

## **Método geoestatístico para modelagem ambiental de poluentes em sistemas lacustres – Amazônia Ocidental.**

Ronaldo de Almeida<sup>1</sup>  
José Vicente Elias Bernardi<sup>1</sup>  
Wanderley Rodrigues Bastos<sup>1</sup>  
Elisabete Lourdes do Nascimento<sup>1</sup>  
Ronaldo Cavalcante de Oliveira<sup>1</sup>  
Dario Pires de Carvalho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Rondônia Laboratório de Biogeoquímica Ambiental CEP 78900 –  
500 Campus José Ribeiro Filho, Porto Velho Ro, Brasil.  
ronaldoalmeida@unir.br

**Abstract.** This work uses the geostatistical method for mercury and organic matter spatial modeling in lakes systems. It uses the indicative kriging to elaborate probabilities maps of mercury and organic matter concentration in sediment. The fitting model so much to mercury how to organic matter was the gaussian model. The geostatistic was a effective tool in the pollutant environmental modeling in lakes sediments. Starting from sampled points, the indicative kriging allowed to reconstruct the representative surface of Hg concentrations in lakes sediments. Through the geostatistic use we can observe that total Hg concentration and organic matter in sediment varies spatiality and this variation depends on the neighborhood samples concentrations.

**Palavras-chave:** Geostatistical, indicative kriging, Lake, mercury, Geoestatística Krigagem indicativa, mercúrio.

### **1. Introdução**

A necessidade de conhecer uma área tão vasta como a região amazônica, onde surgiam garimpos de ouro e, conseqüentemente o emprego do Hg no processo de extração se deu a uma velocidade espantosa, levando os pesquisadores a desenvolver trabalhos de prospecção ambiental e avaliar os potenciais riscos que o Hg pode causar a saúde humana, não sendo possível estabelecer uma grade com maior esforço amostral, dificultando a análise espacial de Hg na região.

A partir de 2004, pequenas porções geográficas e seu contingente humano passam a ser alvo de estudos mais detalhados, constituindo os chamados estudos de caso. Como exemplo, cita – se, o lago Puruzinho no baixo rio Madeira aonde distribuição de mercúrio em sedimentos vem sendo abordada. Tais estudos visam à compreensão da estrutura espacial das concentrações de Hg e matéria orgânica (MO). Estes lagos apresentam sedimentos ricos em matéria orgânica (Almeida, 2006), e o mercúrio pode ser encontrado adsorvido a matéria orgânica como, verificado por Vergotti (2001) em estudos realizados em lagos na bacia do rio madeira.

O presente trabalho, além de apresentar resultados quantitativos como contribuição no Projeto Puruzinho ao estudo de Hg na região Amazônica. Tem como objetivo utilizar ferramentas geoestatísticas para modelar a variabilidade espacial dos dados e aplicar algoritmo Krigagem Indicativa para mapear a distribuição de Hg e matéria orgânica no sedimento de fundo do lago Puruzinho, Amazonas.

#### **1.1 Análise geoestatística**

A geoestatística se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas. Uma variável regionalizada (VR) tem um comportamento médio, mais ou menos bem definido na sua estrutura espacial que caracteriza a variável considerada (Grip, 1992; Landim, 1998). A modelagem de poluentes em lagos utilizando geoestatística é possível uma vez que,

propriedades como concentração de elementos-traço (Grip, 1992) ou conteúdo de matéria orgânica variam continuamente sobre o espaço.

O uso de técnicas geoestatísticas para prever a distribuição espacial de elementos-traço vem portando auxiliar na modelagem de dados ambientais e contribuir para sua evolução da geoestatística enquanto conhecimento específico. Associado a isto, alguns aspectos se tornam fundamentais, dentre eles, procedimentos metodológicos que permitem avaliar a distribuição de Hg total em lagos Amazônicos. Estes ambientes lacustres são elementos da paisagem importantes uma vez que estabelece relações ecológicas entre os ecossistemas terrestres e aquáticos, desempenhando papel fundamental na exportação e importação de poluentes, como ocorre nos sistemas de lago do rio Madeira (Almeida et al., 2005).

