

# CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM SISTEMA FLUVIAL, FORMAÇÃO ITAQUAQUECETUBA, TERCIÁRIO DA BACIA DE SÃO PAULO

Rodrigo ZANÃO <sup>1</sup>, Joel Carneiro de CASTRO <sup>1</sup>, Antonio Roberto SAAD <sup>1,2</sup>

(1) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Avenida 24-A, 1515. Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereços eletrônicos: rzanao@gmail.com; jocastro@rc.unesp.br. (2) Universidade Guarulhos (UnG). Praça Teresa Cristina, 1. Centro. CEP 07023-070. Guarulhos, SP. Endereço eletrônico: asaad@prof.ung.br.

Introdução  
Contexto Geológico  
Sistema Fluvial  
Antigos Sistemas Fluviais – Breve Revisão  
Fácies e Ciclos de Fácies  
Correlação de Perfis Faciológicos  
Considerações Finais  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O presente trabalho tem como objetivo a caracterização geométrica de um sistema fluvial, exemplificado pela Formação Itaquaquetuba. O local de estudo é uma pedreira na cidade de Itaquaquetuba, a 35 km da cidade de São Paulo, e que está inserida no contexto geológico da Bacia de São Paulo. Sistemas fluviais constituem importantes reservatórios de hidrocarbonetos e aqui se busca a caracterização de um análogo para outros reservatórios fluviais do passado. Foram elaborados dez perfis faciológicos verticais em um lance de 200 m (espaçamento de 20 m entre os perfis), com uma altura média de 40 m para cada perfil (espessura). Foram identificados oito ciclos de fácies e a correlação dos perfis possibilitou mapear a distribuição das fácies reservatório e não-reservatório de cada ciclo. Quanto ao sistema deposicional da referida unidade, chegou-se um ambiente fluvial meandrante associado a canais do tipo *ribbon*, implantados em um sistema de leque aluvial.

**Palavras-chave:** Ciclo de fácies, canal meandrante, canal *ribbon*, leque aluvial, geometria de reservatório.

**ABSTRACT** – R. Zanão, J.C. Castro, A.R. Saad – *Geometric characterization of a fluvial system, Itaquaquetuba Formation, Tertiary of São Paulo Basin.* The objective of this study is the geometric characterization of a fluvial system, exemplified by the Itaquaquetuba Formation. The studied area is a quarry located in Itaquaquetuba, distant 35 km from the city of São Paulo, which is inserted in the context of São Paulo Basin. Fluvial systems are important hydrocarbon reservoirs, and this study may contribute with an analogue for ancient reservoirs. It was elaborated ten facies logs along a distance of 200 m (log spacing of 20 m), with a vertical column (thickness) of 40 m for each log. Eight facies cycles, and its lateral chrono-correlation allowed to map the potential reservoir and non-reservoir facies within each cycle. Regarding the depositional model for the studied section, it is assumed an alluvial fan system composed of meandering and ribbon-type fluvial channels.

**Keywords:** Facies cycle, alluvial fan, meandering channel, ribbon channel, sand-body geometry.

## INTRODUÇÃO

A utilização de modelos ou guias exploratórios no desenvolvimento e exploração de hidrocarbonetos tem sido uma prática constante nas pesquisas geológicas aplicadas, em função das incertezas inerentes à natureza do depósito e dos altos custos financeiros envolvidos. Dentre os vários tipos de habitat de hidrocarbonetos, arenitos fluviais constituem importantes reservatórios no Brasil e no mundo, tais como as formações Sergi (Campo Araçás, Bacia do Recôncavo), Açú (Campo Alto do Rodrigues, Bacia Potiguar), Chaunoy, no campo homônimo (Bacia de Paris) e Nahr Umr (campo de Burgan, no Kuwait). Para se compreender o reservatório de subsuperfície, onde os dados são “pontuais”, recorre-se à

