

## **Modelagem de As em prospecção geoquímica: estudo de caso no vale do Ribeira – SP.**

José Maria Filippini Alba <sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Embrapa Clima Temperado  
Caixa Postal 403 – 96001-970 - Pelotas - RS, Brasil  
fili@cpact.embrapa.br

<sup>2</sup>Instituto de Geociências – UNICAMP  
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
beto@ige.unicamp.br

**Abstract.** A method of data fusion is discussed, where geochemical files (locations) and images layers are overlapped in GIS environment. Data were organized through microbasins and multivariate statistical data were applied. Geochemical modelling was adequated for **As**, but not for **Pb**.

**Palavras-chave:** Geochemistry, GIS, statistic, geoquímica, SIG, estatísticas.

### **1. Introdução**

Em prospecção geoquímica é comum o uso da interpolação para converter dados pontuais em imagens, sendo avaliada a distribuição espacial das variáveis (Thornton, 1983; Koljonen, 1992). Essas informações podem, de maneira adicional, ser fusionadas com imagens de satélite em sistemas de informação geográfica - SIG (Gaál, 1988; Filippini-Alba, 1998). Para evitar os erros introduzidos pela interpolação, quando considerados dados geoquímicos de sedimentos de corrente, Bonham-Carter (1994) recomenda o uso do método das microbacias.

Hawkes (1976) aplicou o modelo de diluição sobre dados de sedimentos de correntes em prospecção geoquímica. Nesse modelo, o teor de um elemento é relacionado ao teor de fundo da microbacia, à área da microbacia e à ocorrência de mineralizações, sendo adequado quando existe um forte controle mecânico sobre a dispersão geoquímica.

Neste estudo aplicaram-se métodos estatísticos e de SIG sobre dados geoquímicos de sedimentos de corrente no Médio Vale do Ribeira (IPT, 1985), transformados através do método das microbacias, visando modelar os teores de **As** e **Pb**, por meio da análise de regressão envolvendo variáveis físicas e químicas, de maneira que fosse avaliada sua procedência: atividades antrópicas, mineralizações ou litologia.

### **2. Material e métodos**

A área de estudo abrange as folhas 1/50.000 Iporanga e Gruta do Diabo, localizadas no Vale do rio Ribeira de Iguape, na região da fronteira entre os Estados de Paraná e São Paulo (**Figura 1**). Trata-se de um antigo distrito mineiro (Moraes, 1997), de geologia bem conhecida (Perrotta, 1996), onde ocorre uma anomalia regional de **As** em sedimentos de corrente e solos, segundo indicado por estudos prospectivos desenvolvidos pela CPRM (Addas e Vinhas, 1975; Morgental et al., 1975; Morgental et al., 1978).

A base de dados disponível foi organizada no ambiente SIG (ESRI, 1999) e compreendeu: (i) dados geográficos (Sinbiota, 1999); (ii) dados geoquímicos de sedimentos de correntes (IPT, 1985); (iii) o modelo digital de elevação (MDE) derivado de dados da Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM da NASA.

A fração inferior a 80 mesh das amostras geoquímicas foi analisada para 25 elementos nos Laboratórios do IPT (op. cit.): As (espectrometria de absorção atômica); F (eletrodo seletivo); Ca, Fe, Mg, Ti, B, Ba, Be, Co, Cr, Cu, La, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Sn, Sr, V, Y, Zn e Zr (espectrometria ótica de emissão).

