



## DISTRIBUIÇÃO DE METAIS PESADOS EM PERFIS VERTICAIS DE SEDIMENTOS NA BACIA DO ARROIO DO CONDE, RS

L.S. Ortiz<sup>1</sup>; M.F.C. Alves<sup>2</sup>; E.C. Teixeira<sup>1</sup>; G. Vecchio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEPAM, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler,  
Rua Carlos Chagas-55/707, CEP 90030-020, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup>Bolsista de Apoio Técnico - CNPq

Recebido em 02/01; aprovado para publicação em 02/02

### ABSTRACT

*Chemical composition in core fluvial sediments was studied in 5 sites in the Conde stream basin. Geochemistry distribution of Fe, Ti, Al, Zn, Ni, Cu and Cr, as well as textural aspects, indicate a strong sediment remobilization on the fluvial channel. Substrate changes introduced by solid material from coal mining and processing activities can be observed. A wide variability in the composition of bottom layers does not allow assuming the heavy metal concentration in these layers as background levels in the stream basin. On the contrary, it suggests that both, erosive processes and the introduction of solid loads of anthropogenic origin contribute to a constant alteration of physical and chemical characteristics of sediments in the fluvial channels in the Conde stream basin.*

### RESUMO

*A composição química nos perfis verticais de sedimentos fluviais na bacia do arroio do Conde foi estudada em cinco pontos de amostragem de testemunhos. O comportamento geoquímico dos elementos Fe, Ti, Al, Zn, Ni, Cu e Cr, juntamente com os aspectos texturais, indicam uma intensa remobilização dos sedimentos no leito do canal. A modificação do substrato, a partir da introdução de materiais sólidos, oriundos das atividades de mineração e beneficiamento do carvão, na bacia, pode ser observada. A grande variabilidade composicional nas camadas inferiores dos perfis amostrados não permite que os teores de metais pesados na porção basal dos testemunhos sejam assumidos como níveis de referência na bacia. Pelo contrário, sugere-se que tanto os processos erosivos como a introdução de cargas sólidas de origem antrópica contribuam para a constante alteração das características físicas e químicas dos sedimentos no leito dos canais fluviais na bacia do arroio do Conde.*

## INTRODUÇÃO

Os sedimentos de fundo de canais fluviais ao longo dos rios e arroios que drenam áreas de mineração de carvão, geralmente, apresentam altas concentrações de metais pesados (Bell *et al.*, 1992; Helgen & Moore, 1996; Teixeira *et al.*, 2000 a e b). As fontes destes contaminantes, relacionadas às atividades do processamento do carvão, dão-se, principalmente, através dos processos de oxidação de sulfetos, presentes nos rejeitos da mineração e do beneficiamento (Bell *et al.*, 1992; Clarke, 1995).

Parte destes rejeitos é depositada nas calhas dos rios, onde o retrabalhamento dos bancos de sedimento contaminados torna-se, então, uma fonte secundária de metais para o sedimento ativo transportado pela corrente. Mesmo após o fechamento das minas e a recuperação das áreas impactadas, os metais acumulados nos sedimentos da calha e da planície fluvial podem ser liberados continuamente para a coluna d'água, caracterizando estes materiais como responsáveis pelo transporte e dispersão dos metais a jusante das áreas de mineração e como fonte potencial de efeitos a longo prazo sobre a biota aquática.

Conforme Helgen & Moore (1996), o lançamento de efluentes das barragens de rejeitos finos do beneficiamento do carvão e a erosão física em pilhas de estéril, geralmente fazem com que a capacidade de transporte de sedimentos em sistemas fluviais receptores seja ultrapassada. Esta enorme quantidade de cargas detríticas pode provocar o assoreamento do leito fluvial e alargamento da planície de inundação.

Desse modo, as drenagens que atravessam áreas impactadas pela mineração podem contribuir com descargas líquidas relativamente pequenas, enquanto a descarga de sedimentos e os fluxos de metais são geralmente importantes para os sistemas fluviais como um todo (Swennen *et al.*, 1994).

A acumulação de metais pesados, bem como a introdução de cargas sólidas associadas a estas atividades, podem alterar as características naturais dos sedimentos fluviais. Portanto, o entendimento da dinâmica da sedimentação fluvial é importante para a caracterização dos níveis de base (*background*) das concentrações de metais pesados, bem como para a identificação das possíveis mudanças geradas pelas atividades antrópicas.

As análises químicas devem ser acompanhadas de informações sobre a origem dos sedimen-

tos, as quais envolvem suas características físico-químicas e mineralógicas e os fatores que controlam o intemperismo, transporte e os processos de deposição (Prohic & Juracic, 1989). A textura dos sedimentos é, também, determinante na distribuição geoquímica dos metais pesados no leito fluvial, tendo em vista que as frações finas adsorvem melhor os metais e são mais facilmente transportadas pelo fluxo das águas (Horowitz, 1991).

A perspectiva histórica de contaminação por metais pesados pode ser obtida através de perfis verticais de sedimentos depositados nas planícies de inundação e nos canais fluviais (Zober & Magnuszewski, 1998). Deve-se, porém, considerar que a sedimentação ocorre de forma descontínua, associada aos eventos de descarga fluvial.

A acumulação de metais pesados ocorre particularmente nos sedimentos depositados nas planícies de inundação, mas os processos de erosão e transporte podem tornar temporários os estoques dos contaminantes nestes depósitos, bem como nos sedimentos de canal (Swennen *et al.*, 1994).

Nos rios e arroios com alta dinâmica fluvial, o carreamento dos sedimentos finos dos depósitos de fundo de canal é comum, resultando perfis verticais arenosos empobrecidos em finos e, conseqüentemente, em baixas concentrações de metais, que tendem a se acumular na região de foz ou em zonas de baixa energia.

Na bacia hidrográfica do arroio do Conde, situada na região carbonífera do Baixo Jacuí, RS, há um significativo aporte de cargas detríticas associadas às atividades de mineração e beneficiamento de carvão. Estes sólidos são freqüentemente retrabalhados por eventos de precipitação intensa, que afetam a dinâmica fluvial deste curso d'água de pequeno porte, o que pode resultar em complexos processos de dispersão, acumulação e/ou exportação dos sedimentos finos e das cargas metálicas associadas.

O objetivo deste trabalho é investigar a distribuição geoquímica nos perfis verticais de sedimentos de fundo de canais fluviais na bacia do arroio do Conde e sua relação com as fontes potenciais de liberação de metais pesados para bacia, associadas à mineração, ao beneficiamento de carvão e à lixiviação de depósitos de rejeitos oriundos destas atividades, considerando as características da dinâmica fluvial de sedimentação no arroio.

## ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem como área de estudo a bacia do arroio do Conde, situada na região do Baixo Jacuí, RS, que engloba, parcialmente, a área dos municípios de Minas do Leão, Butiá e São Jerônimo, sendo que este último tem sua sede municipal situada fora dos limites da bacia (Fig. 1). Os critérios para a escolha desta bacia devem-se ao fato de ser uma área com influência significativa das atividades do processamento de carvão, contendo áreas de mineração e inúmeros depósitos de rejeitos de carvão dispostos de forma inadequada (Teixeira *et al.*, 1999a; Binotto *et al.*, 1999).

As minas Taquara (céu aberto) e Leão I (subterrânea), localizadas na porção sudoeste da bacia, são operadas pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), enquanto as minas a céu aberto da porção sudeste, Recreio e Butiá Leste, ambas de responsabilidade da COPELMI, encontram-se atualmente desativadas e em fase de recuperação.