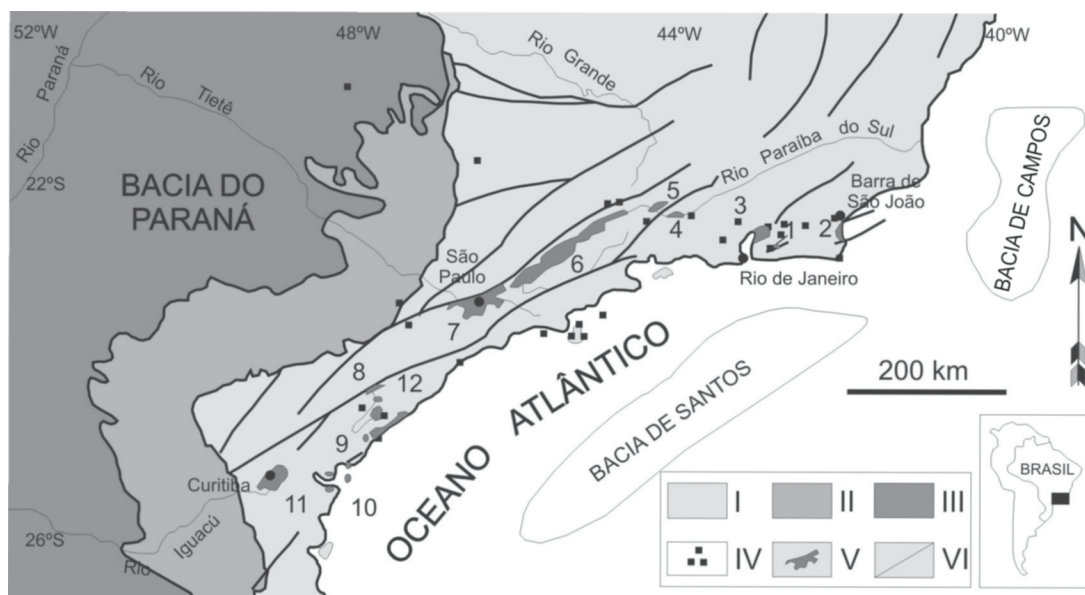
investigação em superfície, onde se busca afloramentos correspondentes à própria unidade reservatório.

Dentro desta ótica, a Formação Itaquaquetuba, aflorante na Bacia Sedimentar de São Paulo, prestou-se de forma inequívoca para esta finalidade. Na localidade de Itaquaquetuba, Região Metropolitana de São Paulo, há um porto de areia, Itaquareia I, no qual esta unidade é explorada para obtenção de areia voltada à construção civil. Numa das frentes de exploração, as litofácies que compõem essa unidade encontram-se expostas de modo contínuo, de tal forma que são possíveis estudos estratigráficos e sedimentológicos em detalhe desse arenito reservatório.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

No cenário geológico cenozóico do Sudeste do Brasil, a Bacia de São Paulo encontra-se inserida no Sistema de Riftes da Serra do Mar, de Almeida (1976), sendo posteriormente nomeado Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) por Riccomini (1989). Esta província estrutural corresponde a uma feição tectônica

paralela à da faixa litorânea, com cerca de 900 km de extensão, alongada e deprimida, de direção ENE. Deste sistema de riftes fazem parte, ainda, as bacias de Curitiba, Taubaté, Resende, Volta Redonda, Itaboraí e Barra de São João, e os grábens de Sete Barras, Cananéia, Guaraqueçaba e Guanabara (Figura 1).



**FIGURA 1.** Contexto geológico regional do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), onde são identificadas onze bacias rifte, sendo a de São Paulo representada pelo número 7. I: Embasamento Pré-Cambriano. II: Rochas sedimentares paleozóicas da Bacia do Paraná. III: Rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral. IV: Rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozóico-cenozóico. V: Bacias cenozóicas do rifte, na qual a Bacia de São Paulo é a número 7. VI: Zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozóico e Cenozóico. Modificado de Riccomini et al. (2004).

A Bacia Sedimentar de São Paulo compreende uma depressão tectônica ovalada com aproximadamente 1000 km<sup>2</sup>, sendo o eixo maior (cerca de 75 km) compreendido entre os municípios de Arujá e Embu-Guaçu, e o menor (cerca de 25 km) situado entre o município de Santo André e o bairro de Santana. A norte, em sua borda retilínea, esta bacia é marcada pelos sistemas de falhas Taxaquara-Jaguari e a sul apresenta contatos irregulares com o embasamento Pré-Cambriano (Takiya, 1997; Riccomini, 1989; Riccomini et al., 2004). As unidades litoestratigráficas presentes na Bacia de São Paulo são: formações Resende, Tremembé, São Paulo e Itaquaquecetuba (área de estudo).

