

# Reinterpretación paleoambiental de la Formación Rio Bonito (Pérmico de la Cuenca de Paraná) en el yacimiento de carbón de Iruí, Rio Grande do Sul, Brasil: Integración de análisis de facies, icnología y estratigrafía secuencial de alta resolución

*Paleoenvironmental reinterpretation of the Rio Bonito Formation (Permian, Paraná Basin) in the Iruí Coal Mine, Rio Grande do Sul, Brazil: Integration of facies analysis, ichnology and high-resolution sequence stratigraphy*

L. A. Buatois (\*), R. G. Netto (\*\*), y M. G. Mángano (\*)

(\*) Instituto Superior de Correlación Geológica. Casilla de Correo 1 (CC). 4000 San Miguel de Tucumán. Argentina. [ichnology@infovia.com.ar](mailto:ichnology@infovia.com.ar)

(\*\*) Núcleo de Estudos Sedimentológicos e Estratigráficos - NESE. UNISINOS. Av. Unisinos, 950. 93022-000 São Leopoldo RS. Brazil.

## ABSTRACT

*The Permian Rio Bonito Formation of the Paraná Basin, southern Brazil, has been traditionally interpreted in terms of a fluvio-dominated deltaic model. Integration of facies analysis, ichnology, and high-resolution sequence stratigraphy suggests that this unit represents deposition in a tide-dominated, fluvio-estuarine valley system. The overlying Palermo Formation records deposition in open-marine environments.*

**Key words:** Estuaries, Trace Fossils, Permian, Brazil.

*Geogaceta*, 29 (2001), 26-28  
ISSN: 0213683X

## Introducción

A partir de los estudios realizados en el Delta del Mississippi en las décadas del 50 y 60, se desarrolló un modelo de facies, el de deltas fluvio-dominados (Scruton, 1960), que alcanzó enorme popularidad particularmente en el ámbito de la industria petrolera. Durante varias décadas este modelo fue empleado para interpretar sucesiones acumuladas en ambientes marinos marginales. Sin embargo, con el desarrollo de la estratigrafía secuencial en las décadas del 70 y 80, el reconocimiento de valles estuarinos surgió como un paradigma alternativo en la construcción de modelos depositacionales para ambientes parálidos. No es sorprendente que numerosas sucesiones consideradas originalmente como deltaicas (e.g., Shepherd y Hills, 1970), hayan sido reinterpretadas más recientemente como estuarinas (e.g., Rahmani, 1988).

La Formación Rio Bonito (Pérmico Inferior) representa la unidad basal del Grupo Guatá en la cuenca de Paraná, en el sur de Brasil (Schneider *et al.*, 1974). Esta formación comprende conglomerados, areniscas, pelitas y mantos de carbón, algunos de los cuales son económicamente explotables. La Formación Rio Bonito ha sido dividida en tres miembros, de base a techo, Triunfo (depósitos fluvio-deltaicos), Para-

guaçu (depósitos marinos transgresivos) y Siderópolis (depósitos litorales progradantes). Sin embargo, en la región de Rio Grande do Sul no se han establecido subdivisiones de la Formación Rio Bonito. La Formación Rio Bonito ha sido tradicionalmente considerada como el producto de sistemas deltaicos y sus facies han sido interpretadas en forma acorde con un modelo de delta fluvio-dominado (e.g., Holz, 1987; Holz y Dias-Flor, 1984; Lavina *et al.*, 1985; Lavina y Lopes, 1987). Estudios en testigos de sondeo, afloramientos y perfiles eléctricos en la zona del yacimiento de carbón de la Mina do Iruí, municipio de Cachoeira do Sul, estado de Rio Grande do Sul (Fig. 1), sugieren que un modelo de valle estuarino dominado por mareas resulta más apropiado para interpretar a la Formación Rio Bonito. En la caracterización de esta unidad hemos empleado un enfoque integrador que utiliza información proveniente del análisis de facies, estudios icnológicos y estratigrafía secuencial de alta resolución. La alta densidad de pozos con coronas y la existencia de afloramientos proporcionan una amplia base de datos que permite desarrollar un modelo aplicable a exploración y explotación de yacimientos de carbón y que a la vez funcione como un análogo para la caracterización de reservorios de hidrocarburos en ambientes marinos marginales.

