las propiedades petrofísicas (p.e. permeabilidad, porosidad) usualmente se correlacionan con las facies sedimentarias, los modelos de facies también permiten predecir la conectividad de la roca reservorio. Los modelos estáticos constituyen uno de los parámetros principales de entrada para la simulación de la circulación de fluidos (modelos dinámicos), cuya finalidad consiste en predecir el comportamiento del reservorio y del hidrocarburo considerando una determinada estrategia de producción. Consecuentemente, la fiabilidad y calidad de los modelos de distribución de facies influirán en la predicción final.

El estudio de afloramientos de calidad en análogos de reservorios sedimentarios proporciona una amplia y completa base de datos que describe la geometría y disposición de

los elementos sedimentarios (p.e. geometría de cuerpos sedimentarios y su continuidad en las diferentes direcciones del espacio, ángulos de apilamiento que describen tendencias progradantes y retrogradantes, etc.). Estos datos se pueden utilizar para construir modelos de facies en el análogo (Dreyer *et al.*, 1993; Ciftci *et al.*, 2004; Larue, 2004). Estos modelos, junto con los datos utilizados para su construcción, proporcionan información complementaria para reducir la incertidumbre en la modelización de reservorios en el subsuelo, relacionada con la escasez de información disponible (limitada generalmente a datos de pozos y sísmicos).

El presente estudio muestra la metodología aplicada en la construcción de modelos 3D de distribución de facies en un análogo de reservorio detrítico basados en algoritmos estadísticos. Estos modelos reproducen una secuencia compuesta transgresivo-regresiva (secuencia de Vilomara) del abanico costero de Sant Llorenç del Munt (Eoceno, Cuenca del Ebro, Fig. 1A).

HETEROGENEIDAD SEDIMENTARIA

Dentro del abanico de Sant Llorenç del Munt, se ha estudiado la secuencia compuesta de Vilomara dado que: a) es el