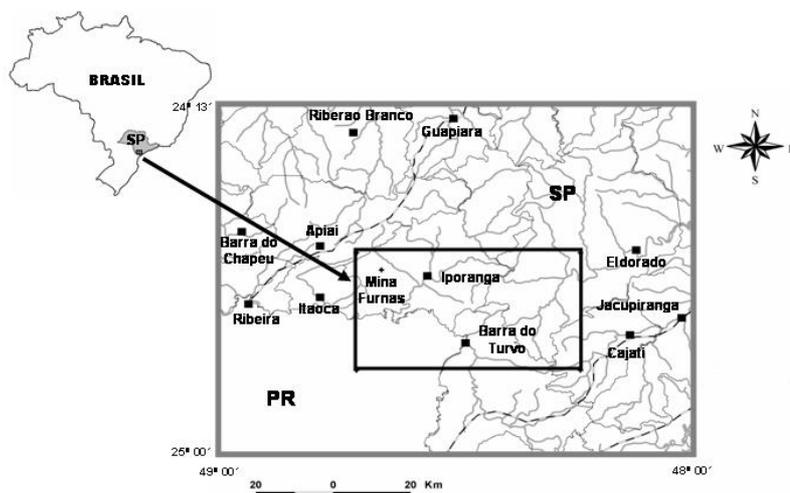


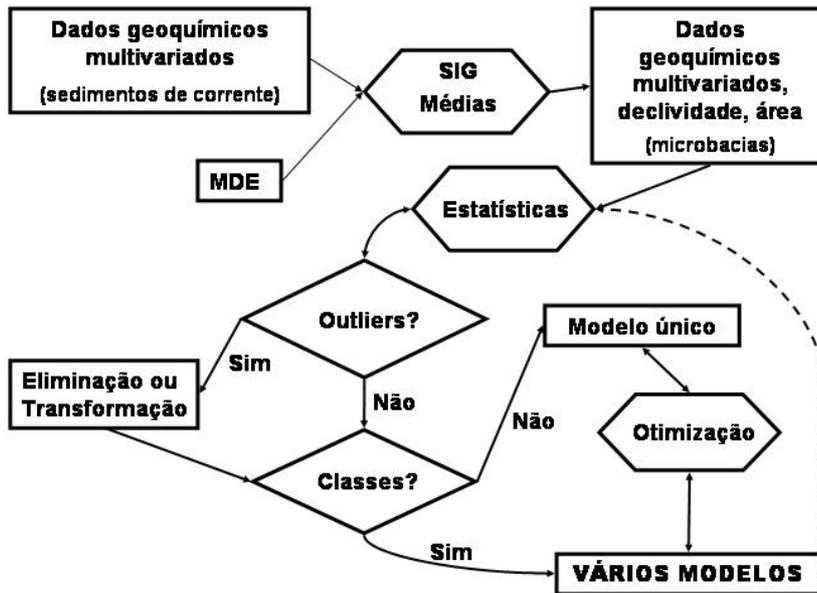
Figura 1. Localização da área de pesquisa.

O MDE foi levantado durante a SRTM, em fevereiro de 2000, por meio de interferometria de radar; possui resolução horizontal de 90m e vertical de 10m (Souza Filho, 2003). A delimitação das microbacias hidrográficas e as posteriores classificações das amostras foram realizadas com o auxílio do software ArcView (ESRI, 2005), considerando o MDE. Foi escolhido um tamanho médio de área de microbacia de 8,5 km<sup>2</sup>, variando no intervalo 0,1 - 31 km<sup>2</sup>, resultando 111 microbacias no total.

O método das microbacias foi aplicado considerando a média das amostras interiores como representativas do teor de cada microbacia para um dado elemento. Filippini-Alba et al. (2003) analisaram a influência do tamanho das microbacias sobre a variabilidade geoquímica em dados de sedimentos de correntes do Médio Vale do Ribeira, concluindo que a perda do efeito local ocorre para microbacias de área média maior que 20 km<sup>2</sup>.

Na área de estudo foram elaborados modelos baseados nos princípios do modelo de diluição (Hawkes, 1976), na tentativa de reproduzir o comportamento geoquímico natural de **As** e **Pb**, elementos peculiares na área de pesquisa. No entanto, para aproveitar o caráter multivariado dos dados geoquímicos, foi utilizada uma estratégia diferente, através da análise de regressão, de maneira que variáveis adicionais foram inseridas nos modelos elaborados.

Essa abordagem requer o conhecimento prévio do comportamento das variáveis consideradas, relacionado à transformação dos dados, à ocorrência de *outliers* (amostras inconsistentes) e/ou de classes (grupos de amostras com comportamento característico) e à análise das correlações, sendo executado um processamento estatístico múltiplice, segundo o quadro da **Figura 2**, apresentado na próxima seção (Processamento estatístico exploratório). Finalmente, o SIG permitiu a análise espacial dos resultados.