## Facies sedimentarias y ambiente de deposición de la Formación Rio Bonito

En el área de estudio, la Formación Rio Bonito exhibe, de base a techo, las siguientes unidades sedimentarias (Fig. 2):

1. *Canales fluviales y paleosuelos*: Estos depósitos presentan una marcada base erosiva y se disponen sobre el basamento metamórfico. Comprende sucesiones grano y estratodecrecientes apiladas, que registran el relleno y posterior abandono de canales fluviales. Los paquetes se inician con conglomerados medianos a finos, que gradan a areniscas muy gruesas a medianas con estratificación entrecruzada en artesa y planar. Los paquetes rematan en areniscas finas a muy finas y pelitas con laminación paralela o masivas con marcas de raíces y texturas en bloque, que indican desarrollo de paleosuelos. No se observa bioturbación de origen animal.

2. *Canales estuarinos y pantanos*: Estos depósitos se disponen por encima de los paleosuelos anteriormente descritos. Los depósitos de canales estuarinos comprenden areniscas finas con estratificación entrecruzada de bajo ángulo que representa superficies de acreción lateral, pantallas de fango y bandas de siderita. Se observan superficies de reactivación y evidencias de bidireccionalidad. Hacia el techo del interva-

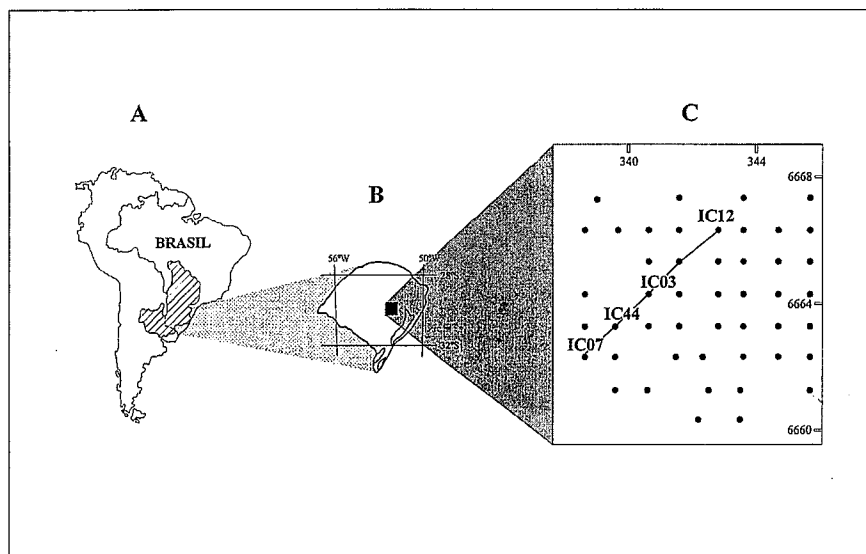


Fig. 1.- Ubicación del área de estudio en relación a la cuenca de Paraná en el sur de Brasil, Paraguay, Uruguay y noreste de Argentina. Se indica la posición de los sondeos de la correlación de la figura 2.

Fig. 1.- Location of the study area related to the Paraná basin in the South of Brasil, Paraguay and Northeast of Argentina. The situation of boreholes correlated in the figure 2 is shown.

lo, se dispone un manto de carbón con marcas de raíces, pelitas carbonosas y margas, que evidencia la desactivación del canal y el desarrollo de pantanos. Las areniscas poseen bajo grado de bioturbación y contienen una asociación empobrecida de icnofósiles, integrada por *Ophiomorpha*, *Skolithos*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus* y *Rhizocorallium*. Esta icnofauna indica influencia marina y condiciones de estrés ambiental, particularmente por dilución de la salinidad hormonal (cf. Pemberton y Wightman, 1992). Las pantallas de fango, las superficies de acreción lateral, las superficies de reactivación y las evidencias de bidireccionalidad sugieren influencia de mareas.