Considerando que a distribuição de mercúrio em ambientes de lago do baixo Madeira é influenciada tanto por processos naturais, quanto por processos antropogênicos Leckler et al, (2000). Estes processos podem se dar de forma relativamente estáveis, isso implicaria na presença de estacionaridade, que supõe um comportamento homogêneo da estrutura da correlação espacial dentro de uma área em estudo (Câmara et al., 2006).

A modelagem variográfica e a krigagem podem auxiliar no entendimento da dinâmica de elementos-traço em lagos amazônicos. O semivariograma experimental é a ferramenta geoestatística que permite avaliar o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e demonstra: O tamanho da zona de influência em torno de uma amostra; a anisotropia; e a continuidade ou não na origem (Guerra, 1998; Landim, 1998).

A função para o semivariograma indicativo pode ser assim definida:

$$y_i(h, v_c) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [i(x+h, v_c) - i(x, v_c)]^2$$

onde:

$h$  passo (lag) básico

$v_c$  nível de corte

$N$  número de pares de pontos

A função semivariograma será utilizada na produção de mapas utilizando a krigagem indicativa. Onde são realizadas estimativas baseadas em valores que se situam abaixo ou acima de um determinado nível de corte (cut off).

### 1.3 Krigagem por indicação

Os diversos métodos de krigagem constituem a âncora dos procedimentos geoestatísticos. Este trabalho utiliza - se como técnica estatística a krigagem indicativa. Essa técnica de inferência estatística não linear baseia-se na premissa de que a propriedade em estudo é considerada uma variável aleatória em cada posição não amostrada. As inferências dos valores e das incertezas são obtidas a partir da construção da função de distribuição acumulada, condicionada aos dados amostrados, de cada variável aleatória (Ortiz et al., 2003; Felgueiras et al., 2006), possibilitando inferências de valores, a partir de amostras pontuais de um atributo espacial. Estas inferências são usadas para finalidades de mapeamento de atributos espaciais (Felgueiras, 1999; Landim, 1998).

As estimativas são baseadas em valores que se situam abaixo ou acima de um determinado nível de corte (cut off). Onde uma função poderá ser ajustada. Deste modo é necessário transformar os dados originais em indicadores, ou seja, os valores que estão acima de um determinado nível de corte em zero (0) e os que estão abaixo em um (1):

$$i_j(v_c) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_j \leq v_c \\ 0 & \text{se } v_j > v_c \end{cases}$$

## 2. Materiais e Métodos

A entrada de dados foi organizada no software ARGIS 9.0<sup>®</sup> de forma a receber fontes de dados raster (Imagem RGB LANDSAT TM 7), dados de GPS coletados em campo e dados vetoriais obtidos através da digitalização de imagens.

A análise variográfica foi realizada a partir do módulo “Geoestatistical Wizard” do ARGIS 9.0<sup>®</sup> que consistiu no cálculo de semivariogramas experimentais para as variáveis, matéria orgânica (MO) e mercúrio (Hg).

Os limites do lago foram definidos a partir de imagens de satélite LANDSAT TM 7 elaboradas a partir da composição colorida RGB Bandas 3, 4 e 5, com data de passagem de 16 de julho de 2003. Os limites da área amostrada foram digitalizados em ARCGIS 9.0, onde foi construído um mapa base da área na escala de trabalho 1:10.000.

Para elaboração do desenho experimental da área fez-se uso da metodologia proposta por Bernardi et al. (2001), onde utilizando receptor de GPS (*Global Position System*) estabeleceu-se 11 transectos em uma área de 10Km de extensão, sendo 3 pontos por transecto, somando um total de 33 pontos para a amostragem de sedimentos de fundo, distribuídos em uma malha regular. As amostragens foram realizadas nos períodos de seca e cheia (**Figura 1**).

A entrada dos dados foi organizada no software ARGIS 9.0<sup>®</sup>, de forma a receber fontes de dados raster (Imagem RGB LANDSAT TM 7), dados de GPS coletados em campo e dados vetoriais obtidos através da digitalização da composição RGB.

