MODELO GEOESTATÍSTICO DE MERCÚRIO TOTAL NO RIO MUTUM-PARANÁ (RO)

F. L. Belém, W. R. Bastos, D. P. Linhaes e P. H. T. Takamatsu

RESUMO

Este trabalho analisa o sedimento de fundo do rio Mutum-Paraná, situado em Porto Velho (RO), região caracterizada como de exploração aluvionar, a qual recebeu recentemente a implantação de atividades agrícolas e pecuárias que, confluentes com seu histórico de contaminação com mercúrio (*Hg*), remobilizaram o solo, intensificando o processo de contaminação da água. A análise do comportamento espacial do *Hg* revelou-se como o melhor método de interpolação para a compreensão espacial de variáveis de pH, matéria orgânica e concentração de Hg, mediante a aplicação do método geoestatístico com algoritmo de Krigagem. A Krigagem aplica estimativa e predições de superfícies com base na correlação espacial, permitindo uma análise exploratória e a interpolação de dados, inferindo-os para onde não se obtiveram coletas de amostras. Por meio da Krigagem indicativa, produção de variogramas e semivariogramas, foram confeccionados mapas de predição, cujo resultado detectou grande variação espacial dos parâmetros, comprovando e mensurando os impactos ocasionados pela nova deposição de mercúrio.

Palavras-chave: Geoestatística. Krigagem, krigagem indicativa. Mercúrio.

1 INTRODUÇÃO

O geoprocessamento é uma importante ferramenta de suporte à tomada de decisão na avaliação de empreendimentos ambientais. O uso da análise espacial é de fundamental importância para o conhecimento holístico das interações de fenômenos ambientais em determinada área a ser estudada. A análise espacial das condições do meio em uma perspectiva sistêmica e, portanto, interativa permite estabelecer correlações entre diferentes fatores capazes de interferir na evolução de determinado fenômeno ambiental, além de estabelecer cenários mais realistas, capazes de ensejar melhores soluções voltadas para a minimização de impactos ambientais. Assim, as ciências exatas e as ciências da terra deixam de ser aplicadas isoladamente e passam a atuar de maneira conjunta, como é fundamental no caso do subtema da análise ambiental Geoestatística.

A construção de modelos geoestatísticos para mensurar a contaminação do meio por metais pesados já provou ser eficiente e viável segundo a literatura, por exemplo, Almeida (2006), Herrmann (2009) e Belém *et. al.* (2010). Os modelos geoestatísticos são aplicados para executar o monitoramento ambiental do mercúrio e dos fatores que podem ser associados a ele. Com base em tais estudos, é possível predizer as regiões que apresentam áreas com alta concentração de mercúrio, bem como estimar a análise matemático-estatística de suas concentrações. Por fim, consegue-se saber quais são as áreas de influência do mercúrio contaminado e dos mercúrios em suas diversas formas químicas presentes na natureza, como: mercúrio metálico, mercúrio orgânico e mercúrio inorgânico.

A aplicação dos modelos geoestatísticos é uma metodologia de suporte para as políticas ambientais e para estudos ambientais, pois com eles é possível ter a precisão da extensão do raio de contaminação, auxiliando no planejamento de políticas públicas que visem à elaboração de estratégias baseadas em evidências, para combater todos os processos que potencializem a contaminação do ambiente por metais pesados.

Segundo Lacerda e Malm (2008), os elevados níveis de mercúrio determinados em solos/sistemas aquáticos amazônicos foram por muito tempo atribuídos, principalmente, às atividades mineradoras. Para Fadini *et al.* (2001), como poluente global, derivado de processos naturais e antrópicos, o mercúrio possui tempo de residência na atmosfera relativamente longo e é transportado via deposição atmosférica seca e/ou úmida. Após o aporte na água ou no solo, a dinâmica do mercúrio pode estar associada à do carbono orgânico. Neste caso, um importante fator a ser considerado é o alto teor de matéria orgânica nos sistemas aquáticos e terrestres da região amazônica.