3. *Complejo de boca de estuario*: Estos depósitos se disponen por encima de las facies de pantanos y consisten en areniscas gruesas a finas, muy bien seleccionadas, con estratificación entrecruzada en artesa y planar, generalmente de alto ángulo, laminación ondulática y pantallas de fango. En los intervalos arenosos se observan evidencias de bidireccionalidad. Localmente los paquetes de areniscas se intercalan verticalmente, e interdigitan lateralmente, con depósitos más finos, integrados por pelitas y areniscas finas a muy finas con laminación paralela y estratificación lenticular, ondulosa y *flaser*. Esta unidad representa deposición en un complejo de boca de estuario caracterizado por el desarrollo de barras de arena mareales, disectadas por canales de *inlet* y asociadas con planicies de mareas. Los depósitos finos albergan una asociación de icnofósiles empobrecida, integrada por *Planolites* y *Palaeophycus*, que su-

giere condiciones de agua salobre en un ambiente restringido.

4. *Shoreface*: Los depósitos de *shoreface* se presentan por encima del complejo de boca de estuario. Consisten en areniscas muy finas a finas con estratificación entrecruzada *hummocky*, que representan depósitos de *shoreface* inferior a medio. Si bien en la mayoría de los casos las capas de arenisca con estratificación entrecruzada *hummocky* se amalgaman formando potentes paquetes, localmente pueden intercalarse areniscas con laminación entrecruzada y *climbing* de oleaje, niveles pelíticos o delgados *lags* de arenisca gruesa a mediana. Las areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky* están asociadas a capas de arenisca con estratificación entrecruzada de alto y bajo ángulo, que representan depósitos de *shoreface* superior y, muy localmente, *foreshore*. Es común la presencia de intervalos amalgamados totalmente carentes de bioturbación. Otros intervalos exhiben una icnofauna integrada por *Helminthopsis*, *Planolites*, *Teichichnus*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Skolithos*, *Diplocraterion*, *Rhizocorallium*, *Thalassinoides*, *Cylindrichnus* y trazas de escape. Los depósitos de tormentas son los dominantes en esta unidad, caracterizándose a la misma como un *shoreface* de alta energía, que lateral y verticalmente grada a un *shoreface* de moderada energía (cf. MacEachern y Pemberton, 1992).

Los estudios realizados sugieren que la Formación Río Bonito representa el relleno de un sistema de valle fluvio-

estuarino dominado por mareas. A diferencia de los estuarios dominados por olas, la división tripartita arena-fango-arena no es tan marcada en los estuarios dominados por mareas (Dalrymple *et al.*, 1992). En el caso de la Formación Río Bonito, si bien pueden reconocerse tres grandes subdivisiones, correspondientes a los sectores superiores, medios e inferiores del estuario, el mínimo de energía de la zona central no es tan pronunciado, como consecuencia de la migración de canales mareales meandriformes a través de la misma. Los depósitos de *shoreface* del tramo cuspidal de la unidad marcan el pasaje a condiciones marinas abiertas.

### Estratigrafía secuencial de la Formación Río Bonito

La Formación Río Bonito exhibe una arquitectura estratal y evolución depositacional comparable a la documentada para valles fluvio-estuarinos (Zaitlin *et al.*, 1994). En la región estudiada, la Formación Río Bonito apoya sobre el basamento metamórfico. La base de los depósitos fluviales representa un límite de secuencia que marca la incisión de un valle fluvial durante una caída del nivel del mar. El relleno de los canales comprende el cortejo depositacional de nivel del mar bajo. El límite entre el cortejo depositacional de nivel bajo y el transgresivo es ubicado donde se presentan las primeras evidencias de acción de mareas o de estructuras biogénicas indicadoras de influencia marina, que marcan el desarrollo de la superficie de línea de bahía (Dalrymple *et al.*, 1992; Allen y Posamentier, 1993). En general este límite se corresponde con la base de los depósitos de canales mareales con acreción lateral y pantallas de fango portadores de una icnofauna de aguas salobres (Fig. 2). La sucesión estuarina exhibe una marcada tendencia transgresiva y culmina con el desarrollo de depósitos de boca de estuario. Estos depósitos de boca de estuario son truncados por una superficie erosiva de extensión regional, originada por oleaje, que marca el tránsito a ambientes marinos abiertos (Fig. 2). Esta superficie es marcadamente erosiva y está delineada por un *lag* de arenisca muy gruesa a gruesa, de 4-22 cm de espesor. Por encima de esta superficie se disponen areniscas de *shoreface*.