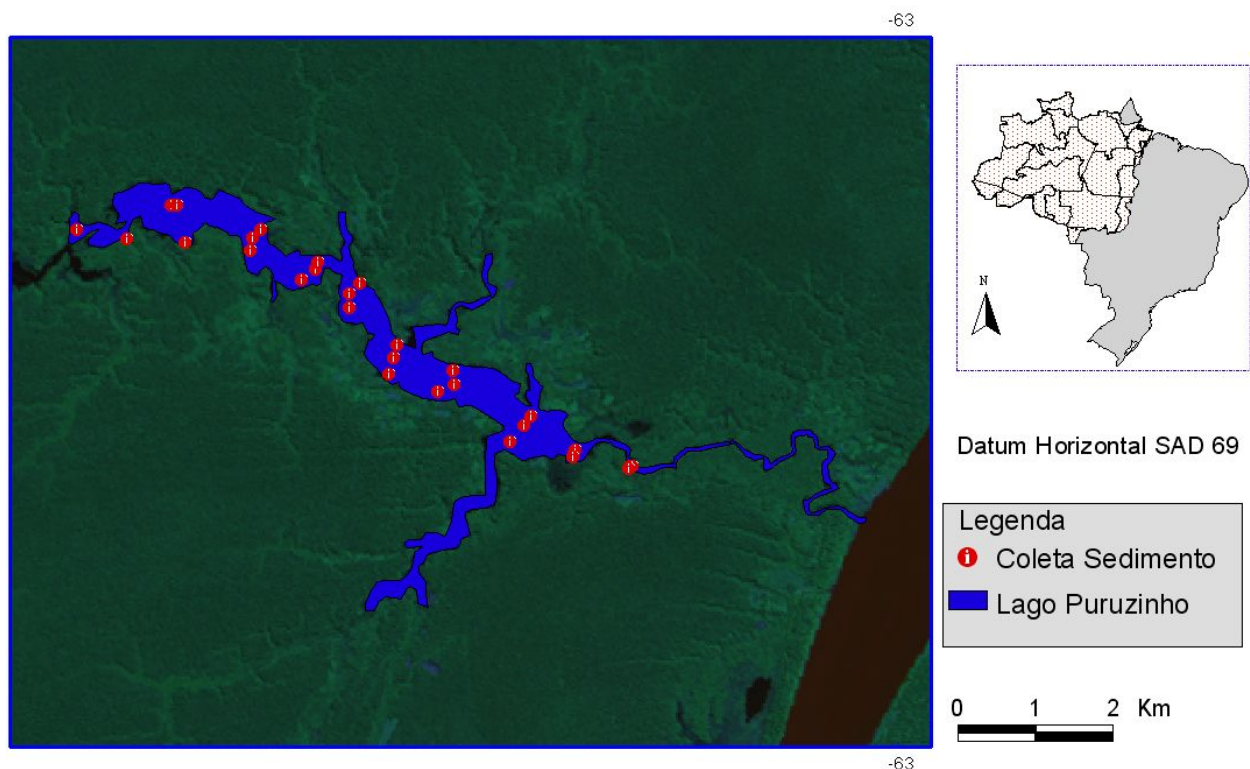


Figura 1. Desenho amostral para coleta de sedimento de fundo no lago Puruzinho, Amazonas.

Para o estudo de distribuição de mercúrio fez-se uma amostragem na escala 1:50.000 que, a partir de métodos de interpolação foi possível produzir mapas de concentração na escala de 1:10.000.

## 2.1 Sedimentos

As amostras de sedimentos de fundo foram realizadas utilizando coletor pontual de sedimento draga de Eckman. Após a coleta as amostras de sedimentos foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidos resfriados até a preparação da amostra para posterior análise. A determinação de Hg total no sedimento foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica acoplada ao gerador de vapor frio (FIMS-400, Perkin-Elmer) utilizando uma técnica proposta por Bastos et al. (1998).