As principais formas iônicas de mercúrio e de metil-mercúrio são fortemente complexadas por ácidos húmicos, fúlvicos e outras moléculas orgânicas presentes nos ecossistemas naturais amazônicos, segundo estudo elaborado por Lacerda e Malm (2008).

O rio Mutum-Paraná, que se localiza no munícipio de Porto Velho (RO), foi escolhido como objeto de estudo por fazer parte da bacia do rio Madeira e por ser um dos principais afluentes da margem direita do rio Amazonas, localizando-se na região do Alto rio Madeira, no estado de Rondônia. Esta região, no início na década de 1970 até a década de 1990, caracterizou-se por ser exploradora de ouro aluvionar e por realizar o concerto de dragas que exploravam a garimpagem do ouro no alto rio Madeira. Com isso, houve a emissão de mercúrio por meio de rejeitos da atividade mineradora, como peças de dragas e sedimentos que continham mercúrios. Conforme Lacerda e Malm (2008), tem-se como consequência a presença de altos níveis de mercúrio na área até os dias atuais, já que os restos das dragas com resíduos de

mercúrio foram lançados no rio Mutum-Paraná. Contudo, segundo informa Watanabe (2011), com a decadência da exploração do ouro na região do alto rio Madeira, por volta de 1995, a região deixou de ser marcada pela exploração da mineração passando a ser pela extração madeireira e atividades agropecuárias.

No estado de Rondônia, segundo Miranda (2010), a forte expansão da atividade garimpeira e mineradora fez com que aumentasse de modo severo a concentração de mercúrio total no ambiente. Isso se deu pelo uso deste metal pesado durante o processo de amalgamação, que consiste em utilizar mercúrio para separar o ouro dos rejeitos contaminantes. Com base em Lacerda e Malm (2008), tem-se que a consequência imediata deste processo indiscriminado foi a ampliação da exposição de mercúrio para a biota local e, consequentemente, para a população ribeirinha.

Um forte agravante que torna este processo mais nocivo ao meio ambiente em Rondônia é a maior taxa de retirada desordenada e intensa da cobertura vegetal, decorrente de fatores como: expansão da fronteira agrícola, principalmente no sul do estado, que promove a troca de floresta por pasto; intensificação da silvicultura; expansão da mineração; e aumento da atividade madeireira. Assim, acentuaram-se os processos de lixiviação, erosão e desnudação geoquímica. Toda esta cadeia de eventos da exploração mineral rondoniense fez com que ocorresse o processo de remobilização do mercúrio, consistindo no transporte deste metal, que estava acumulado no solo, para os corpos d'água.

2. METODOLOGIA DE TRABALHO

Para a realização deste trabalho, adotou-se uma metodologia de pesquisa empírica. Isso requer que esta pesquisa geoestatística aplique um método científico comprovado por meio de coletas de campo e estudo estatístico. As coletas das amostras de campo, realizadas por Linhares (2009), ocorreram em todo o rio Mutum Paraná (Figura 1). Com isso, houve a necessidade de construir um banco de dados geográficos georreferenciados. Os programas utilizados neste trabalho foram o ArcGIS® e o Spring®, que são Sistema de Informações Geográficas (SIG) escolhidos por apresentar o algoritmo geoestatístico de Krigagem.