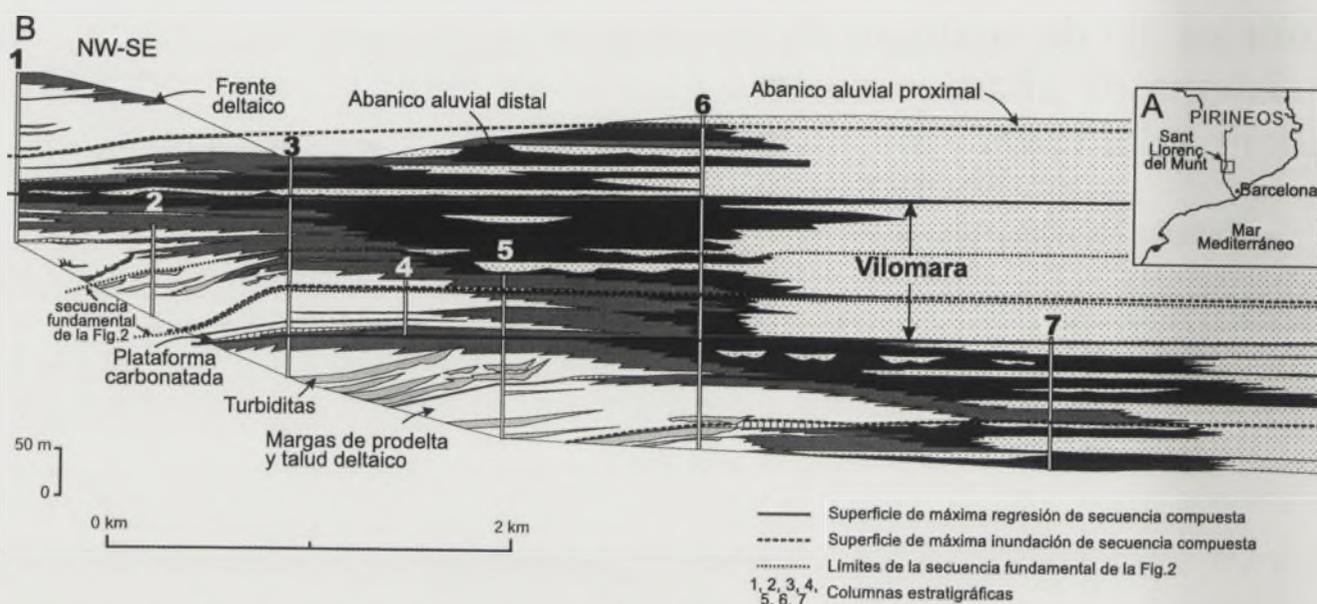


FIGURA 1. (A) Mapa del NE de la Península Ibérica indicando la localización del sistema de abanico costero de Sant Llorenç del Munt. (B) Panel de correlación que muestra el patrón de apilamiento de la secuencia de Vilomara y su estructuración en secuencias transgresivo-regresivas de menor escala. Basado en López-Blanco et al. (2000b). En el panel se indica la posición estratigráfica de la secuencia fundamental correspondiente a los modelos de la figura 2.

tramo que mejor aflora de todo el sistema deltaico, b) muestra una gran variabilidad sedimentológica, y c) ha sido objeto de numerosos estudios previos (López-Blanco, 1996; López-Blanco et al., 2000a, 2000b; Rasmussen, 2000; Steel et al. 2000), que proporcionan una amplia información geológica (columnas estratigráficas, mapas y cortes geológicos).

La secuencia compuesta de Vilomara comprende 133 m de potencia máxima, y está formada por un cortejo transgresivo y otro regresivo suprayacente, ambos separados por una superficie de máxima inundación (Fig. 1B). A su vez, la secuencia se compone de 7 subunidades transgresivo-regresivas de menor potencia (secuencias fundamentales). Cada una de las secuencias fundamentales está limitada por superficies de máxima regresión, mientras que superficies de máxima inundación separan los tramos transgresivos de los regresivos suprayacentes (Fig. 1B).

El sistema de Sant Llorenç del Munt comprende una alternancia de depósitos clásticos y depósitos carbonatados. López-Blanco (1996) y López-Blanco et al. (2000b) reconocen la interdigitación de diferentes cinturones de facies mostrando tendencias de apilamiento agradantes-retrogradantes en las unidades transgresivas y claramente progradantes en las regresivas (Fig. 1B). Los cinturones de facies definidos, de proximal a distal, son: abanico aluvial proximal, abanico aluvial distal, frente deltaico, talud deltaico y prodelta. Los depósitos carbonatados básicamente se desarrollan en los tramos transgresivos (Fig. 1B).

Las facies de abanico aluvial proximal se componen de conglomerados masivos, interpretados como resultado de procesos de flujos acuosos. Estos depósitos evolucionan a facies de abanico aluvial distal, constituidas por areniscas y lutitas rojas de llanura de inundación, y facies arenosas y conglome-

ráticas de relleno de canal. Las facies de frente deltaico constituyen el cinturón de facies de transición marino-continental y están compuestas por conglomerados que pasan distalmente a areniscas. Las facies de talud deltaico y prodelta comprenden dos grupos principales de depósitos: a) sedimentos de grano fino, formados por margas de prodelta y b) depósitos arenosos y conglomeráticos que corresponden a depósitos gravitacionales. Las plataformas carbonáticas básicamente están formadas por barras bioclásticas y facies arrecifales.

Los modelos de facies reproducen distintas escalas de heterogeneidad sedimentaria. Estas escalas ejercen una influencia destacada en la circulación de fluidos, y consecuentemente deben ser resueltas para obtener predicciones realísticas de circulación de fluidos. En el sistema deposicional de Sant Llorenç del Munt los elementos que dan lugar a la heterogeneidad sedimentaria presente están asociados a:

(a) Estratigrafía secuencial. Los cortejos transgresivos y regresivos de las 7 secuencias fundamentales que forman la secuencia de Vilomara presentan tendencias de apilamiento alternantes.