O arroio do Conde possui afluentes que recebem, ainda, descargas provenientes do beneficiamento de carvão realizado pela CRM. Pelo fato das bacias de decantação associadas ao tratamento destes efluentes estarem frequentemente saturadas, ocorre a descarga direta de carvão britado e lavado em alguns cursos d'água.

A bacia do arroio do Conde, localizada na margem direita do rio Jacuí, possui uma área de drenagem de 364 km<sup>2</sup>. O seu curso principal apresenta 53 km de extensão, com declividade média de 3,6 m/km, escoando de uma cota de 200 m até 7 m do nível do mar na sua foz no Rio Jacuí. No seu trecho superior, até cerca de 23 km, o arroio do Conde apresenta maior declividade, de aproximadamente 8 m/km, enquanto, no restante, este valor diminui para 0,4 m/km. Nessa bacia, existem reservatórios de água de pequeno porte, utilizados para atendimento à agricultura, ao abastecimento público e às plantas de beneficiamento.

As características fisiográficas da bacia e os índices de forma e compacidade, apresentadas por Andreatza (1997), conferem à área uma baixa susceptibilidade a enchentes, com moderada densidade de drenagem.

A área da bacia do arroio do Conde está inserida na região geomorfológica da Depressão Central Gaúcha. Esta região apresenta clima subtropical úmido, com temperaturas médias entre 3 e 18°C, no mês mais frio, e superiores a 22°C, no verão. A precipitação é bem distribuída durante o ano, com totais superiores a 1.200 mm e médias mensais superiores a 130 mm, nos meses de abril a outubro.

O arcabouço geológico da bacia consiste, basicamente, de formações sedimentares de idade Permiana. A Fm. Rio Bonito, na base da seqüência, contém as camadas de carvão associadas a folhelhos e arenitos, que são mineradas, na área de estudos, desde a segunda metade do século XIX. A esta sobrepõe-se seqüências pelíticas, associadas a níveis carbonáticos, formadas em ambiente marinho raso (Fms. Palermo, Irati e Estrada Nova), finalizadas pela deposição de sedimentos clásticos da Fm. Rio do Rasto, em ambiente continental. Na porção norte da bacia, próximo à foz do arroio do Conde, ocorrem, ainda, as rochas sedimentares triássicas do Grupo Rosário do Sul. Estas seqüências sedimentares recobrem o embasamento cristalino pré-Cambriano, representado pelo Complexo Granítico-gnáissico Pinheiro Machado, que aflora no curso superior dos afluentes da borda sudeste da bacia. Ao longo da calha das principais drenagens, ocorrem sedimentos aluvionares do Quaternário.

A Fm. Rio Bonito, que ocorre na porção do curso superior da bacia, encontra-se bem representada em termos de área de influência, tornando importantes as contribuições naturais e antrópicas de cargas sólidas e metálicas associadas ao carvão nesta parte da bacia.

Tendo em vista a declividade relativamente acentuada no curso superior da bacia, os cursos d'água apresentam regime torrencial, fazendo com que parte das cargas sólidas em suspensão sejam transportadas para a região da foz. Somado a isto, as litologias predominantemente arenosas do topo da Fm. Rio Bonito contribuem com sedimentos grossos que são retrabalhados nas calhas fluviais.

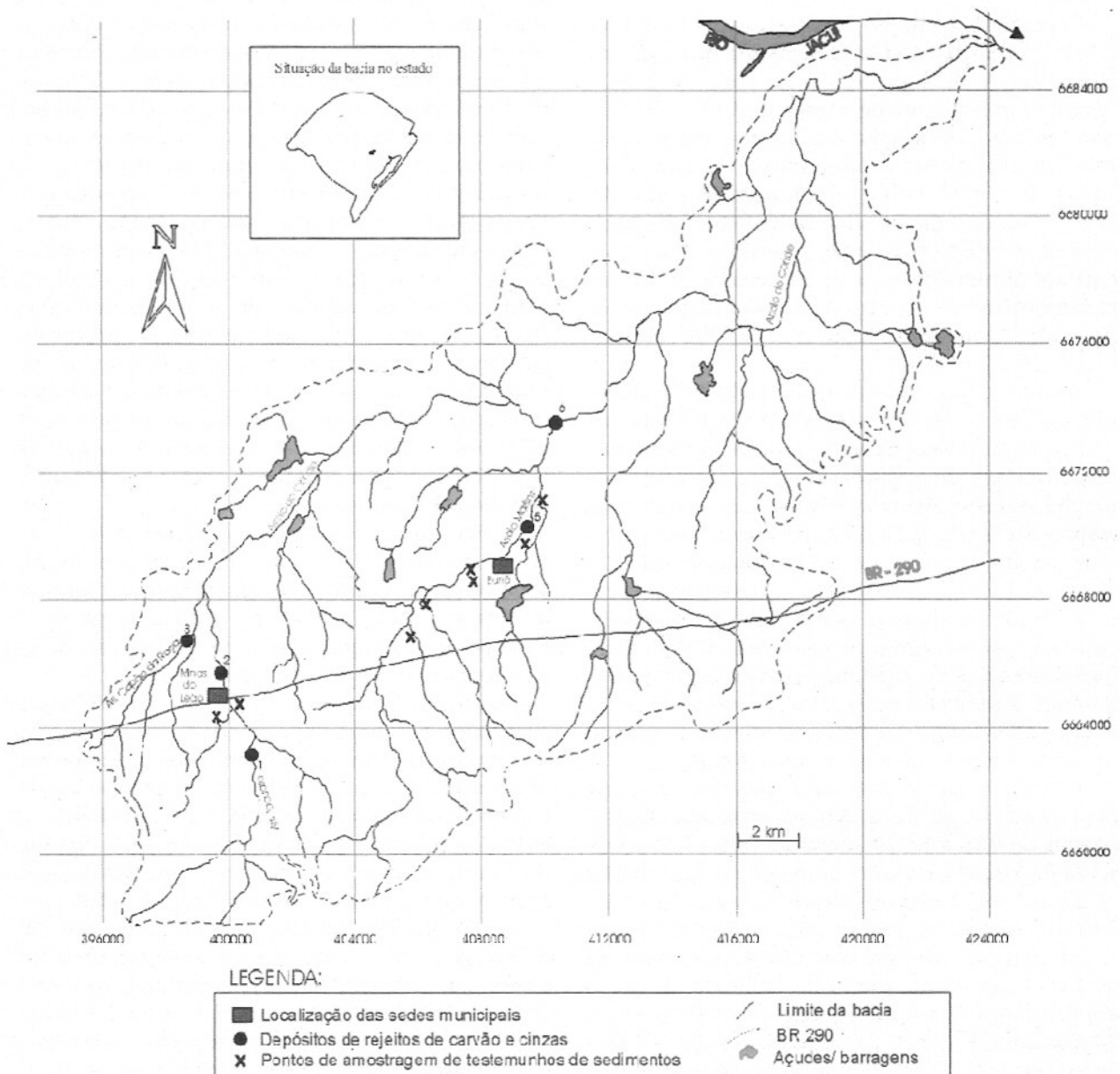
A planície de inundação ao longo dos cursos d'água é relativamente estreita, sendo melhor representada na região da foz. Deste modo, os locais de deposição de sedimentos finos são escassos, associados a obstáculos, como barra de canais e barras arenosas e porções internas de meandros fluviais. Os sedimentos em geral são compostos tipicamente por areias e cascalhos, com camadas de silte e argila pouco representativas nos perfis verticais.