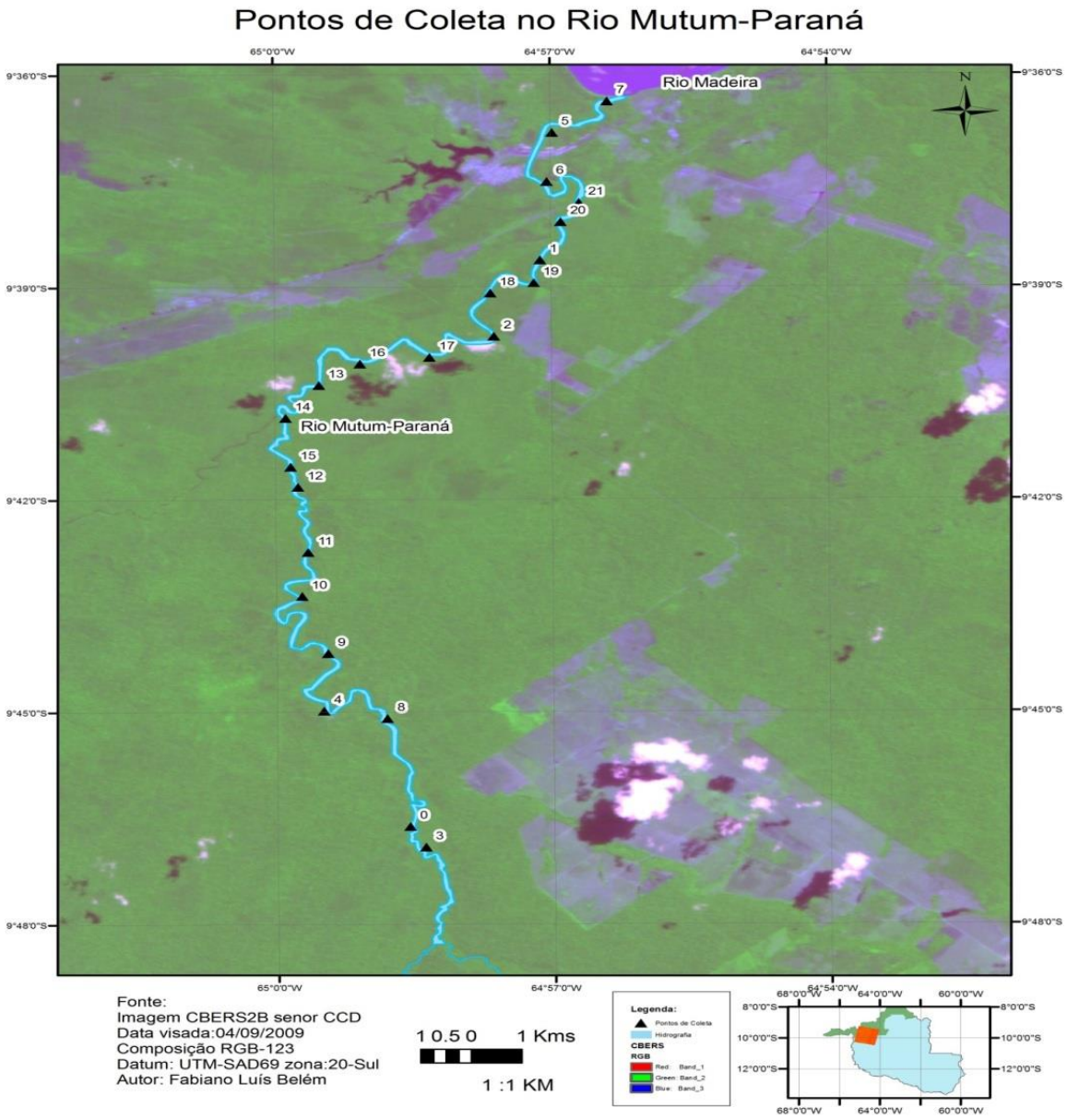

Figura 1 - Pontos de coleta no rio Mutum-Paraná

Conforme Camargo e Filgueiras (2002), existem vários métodos geoestatísticos de interpolação que podem ser utilizados para extrair o máximo das características dos dados analisados, de modo a estimar uma superfície contínua. Dentre essas técnicas, destaca-se a de estimativa, de Krigagem, que consiste em uma interpolação de um atributo a partir de um conjunto de amostras vizinhas. A Krigagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfície. Baseia-se na estrutura de correlação espacial. O método de Krigagem, segundo Meirelles *et al*. (2007), permite realizar: análise exploratória dos dados, análise estrutural da modelagem de correlação espacial e interpolação estática da superfície do fenômeno estudado. Conforme Ortiz (2002), a técnica estimativa de Krigagem interpola valores para regiões onde não se têm valores coletados em campo e cada estimativa apresenta a média ponderada dos valores coletados em sua vizinhança. Carmago e Filgueiras (2002) apresentam a Equação (1) de Krigagem:

$$\bar{Z}(x_o) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \tag{1}$$

Em que:
$\bar{Z}(x_o)$: Krigagem ordinária;
x_i: variável aleatória;
n: número de coletas;
i: número de amostragens; e
λ: pontos de interpolação.

Trabalha-se com o algoritmo de Krigagem indicativa, remetendo-se novamente a Camargo e Felgueiras (2002), para quem esta é uma estimativa não linear, que consiste na propriedade da variável em estudo e no fato de a amostragem ser aleatória. A Krigagem indicativa serve para estimar valores de incerteza. Isso ocorre devido à função de distribuição acumulada, condicionando os dados amostrados da variável aleatória a um atributo espacial, possibilitando inferência de valores com amostras pontuais de um atributo espacial.

As estimativas consistem em valores de determinado nível de corte, em que os valores amostrados em campo encontram-se acima ou abaixo deste nível. Então, a função será ajustada, determinando que os valores amostrados se tornem binários e assumindo valores de um ou zero. Esta codificação dos valores amostrados em arquivos binários pode ser feita utilizando como valor de referência a média ou, mesmo, a mediana, que é um valor mais robusto quando a distribuição é assimétrica. Adotou-se a opção de utilizar o quartil superior, que consiste na adoção do valor do quartil para enfatizar alguma concentração analisada.

Ainda segundo Camargo e Felgueiras (2002), calcula-se a função de distribuição de probabilidade acumulada (*fdpac*). Dessa função é que se obtêm a inferência dos valores da incerteza que são gerados de cada variável aleatória dos valores de cada amostra. Assim, o valor de incerteza pode ser interpolado por meio de valores estimados da probabilidade. A função da Krigagem indicativa é representada pela Equação (2):

$$\sigma_{SK}^2(\mathbf{u}) = C(0) - \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha^{SK}(\mathbf{u}).\, C(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}) \tag{2}$$

Em que:
u: posição de um valor não amostrado;
σ: Krigagem indicativa;
C: covariança entre amostrados;
α: multiplicador de Langrage;
K:valor interpolado; e
λ: pesos de interpolação.

A partir disso, o algoritmo transforma os valores coletados em números binários, gerando mapas de probabilidades, conforme apresentado na Equação (3) de transformação binária:

$$I(\mathbf{u};\, Z_k) = \begin{cases} 1, & se\ Z(\mathbf{u}) \leq Z_k \\ 0, & se\ Z(\mathbf{u}) > Z_k \end{cases}$$

(3)

Em que:
I: probabilidade indicativa;
u:variável aleatória; e
Z_k: valor de corte.

Por fim, é utilizado o estudo no semivariograma, o qual permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. O semivariograma é usado para calcular os valores da dependência espacial para certa distância, sendo necessário para a realização da equação de Krigagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no referencial citado, adotou-se para a estimativa do objeto de estudo o algoritmo de Krigagem indicativa, porque estes dados não apresentavam distribuição *gaussiana.* O valor de corte utilizado foi de 108.17mg/Kg, que consiste no quartil superior, utilizado para enfatizar as áreas que apresentam maior quantidade de mercúrio presente no rio. O semivariograma da concentração de mercúrio foi ajustado por meio da função exponencial, o qual apresenta um alcance 5.410m e efeito de pepita de 1,05, conforme a Figura 2. Com base na modelagem produzida com o software com os parâmetros adotados, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 3 e na Figura 4, que mostram a distribuição das concentrações de mercúrio total nos sedimentos de fundo do rio Mutum-Paraná. Tal resultado revela que as amostras apresentam uma dependência espacial de 5.410m.