(b) Patrón de apilamiento de los cinturones de facies correspondientes a subambientes deposicionales diferentes para cada unidad (transgresiva y regresiva). Además existe una interdigitación superpuesta a esta tendencia general resultante de los cambios laterales entre los cinturones de facies.

(c) Geometría de los cuerpos sedimentarios individuales dentro de cada cinturón de facies (canales, lóbulos, etc.).

ESTRATEGIA DE MODELIZACIÓN

La estrategia de modelización diseñada en el presente trabajo consiste en resolver las escalas de heterogeneidad

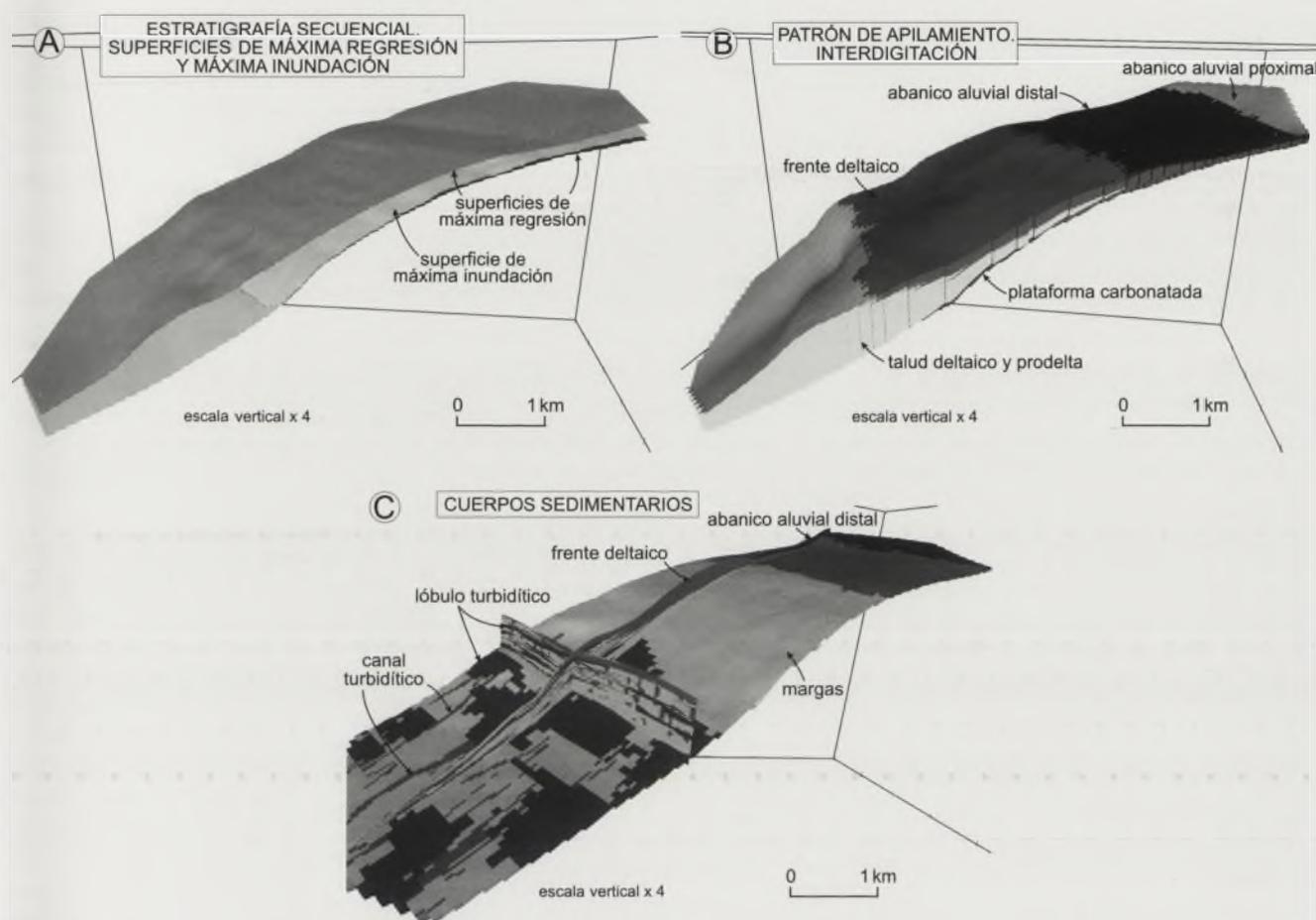


FIGURA 2. Visualización de algunos modelos 3D de una secuencia fundamental de la secuencia de Vilomara (ver Fig. 1B) que reproducen: (A) la geometría 3D de las superficies de máxima regresión y máxima inundación que limitan dicha secuencia fundamental, (B) el patrón de apilamiento de los diferentes cinturones de facies y su interdigitación, y (C) la disposición espacial de cuerpos sedimentarios del cortejo regresivo de la secuencia fundamental considerada, tales como canales y lóbulos turbidíticos pertenecientes tanto al talud deltaico como al prodelta.

sedimentaria descritas partiendo de la escala mayor y, progresivamente, aumentando la precisión de los modelos. Las escalas consideradas han sido las siguientes:

(a) Reconstrucción determinística de las superficies de máxima regresión y máxima inundación que separan cada uno de los cortejos transgresivos y regresivos de las secuencias fundamentales (Fig. 2A). Esta reconstrucción resuelve la heterogeneidad ligada a la estratigrafía secuencial.

(b) La siguiente escala de modelización, que reproduce el patrón de apilamiento de los cinturones de facies y sus interdigitaciones, se ha resuelto mediante la construcción de mallas delimitadas por dos superficies estratigráficas consecutivas (superficies de máxima regresión y máxima inundación de las secuencias fundamentales) y el uso de un algoritmo de modelización basado en la truncación de la suma de una tendencia determinística y un campo gaussiano (Fig. 2B, MacDonald y Aasen, 1994). Los datos de entrada para condicionar el algoritmo han sido extraídos de estudios de afloramiento u obtenidos de trabajos previos.