Segundo Coimbra et al. (1983), a Formação Itaquaquecetuba possui os depósitos sedimentares atribuídos a sistema fluvial entrelaçado associado a leques aluviais, de idade pertencente ao intervalo Eoceno-Oligoceno (Melo et al., 1985; Melo et al., 1986; Lima & Melo, 1989). Em sua seção-tipo, localizada no

Porto de Areia Itaquareia I, a Formação Itaquaquecetuba é constituída predominantemente por arenitos grossos arcoseanos, mal a medianamente selecionados, exibindo estratificações cruzadas tabulares e acanaladas, podendo estes estratos conter níveis argilo-siltosos, eventualmente arenosos, de coloração castanha-escuro, ricos em matéria orgânica e apresentando níveis de conglomerado com seixos de quartzo e quartzito bem arredondados (Riccomini et al., 2004).

Com relação aos processos de sedimentação desta unidade, Riccomini et al. (2004) apontam para o fato de que a deposição foi controlada por falhas de direção ENE e NNW, que propiciaram a formação de cunhas clásticas conglomeráticas, de natureza polimítica, oriundas de rochas pré-cambrianas, bem como megaclastos de siltitos e folhelhos supostamente pertencentes à Formação São Paulo. Ainda, segundo estes mesmos autores, nas partes distais das cunhas ocorreriam lamitos arenosos, por vezes seixosos,

intercalados por arenitos maciços finos a médios portadores, por vezes de estruturas almofadadas resultantes de liquefação.

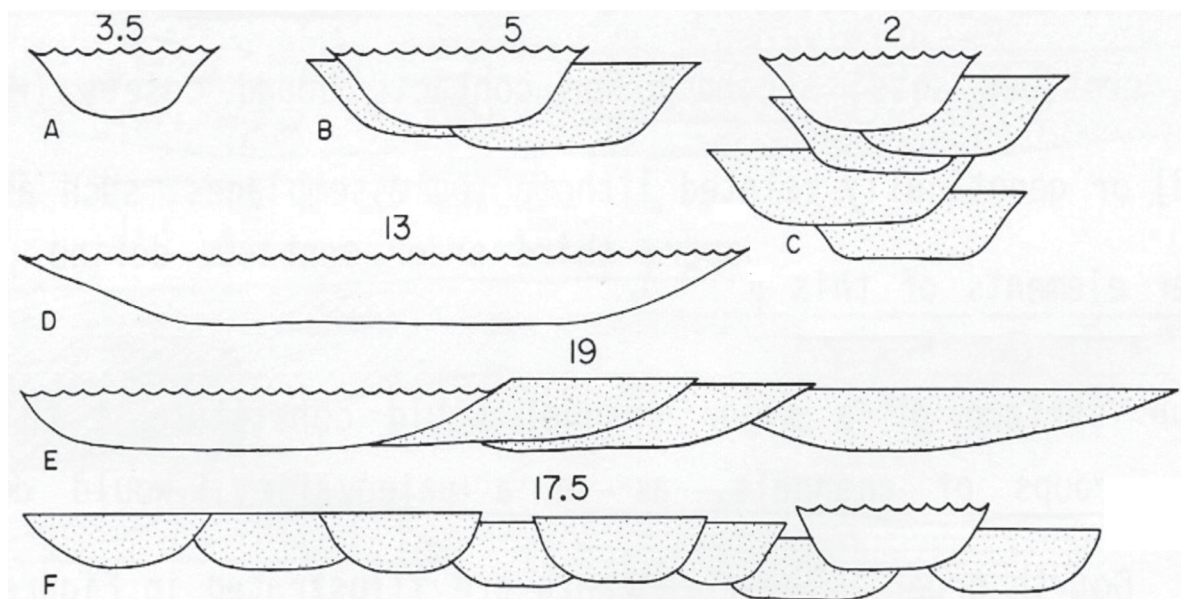
Na Bacia de São Paulo ocorrem depósitos típicos de sistema fluvial entrelaçado, que incluem dunas subaquosas de arenitos arcoseanos, com estratificações cruzadas acanalada e tabular, de grande porte;

conglomerados basais com seixos de quartzo e quartzito arredondados de barras longitudinais de canais ou brechas com fragmentos argilosos relacionados a mudanças na direção de fluxo ao longo do canal (Riccomini et al., 2004). Aparecem, ainda, troncos vegetais fósseis e megaclastos métricos de pelitos com restos vegetais.