**Figura 2.** Quadro explicativo do processamento estatístico múltiplice.

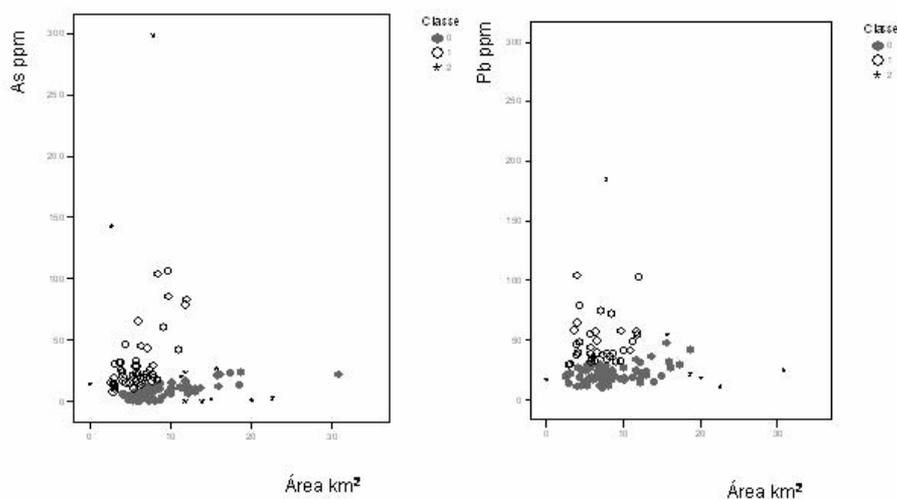
### 3. Processamento estatístico exploratório

Na **Tabela 1** se comparam as médias e os coeficientes de variação para as amostras originais e as microbacias, sendo descartadas as variáveis muito afetadas pelos (**Be**, **La**, **Li**, **Mo** e **Sn**). Área, declividade e elevação são variáveis associadas as microbacias e seus valores foram extraídos com auxílio de SIG. O teste Não Paramétrico de Kolgomorov – Smirnov (Davis, 1986) mostrou log-normalidade para todas as populações de microbacias, exceto para o **Zr**.

A análise das dependências foi realizada por meio de dois procedimentos: (1) cálculo de coeficientes de correlação, onde se corroborou uma forte correlação de vários traços com o **Fe**, além de baixas correlações entre às variáveis físicas e químicas; (2) pela observação dos diagramas de dispersão, onde foi evidenciada a ocorrência de amostras inconsistentes (*outliers*) e de subpopulações de amostras. Assim, foi possível discriminar conjuntos de amostras levando em conta o teor do elemento (**As** ou **Pb**) e a área de microbacia, denominados classes 0, 1 e 2 (**Figura 3**). A classe 0 corresponde a uma relação moderada entre área de microbacia e o teor do elemento. Na classe 1, o teor do elemento aumenta drasticamente ao aumentar a área de microbacia. A classe 2 representa *outliers* empobrecidos, enriquecidos ou transicionais.

**Tabela 1.** Médias e coeficientes de variação (CV) para o total de amostras e para as microbacias.

<i>Variável (unidade)</i>	<i>Geral (N = 763)</i>		<i>Microbacias (N = 111)</i>	
	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>
Área (km <sup>2</sup> )	Não	Não	8,5	54 %
Declividade(°)	Não	Não	16	17 %
Elevação (m)	Não	Não	353	45 %
Fe (%)	4,6	51 %	4,5	37 %
Ca (%)	0,3	246 %	0,3	153 %
Mg (%)	0,4	88 %	0,4	66 %
Ti (%)	0,9	79 %	0,9	52 %
Mn (ppm)	1870	78 %	1796	58 %
As (ppm)	23	199 %	22	154 %
B (ppm)	137	84 %	138	53 %
Ba (ppm)	503	45 %	503	29 %
Co (ppm)	23	72 %	22	47 %
Cr (ppm)	85	58 %	83	33 %
Cu (ppm)	46	82 %	43	53 %
F (ppm)	452	50 %	457	32 %
Nb (ppm)	27	59 %	27	37 %
Ni (ppm)	34	53	33	36 %
Pb (ppm)	38	255	32	70 %
Sr (ppm)	59	82	59	57 %
V (ppm)	108	50	105	30 %
Y (ppm)	30	61	30	35 %
Zn (ppm)	89	65	87	37 %
Zr (ppm)	290	86	286	46 %