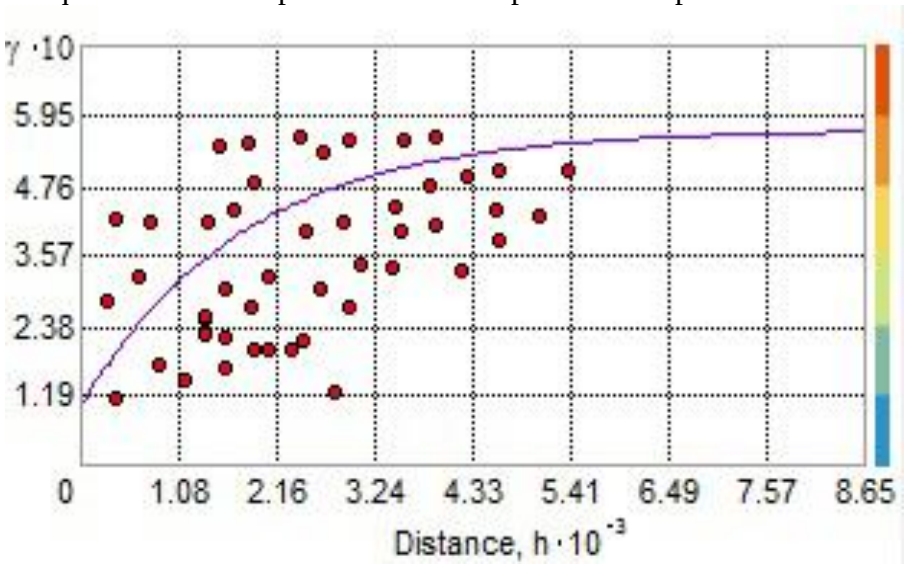

Figura 2 - Semivariograma exponencial de concentração de mercúrio nos sedimentos de fundo do rio Mutum-Paraná, nível de corte 108.17 mg/kg

Os modelos foram divididos em baixo Mutum-Paraná e alto Mutum-Paraná, para melhor visualização geográfica do resultado, com base na cota de altimetria de 35m. Com base na Krigagem indicativa, concluiu-se que se tem a maior probabilidade de se encontrar maior quantidade de mercúrio no sedimento de fundo na foz do rio próximo ao rio Madeira, onde se observa que o acúmulo acompanha a direção da jusante, como pode ser visto na Figura 3 e na Figura 4.