## METODOLOGIA

### Amostragem e Análise das Amostras

Cinco perfis verticais foram amostrados, em Janeiro/1997, em locais rasos e de seção transversal relativamente estreita, nos sedimentos de fundo de canal dos principais cursos d'água da bacia do arroio do Conde, contemplando os locais a jusante das fontes potenciais de contami-

## BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DO CONDE



**Figura 1** – Localização geográfica da bacia hidrográfica do arroio do Conde – RS, das áreas de disposição de rejeitos e dos pontos de amostragem de sedimentos.

nação, relacionadas às atividades do processamento do carvão.

O *Ponto 1* localiza-se nas cabeceiras do arroio do Conde, que recebe a denominação de arroio Taquara, a montante das áreas de influência das atividades do processamento de carvão. O *Ponto 2* está situado no mesmo curso d'água, a jusante da área de rejeitos de beneficiamento e mineração da Mina do Leão I, os quais encontram-se dispostos em pilhas que atingem até 10 m de espessura, distribuídos numa área de 750 m<sup>2</sup>

(Binotto *et al.*, 1999; Teixeira *et al.*, 1999a). O *Ponto 3* está localizado no arroio Capão da Roça, a jusante das bacias de sedimentação da planta de beneficiamento da CRM. O *Ponto 4*, no arroio Martins, está a jusante de uma área de deposição de cinzas e quatro áreas de depósitos de rejeitos da cata manual do carvão provenientes da mina de Butiá, cujas pilhas variam de 2,5 a 5 m de espessura e encontram-se dispostas em áreas ao longo deste arroio, representando fontes de drenagem ácida para este curso d'água

(Binnoto *et al.*, *op. cit.*; Teixeira *et al.*, *op. cit.*). O Ponto 5 localiza-se no arroio do Conde, após a confluência com o arroio Martins, portanto, a jusante das fontes antrópicas de cargas sólidas e contaminantes mencionadas.

As coletas de sedimento foram realizadas em 1997, com apoio de técnicos do setor de coleta da FEPAM e do Centro de Estudos Marinhos e Costeiros (CECO), do Instituto de Geociências da UFRGS. As amostras foram obtidas mediante a utilização de um equipamento confeccionado em PVC de 75 mm de diâmetro e de fundo perfurado.

Os testemunhos foram descritos quanto aos aspectos de cor, textura e conteúdo de fragmentos. Cerca de 1kg de amostra foi retirado de cada camada identificada para análise granulométrica e química, de acordo com a microestratigrafia observada, de modo a permitir o estabelecimento das relações entre as fácies texturais e a concentração de metais (Swennen *et al.*, 1994; Birch *et al.*, 1994).

As amostras submetidas à análise química de concentração total de elementos traço foram peneiradas a úmido em peneiras de teflon, com malha de nylon com abertura de 63 µm e, posteriormente, secas em câmara de luz UV, a aproximadamente 30°C, homogeneizadas e desagregadas em graal de ágata.

Análise padrão nas frações de sedimentos menores que 63 µm tem sido bastante citada, a partir de Salomons e Forstner (1980), para ajuste do efeito de tamanho de grão e para comparação de resultados entre áreas com sedimentos de diferentes características granulométricas. Esta fração é recomendada pelo fato dos metais estarem associados, principalmente, às partículas de argila e silte, frações que, na maior parte do tempo, correspondem ao material carregado em suspensão.

### Método de Extração Total

A extração total dos sedimentos foi realizada empregando o método de digestão por microondas (modelo CEM-2100), utilizando, aproximadamente, 0,25 g de amostra. A digestão consistiu em adicionar, previamente, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em sistema aberto, para a eliminação da matéria orgânica, seguindo o ataque adicionando HNO<sub>3</sub>, HCl e HF, através do microondas, até a abertura total da amostra. A digestão por microondas foi realizada de acordo com as condições de operação recomendadas pelo manual do fabricante.

### Precisão e exatidão

A leitura dos metais em extratos de sedimento foi realizada por ICP-AES, 38 S, Jobin Yvon. A precisão analítica das extrações totais foi obtida através das análises realizadas em triplicatas e sua reprodutibilidade foi satisfatória com coeficiente de variação inferior à 7,5% e 10%, respectivamente, para o material de referência certificado e para todas as amostras estudadas. A eficiência das extrações totais foi verificada pela avaliação do erro de exatidão (Tabela 1). Os resultados revelaram que a extração total aplicada ao padrão STSD-4 foi eficiente para a maioria dos elementos estudados (Fe, Mn, Ni, Zn, Cu, Cr, Ti e Al), com erro inferior a 5,4%, exceto os elementos Ti e Al, que apresentaram menor exatidão, < 10%.

**Tabela 1** – Coeficiente de Variação (CV) e Erro calculado com base na extração total aplicada ao material de referência certificado (STSD-4 CANMET).

| METAL | MÉDIA DOS VALORES DETERMINADOS (µg/g) | CV (%) | VALORES CERTIFICADOS MRC*– STSD-4-CANMET (µg/g) | ERRO (%) |
|-------|---------------------------------------|--------|---|----------|
| Fe %  | 4,1                                   | 0,52   | 4,1   | 0,0      |
| Mn    | 1520                                  | 0,48   | 1520  | 0,0      |
| Cu    | 63                                    | 1,0    | 65  | 3,1      |
| Ni    | 31                                    | 2,5    | 30  | 3,3      |
| Cr    | 88                                    | 0,8    | 93  | 5,4      |
| Zn    | 104                                   | 2,0    | 107   | 2,8      |
| Ti    | 4920                                  | 1,0    | 4530  | 8,6      |
| Al %  | 5,94                                  | 20     | 6,4   | 7,2      |

MRC \* Material de Referência Certificado

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Varição Textural

As Figuras de 2 a 6 mostram os perfis verticais dos sedimentos fluviais para os pontos estudados. Com exceção do ponto 5, os demais perfis apresentaram a ocorrência de uma camada basal composta por sedimentos finos silítico-argilosos, por vezes com areia fina, a qual é sobreposta por camadas de areia grossa, onde é comum a presença de seixos e pedaços de carvão (Figs. 2 a 6). Os contatos entre as camadas são,

geralmente, abruptos, de natureza erosiva, indicando o transporte de sedimentos grossos por arraste no leito fluvial.

Conforme reportado por Swennen *et al.* (1994), a ocorrência de superfícies erosivas entre diferentes subunidades e fácies texturais, e a impossibilidade de correlação lateral de diferentes unidades a curtas distâncias, como observado entre as amostras aqui estudadas, podem indicar que os sedimentos foram depositados e subsequentemente erodidos em resposta aos processos de ajuste do canal fluvial. As camadas de granulometria mais grossa, com areia e seixos, refletem a deposição durante picos de descarga fluvial.

Por outro lado, pode-se sugerir que os picos de vazão são responsáveis, também, pela lavagem dos leitos fluviais e transporte dos finos depositados em períodos de vazante por correntes fluviais menos competentes, resultando na acumulação de materiais grossos na base do canal.

Os aspectos texturais dos perfis verticais de sedimentos fluviais no arroio do Conde, com predominância das frações granulométricas grossas, indicam, assim, uma intensa remobilização dos sedimentos no leito do canal, com predominância dos processos erosivos sobre os processos de deposição, particularmente em relação aos sedimentos de fina granulometria.