**Figura 3.** Diagramas de dispersão de teor de As e Pb em função de área de microbacia.

#### 4. Otimização dos modelos de regressão

Durante o processamento estatístico exploratório observou-se que diferentes processos geológicos controlam a variabilidade geoquímica, como o conteúdo de óxidos de **Fe**, a erosão e a ocorrência de rochas específicas ou mineralizações, existindo diversos graus de associação das variáveis físicas e químicas com esses processos. Assumiu-se que o teor de **As** e de **Pb** nos sedimentos de corrente poderiam ser reproduzidos por uma combinação linear de variáveis físicas e químicas (modelo de regressão).

Os modelos apresentaram melhor ajuste quando consideradas as classes 0 e 1 separadamente. A otimização envolveu a aplicação da transformação logarítmica ou não e a seleção das variáveis, sendo utilizadas a área e declividade de microbacia e os teores de **As**, **Cr**, **Cu**, **Fe**, **Mn**, **Pb**, **V**, **Zn**. As variáveis geoquímicas foram escolhidas em função das suas propriedades (Govett, 1983), por exemplo, **As**, **Cu**, **Pb** e **Zn** possuem caráter sulfófilo e se encontram associados a mineralizações. **Fe** e **Mn** se relacionam com formações superficiais (hidróxidos e óxidos) e **Cr** e **V** possuem maior tendência para o caráter litófilo. Observa-se que alguns elementos apresentam comportamento de transição, como no caso de **Cu** e **Zn**.

Nas **Tabelas 2 e 3** são apresentados os parâmetros dos modelos de regressão para **As** e **Pb** respectivamente. O modelo B (**Tabela 2**) significa que para as microbacias da classe 0 e sem transformar os dados em logaritmos, se verifica:

$$As = 1,6.Fe + 0,08.Pb + 0,74.Area - 6,4$$

A estatística **F** mede a razão entre a variância explicada pelo modelo (**VEX**) e a variância residual, sendo que, valores expressivos representam um bom ajuste do modelo. Esses parâmetros junto a inexistência de coeficientes negativos, com a exceção de **K**, foram considerados para escolher os modelos (destacados em negrito). Ainda assim, existem dois ou mais modelos possíveis em cada situação, com a exceção da classe 1 do **Pb**, cujos modelos apresentaram baixa **VEX**. Por esse motivo, a atenção será focalizada no **As**.

**Tabela 2.** Modelos de regressão para **As**, considerando as 55 microbacias da Classe 0 (celas sombreadas) e as 46 microbacias da classe 1. **VEX** = Variância explicada pelo modelo. **Log** = aplicação da transformação logarítmica ou não.