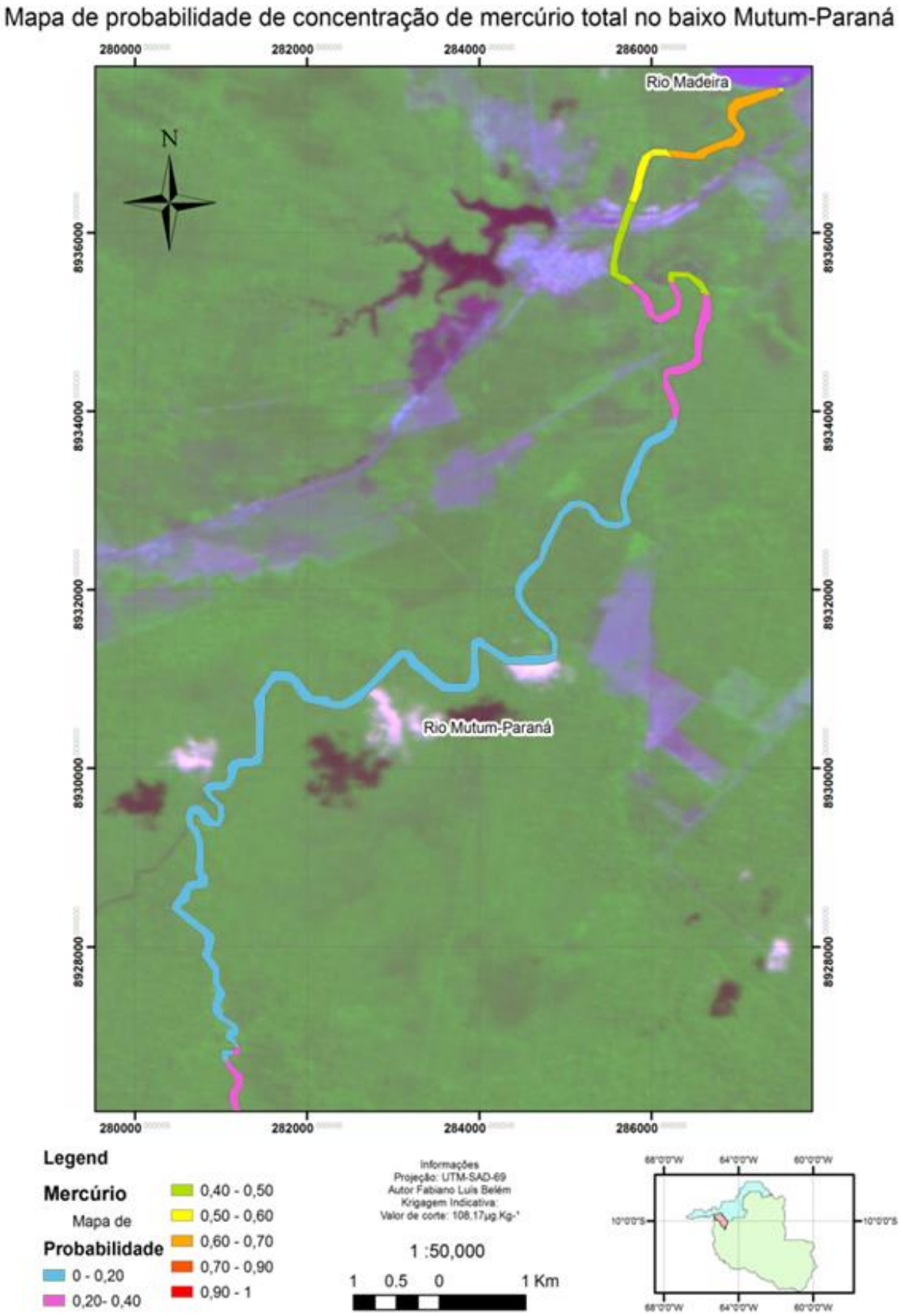

Figura 3 - Mapa de probabilidade de distribuição de concentração de mercúrio total no baixo rio Mutum-Paraná. Valor do nível de corte 108.17mg/kg.

