

## Assinatura gamaespectrométrica de depósitos fluviais: estudo de caso na Formação Rio do Rasto, Permiano Superior da Bacia do Paraná

*Spectral gamma-ray signature of fluvial deposits: a case study from the Late Permian Rio do Rasto Formation, Paraná Basin, Brazil*

Guilherme Arruda Soweck<sup>1</sup>, Francisco José Fonseca Ferreira<sup>2</sup>, Fernando Farias Vesely<sup>2</sup>, Fabio Berton<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Caixa Postal 19.001 - Jd. das Américas, CEP 81531-990, Curitiba, PR, BR (arruda@ufpr.br)

<sup>2</sup>Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR, BR (francisco.ferreira@ufpr.br; vesely@ufpr.br)

<sup>3</sup>Curso de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR, BR (fabioberton1@yahoo.com.br)

Recebido em 13 de março de 2013; aceito em 11 de junho de 2013

### Resumo

Reservatórios de origem fluvial apresentam elevada heterogeneidade, dificultando sua caracterização em subsuperfície. O estudo de afloramentos análogos, através da combinação de análise de fácies e dados petrofísicos, auxilia no entendimento desses reservatórios em subsuperfície. O objetivo deste trabalho foi determinar as assinaturas gamaespectrométricas de depósitos fluviais da Formação Rio do Rasto em afloramentos da borda Leste da Bacia do Paraná. Perfis gamaespectrométricos foram levantados em duas exposições da unidade, visando: 1) caracterizar as log fácies de uma sucessão composta por alternância de depósitos de canal, planície de inundação e eólicos; 2) definir a variabilidade gamaespectrométrica em depósitos de barra em pontal de carga mista e suas relações com a granulometria e as litofácies; 3) verificar a correlação das assinaturas observadas em campo com perfis de poços situados num raio de dezenas de quilômetros da área de estudo. Os perfis gamaespectrométricos evidenciaram as variações granulométricas dos afloramentos e os distintos elementos deposicionais. Na barra em pontal, há elevada variação lateral nos padrões do perfil, dificultando o rastreamento das superfícies de acreção. O clássico padrão em sino, típico de barras em pontal, é frequente, mas nem sempre é observado, significando que o reconhecimento de depósitos desse tipo em subsuperfície pode ser prejudicado. Apesar das variações nas assinaturas de cada perfil, foram reconhecidas várias log fácies nos poços. O perfil composto construído em campo foi satisfatoriamente correlacionado com o poço localizado mais próximo da área de estudo.

**Palavras-chave:** Depósitos fluviais; Gamaespectrometria de afloramento; Reservatórios análogos; Formação Rio do Rasto; Bacia do Paraná.

### Abstract

Fluvial channel-fill deposits form highly heterogeneous hydrocarbon reservoirs. The study of outcrop analogs can help in the characterization of these heterogeneities, which are usually not detected by subsurface geophysical methods. The aim of this research is to compare outcrop log signatures with grain size trends and depositional elements of the fluvial deposits of the Late Permian Rio do Rasto Formation. A series of vertical gamma-ray logs were assembled in two outcrops in order to: 1) characterize log-facies in a succession composed of alternated flood plain, channel fill and eolian strata; 2) define within-channel spectral gamma-ray variability of a mixed-load composite point bar deposit and its relationship with grain size trends and lithofacies; 3) correlate log signatures observed in the outcrop sections with deep exploratory wells drilled several tens of kilometers from the study area. The results of this study show that gamma-ray logs have good correlation with grain size trends and that different depositional elements have distinct signatures. On the other hand, point bar deposits exhibit strong lateral changes in log signature due variations in grain size and mud content within lateral accretion strata. Although frequent, the classic bell-shaped log motif was not always detected, which means that the amount of fluvial channel-fill deposits recognized in subsurface can be underestimated. Similar log signatures were detected in the boreholes, at least in the closest ones, helping in paleoenvironmental interpretation in the subsurface.

**Keywords:** Fluvial deposits; Gamma-ray logs; Outcrop analogs; Rio do Rasto Formation; Paraná Basin.

## INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo, a gamaespectrometria começou a ser utilizada na década de 1930 como o primeiro método não elétrico de perfilagem de poços (Ellis e Singer, 2008) e, desde então, a detecção da radioatividade natural das rochas é amplamente utilizada na exploração e desenvolvimento dos campos de hidrocarbonetos.

A principal utilização da perfilagem gamaespectrométrica é contribuir para os estudos de argilosidade das unidades estratigráficas, pois os elementos radioativos tendem a se concentrar nos argilominerais. Com a informação da argilosidade é possível utilizar os perfis para definição de litotipos, variações de granulometria, padrões de empilhamento e sequências deposicionais, bem como correlacionar poços e afloramentos (Rieder, 1990).

A definição de padrões ou assinaturas de perfis de raios gama é um dos métodos mais utilizados na análise estratigráfica e caracterização de reservatórios em subsuperfície, onde, na maioria das vezes, não se dispõe de dados diretos (testemunhos). Para isso são utilizados modelos de formatos de curva que refletem tendências de variações de argilosidade típicas de determinados elementos e sistemas deposicionais. No presente trabalho são analisadas as assinaturas gamaespectrométricas de depósitos fluviiais neopermianos da porção superior da Formação Rio do Rasto (Membro Morro Pelado) em afloramentos e poços no Leste de Santa Catarina. A Formação Rio do Rasto é uma das unidades mais bem expostas da Bacia do Paraná, seus afloramentos de grande extensão lateral e vertical favorecem o levantamento de perfis geofísicos.

Depósitos fluviiais constituem importantes reservatórios de petróleo (e.g. McDonald e Halland, 1993; Melvin, 1993; Zhi, 1982; Labrecque et al., 2011), no entanto o reconhecimento da arquitetura fluvial em subsuperfície é tarefa difícil, pois muitas heterogeneidades ocorrem em escalas não detectáveis por dados sísmicos e de perfis de poços. O estudo de afloramentos análogos permite a análise das fácies e da arquitetura deposicional em escala de detalhe, assim como das variações de propriedades petrofísicas. Tais informações podem ser utilizadas na formulação de modelos preditivos aplicáveis aos reservatórios em subsuperfície.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Gamaespectrometria

Os raios gama ( $\gamma$ ) são ondas eletromagnéticas e por isso apresentam alta penetratividade. A gamaespectrometria registra a energia dos raios gama em elétronvolts (eV), onde 1 eV é definido como a energia adquirida por um elétron

no decaimento através de uma diferença de potencial de um volt (Parasnis, 1997). Entretanto, em gamaespectrometria, são utilizadas unidades derivadas, como milhões de elétronvolts (MeV), ou quiloelétronvolts (keV).

As janelas de aquisição da contagem total (CT), potássio, urânio e tório são medidos através de energias de radiações de núclídeos específicos (Tabela 1). O potássio tem seu próprio núclídeo de emissão de radiação gama natural, já o urânio e o tório não emitem radiação gama natural e têm como núclídeos o bismuto e o tálio, respectivamente.

### K, U e Th

Traços de minerais radioativos são encontrados em todos os tipos de rochas, além de rios, hidrocarbonetos e matéria orgânica. Dos elementos detectados pelo gamaespectrômetro, o K é o de maior ocorrência (medido em %), enquanto que o Th e o U são medidos em ppm.

O K é encontrado em sais, micas, feldspatos e minerais do grupo das argilas (Rider, 1990; Ellis e Singer, 2008). Os feldspatos que apresentam K em sua composição são o microclínio (16% de K) e o ortoclásio (14% de K). As argilas com mais potássio em sua composição são a illita e a glauconita, enquanto que a esmectita e a caolinita apresentam pouco ou nenhum K. Os sais de potássio também são fontes de radiação e chegam a apresentar valores elevados de raios gama, como é o caso da silvita (mais de 50% de K).

O tório e o urânio ocorrem em estruturas cristalinas, normalmente, substituindo outros elementos de mesma carga e raio semelhante. Nas rochas sedimentares é comum encontrar o Th e o U em substituições em minerais pesados (monazita, zircão, esfeno, apatita), mas o fator predominante que controla a presença dos radionúclídeos é sua adsorção pela matéria orgânica e pelas argilas. As argilas e, principalmente, a matéria orgânica, adsorvem os íons de K, Th e U. Com isso, os folhelhos com matéria orgânica apresentam elevada radioatividade.

A variação da concentração dos elementos descritos acima define os padrões de assinatura gamaespectrométrica. A Figura 1 apresenta os principais litotipos sedimentares e suas assinaturas respectivas em unidades API, Th em ppm, U em ppm e K em %.