## 2.2 Geoestatística

A análise variográfica consistiu no cálculo de semivariogramas experimentais para as variáveis MO e Hg. A krigagem por indicação para os dados de Hg e MO foi realizada a partir da adoção de valores de corte. Definiu-se então a partir do módulo “Geoestatistical Wizard”<sup>®</sup> do Arcgis 9.0 um modelo teórico de semivariograma para representar a variabilidade espacial da variável por indicação. A geração dos mapas de probabilidades foi realizada a partir da combinação da sobreposição do polígono do lago e a superfície gerada na interpolação por krigagem indicativa.

### 3. Resultados

A quantificação da dependência espacial para Hg total e MO foi realizada através do método de variografia, adotando como valor de corte a mediana para construção dos mapas de probabilidades está apresentada na **Figura 2a**. Observa-se que o alcance máximo para a distribuição de Hg total foi de 3960 metros, demonstrando haver uma dependência espacial na distribuição dos teores de Hg total em função do sedimento de fundo do lago Puruzinho.

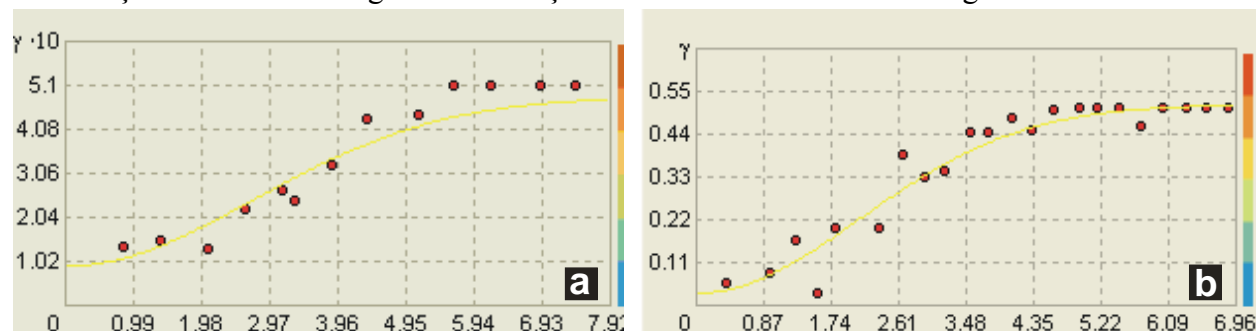


Figura 2. Modelo gaussiano para níveis de corte  $>67,13 \mu\text{gHg.Kg}^{-1}$  no sedimento de fundo do lago Puruzinho (a). Modelo gaussiano níveis de corte maior que 8% de matéria orgânica no sedimento de fundo do lago Puruzinho (b).

A distribuição de MO também apresenta uma dependência espacial (**Figura 2b**). O modelo é do tipo gaussiano e o alcance máximo obtido foi de 4350 metros. Tanto o modelo para distribuição de Hg quanto para distribuição de matéria orgânica apresentaram efeito pepita, indicando pequena descontinuidade na origem. A anisotropia é fortemente orientada em direção ao eixo principal do lago, uma vez que o comprimento do eixo transversal ao lago está contido cerca de 10 vezes no comprimento do lago.

#### 3.1. Validação cruzada

Antes de se executar a krigagem fez-se a validação dos modelos. A validação cruzada é uma forma de medir a incerteza da predição dos dados. A **Tabela 1**, sumariza os parâmetros da validação. O valor médio da predição do erro próximo de zero indica que os valores são não viesados. Igual informação pode ser obtida analisando a raiz quadrada do erro padronizado. Portanto, o erro médio padronizado é maior que a raiz média quadrada do erro predito. Isto demonstra que a variabilidade dos dados é ligeiramente superestimada. A raiz média quadrada do erro predito é a medida da predição dos dados de um ponto observado e determina a média para o intervalo de confiança. Finalmente, a raiz média quadrada padronizada próximo de um (1) indica o bom ajuste entre os pontos observados e pontos estimados.

Tabela 1. Validação cruzada para Hg e MO em sedimentos de fundo do lago Puruzinho.