## SISTEMA FLUVIAL

Nesta breve revisão, destacaremos os aspectos geométricos dos depósitos fluviais, principalmente no que diz respeito à relação entre largura e profundidade do canal. Segundo Friend (1983), os canais fluviais, conforme sua geometria, podem ser classificados em três tipos: fixos (geometria em forma de *ribbon*), móveis (largos e rasos, com geometria de preenchimento complexa) e em forma de lençol (essencialmente não canalizado). Os canais fixos são estreitos, possuindo razão largura/profundidade menor que 15;

em canais móveis tal razão é maior que 15 e ocorre migração (lateral) de canal. Já os canais em forma de lençol mostram razão largura/profundidade acima de 100. Quanto à relação entre a geometria de um canal ativo individual e a geometria resultado de um preenchimento de canal, os canais fixos podem ser considerados, em geral, com sendo multi-história (*multistory*) (ex.: C na Figura 2), enquanto que em canais móveis predominam modelos multilaterais (ex.: F na Figura 2).



**FIGURA 2.** Relação entre geometria de canal individual ativo e a geometria resultante de um complexo de canais. Números representam a relação largura/profundidade. **A, D:** canais simples. **B, E, F:** complexo de preenchimento de canais largos formados por migração lateral do canal ou com pequena mudança em subsidência contemporânea. **C:** complexo de canais empilhados formados por agradação vertical com relativa estabilidade do canal menor em condições de rápida subsidência (Friend, 1983).

De acordo com Miall (1977), rios entrelaçados são caracterizados pela alta razão largura/profundidade do canal, normalmente maior que 40 e comumente excedendo 300.

Ethridge (1985) identifica três tipos de canais fluviais no passado: (1) sistemas meandranes de textura fina; (2) sistemas de rios entrelaçados e (3) seqüências

de preenchimento de vale (*valley-fill*). No terceiro caso, o autor se refere a vales incisos em contexto plataformal, originados por descida do nível de base ou, mais provavelmente, por subida da área-fonte devido a rejuvenescimento tectônico. O mais conhecido exemplo de vale inciso é o da base do Pensilvaniano (Andar Morrow) no meio-oeste dos Estados Unidos,



formado como uma resposta à orogênese Herciniana. Tais vales fluviais evoluem para estuário, dentro de um contexto transgressivo, mas possuem em comum canais fixos (*ribbons* associados a leque aluvial) e a forma encaixada que acarreta baixos valores da razão largura/profundidade do canal.

Outro exemplo é o Leque Tórtola, situado na Bacia Loranca, Oligoceno-Holoceno da Espanha Central. Martinius (2000) mostra um modelo paleogeográfico com quatro zonas de fácies sendo, no sentido proximal-

distal do leque: zona 1 - canal entrelaçado cascalhento; zona 2 - canal entrelaçado arenoso; zona 3 - canal meandrante; zona 4 - Pequenos canais de baixa sinuosidade, *splays* terminais e lagos. Em painéis estratigráficos, para as porções medial e distal do sistema, o autor situa a proporção de arenitos, respectivamente 29% e 17%, e destaca a ocorrência de canais *ribbon* nas zonas I e II da porção medial e em todas as zonas da porção distal do leque.

### CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA

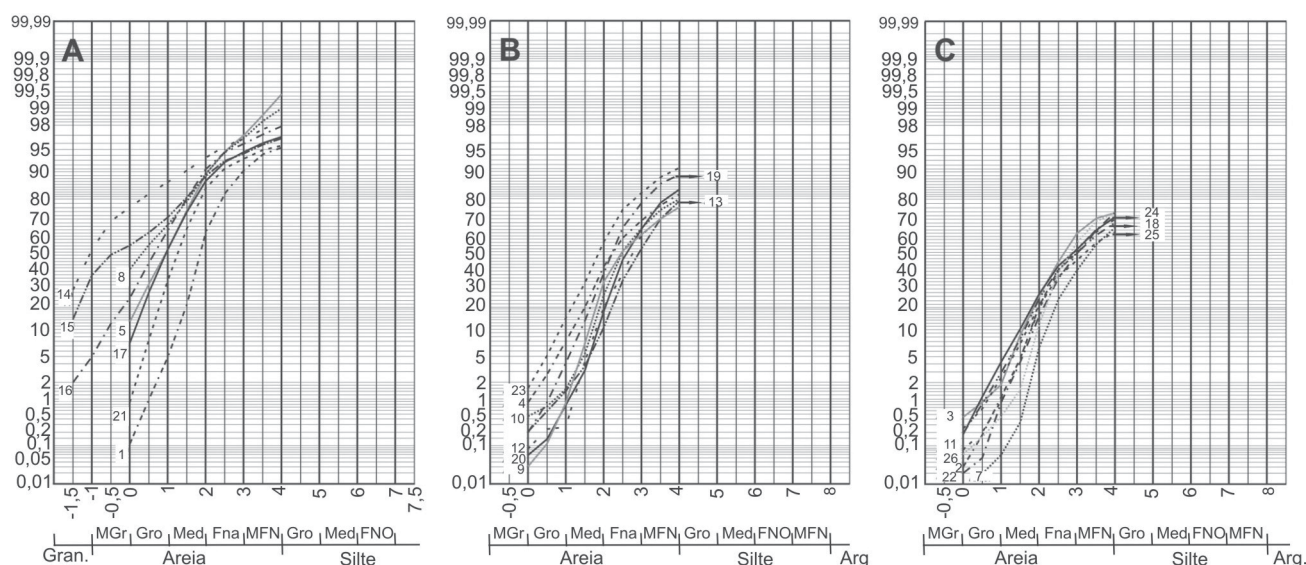
Com os trabalhos de campo foi possível a caracterização de nove litofácies, as quais são, em ordem de granulometria decrescente: 1 - Conglomerado com estratificação cruzada acanalada; 2 - Arenito grosso/conglomerático com estratificação cruzada acanalada; 3 - Arenito fino/grosso com estratificação cruzada acanalada; 4 - Arenito fino/médio com laminação horizontal; 5 - Arenito moderadamente argiloso; 6 - Arenito muito argiloso; 7 - Ritmito arenito - siltito carbonoso, o arenito possui laminação cruzada clino-ascendente, e o siltito é carbonoso (impressões vegetais); 8 - Lamito mal selecionado, com grãos e seixos; 9 - Lamito síltico bem selecionado.

Como um dos objetivos do trabalho é a caracterização das fácies reservatório e selante, as nove litofácies foram divididas em dois grupos. O primeiro grupo, correspondente às litofácies de 1 a 5, representa possíveis rochas reservatórios, enquanto o segundo grupo, representado pelas litofácies de 6 a 9, são não-reservatórios.

Para auxiliar na caracterização das fácies, foram realizadas ensaios de análise granulométrica de 26 amostras coletadas em campo. O método utilizado foi o de peneiramento a úmido e o resultado obtido foram as curvas acumulativas.

As curvas acumulativas revelaram que as amostras coletadas para análise podem ser divididas em três grupos. O primeiro corresponde aos conglomerados e arenitos grossos/médios, representados pelas amostras 1, 5, 8, 14, 15, 16, 17 e 21 (Figura 3A). Esta classe corresponde a amostras com teor de finos (< 62 μ) entre 5 e 0,5% e moda variando de grânulo a areia média. A seleção dos grãos foi obtida por meio do desvio padrão (Ø84 - Ø16)/2 de cada amostra analisada na curva acumulativa. No que diz respeito à seleção dos grãos, a mesma variou de regular/boa (ex. amostra 1) a pobre (ex. amostra 8).

O segundo grupo, caracterizado através das curvas acumulativas, corresponde aos arenitos modera-



**FIGURA 3.** (A): curvas acumulativas das amostras com teor de finos (< 62μ) abaixo de 5%; (B): curvas acumulativas das amostras com teor de finos (< 62μ) entre 9 e 24%. (C): curvas acumulativas das amostras com teor de finos (< 62μ) entre 26 e 38%.

damente argilosos, representados pelas amostras 4, 9, 10, 12, 13, 19, 20 e 23 (Figura 3B). O teor de finos nestas amostras está compreendido entre 9 e 24% e a moda varia de areia muito fina à média. Para esta fácies não foi possível a determinação da seleção utilizando o desvio padrão, pois as curvas acumulativas não atingiam valores de  $\Sigma$  iguais ou superiores a 84; a seleção dos grãos foi obtida através de estimativas e o resultado variou de regular/pobre a regular.

O terceiro e último grupo corresponde aos arenitos muito argilosos, representados pelas amostras 2, 3, 7, 11, 18, 22, 24, 25 e 26 (Figura 3C). Esta classe contém teor de finos que varia de 26 a 38%, enquanto a moda observada variou entre fino e fino+. Uma síntese dos resultados obtidos é mostrada na Tabela 1.