O tipo de material representativo do leito fluvial na Bacia do arroio do Conde é indicativo de depósitos sedimentares sob condições de alta dinâmica fluvial e a presença de fragmentos e pedaços de carvão reflete a introdução de materiais alóctones através das atividades relacionadas à exploração de carvão na bacia.

### Distribuição Geoquímica dos Metais Pesados

A concentração dos elementos metálicos nos perfis de sedimentos é mostrada nas Figuras 2 a 6. De forma geral, estas figuras apresentam uma tendência de aumento das concentrações destes elementos da base para o topo nos testemunhos, com variações no comportamento das concentrações desses metais para a maioria das amostras estudadas (Figs. 2 a 6).

Não foi observada coerência entre as variações texturais e as concentrações de metais pesados nas camadas de sedimentos selecionadas, o que, provavelmente, deve-se à normalização das diferenças texturais através do uso da fração < 63mm, para as análises químicas.

Estudos sobre a relação entre distribuição geoquímica e o controle microestratigráfico em se-

dimentos fluviais e estuarinos, reportados por Birch *et al.* (1994), indicaram, de forma similar, que as concentrações de metais podem apresentar boa correlação com as fácies e o ambiente deposicional no sedimento total, mas quando o efeito de diluição das concentrações nas frações grosseiras é removido, através do uso das frações finas, tal associação não é destacada.

Quanto à distribuição geoquímica dos metais, o Ponto 3 destaca-se entre os perfis estudados, por apresentar características mais heterogêneas, provavelmente em função da maior interferência antropogênica nos processos de sedimentação, dada a proximidade do ponto de descarga das bacias da planta de beneficiamento localizadas a montante.

Para os demais pontos, notam-se as associações de certos elementos, através de seu comportamento similar ao longo dos testemunhos amostrados, descritas a seguir.

De forma geral, o Fe e o Al mostraram tendência de distribuição vertical bastante semelhantes para a maioria dos pontos estudados e concentrações, variando de 9.000 a 107.270 mg/g e 22.935 a 107.286 mg/g, respectivamente (Figs. de 2 a 6). Fe e Al são elementos pouco móveis em ambiente fluvial e geralmente são enriquecidos em sedimentos intensamente lixiviados em regiões subtropicais. Além disso, as drenagens ácidas provenientes das áreas impactadas pelas atividades do processamento de carvão representam fontes importantes destes elementos, através da dissolução de sulfetos de ferro e aluminossilicatos (Clarcke, 1995; Binotto *et al.*, 1999).

Como exceção, o Ponto 3 mostrou variação mais significativa entre estes elementos ao longo do perfil quando comparado aos demais perfis estudados. O Ponto 4 apresentou um empobrecimento relativo de Fe em relação ao Al no topo do perfil, o qual foi acompanhado por outros elementos, como será discutido adiante.

O Fe e o Al apresentaram valores elevados de correlação de Pearson, variando de 0,8 a 1,0 ( $p < 0,05$ ) nos Pontos 1, 2, 4 e 5. O Ti, outro elemento relativamente pouco móvel, ao contrário do esperado, não apresentou correlação significativa com Fe e Al, exceto no Ponto 3, onde a correlação, embora negativa, foi significativa ( $r$  de Pearson -0,92,  $p < 0,05$ ). Este fato pode sugerir uma origem natural para as concentrações de Ti nos sedimentos estudados e contribuições antropogênicas associadas ao processamento do carvão para as alterações das concentrações de Fe e Al.

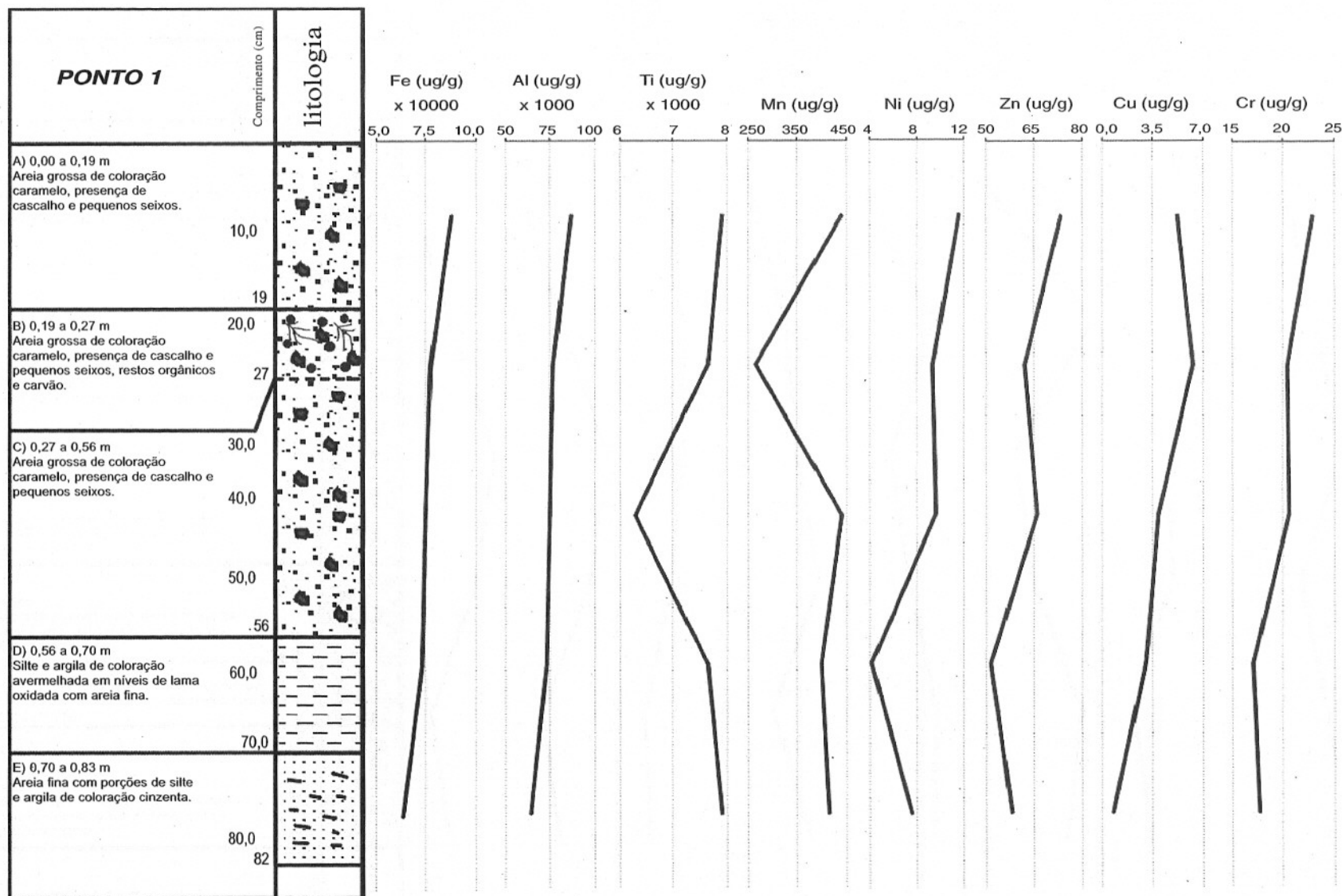


Figura 2 – Perfil vertical de sedimentos fluviais no Ponto 1.