Nível de corte	$67,13 \mu\text{gHg.Kg}^{-1}$	8,01 MO%
Média	-0,0003952	-0,01021
Raiz média quadrada	0,3647	0,4735
Erro médio padrão	0,33353	0,46370,3742
Média padronizada	-0,01425	-0,01414
Raiz média quadrada padronizada	1,115	1,021
N amostral	33	33

### 3.2. Krigagem indicativa

A **Figura 3 a e b** mostram os resultados da aplicação da krigagem por indicação para Hg e MO onde os valores dos atributos foram estimados pelo valor mediano. O mapa de distribuição de probabilidade com nível de corte igual a mediana ( $67,13 \mu\text{gHg.Kg}^{-1}$ ) foi elaborado para o período em estudo. Desta forma foi possível mapear áreas do lago onde há probabilidade de ocorrer concentrações de mercúrio maiores que a mediana.

O diagrama de distribuição de probabilidade está representado na Figura 3a, onde pode-se observar áreas na parte mais central do lago, de maior probabilidades de se encontrar valores maiores que a mediana. Estas áreas correspondem as regiões mais profundas do lago. A variabilidade espacial dos dados de Hg e MO no lago Puruzinho demonstra uma clara compartimentalização do lago em relação à presença do Hg e da MO. As áreas onde ocorrem as maiores probabilidades de se obter valores maiores que  $67,13 \text{ ppb}$  de Hg são também as áreas onde é possível observar as maiores probabilidades para ocorrência de valores maiores que 8% de matéria orgânica (**Figura 3a e b**).

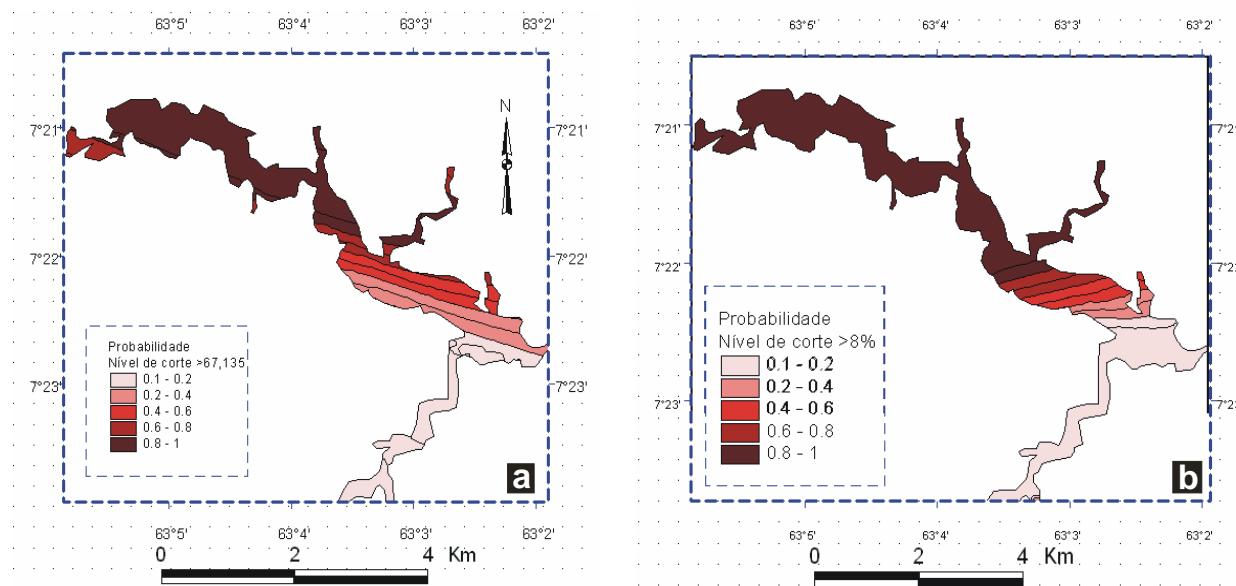


Figura 3. Diagrama de probabilidade de se obter valores maiores que  $67,13 \mu\text{gHg.Kg}^{-1}$  obtido a partir de krigagem indicativa (a); Diagrama de probabilidade de se obter valores maiores que 8% de MO no sedimento do lago Puruzinho (3b).