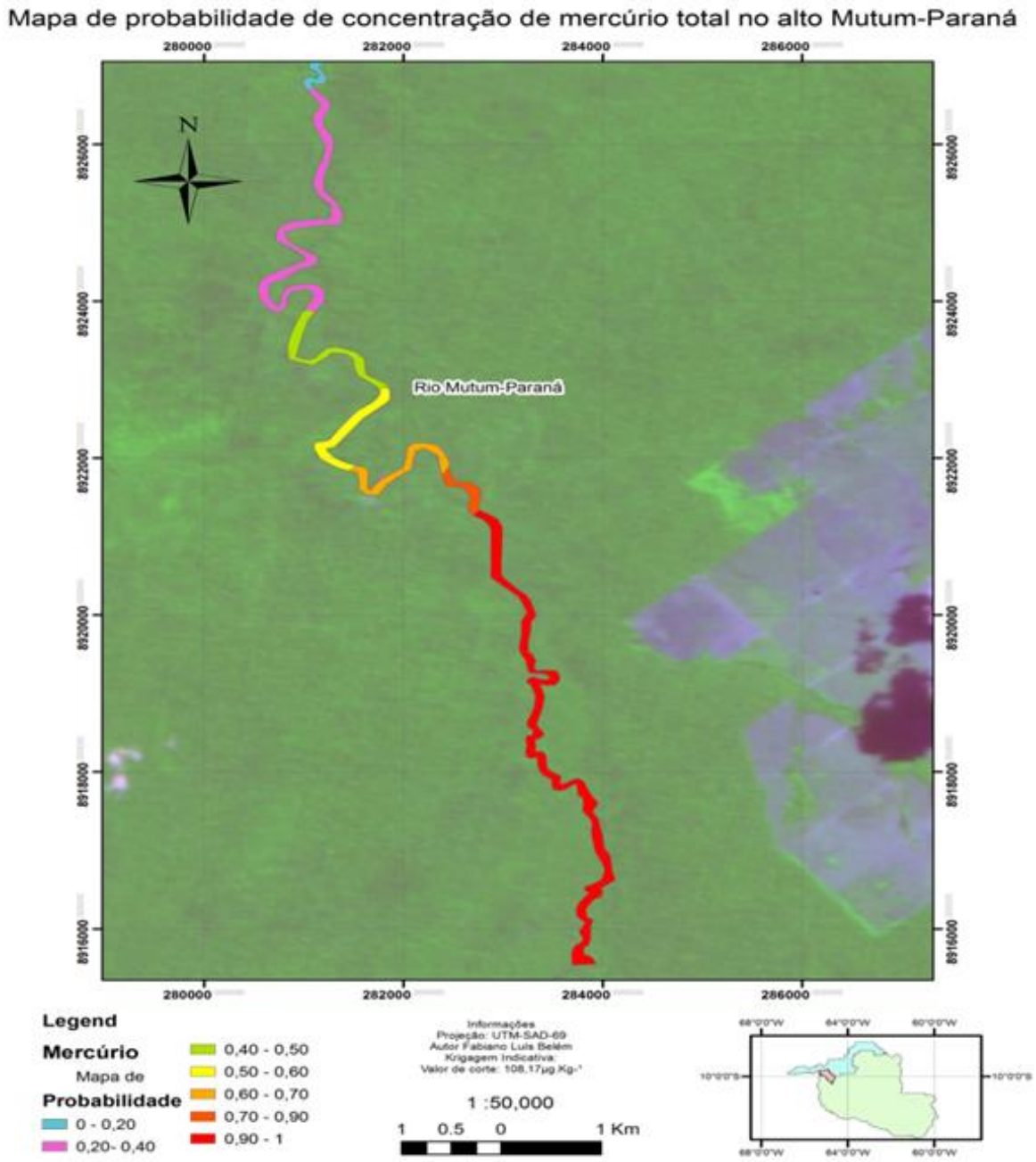

Figura 4 - Mapa de probabilidade de distribuição de concentração de mercúrio total no alto rio Mutum-Paraná. Valor do nível de corte 108.17mg/kg.

Segundo Almeida (2006), para validar o modelo geoestatístico, são usados alguns índices estatísticos, como: média de erros, raiz média quadrada, erro médio padrão, média padronizada e raiz média quadrada. A construção da Tabela 1 obedeceu a este procedimento. Estes dados estatísticos servem para medir a incerteza das estimativas dos dados.