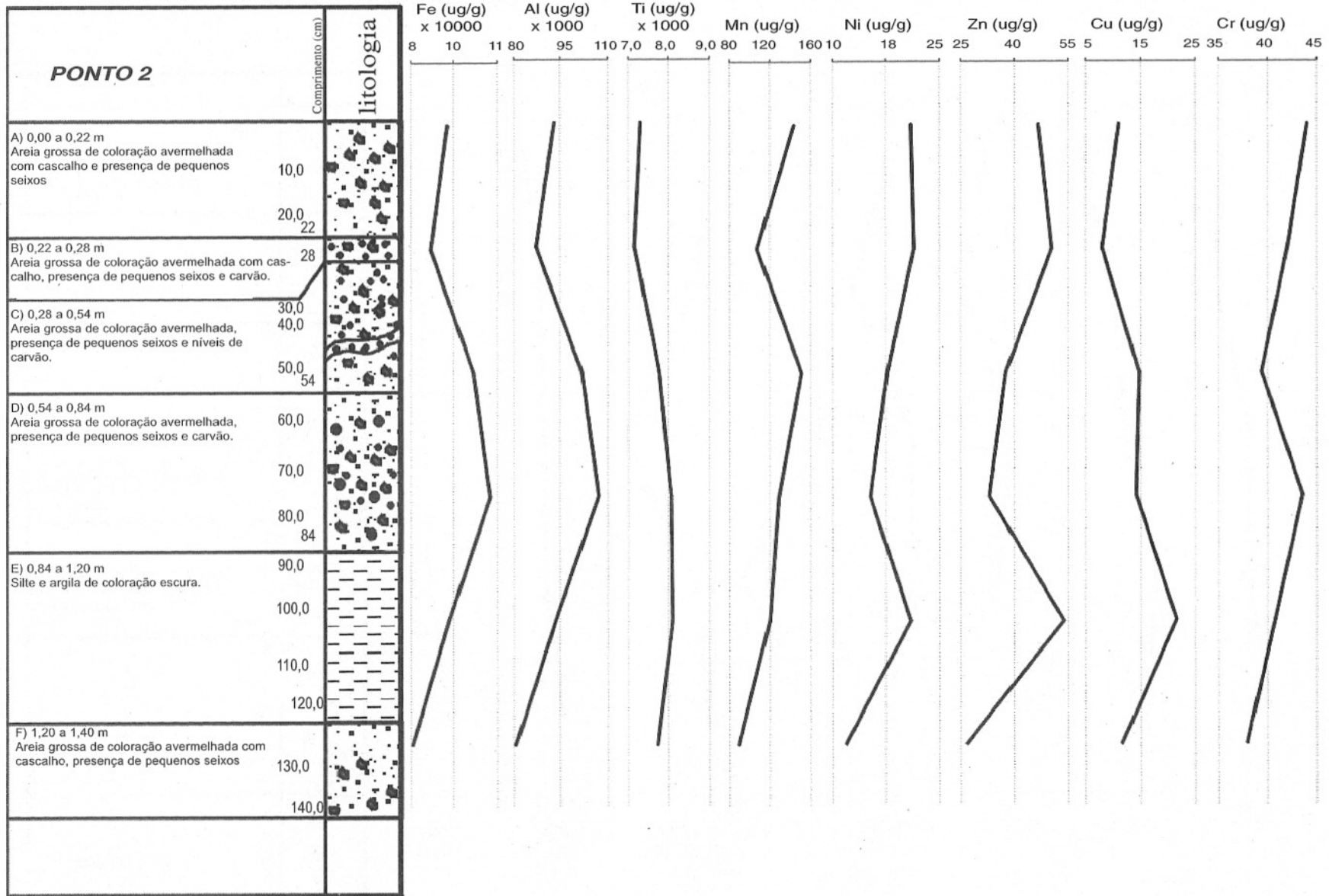


Figura 3 – Perfil vertical de sedimentos fluviais no Ponto 2.



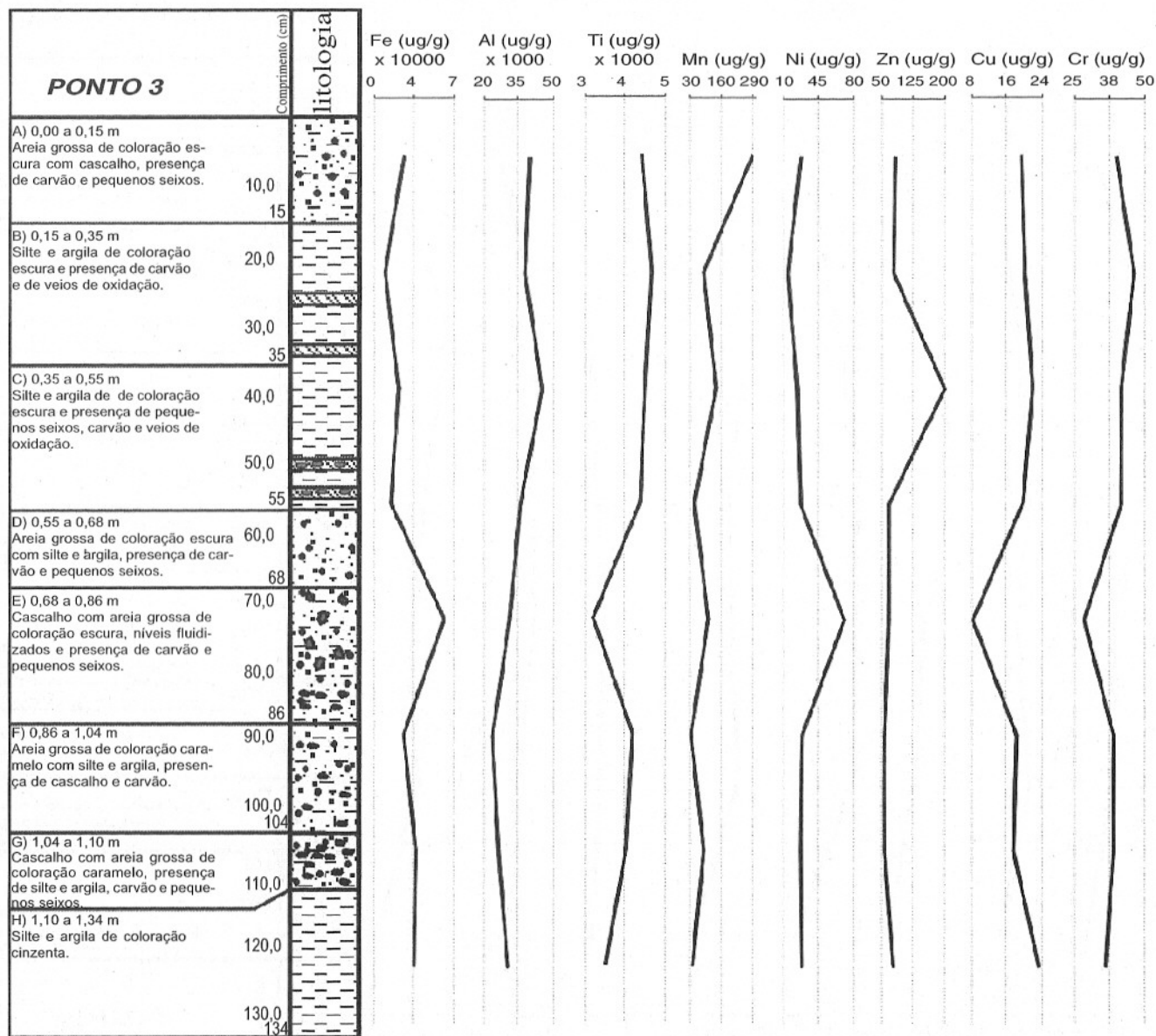


Figura 4 – Perfil vertical de sedimentos fluviais no Ponto 3.