**Tabela 1.** Núclídeos medidos pelo gamaespectrômetro e suas respectivas faixas de energia (Minty et al., 1997).

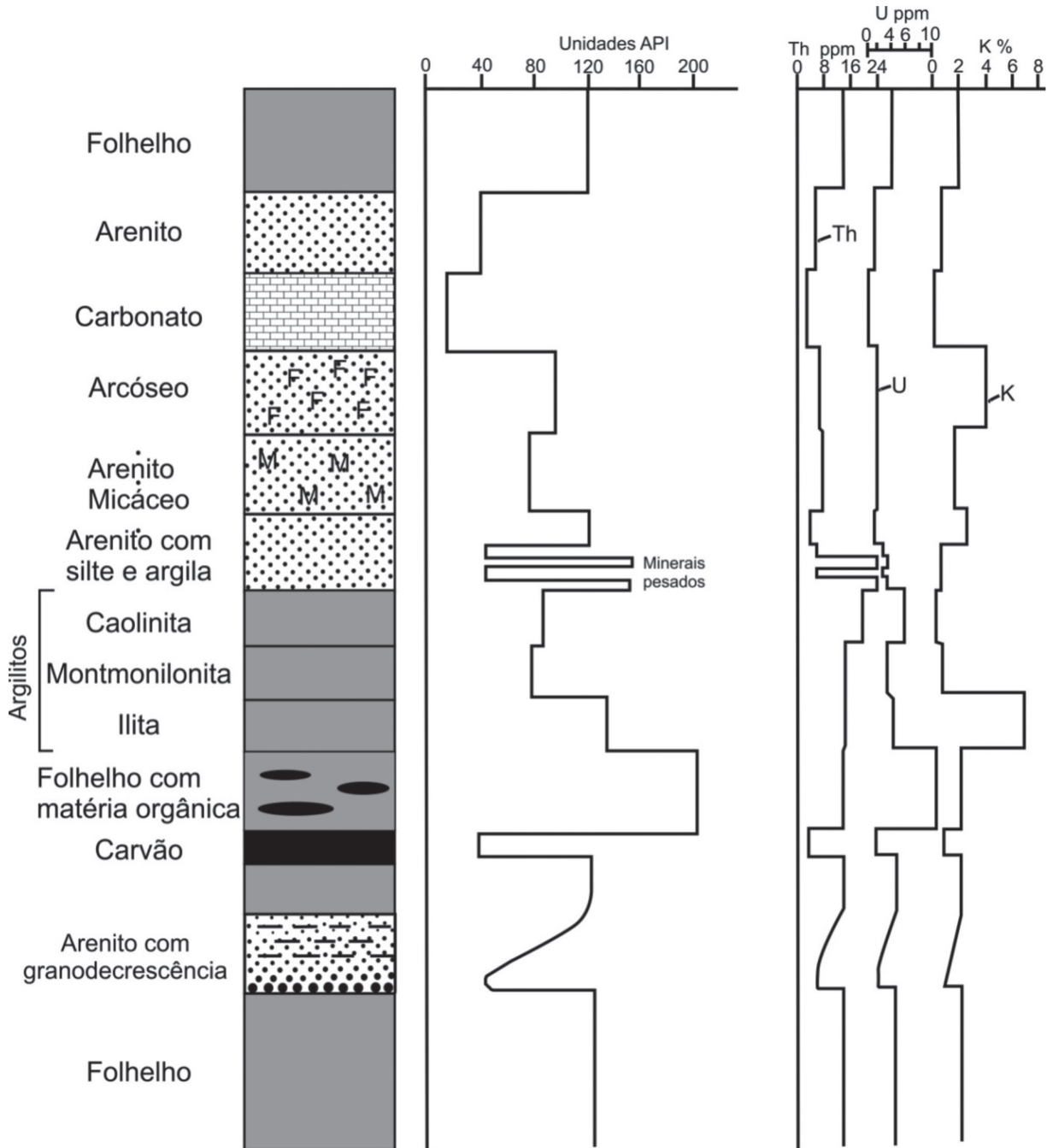
Janela	Núclídeo	Faixa de energia (MeV)
Contagem total	-	0,4 – 2,81
Potássio	<sup>40</sup> K	1,370 – 1,570
Urânio	<sup>214</sup> Bi	1,666 – 1,860
Tório	<sup>208</sup> Tl	2,410 – 2,810

Considerando que os dados de radiação gama dos poços estudados foram apenas adquiridos em unidades API (unidade empírica de radiação gama utilizada em perfis radioativos de poços pelo American Petroleum Institute – API/USA, Sheriff, 1999; Duarte, 2003), a correlação aos dados de superfície foi feita apenas para o referido canal (CT - ppm de Ueq para os dados de superfície e unidades API para os dados de subsuperfície). A definição de 200 unidades API está relacionada a uma formação

(folhelho), artificialmente radioativa, construída pela Universidade de Houston (Texas), a qual contém aproximadamente 4% de K, 24 ppm de Th e 12 ppm de U (Ellis e Singer, 2008).

*Gamaespectrometria de afloramentos*

Uma das primeiras publicações sobre levantamento de perfis gamaespectrométricos em afloramentos é a

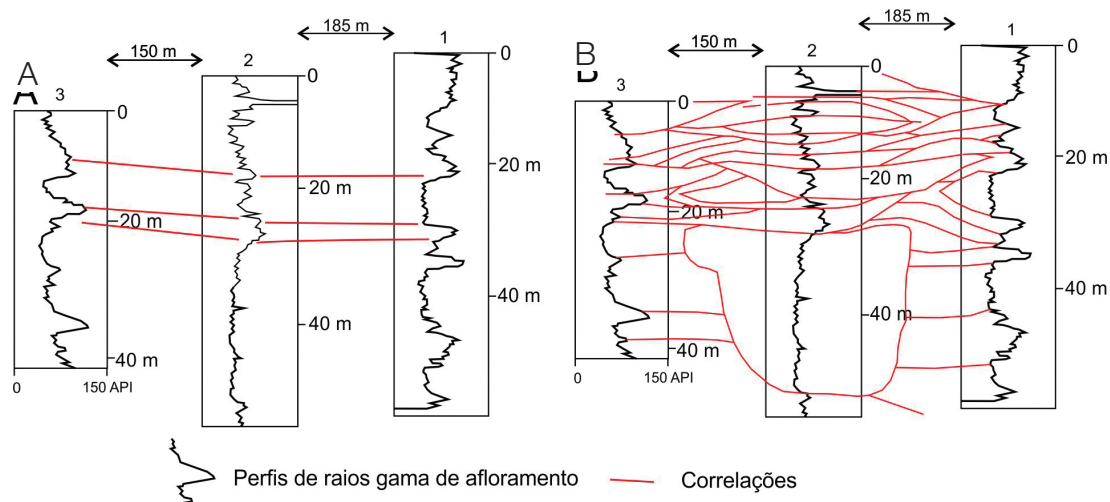


**Figura 1.** Assinaturas gamaespectrométricas típicas dos principais litotipos sedimentares (adaptado de Rider, 1990).

de Chamberlain (1984). O autor constatou que os perfis de afloramentos mostram padrões claros de variação de granulometria e alguns intervalos podem ser facilmente correlacionados com dados de poços das mesmas unidades. O autor ainda afirma que a perfuração em afloramentos pode ajudar a resolver problemas de correlação de poços.

No início da década de 1990, outros autores, com base no trabalho de Chamberlain (1984), realizaram levantamentos em afloramentos verificando a aplicabilidade dos perfis e as melhores formas de realizar as medições. trocar por Talwar et al. (1992), levantando perfis em rochas jurássicas no litoral Sul da Inglaterra, verificaram a boa correlação de unidades de folhelhos, mas notaram também dificuldade na correlação de unidades arenosas devido às heterogeneidades identificadas. Van Buchem et al. (1992) tiveram como objetivo a verificação de correlação de afloramentos levantados na costa Leste da Inglaterra com perfis de poços. Os autores constataram boas correlações com os perfis gamaespectrométricos de poços e conseguiram ainda subdividir as fácies de lamitos nos perfis de afloramentos, mostrando correlação direta com a divisão estratigráfica da unidade estudada.

Slatt et al. (1992) verificaram a boa relação entre a granulometria e a resposta dos raios gama em afloramentos do Pensilvaniano do Estado do Arkansas (EUA) e observaram que a gamaespectrometria em afloramentos ajuda objetivamente a melhorar a interpretação e correlação de dados de poços nos casos onde a variação lateral das fácies é maior que o espaçamento entre os poços. Na Figura 2 pode-se notar as diferenças entre as interpretações de perfis de um mesmo afloramento, usando apenas as informações dos perfis (Figura 2A) e considerando as complexidades analisadas no afloramento (Figura 2B).



**Figura 2.** (A) Correlação de perfis gamaespectrométricos de um afloramento apenas com informações do perfil; (B) Interpretação dos perfis com as informações obtidas no afloramento (Slatt et al., 1992).

#### *Aplicação da gamaespectrometria em depósitos fluviais*

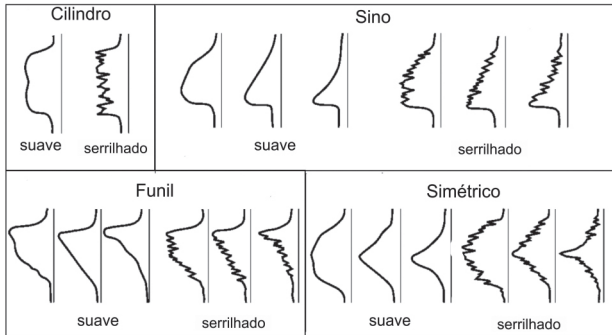
A correlação estratigráfica de depósitos fluviais é difícil utilizando apenas dados convencionais de poços (Hampson et al., 2005), pois o ambiente fluvial apresenta um elevado grau de heterogeneidade interna e a continuidade lateral das camadas é, muitas vezes, menor que o espaçamento entre os poços (Evans et al., 2007). Por esses motivos, a análise de afloramentos auxilia a interpretação da arquitetura fluvial.

Os estudos baseiam-se nos padrões de assinatura dos perfis gamaespectrométricos associados às variações de granulometria. Slatt (2006) descreveu quatro padrões principais reconhecidos nos perfis: 1 – padrão cilindro, que representa camadas uniformes com menores valores de radiação e sem variações verticais de granulometria; 2 – em sino, que significa a diminuição da granulometria para o topo; 3 – em funil, representando aumento de granulometria; 4 – padrão simétrico com diminuição gradual da radioatividade até atingir um pico mínimo seguido por um aumento gradual de radioatividade (Figura 3).