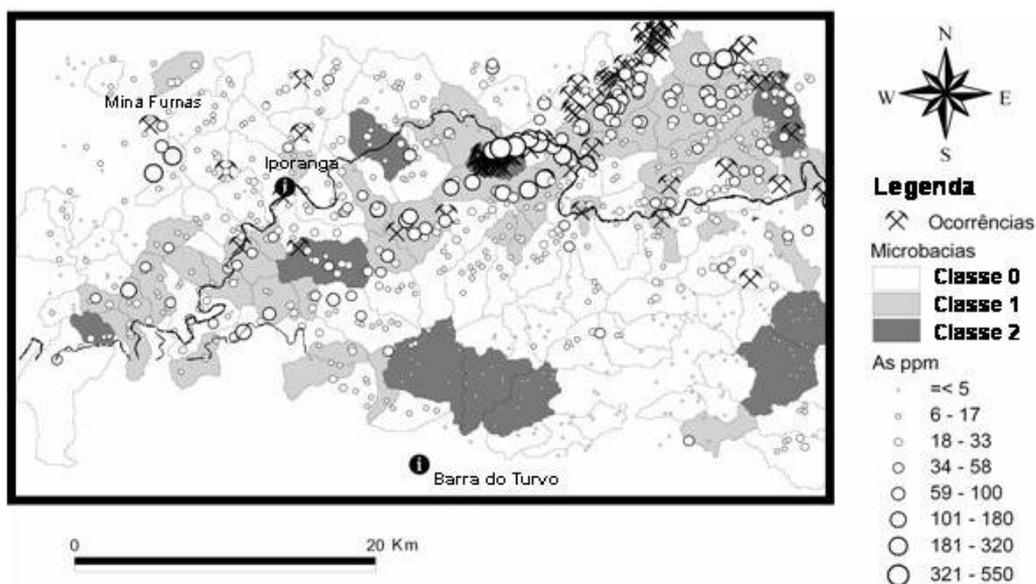
<i>Modelo</i>	<i>VEX</i>	<i>Log</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>V</i>	<i>Área</i>	<i>K</i>	<i>F</i>
A	70 %	Não	1,9	Não	Não	-0,04	0,08	Não	0,74	- 6,5	30
B	<b>70 %</b>	Não	<b>1,6</b>	Não	Não	Não	<b>0,08</b>	Não	<b>0,74</b>	- <b>6,4</b>	<b>40</b>
C	<b>70 %</b>	Não	<b>1,4</b>	<b>0,001</b>	Não	Não	Não	Não	<b>0,76</b>	- <b>5,3</b>	<b>39</b>
D	69 %	Não	2,2	Não	Não	-0,03	Não	Não	0,75	- 5,9	38
E	57 %	Sim	1,2	Não	Não	Não	0,09	Não	0,82	- 8,0	22
F	58 %	Não	-1,3	Não	0,36	Não	0,24	Não	4,3	-29,0	15
G	61 %	Não	Não	Não	0,14	Não	0,19	0,21	4,0	- 35,1	17
H	58 %	Não	Não	Não	0,31	Não	0,21	Não	4,4	-30,5	20
I	60 %	Não	Não	Não	Não	Não	0,23	0,28	4,1	- 31,9	22
J	<b>65 %</b>	Sim	Não	Não	Não	Não	<b>0,37</b>	<b>0,78</b>	<b>0,60</b>	- <b>4,8</b>	<b>27</b>
K	64 %	Sim	Não	Não	0,75	Não	Não	0,64	0,60	- 5,4	25
L	<b>66 %</b>	Sim	Não	Não	<b>0,81</b>	Não	<b>0,35</b>	Não	<b>0,62</b>	- <b>4,9</b>	<b>27</b>
M	<b>68 %</b>	Sim	Não	Não	<b>0,53</b>	Não	<b>0,30</b>	<b>0,49</b>	<b>0,58</b>	- <b>5,0</b>	<b>22</b>
N	70 %	Sim	-0,46	Não	0,60	Não	0,40	0,78	0,52	- 4,2	18

**Tabela 3.** Modelos de regressão para o **Pb**, considerando as 69 microbacias da classe 0 (celas sombreadas) e as 32 da classe 1. **VEX** = Variância Explicada pelo modelo; **DEC** = Declividade. “**Log**” refere-se à aplicação da transformação logarítmica ou não.

Modelo	VEX	Log	Fe	Mn	As	Zn	Área	DEC	K	F
O	57 %	Não	<b>0,68</b>	<b>0,006</b>	Não	Não	<b>0,31</b>	Não	<b>9,3</b>	<b>29</b>
P	51 %	Sim	0,04	0,40	Não	Não	0,10	Não	-0,71	23
Q	49 %	Não	3,0	Não	0,13	Não	0,34	Não	6,3	21
R	<b>55 %</b>	Não	<b>0,99</b>	<b>0,006</b>	Não	Não	Não	Não	<b>10,4</b>	<b>40</b>
S	<b>57 %</b>	Não	Não	<b>0,006</b>	<b>0,03</b>	Não	<b>0,33</b>	Não	<b>10,4</b>	<b>28</b>
T	53 %	Sim	Não	0,50	-0,06	Não	0,10	Não	-0,81	24
U	25 %	Sim	-0,01	Não	Não	0,56	Não	Não	0,59	5
V	27 %	Não	Não	0,03	0,22	Não	Não	5,1	-54,8	4
W	28 %	Sim	Não	0,21	0,15	Não	Não	1,3	-0,92	4