Tabela 1 - Validação do modelo geoestatístico de concentração de mercúrio total no rio Mutum-Paraná

Validação cruzada	Concentração de *Hg* total
Média	-0.007849
Raiz média quadrada	0.446
Erro médio padrão	0.459
Média padronizada	-0.01276
Raiz média quadrada padronizada	0.9957

O modelo geoestatístico pôde ser validado porque o índice da média de erro está próximo de zero. Os índices de raiz média quadrada e de erro médio padrão estão próximos, mas ocorreu ligeiro aumento do índice de erro médio padrão. Isso mostra que o modelo está um pouco subestimado. O índice de média padronizada está próximo de 0 e o índice de raiz média quadrada padronizada está próximo de 1, validando este modelo geoestatístico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos geoestatísticos aqui utilizados constituem uma metodologia de monitoramento ambiental ótima para a área estudada, pois obtiveram um alcance bom, o que respalda tanto o modelo aplicado quanto os dados químicos pesquisados. A Krigagem indicativa apresentou as variações de concentração de mercúrio total ao longo do rio Mutum. O rio Mutum-Paraná se destaca por apresentar grande quantidade de mercúrio em sua confluência com o rio Madeira, confirmando estudos anteriores de Gomes (2006) e Linhares (2009). Isso pode ser evidenciado nos mapas de probabilidade de mercúrio apresentados anteriormente (Figura 3 e Figura 4), pois o ambiente do rio, principalmente ao longo do seu leito, possui a paisagem natural modificada.

São sérias as consequências ambientais decorrentes da contaminação ocorrida com a mudança da matriz econômica da exploração do minério para as atividades agrícolas e pecuárias. Embora o garimpo de ouro continue, ainda que em uma escala menor, o desmate provocado por essas atividades e a remobilização do mercúrio presente no solo fazem com que este mineral alcance os cursos d’água e se acumule nas partes mais baixas do rio.

5. AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento à Universidade Federal de Rondônia (UNIR), por intermédio do Programa de Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, cujo apoio foi imprescindível à consecução dos objetivos desta pesquisa interdisciplinar, e à Universidade Federal do Amapá, por intermédio do Programa de Auxílio ao Pesquisador (PROPEV).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, R. (2006) **Análise geoestatística das concentrações de mercúrio no lago do puruzinho em Rondônia – Amazônia Ocidental**, dissertação de mestrado, UNIR, Porto Velho.

Belem, F. L, Temba, P. C, Donicci, C, Rodrigues, A. A. D. (2010) Modelo geoestatístico para monitoramento de metais pesados na Bacia do Rio das Velhas em MG, **Anais do VI congresso brasileiro de cartografia**, 1(1), SBC, Aracajú, 240-246.

Camargo, E. C. G,. Felgueiras, C. A. (2002) **Curso de fundamentos de geoestatística,** INPE, São José dos Campos.

Fadini, P. S., Jardim, W. F. (2001) Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury?, **Science of the Total Environment,** 275(1-3), 71-82.

Gomes, J. P. O. (2006) **Elementos-traço em solos do alto rio Madeira**, dissertação, Rondônia. Porto Velho.

Hermmann, J. C. (2008) **Mercúrio em solos da sub-bacia do Rio Corumbiara/RO**. Análise do padrão espacial dispersão, tese de doutorado, UNESP, Rio Claro.

Lacerda, L. D, Malm, O. (2008) Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: Uma análise das áreas críticas, **Revista Estudos Avançados**, 22(63), USP, São Paulo.

Linhares, D. P. (2009) **Mercúrio em solos e sedimentos na sub-bacia do Mutum-Paraná em Rondônia**, dissertação, UNIR, Porto Velho.

Meirelles, M. P. S., Camara, G., Almeida, M. C. (2007) **Geomática Modelos e Aplicações Ambientais,** 1(1), Editora Embrapa, São Paulo.

Miranda, M. R. (2010) **Formação do metil-mercúrio na bacia do Rio Madeira, Rondônia**, tese de doutorado, UFRJ/IBCCF, Rio de Janeiro,

Ortiz, G. C (2002) **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**, dissertação, ESALQ-UNESP, Piracicaba.

Watanabe, M. (2011) **Análise integrada da paisagem da bacia do rio Mutum-Paraná (RO**), dissertação, UNIR, Porto Velho.