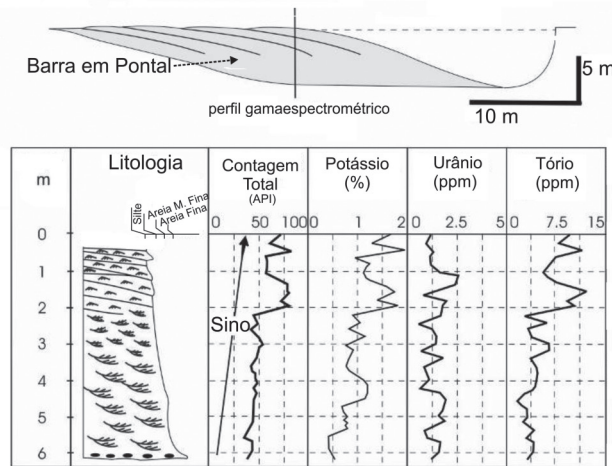
Hornung e Aigner (1999) e Evans et al. (2007) verificaram que não é possível diferenciar fácies a partir de assinaturas gamaespectrométricas, mas os perfis podem ajudar a identificar os elementos deposicionais que apresentem variações na concentração interna de lama. North e Boering (1999) afirmaram que não é possível definir ambientes deposicionais continentais através da gamaespectrometria, pois há muitas sobreposições entre as litofácies eólicas e fluviais. Evans et al. (2007) atentaram para a verificação de minerais radioativos nas camadas de arenitos, que podem alterar a interpretação dos dados gamaespectrométricos.

A diferenciação de certos elementos deposicionais com base nas respostas gamaespectrométricas foi proposta por Aigner et al. (1995), que reconheceram canais fluviais

proximais e distais nos perfis. Hornung e Aigner (1999) distinguiram assinaturas típicas de canais com carga de fundo, suspensa e mista, devido às variações na quantidade de argila. Martinius et al. (2002) apresentaram assinaturas radioativas espectrais para depósitos de barras em pontal (Figura 4), onde se observa que o padrão em sino é melhor representado nos espectros do Th, do K e da CT.



**Figura 3.** Principais assinaturas de perfis de raios-gama (Slatt, 2006)



**Figura 4.** Resposta de perfis gamaespectrométricos para uma barra em pontal (adaptado de Martinius et al., 2002).

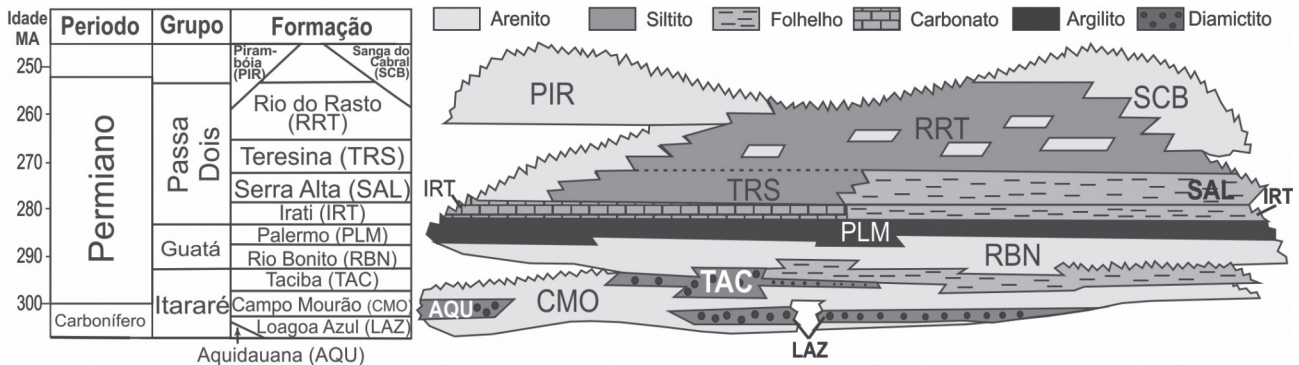
**CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL**

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica de idade paleozoica-mesozoica com início da sedimentação no Neo-Ordoviciano e evolução até o Neo-Cretáceo (Milani et al., 2007). Apresenta uma área de cerca de 1,5 milhões de km<sup>2</sup> englobando a porção Meridional do Brasil, o Paraguai Oriental, o Nordeste da Argentina e o Norte do Uruguai. Grande parte das rochas se depositou durante o Paleozoico, no contexto do paleocontinente Gondwana, registrando a sua história com transgressões e regressões marinhas. Os estratos mesozoicos já não apresentam deposição marinha e, diferentemente do Paleozoico, apresentam grandes espessuras de rochas ígneas extrusivas, reflexo da ruptura do continente Gondwana.

A estratigrafia da Bacia do Paraná pode ser dividida em seis superseqüências ou seqüências de segunda ordem (Milani, 1997), todas limitadas por discordâncias regionais: Ordovício-Siluriana, Devoniana, Permocarbonífera, Triássica, Jurássica-Eocretácea e Neocretácea, cada uma depositada durante uma fase de subsidência que permitiu criação de espaço de acomodação.

O Grupo Passa Dois integra a Superseqüência Permocarbonífera juntamente com os Grupos Itararé e Guatá (Figura 5). Esse grupo engloba, da base para o topo, as formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto. A Formação Rio do Rasto envolve ambientes continentais lacustre, fluvial e eólico, gradando no topo, segundo a opinião de Milani et al. (2007), para os arenitos predominantemente eólicos da Formação Piramboia. A Formação Rio do Rasto é dividida nos membros Serrinha (basal) e Morro Pelado (superior). Os afloramentos estudados neste artigo estão localizados no intervalo estratigráfico referente ao Membro Morro Pelado, onde predominam fácies fluviais.

A idade da Formação Rio do Rasto é considerada por Milani et al. (1994) como do Permiano Superior e início do Triássico. Entretanto, na mais recente carta estratigráfica da Bacia do Paraná, Milani et al. (2007) posicionam a Formação Rio do Rasto inteiramente no Permiano Superior.



**Figura 5.** Carta estratigráfica da superseqüência carbonífera-permiana da Bacia do Paraná (adaptado de Milani et al., 2007).

A Formação Rio do Rasto apresenta contato transicional na base com a Formação Teresina (Schneider et al., 1974; Rohn, 1994; Warren et al., 2008) e entre seus membros (Orlandi Filho et al., 2006). A natureza do contato superior com a Formação Piramboia não é unânime na literatura. Schneider et al. (1974) descreveram um contato erosivo enquanto Mendes (1984), Milani et al. (2007) e Warren et al. (2008) definem o contato superior da Formação Rio do Rasto como transicional.

O Membro Serrinha apresenta na base camadas de arenitos finos bem selecionados intercalados a siltitos e argilitos com geometria tabular com um aumento de arenitos em direção ao topo (Warren et al., 2008). As estruturas identificadas nos arenitos e siltitos são laminações cruzadas, plano-paralelas, *wavy* e *flaser*, ondulações, estratificação *hummocky*, estratificações cruzadas planares a acanaladas, além de presença de níveis pelíticos com intensa bioturbação e gretas de ressecamento.

O ambiente de sedimentação do Membro Serrinha é definido por Rohn (1994) como predominantemente lacustre com ondas de tempestade e início de rios efêmeros na porção mais superior, indicando tendência de aridização. Ainda segundo a autora, o membro apresenta a primeira evidência concreta da diminuição da salinidade com o aparecimento de espécies que indicariam um ressecamento de grandes áreas seguido por inundações.

O membro Morro Pelado é caracterizado por arenitos finos lenticulares ou lobados, lateralmente interdigitados com siltitos e argilitos vermelhos, podendo ser encontrados fósseis de plantas e vertebrados (Schneider et al., 1974, Warren et al., 2008). Os arenitos apresentam estratificações cruzadas acanaladas e tabulares e laminações plano-paralelas, enquanto que os sedimentos mais finos apresentam ondulações de corrente indicativas de fluxo aquoso.

O ambiente deposicional do Membro Morro Pelado é definido inicialmente como predominantemente lacustre com barras de desembocaduras deltaicas (Warren et al., 2008), em direção ao topo o membro começa a apresentar feições de exposição subaérea e início de aridização com pequenos corpos aquosos cercados por áreas emersas com rios e dunas eólicas (Rohn, 1994; Warren et al., 2008). Trabalhando no Membro Morro Pelado, numa área que abrange o presente trabalho, Warren et al. (2008) identificaram elementos deposicionais lacustres, desérticos e fluviais, incluindo barras em pontal.

## MÉTODOS

Foram estudados dois afloramentos com boa continuidade lateral e vertical, abrangendo o intervalo de exposição do Membro Morro Pelado (Figura 6). O afloramento 1

localiza-se na margem da BR-282, próximo à localidade de Bocaina do Sul, e expõe formas de acreção lateral fluviais. O afloramento 2 é uma seção situada na BR-470, entre os entroncamentos com a SC-114 e a BR-116, onde ocorre alternância de fácies eólicas e fluviais, as últimas incluindo depósitos de canal e de planície de inundação. Para a correlação com dados de superfície, foram utilizados perfis de raios gama de seis poços próximos aos afloramentos estudados e que abrangem o intervalo de interesse (Figura 6).