As areias com melhor potencial para serem reservatório correspondem ao grupo 1, devido ao baixo teor de finos (entre 0,5% e 5%), a classe modal superior aos outros dois grupos e a seleção regular na maioria das amostras. Os arenitos moderadamente argilosos podem ser reservatórios de menor qualidade, devido ao teor de finos ser um pouco mais elevado do que no primeiro grupo, a sua classe modal e a seleção regulares. Os arenitos constituintes do terceiro grupo, com teor de finos entre 26% a 38%, não se enquadram como reservatório devido ao excesso de finos, a seleção ruim e a sua classe modal inferior.

Uma analogia entre esses três grupos obtidos com a análise granulométrica e as nove litofácies pode ser realizada utilizando, por exemplo, a classe modal e o teor de finos. O primeiro grupo pode ser associado às litofácies 1, 2 e 3, o segundo com as litofácies 4 e 5 e o terceiro grupo com a litofácies 6. As amostras analisadas foram coletadas ao longo da frente de exploração estudada, estando concentradas principal-

**TABELA 1.** Síntese dos resultados das análises granulométricas.

FÁCIES	AMOS-TRA	MODA	SELEÇÃO	TEOR DE FINOS (<62 $\mu$ ) %	
Arenito fino a grosso a conglomerático	01	M <sup>-</sup>	Regular/Boa	5	0,5 a 5
	05	M <sup>+</sup>	Regular	0,5	
	08	MG <sup>-</sup>	Baixa	0,5	
	14	Grânulos	Regular/Baixa	1,5	
	15	Grânulos	Baixa	3	
	16	G	Regular/Baixa	2	
	17	G <sup>-</sup>	Regular	3	
Arenito moderadamente argiloso	21	M <sup>+</sup>	Regular	4	9 a 24
	23	M <sup>-</sup>	Regular/Baixa	9	
	19	F <sup>+</sup>	Regular	11	
	20	F <sup>+</sup>	Regular/Baixa	16	
	12	MF <sup>-</sup>	Regular	23	
	13	MF <sup>+</sup>	Regular	21	
	04	M <sup>-</sup>	Regular	18	
Arenito muito argiloso Matriz	09	M <sup>-</sup>	Regular	24	26 a 38
	10	MF <sup>+</sup>	Regular	20	
	02	F <sup>+</sup>	Baixa	35	
	03	F	Baixa	26	
	07	F	Baixa	29	
	11	F <sup>+</sup>	Baixa	30	
	18	F	Regular/Baixa	30	
22	F	Regular/Baixa	30		
24	F	Baixa	30		
25	F	Baixa	38		
26	F	Baixa	30		

mente nos perfis 1 e 9 por se tratarem das áreas extremas. Nos demais perfis, as coletas foram dirigidas àquelas fácies que exigiam uma melhor caracterização sedimentológica.

As fácies areno-conglomeráticas, potenciais reservatórios, ocorrem na parte inferior do ciclo fluvial, enquanto as fácies areno-lamíticas, não-reservatório, ocorrem na parte superior.

## CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS DEPÓSITOS FLUVIAIS

Distinguem-se dois tipos de canais em vários dos ciclos observados no campo: um com significativo entalhamento, aqui designado côncavo-plano de acordo com sua geometria, e um segundo tabular.

Os ciclos sedimentares e seqüências cíclicas referem-se a etapas sucessivas de preenchimento sedimentar de uma bacia, que termina com o retorno às condições iniciais. Em termos concretos, os ciclos sedimentares são representados por uma repetição ordenada de dois ou mais termos litológicos (Suguio, 2003).

As fácies fluviais gradam para sedimentos finos, formando perfis verticais de granodecrescência ascendente (em forma de sino). Com isso, são formados ciclos deposicionais que, no presente caso, podem ser característicos do modelo fluvial meandrante.

Entretanto, o depósito fluvial meandrante possui uma base planar, que lhe empresta uma geometria tabular, e não uma base acanalada/entalhada, típica do canal *ribbon*; também, o sistema fluvial meandrante possui, em sua parte superior, siltes com raízes e eventuais *drapes* argilosos, e não os lamitos, inclusive seixosos, do caso em análise (associados a sistema de leque aluvial).

Em compensação, o modelo de canal *ribbon* é classicamente entalhado (Friend, 1983); em sua aplicação no passado, o canal *ribbon* está relacionado a canais associados a leques aluviais (Martinius, 2000).

Assim, no caso da Formação Itaquaquacetuba na área de estudo, a associação de ciclos fluviais de geometria tabular com os do tipo *ribbon* proporciona um arcabouço estratigráfico “bolo-de-camada” para a