A determinação destas áreas de concentração foi possível através do uso de técnicas geoestatísticas e técnicas de geoprocessamento que permitem a sobreposição de mapas base e de superfícies mapeadas utilizando a krigagem indicativa. O conhecimento de áreas preferenciais de concentração de Hg no lago puruzinho permitiu observar que a distribuição de Hg no sedimento de fundo tem um comportamento regionalizado e que os valores de vizinhança tanto de Hg como de MO exercem influência na distribuição espacial destas variáveis.

### 4. CONCLUSÕES

A geoestatística mostrou ser uma ferramenta eficaz na modelagem ambiental de poluentes em sedimentos de lagos. A partir de pontos amostrados, a krigagem indicativa permitiu reconstruir superfície representativa das concentrações de Hg em sedimentos de lagos. Através do emprego da geoestatística pode-se observar que a concentração de Hg total e MO

no sedimento de fundo variam espacialmente com dependência das concentrações das amostras da vizinhança. Desta forma pode-se inferir que o Hg e a MO formam compartimentos no lago, criando zonas preferências de concentração tanto para mercúrio quanto para a matéria orgânica.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro do CNPq através do projeto CNPq/PPG-7 (processos Nos. 556934/2005-9; 556972/20058).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, R. **Análise geoestatística das concentrações de mercúrio no lago Puruzinho - Amazonia Ocidental**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente), Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Porto Velho. 82p. 2006.

Almeida, R.; Oliveira, R. C.; Gomes, J. O.; Nascimento, E. L.; De Carvalho, D. P.; Bastos, W. R.; Bernardi, J. V. E.; Landim, P. M. B. Avaliação da Concentração de Mercúrio em Sólidos em Suspensão e perfis de Sedimento de Fundo no Lago Puruzinho, Amazônia Ocidental. In: X Congresso Brasileiro de Geoquímica e II Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, Anais. Porto de Galinhas, p.1-3, 2005.

Bastos, W. R.; Malm, O.; Pfeifer, W. C.; Cleary, D. Establishment and analytical quality control of laboratories for Hg determination in biological and geological samples in the Amazon Brazil. **Ciência e Cultura Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science**. v. 50, p. 255-260. 1998.

Bernardi, J.V.E.; Fowler, H. G.; Landim, P M B. Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada. **Holos E Environment**, Rio Claro, v. 1, n. 2, p. 162-172, 2001.

Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. Análise espacial e geoprocessamento. In: Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA,

Felgueiras, C.A.; Fuks, S. D.; Monteiro, A M. V.; Camargo, E. C. G. Inferências e Estimativas de Incertezas Utilizando Técnicas de Krigagem Não Linear, (1999). Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/gisbrasil99/incertezas/2006>. Acessado em: 10 de abril de 2006

Felgueiras C. A. Modelagem Ambiental com Tratamento de Incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: O Paradigma Geoestatístico por Indicação. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Disponível em: [em <http://www.dpi.inpe.br/teses/carlos/>](http://www.dpi.inpe.br/teses/carlos/), 1999.

Grip, A. H. Utilização de geoestatística para tratamento de dados de prospecção geoquímica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.22, n.2, p. 248 – 251, 1992.

Guerra, P. A. G. Geoestatística operacional. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral. 145 p.1988.

Landim, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora da UNESP. 1998.

Landim, P.M.B & Sturaro, J.R. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Geomatematica, Texto Didático 6, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, 2002. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em: 16 abril.2002.

Lechler, P. J. Miller, J. R. Lacerda, L. D. Vinson, D. Bonzongo, J. -C. Lyons, W. B. Warwick J. J. Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments? **The Science of the Total Environment**, V. 260, (1-3), p. 87-96, 2000.

Ortiz, J. O.; Felgueiras, C. A.; Druck, S.; Monteiro, A. M. V. Um estudo comparativo entre os procedimentos geoestatísticos de krigagem por indicação e simulação estocástica para amostras de alumínio. In XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), **Anais**, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 999-1004. 1999.

Vergotti, M. **O mercúrio em lagos da bacia do Rio Madeira**. Dissertação (Mestrado em Geociências) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 2002.