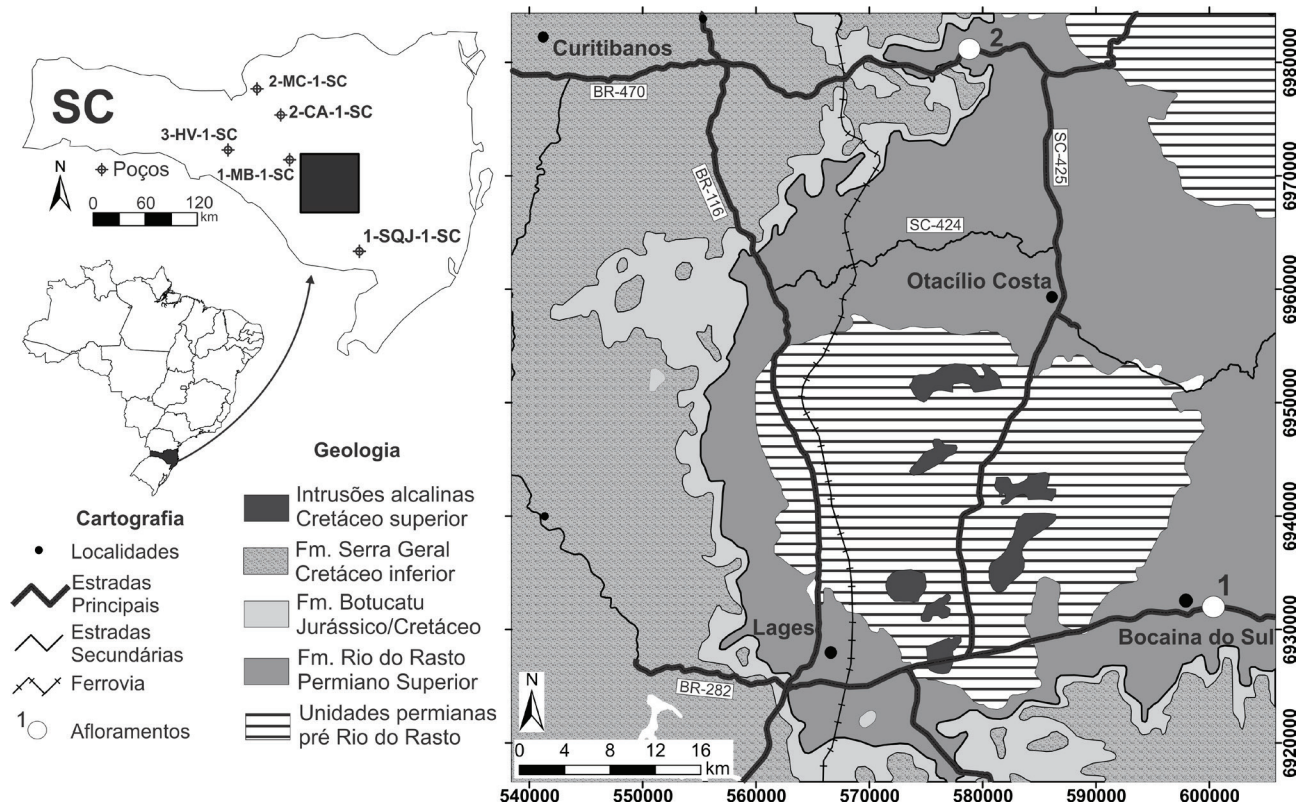
Nos afloramentos estudados foram descritas as litofácies e interpretados os elementos deposicionais e superfícies limitantes. Foram identificadas sete litofácies cuja classificação foi feita a partir da nomenclatura de Miall (2006) com base na granulometria e estruturas sedimentares (Tabela 2).

Os perfis gamaespectrométricos foram levantados com intervalo de amostragem de 15 cm. O tempo de aquisição de cada medida foi de 30 s. Este tempo foi definido através da análise da metodologia descrita em diversos trabalhos onde se verificou o uso de tempo de 10 s até cerca de 5 minutos, mas sempre com resultados satisfatórios (e.g. North e Boering, 1999; Hadley et al., 2000; Ruf e Aigner, 2004; Ferreira et al., 2010).

Concomitantemente à amostragem gamaespectrométrica foram levantados perfis estratigráficos verticais de detalhe com o objetivo de comparar as variações granulométricas e de litofácies com as respostas gamaespectrométricas. Foram levantados sete perfis no afloramento 1, ao passo que no afloramento 2 foi construído um perfil composto que abrange o mesmo nível estratigráfico do afloramento 1.

O equipamento utilizado foi o gamaespectrômetro portátil GS-512, de fabricação tcheca (Geofyzika), pertencente ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFRP). O aparelho é um contador de cintilação que possui um cristal (iodeto de sódio ativado a tálio) na base e cintila na presença de raios gama. A cintilação gerada por esse cristal é detectada por um foto-catodo que emite elétrons, os quais são multiplicados gerando uma corrente para um circuito externo que realiza as medições. As medidas são registradas em quatro intervalos de energia de raios gama denominados de ROIs (*regions of interest*) que equivalem às energias de K, eU e eTh e contagem total (CT). A partir da calibração prévia do aparelho (Becegato e Ferreira, 2005) os dados das ROIs (em cps) foram convertidos em teores: ROI1, contagem total (CT) em ppm de urânio equivalente (Ueq); ROI2 em % de K; ROI3 em ppm de urânio e ROI4 em ppm de tório.

Para verificar a qualidade da calibração, foram elaborados perfis comparativos e gráficos de correlação dos dados obtidos em contagens por segundo (cps) e em concentrações em um dos perfis levantados (Figura 7). A CT apresenta índice de correlação igual a 1, mostrando que



**Figura 6.** Mapa geológico da área de estudo indicando a localização dos afloramentos estudados (modificado de CPRM, 2004) e dos poços utilizados na correlação.

**Tabela 2.** Fácies sedimentares identificadas de acordo com a codificação de Miall (2006).

Fácies	Descrição
Fm	Argilitos e siltitos maciços
Fh	Argilitos e siltitos com laminação plano-paralela
Sm	Arenitos finos, com baixa a moderada maturidade e maciços. Podem ocorrer intraclastos de argila
Sh	Arenitos finos a médios, com a baixa a moderada maturidade, com estratificação plano-paralela
St	Arenitos finos a médios de baixa a moderada maturidade, com estratificação cruzada acanalada
Sp	Arenitos finos a médios de baixa a moderada maturidade, com estratificação cruzada tabular
H	Camadas heterolíticas com estruturas geradas por correntes subaquosas: ondulações, <i>climbing ripples</i> , <i>wavy</i> , <i>linsen</i> e <i>flaser</i>

a calibração está correta e os dados são representativos. Os canais do K e do eTh mostraram índices de correlação de 0,98 e 0,99, respectivamente, também sendo considerados satisfatórios. O gráfico do eU foi o que apresentou o menor índice de correlação (0,59), evidenciando uma

dispersão relativa que pode estar associada a problemas na calibração do instrumento ou à alta mobilidade do urânio.

Finalmente, as medidas foram plotadas em perfis gamaespectrométricos semelhantes aos perfis de poços com valores de profundidade no eixo das ordenadas e os teores no eixo das abscissas.

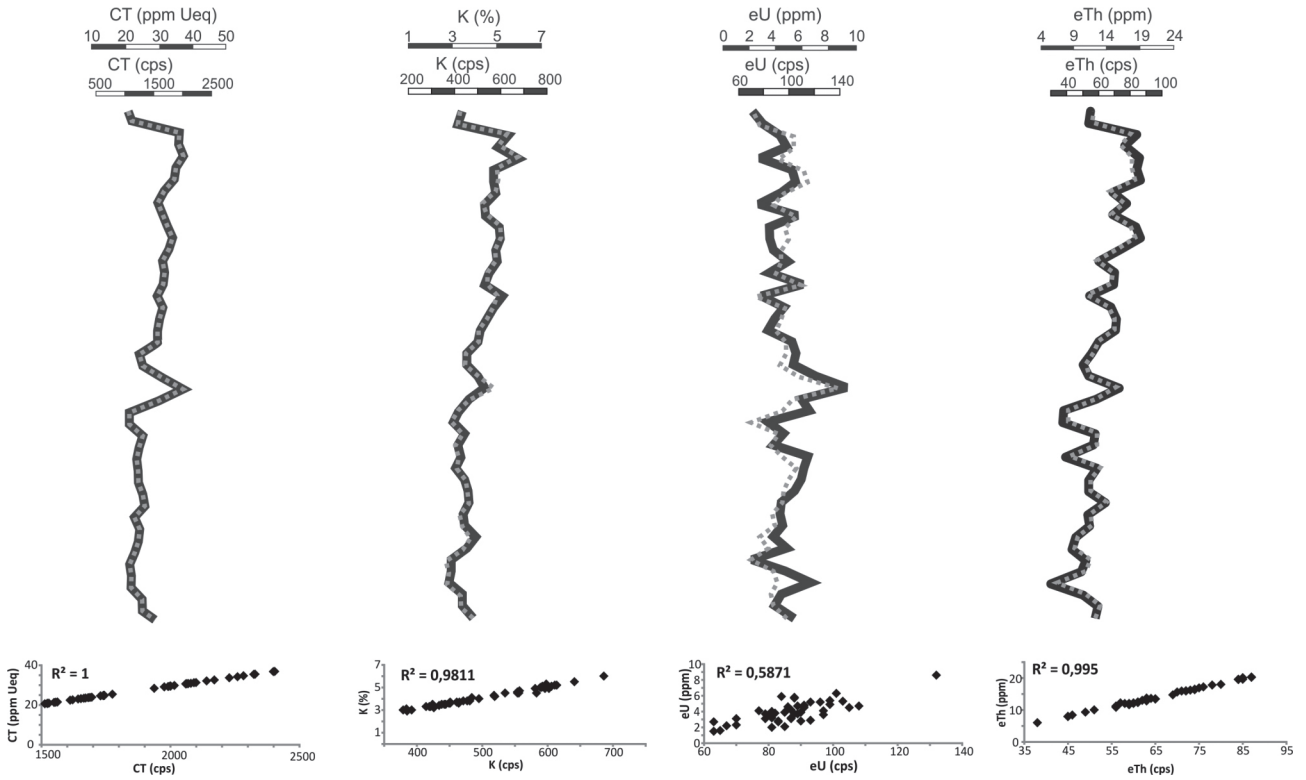
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Perfis gamaespectrométricos