### Discusión

Los estudios realizados sugieren que el modelo de delta fluvio-dominado que se aplicó tradicionalmente para interpretar el ambiente depositacional de la Formación

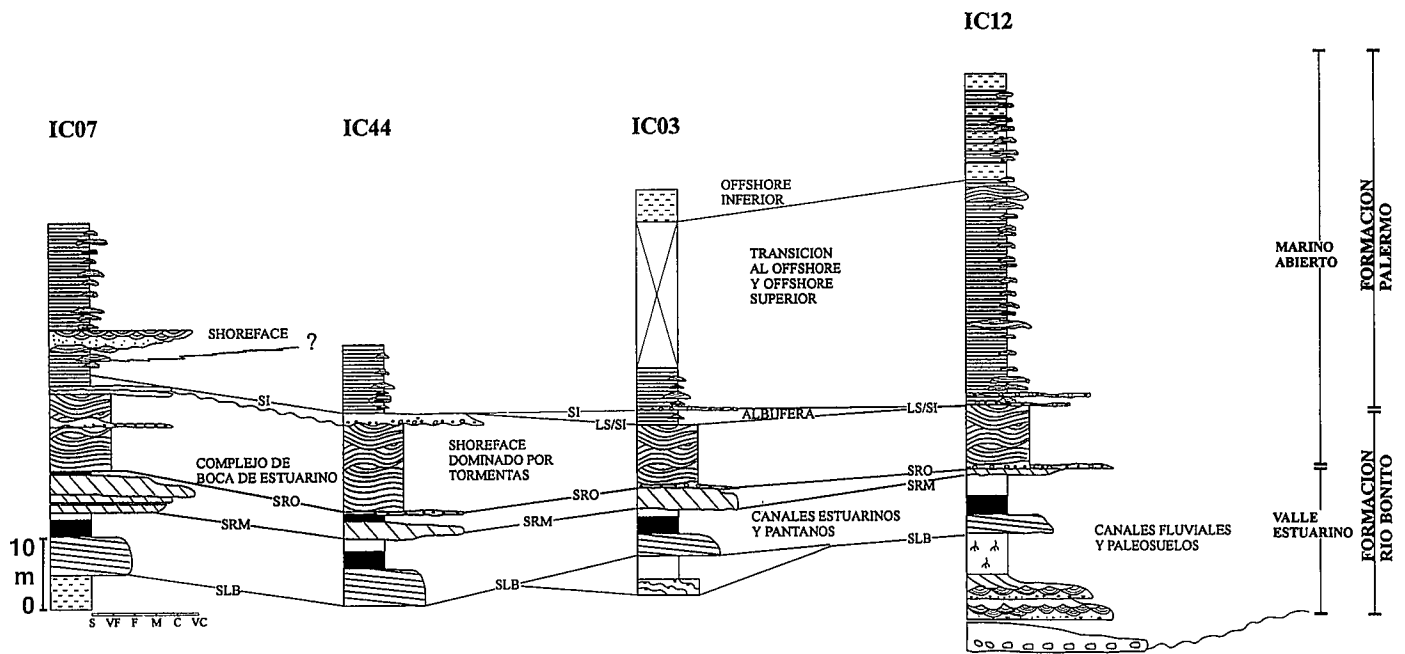


Fig. 2.- Correlación de sondeos en el área de estudio, mostrando el desarrollo de los depósitos de valle estuarino de la Formación Río Bonito. SLB = Superficie de línea de bahía. SRM = Superficie de erosión originada por mareas. SRO = Superficie de removilización por oleaje. LS/SI = Límite de secuencia / Superficie de inundación. SI = Superficie de inundación.

Fig. 2.- Correlation in the study area of the indicated boreholes showing the disposition of the estuarine valley sedimentary infill of the rio Bonito Formation. SLB = Bakline surface. SRM = Tidal erosional surface. SRO = Wave ravinement surface. LS/SI = Sequence boundary/Flooding surface. SI = Flooding surface.