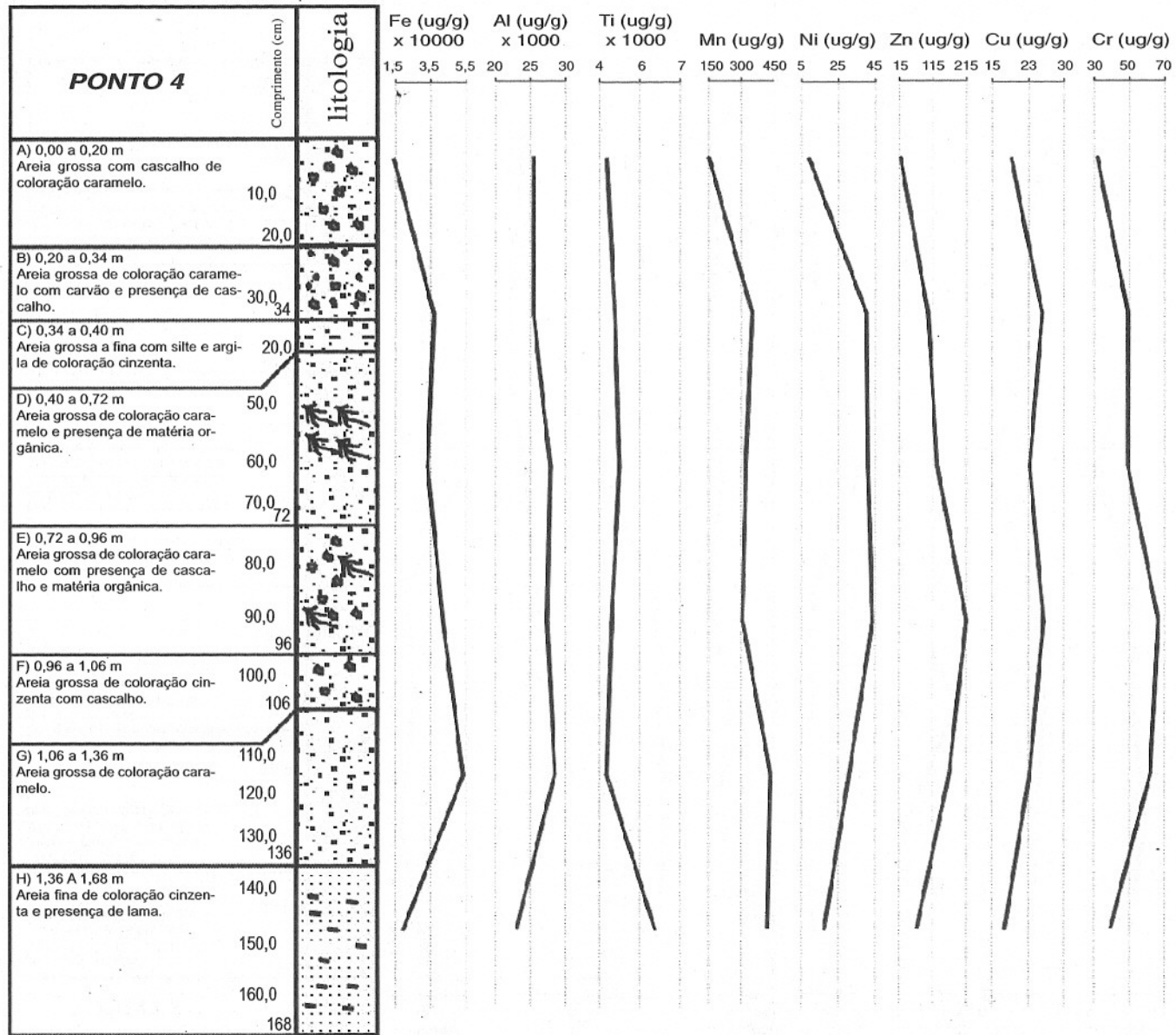


Figura 5 – Perfil vertical de sedimentos fluviais no Ponto 4.

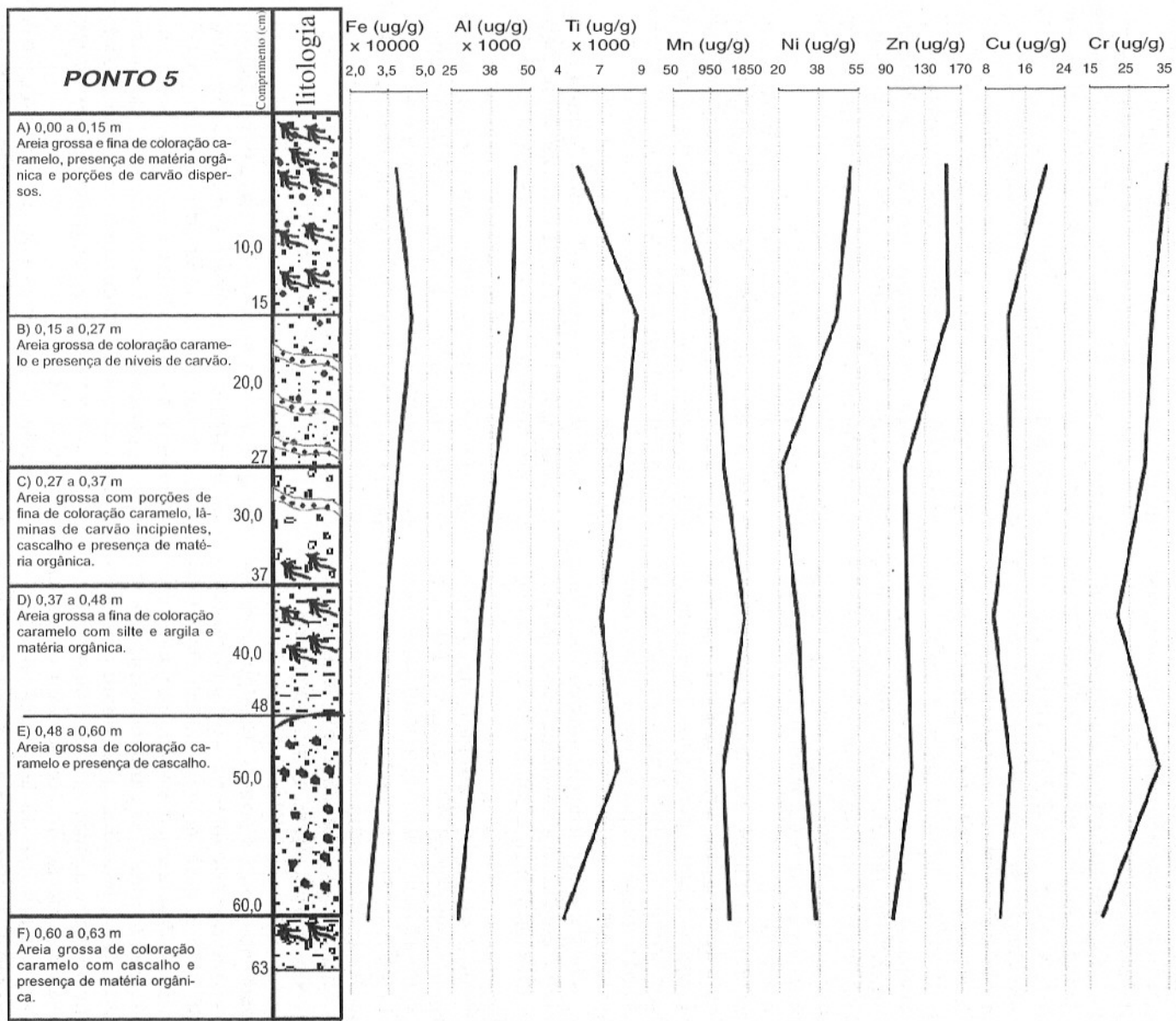


Figura 6 – Perfil vertical de sedimentos fluviais no Ponto 5.