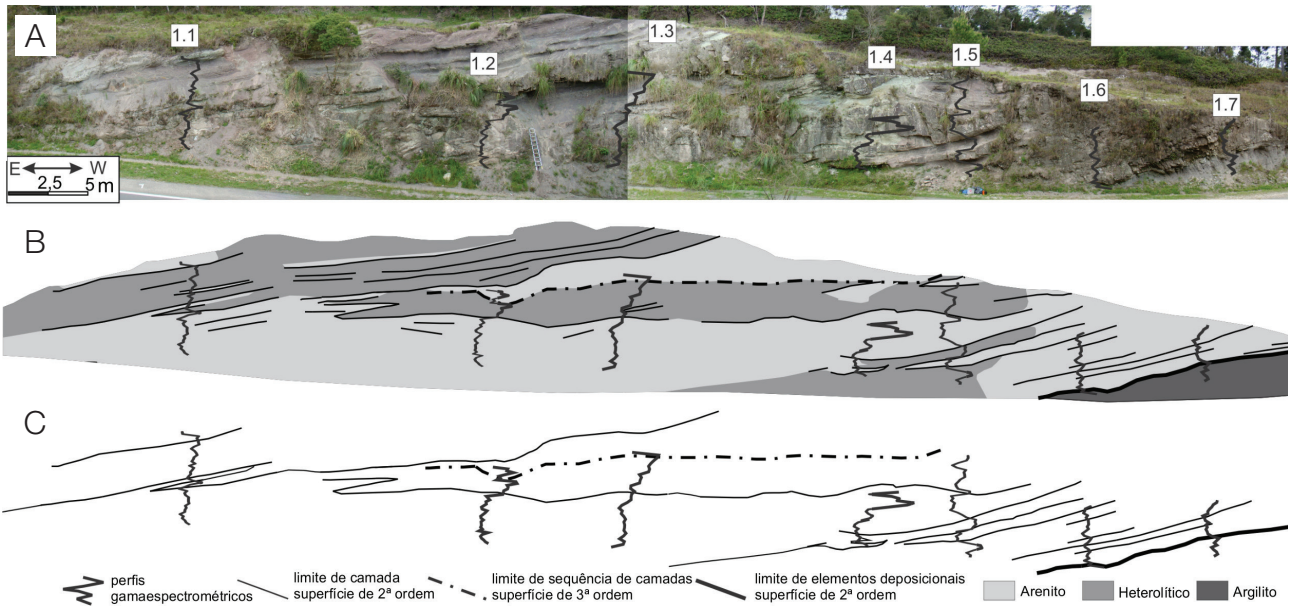
#### Afloramento 1

O afloramento 1 constitui uma barra em pontal composta de carga mista, caracterizada por intercalações de arenitos (fácies St e Sp) e fácies heterolíticas (Figura 8A). As fácies estão dispostas em camadas com acreção lateral, elemento deposicional típico de rios de alta sinuosidade (meandrante). Diversas superfícies limítrofes foram identificadas no afloramento (Figuras 8B e C), classificadas em três ordens de hierarquia de acordo com escala Miall (1988).

Sete perfis gamaespectrométricos (1.1 a 1.7, Figura 8A) foram levantados ao longo da extensão do afloramento com o intuito de verificar variações verticais e laterais



**Figura 7.** Perfis de correlação dos dados gamaespectrométricos em concentração (linhas contínuas) e em cps (linhas tracejadas).



**Figura 8.** (A) Fotografia do afloramento 1 com sobreposição dos perfis gamaespectrométricos. (B) Interpretação do afloramento de acordo com os litotipos e superfícies limitrofes. (C) Interpretação das superfícies sobreposta aos perfis verificando a variação lateral das assinaturas radioativas ao longo do afloramento.



da assinatura gamaespectrométrica na barra em pontal. Os dados das concentrações de CT, K, U e Th podem ser visualizados na Tabela 3, que apresenta, em geral, concentrações menores nas fácies arenosas. Em primeira análise, pode-se observar que os perfis possuem boa correlação com a sucessão vertical de fácies devido a sua sensibilidade ao teor de argila.

Os perfis gamaespectrométricos de contagem total correlacionam-se, de forma geral, com as variações granulométricas verificadas (Figura 9). O perfil de CT é semelhante aos das concentrações do eTh e do K, com exceção do perfil 1.4, que apresenta elevados teores de eU. O K e o eTh correspondem melhor à curva de CT e, respectivamente, às variações granulométricas registradas no afloramento.

O baixo índice de correlação dos dados do eU em ppm e cps (Figura 7) obtido durante a verificação da calibração do aparelho pode ser um dos motivos da falta de correlação com as demais variáveis dos perfis levantados. Os perfis do urânio apresentam padrões serrilhados sem assinatura definida.

Nos perfis 1.2 e 1.4 (Figura 9) foram registrados valores elevados de eU com máximos de 18 ppm e 50 ppm, respectivamente, enquanto que nos outros perfis o maior valor é 9 ppm. Essas anomalias abrangem cerca de 1 metro em cada perfil e não foram reconhecidas em nenhum outro ponto dos demais perfis. No caso do perfil 1.4, os valores ultrapassam cerca de cinco vezes a escala utilizada. Estes valores de eU se refletem na curva de CT, como demonstra a Figura 9.

Anomalias de urânio são comuns em arenitos e podem estar associadas a minerais pesados que se acumulam durante a deposição ou a depósitos de urânio epigenético em *fronts* de oxi-redução. É importante salientar que, quando não se dispõe de perfis espectrais (como é o caso da maioria dos poços da Bacia do Paraná), esses picos são muitas vezes interpretados como aumento de argilosidade, o que dificulta a correlação estratigráfica. Isso demonstra que as curvas de CT, Th e K são mais apropriadas para a definição de assinaturas gamaespectrométricas.

Depósitos de canais fluviais de alta sinuosidade apresentam diminuição da granulometria e aumento da argilosidade para o topo, repercutindo num padrão em sino da curva de raios gama. Esse padrão é bem marcado apenas nos perfis 1.1 e 1.3 (Figura 9) e na porção superior do perfil 1.2 (Figura 9). Nos três perfis, a base apresenta-se na forma de cilindro, demonstrando que os arenitos basais têm composição e textura homogênea com sedimentos mais finos no topo aumentando gradativamente os valores de radioatividade.

Os perfis 1.5 e 1.6 (Figura 9), representativos da porção mais basal da barra, mostram assinaturas radioativas uniformes, sem uma tendência clara de variação vertical de argilosidade (padrão cilíndrico serrilhado e suave). No perfil 1.7

(Figura 9), a base de argilito exibe uma assinatura homogênea, enquanto que o arenito apresenta padrão em funil na base até a parte mediana e em sino na porção superior. A presença de valores mais altos na base do canal deve-se à concentração de intraclastos de argila erodidos dos pelitos sotopostos.

As superfícies de segunda ordem são, na sua maioria, bem marcadas em quase todos os perfis gamaespectrométricos, com mudanças rápidas das concentrações de K, eTh e CT ou por variação no comportamento dos perfis, como no perfil 1.2, cuja assinatura em cilindro na camada basal passa para um padrão em sino da camada superior. No perfil 1.5, essas superfícies são evidenciadas através das variações das fácies areníticas e heterolíticas, definindo sucessivos padrões em cilindro no perfil gamaespectrométrico.

A superfície erosiva é interceptada pelos perfis 1.1 e 1.3 (Figura 8), a qual é marcada por uma brusca mudança dos padrões em sino (topo), reflexo da rápida diminuição dos valores de CT associada a arenitos finos que representam novo estágio evolutivo da barra em pontal.

A variação de teores entre os perfis 1.6 e 1.7 é bastante acentuada, mostrando a grande heterogeneidade interna da barra. Isso se deve ao fato de que canais fluviais de carga mista caracterizam-se por alternância entre camadas pelíticas e arenosas como consequência de oscilações da descarga fluvial. Tal variabilidade impacta na recuperação dos reservatórios, pois forma barreiras de permeabilidade internas ao canal.

Os perfis gamaespectrométricos do afloramento 1 mostram que, apesar da variação vertical e lateral das fácies, algumas camadas de arenitos podem ser bem correlacionadas, como é o caso da base dos perfis 1.1, 1.2 e 1.3 (Figura 9), que exibem valores baixos e constantes de K, eTh e CT o que indica baixos teores de argila. O reconhecimento das assinaturas e variações destas respostas gamaespectrométricas numa escala de unidade de fluxo pode auxiliar a compreensão de reservatórios de mesmo ambiente em subsuperfície, onde os dados de poços são espaçados de dezenas a centenas de metros.