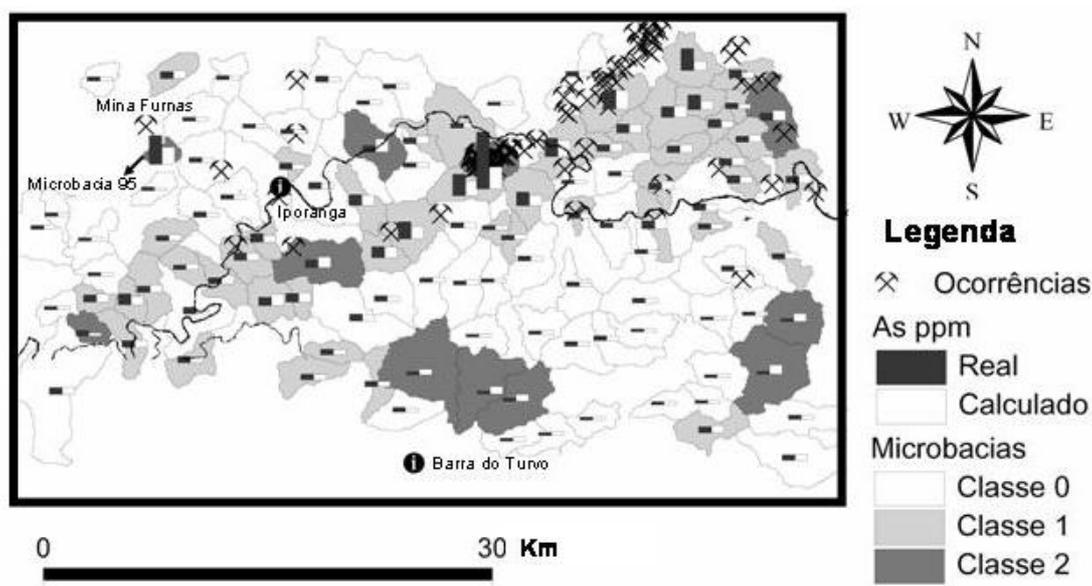
Na **Figura 4** é apresentada a distribuição das microbacias na área des pesquisa segundo sua classe, sendo sobrepostos os teores de **As** (mapa de círculos) e as ocorrências minerais. Resulta evidente uma sobreposição da classe 0 com o teor de fundo regional de **As** e da classe 1 com as ocorrências minerais e anomalias de **As**.

Voltando a discussão dos modelos (**Tabela 2**), há uma clara dependência com a classe. Para a classe 0 (fundo geoquímico regional), destaca-se a participação do **Fe** e da área, com o **Pb** (modelo B) ou o **Mn** (modelo C) com papel coadjuvante. Isso sugere a influência dos processos de sorção sobre hidróxidos e óxidos férricos, e da erosão, em função da participação da área. O uso de logaritmos, para os modelos da classe 1, justifica-se pela log-normalidade das distribuições oportunamente citada. A participação da área, do **Pb** e do **Cr** e/ou **V** (modelos J, L e M) sugere um controle da erosão, das mineralizações e da litologia (encaixantes máficas?), diferente do mencionado para a classe 0.