Río Bonito en la región debe ser abandonado en favor de un modelo de valle fluvio-estuarino dominado por mareas. Las evidencias a favor de un modelo de valle fluvio-estuarino son las siguientes: (1) el patrón de apilamiento estratal refleja una asociación retrogradacional típica de un estuario rellenado transgresivamente en lugar de una asociación progradacional como el que correspondería a un sistema deltaico, (2) la Formación Río Bonito se inicia abruptamente con conglomerados fluviales y presenta una base incisa y (3) las evidencias icnológicas muestran el pasaje desde condiciones de agua dulce a agua salobre y, finalmente, salinidad normal, lo cual es consistente con un sistema fluvio-estuarino transgredido, pero inconsistente con un sistema deltaico progradante que debería exhibir un pasaje vertical de icnofaunas exactamente opuesto. Por su parte, las evidencias a favor de un modelo de estuario dominado por mareas incluye: (1) depósitos canalizados con desarrollo de estratificación entrecruzada de bajo ángulo, representando superficies de acreción lateral en un curso meandriforme, (2) complejos de ondas de arena desarrollados en la boca del estuario, (3) facies heterolíticas con estratificación lenticular, ondulosa y flaser acumuladas en planicies de mareas y (4) abundancia de superficies de reactivación, pantallas de fango y bipolaridad en la dirección de inclinación de capas frontales de areniscas.

**Agradecimientos**

Los fondos para la realización de este estudio han sido aportados por FAPERGS-SECYT en el marco de un programa de cooperación entre el estado de Rio Grande do Sul y Argentina. Los testigos corona analizados, los datos geofísicos y la base de datos cartográficos fueron gentilmente cedidos por el Servicio Geologico de Brasil (CPRM) y por el Departamento Nacional de Producción Mineral (DNPM). Agradecemos a Rodrigo Dias Lima, Francisco Wonrath Tognoli y Ana Novatzki por su colaboración en la descripción de testigos corona y a Unisinos por el apoyo logístico. Rodolfo Aredes y Eric Gomez-Hasselrot colaboraron en las tareas realizadas en el Insugeo.

**Referencias**

Allen, G.P. y Posamentier, H.W. (1993): *J. Sed. Petrol.*, 63, 378-391.  
 Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. y Boyd, R. (1992): *J. Sed. Petrol.*, 62, 1130-1146.  
 Holz, M. (1987): *Acta Geologica Leopoldensia* 25, 65-104.  
 Holz, M. y Dias-Flor, M.A. (1984): *Anais Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, 993-1006.  
 Lavina, E.L. y Lopes, R. da C. (1987): *Paula-Coutiana*, 1, 51-103.

Lavina, E.L., Nowatzki, C.H., dos Santos, M.A.A. y Leão, H.A. (1985): *Acta Geologica Leopoldensia*, 21: 5-75.  
 MacEachern, J.A. y Pemberton, S.G. (1992): En: Pemberton, S.G. (ed.), *Applications of ichnology to petroleum exploration - A core workshop: SEPM, Core Workshop*, 17, 57-84.  
 Pemberton, S.G. y Wightman, D.M. (1992): En: Pemberton, S.G. (ed.), *Applications of ichnology to petroleum exploration - A core workshop: SEPM, Core Workshop*, 17, 141-167.  
 Rahmani, R.A. (1988): En: de Boer, P.L., van Gelder, A. y Nio, S.D. (eds.), *Tide-influenced sedimentary environments and facies*, D. Riedel Publishing Company: 433-471.  
 Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. y Nogueira, A.A. (1974): *Anais Congresso Brasileiro de Geologia*, 2, 41-65.  
 Sheppard, W.W. y Hills, L.V. (1970): Depositional environments, Bearpaw-Horseshow Canyon (Upper Cretaceous) transition zone, Drumheller "Badlands", *Alberta. Bull. Can. Petr. Geol.*, 18, 166-215.  
 Zaitlin, B.A., Dalrymple, R.W. y Boyd, R. (1994): En: Boyd, R., Zaitlin, B.A. y Dalrymple, R. (eds.), *Incised valley systems: origin and sedimentary sequences*, *SEPM Special Publication*, 51, 45-60.