#### Afloramento 2

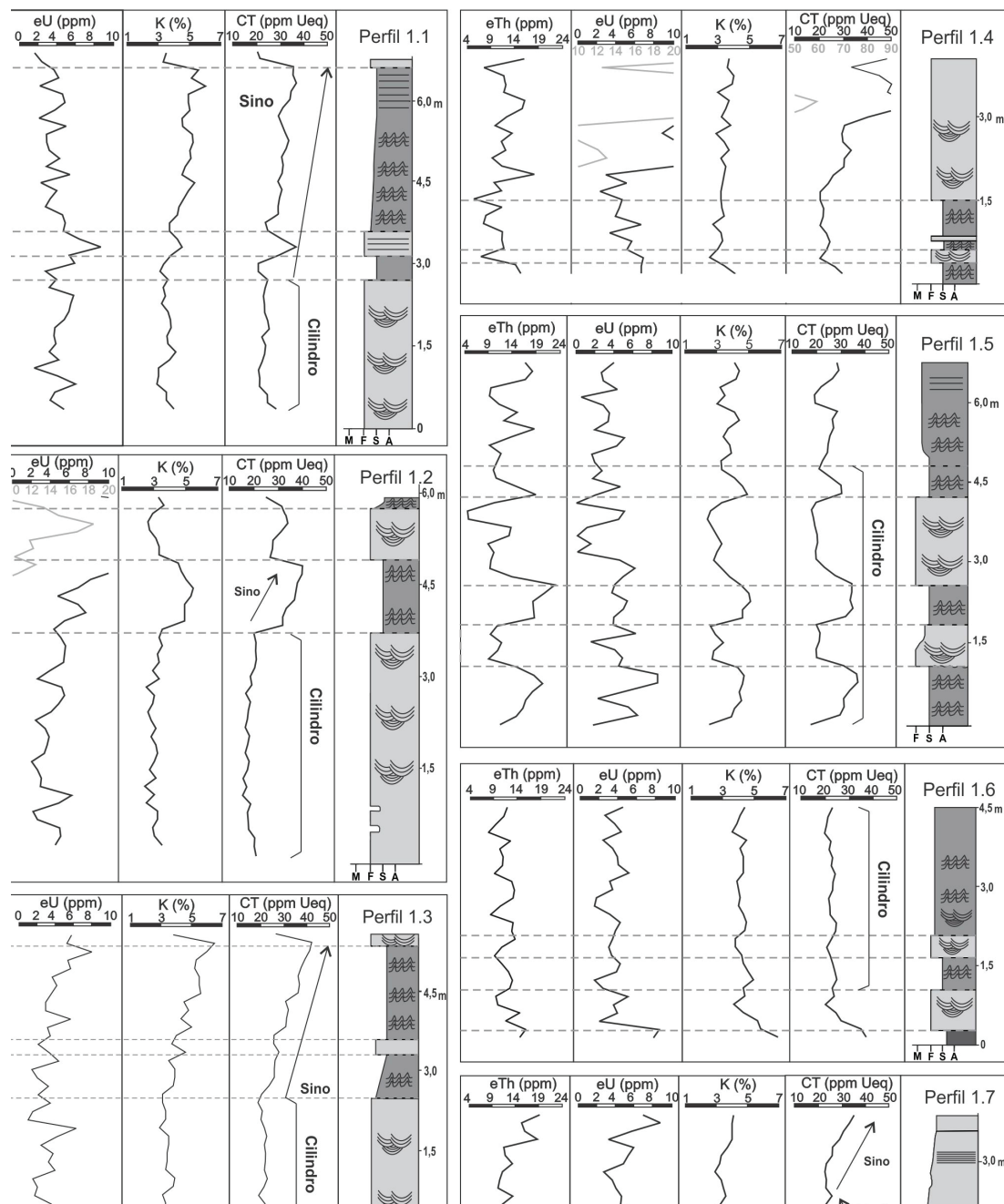
Visando estabelecer critérios mais robustos para a correlação de dados de afloramentos e de subsuperfície do intervalo estudado, perfis gamaespectrométricos foram levantados ao longo de uma seção verticalmente mais contínua na BR-470 (Figura 10).

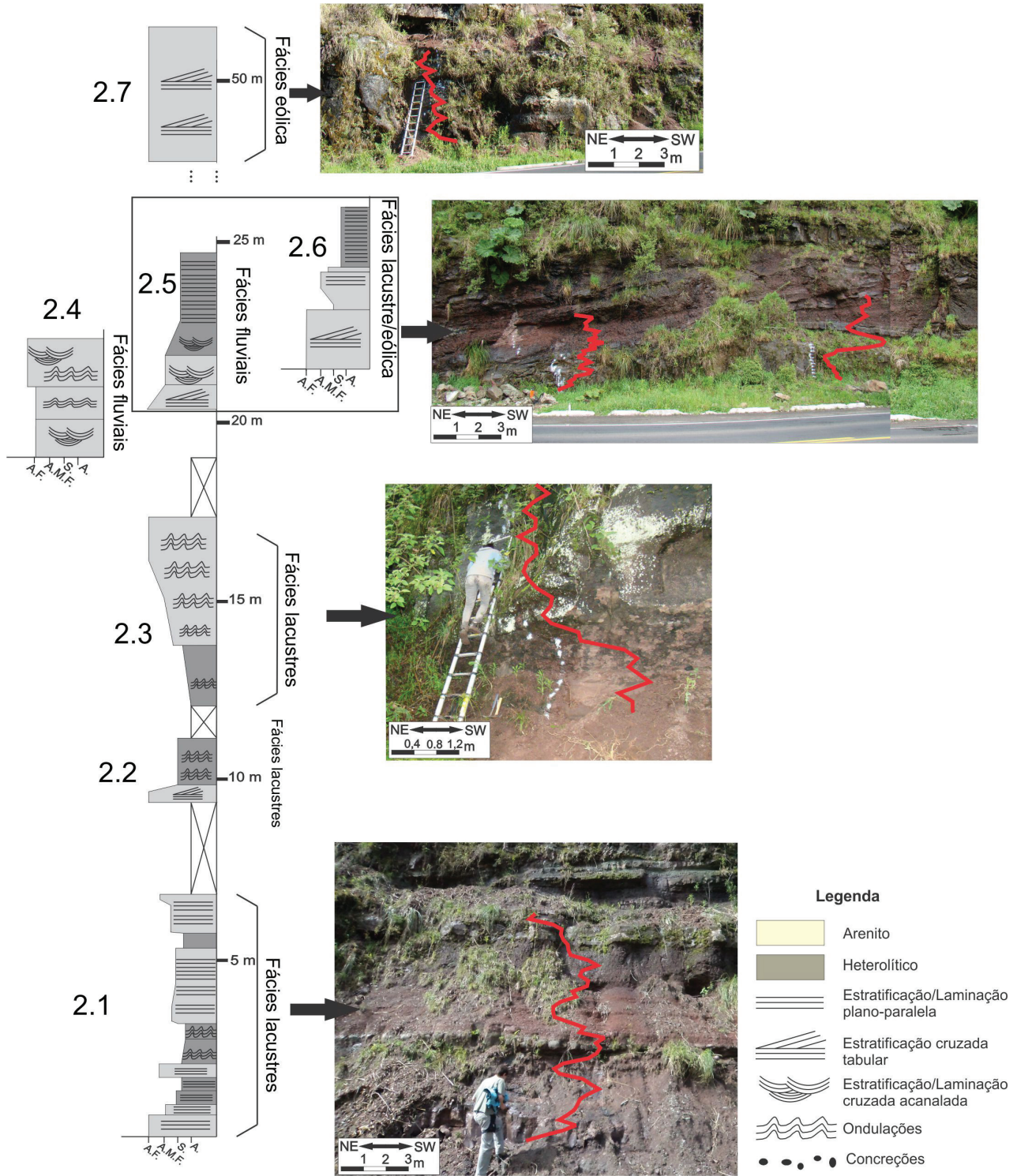
Segundo levantamentos de cunho faciológico efetuados por Schemiko (comunicação pessoal), a seção da BR-470 exibe, além de fácies fluviais de canal e planície de inundação, elementos deposicionais eólicos e de deltas lacustres.

Foram levantados sete perfis, os quais foram empilhados de forma composta (Figura 10). Os perfis 2.1, 2.2 e 2.3 (Figura 11) compreendem depósitos de ambiente deltaico, os perfis 2.4 e 2.5 abrangem uma sequência de barras em

**Tabela 3.** Estatística básica das concentrações gamaespectrométricas do afloramento 1 e de suas fácies arenosas e pelíticas.

Elementos	Total				Fácies arenosas				Fácies pelíticas			
	CT	K	U	Th	CT	K	U	Th	CT	K	U	Th
Média	26,71	3,68	5,25	12,60	24,50	3,30	5,49	10,85	30,21	4,29	4,88	15,38
Desvio padrão	7,07	0,79	4,93	4,13	6,88	0,43	5,78	3,02	5,88	0,86	3,16	4,15
Máximo	59,00	6,50	36,70	25,70	59,00	4,50	36,70	23,00	42,10	6,50	18,40	25,70
Mínimo	14,00	2,20	0,10	4,70	14,00	2,20	0,10	4,70	17,70	2,50	0,50	5,50
Número de amostras	240				147				93			

**Figura 9.** Perfis gamaespectrométricos (eTh, eU, K e CT) e estratigráficos do afloramento 1 (vide localização na Figura 8A).



**Figura 10.** Perfil estratigráfico composto do afloramento 2 indicando os perfis gamaespectrométricos sobrepostos às fotografias do afloramento.

pontal semelhante ao afloramento 1 (Figura 8), o perfil 2.6 tem na base arenitos eólicos e no topo depósitos deltaicos e o perfil 2.7 configura arenitos eólicos. A estatística básica dos perfis pode ser verificada na Tabela 4 e, apesar de

representarem ambientes sedimentares diferentes, os valores são semelhantes aos observados no afloramento 1, mostrando não haver variações composicionais significativas entre as fácies fluviais, lacustres e eólicas