(c) La última escala de modelización reproduce la geometría de los cuerpos sedimentarios dentro de cada cinturón de facies modelizado en la etapa anterior, y reproducen la variabi-

lidad sedimentológica a lo largo de los diferentes subambientes deposicionales. Para generar estos modelos se han utilizado algoritmos basados en objetos (Lia *et al.*, 1997). Estos modelos describen la distribución y relaciones espaciales existentes entre cuerpos sedimentarios reconocidos en estudios de afloramientos y constituyen la etapa de mayor precisión alcanzada en este estudio. Los modelos de distribución de los cuerpos sedimentarios para el talud deltaico y prodelta, por ejemplo, comprenden cuerpos canaliformes que representan canales turbidíticos, y cuerpos lenticulares correspondientes a lóbulos turbidíticos, inmersos en una matriz margosa (Fig. 2C).

Los modelos 3D se han construido utilizando la aplicación informática Roxar Reservoir Modelling System. Mientras que la primera escala de modelización se ha resuelto utilizando una aproximación determinística, la segunda y tercera corresponden a simulaciones estocásticas condicionadas a datos de columnas estratigráficas.

CONCLUSIONES

Los modelos de facies 3D que reproducen la arquitectura deposicional de análogos de reservorios sedimentarios se

basan en el análisis de las características geométricas, sedimentológicas, etc. de los depósitos reconocidos en afloramientos de calidad, y proporcionan información que permite guiar y completar el proceso de modelización de reservorios sedimentarios en subsuelo, reduciendo la incertidumbre relacionada con la limitación de datos. Este ejercicio de modelización permite concluir lo siguiente:

1) Los elementos que producen heterogeneidad sedimentaria reconocidos en la secuencia estudiada del abanico costero de Sant Llorenç del Munt son: (a) unidades transgresivas y regresivas que muestren tendencias de apilamiento alternantes; (b) interdigitación de cinturones de facies sedimentarias; (c) cuerpos sedimentarios reconocidos en los diferentes cinturones de facies.