Ni e Zn apresentaram estreita correlação ( $r$  de Pearson variando entre 0,8 e 0,96,  $p < 0,05$ ) em termos de distribuição vertical nos perfis de sedimentos estudados, exceto o Ponto 3 ( $r$  de Pearson - 0,18). Seu comportamento similar pode indicar uma mesma fonte de contribuição, provavelmente associada à dissolução de sulfetos, onde estes elementos ocorrem em concentrações traço (Clarcke, 1995).

Cu e Cr apresentaram comportamento similar ( $r$  de Pearson variando entre 0,71 e 0,78 nos Pontos 1, 3, 4 e 5,  $p < 0,05$ ), mas não tão evidenciado quanto Ni e Zn. No Ponto 1, o Cr foi melhor correlacionado às concentrações de Zn e Ni ( $r$  de Pearson de 0,97 e 0,93, respectivamente, e  $p < 0,05$ ). No Ponto 4, estes quatro elementos mostraram distribuição semelhante, o que pode sugerir a associação destes elementos nos sulfetos presentes nos rejeito de carvão das áreas a montante. O Ponto 2 apresentou perfis de concentração de Cr e Cu mais heterogêneos ( $r$  de Pearson - 0,18).

O Mn foi o elemento que apresentou a maior amplitude de variação, tanto nos perfis verticais como entre os locais amostrados, com concentrações máximas de 1.765 mg/g e mínima de 37 mg/g. O Mn apresenta, geralmente, alta mobilidade geoquímica em meio fluvial e, frequentemente, ocorre na forma de carbonatos altamente solúveis nas camadas sedimentares associadas ao carvão (Teixeira *et al.*, 2000a; Teixeira *et al.*, 1999b).

O Ponto 3 foi o que apresentou maior variação das concentrações de metais ao longo do perfil vertical, com comportamento distinto dos demais perfis. Ni, Cr e Fe apresentaram covariação negativa com Ti ( $r$  de Pearson de 0,82, 0,94 e 0,92, respectivamente, e  $p < 0,05$ ), enquanto Ni mostrou, ainda, correlação com Cu ( $r$  de Pearson - 0,89,  $p < 0,05$ ), e não com Zn, como observado nos demais pontos. Este ponto apresenta acumulação de materiais oriundos da mineração e do beneficiamento do carvão, cujos efluentes são descarregados logo a montante deste ponto. Deste modo, as características dos sedimentos ali acumulados apresentam clara origem antropogênica, uma vez que grande parte é composta por carvão fino do lavador da CRM, extravasado das bacias de decantação nos períodos de chuva. Portanto, é de se esperar que a variabilidade na distribuição geoquímica destes sedimentos varie de acordo com o tipo e as características do rejeito liberado.

O empobrecimento relativo em Fe em relação ao Al no Ponto 4 é acompanhado pelos me-

tais Mn, Ni, Zn, Cu e Cr, no topo da seqüência. Este comportamento pode ser atribuído às condições de acidez das águas superficiais do arroio Martins (verificadas por Binotto *et al.*, 1999), impactadas pela lixiviação dos depósitos de rejeito a montante, a qual favoreceria a mobilização dos elementos mais móveis do topo do perfil de sedimentos para a coluna d'água.

A diminuição das concentrações dos metais nas camadas superiores dos sedimentos fluviais pode estar associada, conforme discutido por Ramanathan *et al.* (1996), à lixiviação e perda de cátions nos sedimentos de superfície. A ocorrência deste processo no Ponto 4 é bastante provável, tendo em vista as características hidrodinâmicas do arroio Martins, que tem suas nascentes situadas em elevações graníticas do Planalto Sul-rio-grandense e uma declividade média mais acentuada em relação ao curso principal do arroio do Conde, bem como suas características hidrogeoquímicas (acidez).

Além disso, a sub-bacia do arroio Martins tem, como fontes potenciais de metais, pesados depósitos de rejeitos e minas de carvão abandonadas. A paralisação das atividades de mineração pode estar se refletindo na lixiviação dos sedimentos de superfície e na não renovação de cargas sólidas oriundas da mineração.

No Ponto 5, é verificada uma diminuição da concentração de Fe, Ti e Mn no topo da seqüência, em oposição a um enriquecimento em Ni, Zn, Cu e Cr. Sugere-se que, neste ponto, os óxidos e hidróxidos não seriam suportes geoquímicos tão importantes quanto a matéria orgânica presente nestas amostras (indicada pela presença de restos vegetais, observada na descrição dos perfis), a qual estaria favorecendo a fixação destes elementos no Ponto 5.

Quanto à recorrência das camadas silítico-argilosas na base dos testemunhos, poderia-se supor que tais sedimentos, que na maioria dos perfis estudados apresentam concentrações mais baixas de metais, representam concentrações referentes aos níveis de base naturais. Sendo assim, as camadas médias e superiores que apresentam certo enriquecimento em metais refletiriam o aumento das cargas metálicas antropogênicas na bacia.

Entretanto, quando se observam os teores de metais na porção basal dos testemunhos (Tabela 2), notam-se diferenças marcantes entre as concentrações dos elementos estudados. Esta ampla variação das concentrações não seria esperada como resposta às contribuições de origem natural associadas ao intemperismo de ro-

**Tabela 2** – Concentração de metais pesados na camada basal dos testemunhos de sedimentos fluviais da bacia do arroio do Conde, RS

| Ponto | Fe<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Al<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Ti<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Mn<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Ni<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Zn<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Cu<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Cr<br>( $\mu\text{g/g}$ ) |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| P1    | 63.840                    | 63.896                    | 7.906                     | 415                       | 7,6                       | 57,8                      | 0,8                       | 17,7                      |
| P2    | 80.460                    | 80.462                    | 7.702                     | 88,9                      | 12,0                      | 26,8                      | 11,8                      | 37,9                      |
| P3    | 35.250                    | 30.545                    | 3.528                     | 44,2                      | 29,0                      | 79,0                      | 23,4                      | 36,1                      |
| P5    | 18.920                    | 22.935                    | 6.102                     | 424                       | 17,9                      | 68,5                      | 17,6                      | 39,1                      |
| P6    | 26.990                    | 26.900                    | 4.276                     | 1.416                     | 36,0                      | 95,5                      | 10,7                      | 18,2                      |

chas e solos da bacia, principalmente considerando pequena variabilidade litológica na área de influência dos pontos de amostragem, associada às formações sedimentares de idade permiana.

Somado a isto, as irregularidades na composição e a variação textural, observadas ao longo dos perfis dos testemunhos (Fig. 2 a 6), indicam uma forte remobilização dos sedimentos depositados no leito fluvial, bem como a influência das atividades de mineração e beneficiamento de carvão com respeito a introdução de material sólido com características diferenciadas (e.g. carvão fino e pedaços de carvão), os quais, em última análise, influenciam na composição de metais pesados.