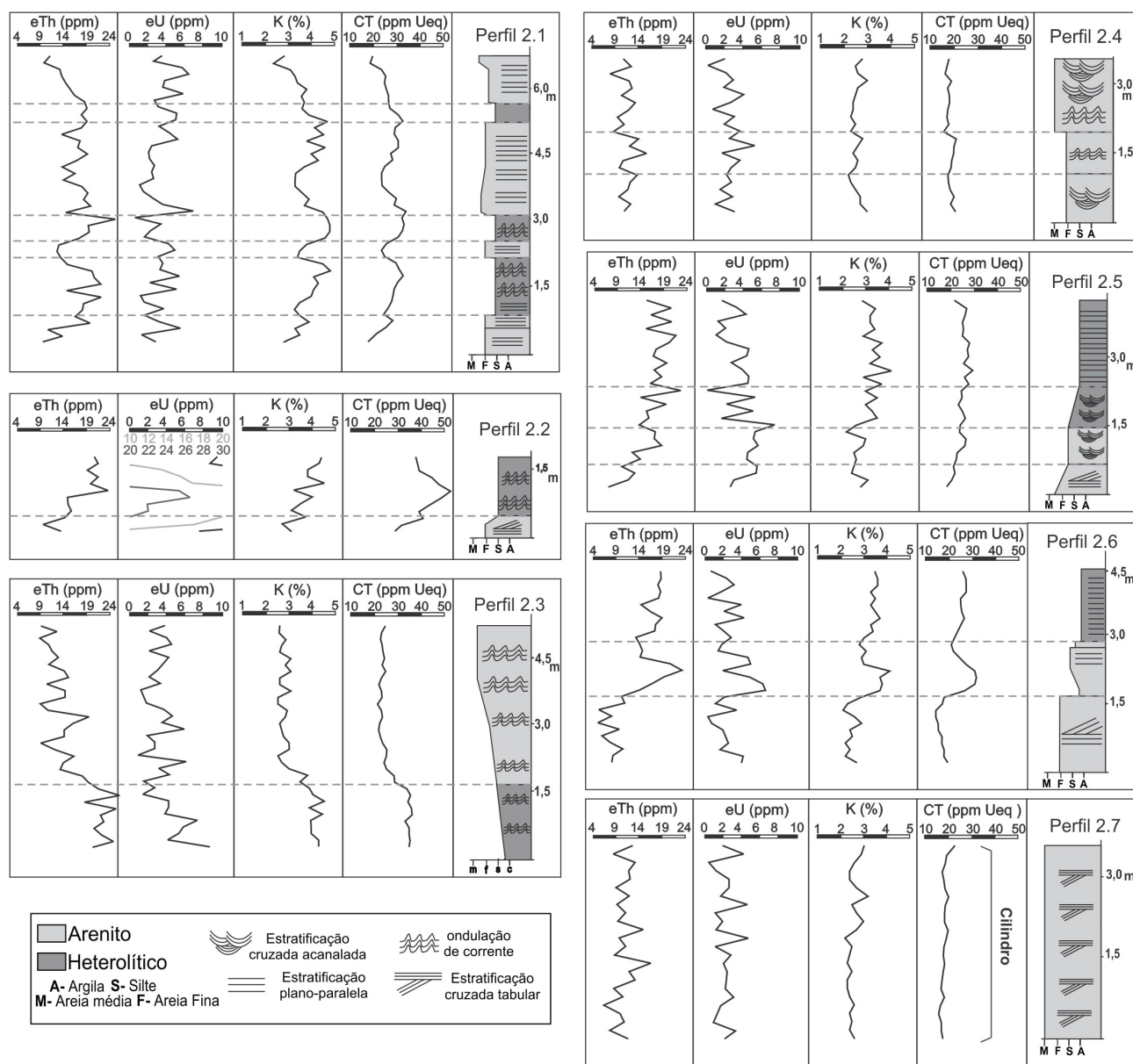


Figura 11. Perfis gamaespectrométricos (eTh, eU, K e CT) e estratigráficos do afloramento 2 (vide localização na Figura 10).

De modo semelhante ao afloramento 1, as curvas de K e eTh possuem assinaturas semelhantes às das curvas de CT e os perfis de eU não mostram assinatura bem definida. Os perfis gamaespectrométricos também se correlacionam diretamente com as variações granulométricas dos perfis estratigráficos, mesmo que tais variações sejam sutis (Figura 11).

A base do perfil composto (perfil 2.1 – Figura 11) apresenta uma assinatura de sucessivos aumentos e diminuições dos valores de CT, reflexo de intercalações de camadas de

arenitos e lamitos. No perfil 2.1, assim como no afloramento 1, valores elevados de eU influenciam a curva de CT, mas não representam, necessariamente, uma maior argilosidade.

No sentido do topo do perfil, ainda nas fácies de ambiente deltaico, ocorrem camadas com granocrescência ascendente, mas com brusca variação na granulometria, o que é registrado no perfil gamaespectrométrico 2.3 de CT (Figura 11), onde se verifica que a parte basal exibe maiores teores passando abruptamente para valores mais elevados na porção central a superior.

Dépósitos de barra em pontal foram registrados pelos perfis 2.4 e 2.5 (Figura 11). Assim como no afloramento 1, a barra apresenta variações laterais numa distância de poucos metros. O perfil 2.4 (Figura 11) compreende a porção mais arenosa, como evidenciada no perfil de CT com pouca variação de argilosidade. Embora se observe nítido afinamento granulométrico no perfil 2.5, a assinatura em sino esperada no perfil de CT apresenta-se de forma bem discreta. Esse formato é, todavia, mais claro no perfil de eTh (Figura 11). No perfil 2.6, há passagem de fácies eólicas na base, marcado por valores baixos e homogêneos de radioatividade, para rochas de ambiente deltaico com maior variação da radioatividade em direção ao topo. Por fim, no perfil 2.7 são registrados valores baixos e constantes de CT, representativos de depósitos eólicos de boa seleção e maturidade.

É importante reconhecer os ambientes sedimentares da barra em pontal e suas respectivas assinaturas radioativas, pois o afloramento 1, que é o alvo de estudo, apresenta menos de 10 m de espessura, o que certamente pode contribuir para a interpretação dos dados e correlações de subsuperfície.

#### Correlação com dados de subsuperfície

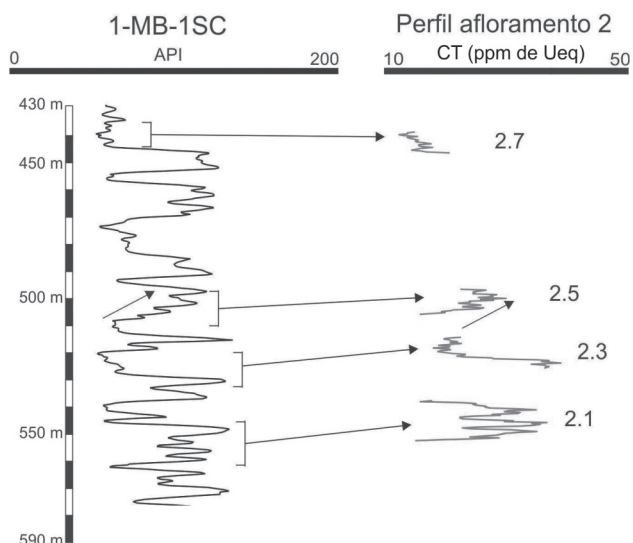
Visando verificar a equivalência das assinaturas gamaespectrométricas dos afloramentos com dados de subsuperfície, foram selecionados cinco poços perfurados pela Petrobras no Estado de Santa Catarina: 1-SJQ-1-SC; 1-MB-1-SC; 1-HV-1-SC; 2-CS-1-SC; 2-MC-1-SC (vide localização na Figura 6). Para a correlação, foram utilizados apenas os perfis de CT dos afloramentos, pois nesses poços não foram adquiridos os perfis de K, eTh e eU. O objetivo dessa correlação é avaliar o potencial de reconhecimento dos depósitos fluviais do topo da Formação Rio do Rasto (Membro Morro Pelado) nos poços, bem como o uso da gamaespectrometria como ferramenta para análise de fácies em subsuperfície.

A Figura 12 ilustra uma tentativa de correlação entre o perfil composto do afloramento 2 e o perfil de raios gama do poço 1-MB-1-SC, localizado a cerca de 50 km da faixa

de afloramentos. Como *datum* para correlação foi utilizada a cota aproximada do topo da Formação Rio do Rasto, que, nessa área, faz contato discordante com a Formação Botucatu.

Observa-se que assinaturas semelhantes ocorrem grosso modo nos mesmos níveis estratigráficos tanto na seção do afloramento 2 quanto no poço 1-MB-1-SC, sugerindo que certos eventos deposicionais possuem expressão lateral significativa, pelo menos da ordem de dezenas de quilômetros.

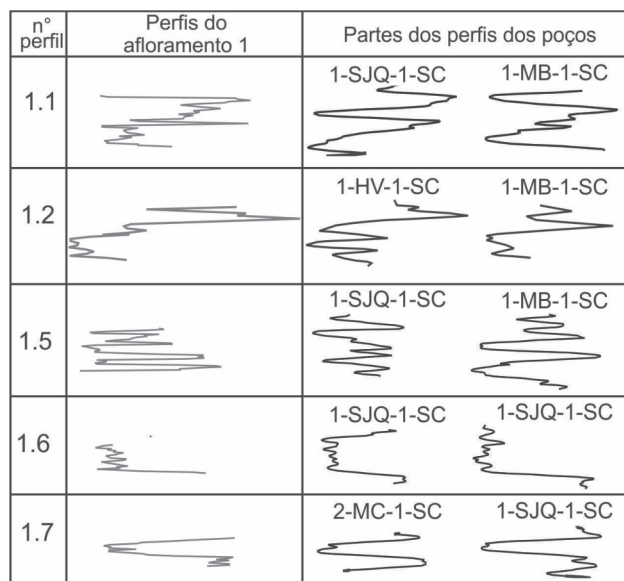
Com os perfis dos afloramentos em escalas compatíveis aos dos poços, foram comparadas as log-fácies para tentar reconhecer assinaturas semelhantes (Figura 13). Os perfis dos poços 1-SJQ-1-SC e 1-MB-1-SC, os mais próximos da área de afloramentos, apresentam melhor equivalência com as assinaturas dos perfis do afloramento 1, enquanto que nos demais perfis a correlação não é significativa. Isso sugere variações laterais de fácies na parte superior da Formação Rio do Rasto resultantes da própria paleogeografia à época da sedimentação.