2) La estrategia de modelización diseñada ha permitido reproducir la heterogeneidad sedimentaria en la distribución de facies de la secuencia modelizada. Esta estrategia es potencialmente exportable a la modelización de reservorios análogos en subsuelo.

3) Los parámetros extraídos de afloramientos, y que se demuestran válidos para los modelos del análogo, se pueden utilizar para restringir la incertidumbre en la modelización de reservorios análogos en subsuelo.

4) Los modelos de facies serán la base para la modelización petrofísica y simulación de flujo del análogo estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por los proyectos CARES (DGICYT BTE 2001-3650) y MARES (CGL 2004-05816-C02-02), el Grup Consolidat de Recerca de Geodinàmica i Anàlisi de Conques (2005SGR00397) y el Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya y el Fons Europeu. Los autores agradecen a Roxar la cesión de la aplicación informática IRAP RMS para la modelización de reservorios.

REFERENCIAS

- Ciftci, B.N., Aviantara, A.A., Hurley, N.F. y Kerr, D.R. (2004): Outcrop-based Three dimensional Modeling of the Tensleep Sandstone at Alcalí Creek, Boghorn Basin, Wyoming. En: *Integration of outcrop and modern analogs in reservoir modelling*. AAPG Memoir, 80: 235-259.
- Dreyer, T.; Falt, L.M.; Høy, T.; Knarud, R.; Steel, R.J. y Cuevas, J.L. (1993): Sedimentary architecture of field analogues for reservoir information (SAFARI): a case study of the fluvial Escanilla Formation, Spanish Pyrenees. En: *The geological modelling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues* (S. Flint y I.D. Bryant, Eds.). IAS, Spec. Publ., 15: 57-80.
- Larue, D.K. (2004): Outcrop and Waterflood Simulation Modeling of the 100-Foot Channel Complex, Texas, and the Ainsa II Channel Complex, Spain: Analogs to Multistorey and Multilateral Channelized Slope Reservoirs. En: *Integration of outcrop and modern analogs in reservoir modelling*. AAPG Memoir, 80: 337-364.
- Lia, O., Tjelmeland, H., Holden, L. y Kjellesvik, L.E. (1997): Modelling of facies architecture by marked point models. En: *5th International Geostatistics Congress*. Proceedings: 386-398.
- López-Blanco, M. (1999): *Estratigrafía secuencial de sistemas deltaicos de cuencas de antepaís: ejemplos de Sant Llorenç del Munt, Montserrat y Roda (Paleógeno, Cuenca de antepaís surpirenaica)*. *Acta Geologica Hispanica*, 31: 91-95.
- López-Blanco, M., Marzo, M., Burbank, D.W., Vergés, J., Roca, E., Anadón, P. y Piña, J. (2000a): Tectonic and climatic controls on the development of foreland fan deltas: Montserrat and Sant Llorenç del Munt systems (Middle Eocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 138: 17-39.
- López-Blanco, M., Marzo, M. y Piña, J. (2000b): Transgressive-regressive sequence hierarchy of foreland, fan-delta clastic wedges (Montserrat and Sant Llorenç del Munt, Middle Eocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 138: 41-69.
- MacDonald, A. C. y Aasen, J. O. (1994): A Prototype Procedure for Stochastic Modeling of Facies Tract Distribution in Shoreface Reservoirs. En: *Stochastic Modeling and Geostatistics* (J.M. Yarus y R.L. Chambers, Eds.). AAPG Computer Applications in Geology, 91-108.
- Rasmussen, H. (2000): Nearshore and alluvial facies in the Sant Llorenç del Munt depositional system: recognition and development. *Sedimentary Geology*, 138: 71-98.
- Steel, R., Rasmussen, H., Eide, S., Neuman, B. y Siggerud, E. (2000): Anatomy of high-sediment supply, transgressive tracts in the Vilomara composite sequence, Sant Llorenç del Munt, Ebro Basin, NE Spain. *Sedimentary Geology*, 138: 125-142.