Segundo Ramanathan *et al.* (1996), o suprimento variável de sedimentos numa bacia hidrográfica pode ser explicado pelos processos naturais controladores da dinâmica fluvial. Porém, conforme demonstrado por Swennen *et al.* (1994), as atividades de mineração podem aumentar em várias vezes a taxa de sedimentação na bacia, devido à remobilização de solos e cobertura estéril, alterando as características naturais dos sedimentos.

Este constante aporte de material alóctone e os indicativos de erosão e remobilização do leito fluvial apontam para condições de difícil preservação de depósitos de sedimentos finos muito antigos. Além disso, as condições de alta descarga fluvial resultam, geralmente, na completa "lavagem", ou retirada de finos, dos sedimentos, dispersando os metais pesados associados, que podem ser transportados para quilômetros de distância a jusante das fontes de contaminação. Tal cenário torna difícil afirmar que as camadas inferiores de granulometria fina representem sedimentos depositados em períodos pré-industriais, os quais não teriam sofrido, ainda, qualquer efeito de remobilização.

Estudos da composição dos sedimentos superficiais na bacia do arroio do Conde (Teixeira *et al.*, 2000 a e b) revelaram que ocorre acumulação dos metais pesados Ni, Co, Zn e Mn apenas no curso inferior do arroio, próximo à sua foz, no Rio-Jacuí, enquanto somente o aumento nas concentrações de Fe foi evidenciado nos trechos fluviais mais próximos às fontes de contaminação, associadas à mineração e ao beneficiamento do carvão.

Tanto a composição química dos sedimentos como suas características texturais, somadas aos aspectos da hidrodinâmica desta bacia, indicam a região de foz como propícia à acumulação de sedimentos de granulometria mais fina e das cargas metálicas oriundas de montante. Sugere-se, portanto, a inclusão desta porção da bacia para o estudo dos perfis verticais e dos processos de sedimentação fluvial e acumulação de cargas metálicas nos sedimentos do arroio do Conde.

## CONCLUSÕES

Os aspectos texturais dos perfis verticais de sedimentos fluviais no arroio do Conde indicam uma intensa remobilização dos sedimentos no leito do canal, com predominância dos processos erosivos sobre os processos de deposição, particularmente em relação aos sedimentos de fina granulometria.

A composição química dos sedimentos, juntamente com os aspectos texturais, indicam ainda a modificação do substrato a partir da introdução de materiais sólidos, oriundos das atividades de mineração e beneficiamento do carvão.

A grande variabilidade composicional nas camadas inferiores entre os pontos de amostragem não permite considerar que os teores de metais pesados na porção basal dos testemunhos sejam utilizados como níveis de referência na bacia.

Pelo contrário, sugere-se que tanto os processos erosivos como a introdução de cargas sólidas de origem antrópica contribuam para a constante alteração das características físicas e químicas dos sedimentos no leito dos canais fluviais na bacia do arroio do Conde.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS, pelo apoio financeiro, e ao Laboratório de Química da FEPAM, pelas análises de metais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREAZZA, A.M.P. (1997) Contribuição à gestão ambiental da bacia hidrográfica do arroio do Conde/RS, com ênfase na qualidade das águas superficiais. Dissertação de Mestrado em Ecologia. Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BELL, A.V.; BAAECHLER, F.E.; PARKER, R. (1992) Management of coal coarse waste: a state-of-art review. In: R.K. SINGHAL; A.K. MEHROTA; K. FYTAS; J.L. COLLINS (Eds.) Environ. Issues and Waste Manag. Energy and Mineral Production. Proceedings, Balkema, Rotterdam. p.367-378
- BINOTTO, R.B.; TEIXEIRA, E.C.; SÁNCHEZ, J.C.D.; NANNI, A.S.; FERNANDES, I. D.; MIGLIAVACCA, D.M. (1999) Avaliação Ambiental da região do baixo Jacuí, RS, Brasil: localização, descrição e caracterização dos resíduos provenientes das atividades de processamento de carvão. Porto Alegre, RS: FINEP-PADET/GTM; FEPAM/CIENTEC, 40p.
- BIRCH, G.F.; EVENDEN, D.; TEUTSCH, M.E. (1994) Dominance of point source in heavy metal distributions in sediments of a major Sydney estuary (Australia). Environ. Geol., **28**(4):169-174.
- CLARCKE, L.B. (1995) Coal mining and water quality. IEACR/80, London.UK, 99p.
- HELGEN, S.O. & MOORE, J.N. (1996) Natural background determination and impact quantification in trace metal-contaminated river sediments. Environ. Sci. Technol., **30**:129-135.
- HOROWITZ, A.J. (1991) A primer on trace metal sediment chemistry. Lewis, Chelsea, 2<sup>nd</sup> edition.
- PROHIC, E.; JURACIC, M. (1989) Heavy metals in sediments – Problems concerning determination of the anthropogenic influence. Study in the Krka River Estuary, Eastern Adriatic Coast, Yugoslavia. Environ. Geol. Water Sci., **13**(2):145-151.
- RAMANATHAN, A.L., SUBRAMANIAN, V.; DAS, B.K. (1996) Sediment and heavy metal accumulation in the Cauvery basin. Environ. Geol., **27**:155-163.
- SALOMONS, W & FÖRSTNER, U. (1980) Trace Metal Analysis on polluted sediments. Part II: Evaluation of Environmental Impact. Environ. Lett., **1**:506-517.
- SWENNEN, R; VAN KEER, I; DE VOS, W. (1994) Heavy metal contamination in overbank sediments of the Geul River (East Belgium): Its relation to former Pb-Zn mining activities. Environ. Geol., **24**:12-21.
- TEIXEIRA, E.C.; BINOTTO, R.B.; SANCHEZ, J.D.; MIGLIAVACCA, D.; FACHEL, J. (1999a) Environmental assessment and characterisation of residues from coal processing and steel industry activities. Fuel, **78**:1161-1169.
- TEIXEIRA, E.C.; SANCHEZ, J.D.; ALVES, M.; FORMOSO, M.L.L. (1999b) Extração parcial aplicada a sedimentos de áreas impactadas pelas atividades do processamento de carvão - região do Baixo Jacuí -Rio Grande do Sul - Brasil. Geochim. Bras., **13**(1):067-083.
- TEIXEIRA, E.C.; SANCHEZ, J.D.; ORTIZ, L.S.; VECCHIO, G.; MIGLIAVACCA, D.M.; HAASE, J.; COBALCHINI, M.S.; CASTRO, J.E. (2000a) Avaliação ambiental da Região do Baixo Jacuí, RS, Brasil: Qualidade das águas superficiais e sedimentos fluviais. Porto Alegre, RS: FINEP - PADCT/GTM; FEPAM/CIENTEC, 42p.
- TEIXEIRA, E.C.; SANCHEZ, J.S.; MIGLIAVACCA, D.; BINOTTO, R.; FACHEL, J.M.G. (2000b) Environmental assessment: Study of metals in fluvial sediments in sites impacted by coal processing and steel industry activities. Fuel, **79**:1539-1546.
- ZOBER, S. & MAGNUSZEWSKI, A. (1998) Wyszogrod Island (Vistula River, Poland) sediments: hydrological explanation of heavy metal concentrations. J. Geochem. Explor., **64**:35-45.