**Figura 12.** Correlação do poço 1-MB-1-SC com o perfil composto do afloramento 2.

**Tabela 4.** Estatística básica das concentrações gamaespectrométricas do afloramento 2 e de suas fácies arenosa e pelítica.

Elemento	Total				Fácies arenosas				Fácies pelíticas			
	CT	K	U	Th	CT	K	U	Th	CT	K	U	Th
Média	25,50	3,35	4,06	15,07	22,48	3,04	3,55	12,89	30,75	3,90	4,94	18,88
Desvio padrão	6,71	0,73	4,10	4,44	4,65	0,57	2,61	3,56	6,54	0,67	5,78	3,04
Máximo	52,30	5,40	26,50	26,50	41,00	4,70	19,60	23,50	52,30	5,40	26,50	26,50
Mínimo	14,20	2,10	0,00	5,00	14,20	2,10	0,10	5,00	22,20	2,90	0,00	13,50
Número de amostras	181				115				66			



**Figura 13.** Exemplos de assinaturas gamaespectrométricas equivalentes entre a barra em pontal do afloramento 1 (vide localização da Figura 6) e os poços.

O padrão em sino, característico de barras em pontal e identificado nos perfis 1.1 e 1.2, é reconhecido em poucas porções dos perfis de poços. Entretanto, outros padrões foram identificados, como no perfil 1.5, que apresenta um padrão cilindro e serrilhado, com leve diminuição dos valores para o topo, e do perfil 1.7, onde se observa o contato da barra em pontal com depósitos de planície de inundação (Figura 13).

## CONCLUSÕES

A partir da análise das assinaturas gamaespectrométricas em depósitos fluviais e fácies associadas da parte superior da Formação Rio do Rasto e sua correlação com perfis de poços, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- as concentrações de K e Th são as que melhor correspondem à concentração da contagem total (CT);
- a assinatura gamaespectrométrica em sino (argilosidade crescente para o topo) ocorre na barra em pontal, mas não pode ser utilizada como característica para a sua definição, principalmente em depósitos de carga mista, uma vez que uma variada gama de padrões de perfil foi observada no afloramento 1;
- os perfis gamaespectrométricos podem ser utilizados para definição da variação granulométrica, pois correspondem às variações da argilosidade detectadas nos afloramentos estudados. Anomalias de urânio, todavia, interferem na contagem total e podem não apresentar relação com argilosidade conforme observado no perfil 1.4;

- a correlação de dados de afloramentos e de subsuperfície na unidade estudada é satisfatória e válida para um raio de dezenas de quilômetros, proporcionando meios de reconhecer ambientes sedimentares em perfis de poços. O estudo realizado corrobora o alto grau de heterogeneidade comumente observado em reservatórios fluviais de carga mista, o que dificulta o mapeamento de unidades de fluxo a partir, exclusivamente, de dados de subsuperfície.

## REFERÊNCIAS

- Aigner, T., Schauer, M., Junghans, W. D., Reinhardt L. (1995). Outcrop gamma-ray logging and its applications: examples from the German Triassic. *Sedimentary Geology*, 100, 47-61.
- Arya, A. P. (1966). *Fundamentals of nuclear physics*. Allyn and Bacon: Boston, USA.
- Becegato, V.A., Ferreira, F.J.F. (2005). Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, 23(4), 371-405.
- Chamberlain, A. K. (1984). Surface gamma-ray logs: A correlation tool for frontier areas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68(8), 1040-1043.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2004). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha SG-22*. 1 CD-Rom. Escala 1:1.000.000.
- Duarte, O. O. (2003). *Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia*. Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf, (2a ed.). Rio de Janeiro.
- Ellis, D. V., Singer, J. M. (2008). *Well Logging for Earth Scientists*. (2a ed.). Springer, The Netherlands.
- Evans, R., Mory, A. J., Tait, A. M. (2007). An outcrop gamma ray study of the Tumblagooda Sandstone, Western Australia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 57, 37-59.
- Ferreira, F. J. F., Candido, A. G., Rostirolla, S. P. (2010). Correlação gamaespectrométrica de afloramentos e poços: estudo de caso na Formação Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(3), 371-396.

- Hadley, M. J., Ruffell, A., Leslie, A. G. (2000). Gamma-ray spectroscopy in structural correlations: an example from the Neoproterozoic Dalradian succession of Donegal (NW Ireland). *Geological Magazine*, 137(3), 319-333.
- Hampson, G. J., Davies, W., Davies, S. J., Howell, J. A., Adamson, K. R. (2005). Use of spectral gamma-ray data to refine subsurface fluvial stratigraphy: late Cretaceous strata in the Book Cliffs, Utah, USA. *Journal of the Geological Society of London*, 162, 603-621.
- Hornung, J., Aigner, T. (1999). Reservoir and aquifer characterization of fluvial architectural elements: Stubensandstein, Upper Triassic, southwest Germany. *Sedimentary Geology*, 129, 215-280.
- Labrecque, P. A., Jensen, J. L., Hubbard, S.M. (2011). Cyclicity in Lower Cretaceous point bar deposits with implications for reservoir characterization, Athabasca Oil Sands, Alberta, Canada. *Sedimentary Geology*, 242, 18-33.
- Martinius, A. W., Geel, C. R., Arribas, J. (2002). Lithofacies characterization of fluvial sandstones from outcrop gamma-ray logs (Loranca Basin, Spain): the influence of provenance. *Petroleum Geoscience*, 8(1), 51-62.
- Macdonald, A. C., Halland, E. K. (1993). Sedimentology and shale modeling of a sandstone-rich fluvial reservoir: Upper Statfjord Formation, Statfjord Field, Northern North Sea. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 77(6), 1016-1040.
- Melvin, J. (1993). Evolving style in the Kekiktuk Formation (Mississippian), Endicott Field Area, Alaska: base level response to contemporaneous tectonism. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 7(10), 1723-1744.
- Mendes, J. C. (1984). Sobre os paleoambientes deposicionais do Grupo Passa Dois. *Revista do Instituto de Geociências*, 5, 15-24.
- Miall, A. D. (1988). Reservoir heterogeneities in Fluvial Sandstones: lessons from outcrop studies. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 72(6), 682-697.
- Miall, A. D. (2006). *The geology of fluvial deposits – sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer Verlag.
- Milani, E. J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental*. 2v. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- Milani, E. J., França, A. B., Schineider, R.L. (1994). *Bacia do Paraná*. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, 8(1), 69-82.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, A. B. (2007). Bacia do Paraná. In: Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G.D., Stica, J.M., Winter, W.R., Caixeta, J.M., Pessoa Neto, C.P. (Eds). *Bacias Sedimentares Brasileiras – Cartas Estratigráficas*. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 265-287.
- Minty, B. R. S., Luyendyk, A. P. J., Brodie, R. C. (1997). Calibration and data processing for airborne gamma ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 51-62.
- North, C. P., Boering, M. (1999). Spectral gamma-ray logging for facies discrimination in mixed fluvial-eolian successions: A cautionary tale. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83(1), 155-169.
- Orlandi Filho, V., Krebs, A. S. J., Giffoni, L. E. (2006). *White Column, Serra do Rio do Rastro, SC - Classic Geologic Section of the Gondwana Continent in Brazil*. In: Winge, M., Schobbenhaus, C., Berbert-Born, M., Queiroz, E. T., Campos, D. A., Souza, C. R. G., Fernandes, A. C. S. (Eds) *Geological and Palaeontological Sites of Brazil*.
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of applied geophysics*. London: Chapman & Hall.
- Rider, M. H. (1990). *Gamma-ray log shape used as a facies indicator: critical analysis of an oversimplified methodology*. In: A. Hurst, M.A. Lovell & A.C. Morton. *Geological Society Special Publication 48: Geological applications of wireline logs*. London: The Geological Society.
- Rohn, R. (1994). *Evolução ambiental da Bacia do Paraná durante o Neopermiano no leste de Santa Catarina e do Paraná*. 2v. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP.
- Ruf, M., Aigner, T. (2004). Facies and poroperm characteristics of a carbonate shoal (Muschelkalk, South German Basin): a reservoir analogue investigation. *Journal of Petroleum Geology*, 27(3), 215-239.
- Schneider, R. L., Muhlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R. A., Daemon, R. F., Nogueira, A. A. (1974). *Revisão*

*estratigráfica da Bacia do Paraná*. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, Anais. 41-65.

Sheriff, R. E. (1999). Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. Society of Exploration Geophysicists – SEG, *Geophysical References Series*, 1, Tulsa.

Slatt, R. M. (2006). *Fluvial deposits and reservoirs. Stratigraphic reservoir characterization for petroleum geologists, geophysicists and engineers*. Elsevier.

Slatt, R. M., Jordan, D. W., D'Agostino, A. E., Gillespie, R. H. (1992). Outcrop gamma-ray logging to improve understanding of subsurface well log correlations. *Geological Society, London, Special Publications*, 65, 3-19.

Talwar, A. D., Henderson, A. S., Hart, M. (1992). Simple gamma-ray response of the Upper Jurassic from the Dorset Coast – A preliminary investigation using the scintilometer

profile technique. *Note of poster display at the annual conference of the Ussber Society*.

Van Buchem, F. S. P., Melnyk, D. H., Mccave, I. N. (1992). Chemical cyclicity and correlation of Lower Lias mudstones using gamma ray logs, Yorkshire, UK. *Journal of the Geological Society, London*, 149, 991-1002.

Warren, L. V., Almeida, R. P., Hachiro, J., Machado, R., Roldan, L. F., Steiner, S. S., Chamani, M. A. C. (2008). Evolução sedimentar da Formação Rio do Rasto (Permo-Triássico da Bacia do Paraná) na porção centro sul do estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2), 213-227.

Zhi, T. (1982). Tectonic features of oil and gas basins in eastern part of China. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66(5), 509-521.