**Figura 4.** Espacialização dos teores de **As** e das classes 0, 1 e 2 das microbacias na área de pesquisa.

Na **Figura 5** se comparam os teores reais de **As** com os calculados em função dos modelos para as classes 0 e 1 - 2 (*outliers*), modelos B e M respectivamente. Destaca-se que várias microbacias, principalmente as *outliers*, mostram teores reais bem acima dos valores calculados. No caso da microbacia 95 (**As** real = 144 ppm; **As** calculado = 80 ppm), onde se localiza a antiga mina Furnas, esse comportamento justificar-se-ia pelas atividades antrópicas. Diversos autores já utilizaram métodos estatísticos multivariados para discriminar a assinatura geoquímica antrópica (Selinus e Esbensen, 1995).



**Figura 5.** Comparação dos dados reais e calculados do **As** por meio de diagramas de barras, considerando os modelos B e M.

## 5. Considerações finais

Os dados geoquímicos foram modelados considerando o método das microbacias e procedimentos estatísticos multivariadas em ambiente SIG. A variância geoquímica em sedimentos de corrente é controlada pela erosão, pelos processos de sorção e pela ocorrência de mineralizações ou de rochas específicas, no entanto, esses processos não atuam de maneira uniforme. Os princípios do modelo de diluição (Hawkes, 1976) foram corroborados, principalmente para o **As**. A modelagem realizada relativa à resposta geoquímica natural mostrou potencialidade para a discriminação de ambientes onde houve significativa influência de atividades antrópicas, na única situação constatada (mina Furnas).

## Referências

- Addas, W.; Vinhas, C.A.G. da. **Projeto Sudelpa: relatório final reconhecimento geoquímico**. São Paulo: Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, 1975. v. 15/17.
- Bonham-Carter, G. (1994). **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Pergamon, 1994. 398p.
- ESRI. **ArcView GIS 3.2** (handbooks). U.S.: Environmental Systems Research Institute Inc., 1999. paginação irregular.
- Filippini Alba, J.M.; Souza Filho, C.R.; Figueiredo, B.R. de. Análise da Variância de dados geoquímicos assistida por Sistemas de Informação Geográfica: Estudo de caso no Vale do Ribeira, São Paulo. **Geoquímica Brasiliensis**, 2004 (no prelo).
- Gaál, G. (ed.). **Exploration target selection by integration of geodata using statistical image processing techniques: an example from Central Finland (part I - text)**. Espoo: Geological Survey of Finland, 1988. 156p. (Report of Investigation 80).
- Govett, G.J.S. **Rock Geochemistry in mineral exploration**. Amsterdam: Elsevier, 1983. 461p.
- Hawkes, H.E. The Downstream dilution of Stream Sediment Anomalies. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 6, p. 345-458, 1976.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Projeto geoquímica regional das folhas Guapiara, Iporanga, Gruta do Diabo, Araçáiba, Barra do Chapéu**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1985 (Relatório 28631).
- Koljonen, T. **The geochemical atlas of Finland** (Part 2 – Till). Espoo: Geological Survey of Finland, 1992. 218p.
- Moraes, R. P. **Transporte de chumbo e metais associados no Rio Ribeira de Iguape, São Paulo, Brasil**. 1997. 94p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.
- Morgental, A.; Batolla Jr., F.; Pinto, G.G.; Paiva, I.P.; Drumond, J.B.V. **Projeto Sudelpa: relatório final**. São Paulo: Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, 1975. 18 v.
- Morgental, A.; Silva, A.A.G.P. da; Borin Jr., T.; Alegri, V.; Oliveira, P.E.P. de. (1978). **Projeto geoquímica no Vale do Ribeira: relatório final**. São Paulo: Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais. 1978. 8 v.
- Perrotta, M. **Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos num Sistema de Informações Geográficas**. 1996, 150p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 1996.
- Selinus, O.; Esbensen, K. Separating anthropogenic to natural anomalies in environmental geochemistry. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 55, p. 55-66, 1995.
- SINBIOTA – Sistema de informação ambiental. São Paulo: Instituto Virtual da Biodiversidade. Disponível em: <<http://www.sinbiota.org.br>>. Acesso em: 5 de junho 2004.
- Souza Filho, C. R. O relevo das Américas como nunca antes visto. **InfoGEO**, v. 30, p. 54-58, 2003.
- Thornton, I., (ed.). **Applied environmental geochemistry**. London: Academic Press, 1983. 501 p.