



GEOESTATÍSTICA DO MERCÚRIO PRESENTE EM SEDIMENTOS DE FUNDO DA ORLA DO RIO NEGRO (MANAUS – AM)¹

Andréa de Deus Medeiros², Paulo Renan Gomes Ferreira³, Wanderley Rodrigues Bastos⁴, Leidiane Caroline Lauthartte⁴ e Genilson Pereira Santana⁵,

Submetido 20/02/2014 – Aceito 16/04/2014 – Publicado on-line 19/07/2014

Resumo

O objetivo desse trabalho foi avaliar geoestatisticamente a distribuição de Hg total (Hg_{tot}) em sedimentos de fundo na região da orla do rio Negro (Manaus). As amostras de sedimento foram coletadas nos meses de novembro (2010 - seca) e março (2011 - cheia) nas quatro principais sub-bacias hidrográficas da cidade: Educandos, São Raimundo, Tarumã-Açu e Puraquequara. Os locais de amostragem consistiram em vinte pontos; três pontos em cada sub-bacias e oito pontos distribuídos próximos à desembocadura de cada bacia pela orla do rio Negro. As concentrações de Hg foram determinadas por Espectrometria de Absorção Atômica acoplada ao gerador de vapor frio. A análise geoestatística foi feita pelo método de interpolação por Krigagem Ordinária, sendo os semivariogramas ajustados e modelos avaliados com base na validação cruzada. Os resultados revelaram uma concentração média de Hg de $0,2929 \text{ mg kg}^{-1}$ no mês de novembro e $0,6498 \text{ mg kg}^{-1}$ no mês de março. Os mapas de krigagem para Hg indicaram que além da contribuição natural de Hg no compartimento, também está ocorrendo influência antrópica na bacia do Educandos e na bacia do São Raimundo.

Palavras-Chaves: Atividade Antrópica, Bacia hidrográfica, krigagem.

Abstract

This global aim of this study was to evaluate the geostatistical distribution of Hg in bottom sediments bordering the rio Negro that surrounds the city of Manaus. The sediment samples were collected in November (2010 - dry) and March (2011 - rainy), corresponding to the beginning and end of the period of flooding in the region, including the four main sub-basins of the city; Educandos, São Raimundo, Tarumã and Puraquequara. Sampling locations consisted of twenty points, three points for each of the sub-basins and eight points distributed along the shore of the rio Negro. The total mercury concentrations were determined by atomic absorption spectrometry coupled to cold vapor generator. For the geostatistical analysis was used the method of interpolation by ordinary kriging, which were adjusted by the semivariogram, the models evaluated based on cross-validation and preparation of maps of levels. The results showed an average concentration of Hg $0.2929 \text{ mg kg}^{-1}$ in November and $0.6498 \text{ mg kg}^{-1}$ in March. The kriging maps for Hg indicated that besides the contribution of natural Hg in the compartment, is also occurring of anthropogenic influence in the Educandos and São Raimundo basins.

Key-Words: Anthropogenic activity, hidrografic basin, kriging

¹ Parte do trabalho de dissertação do segundo autor no Programa de Pós-graduação em Química da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

² Profa. Faculdade Metropolitana de Manaus, Av. Djalma Batista, S/N - Chapada, Manaus – AM, CEP 69050-010

³ Prof. Unicel- Faculdade Literatus, Av. Constantino Nery, n. 3.693 - bairro chapada, CEP 69050-001

⁴ Laboratório de Biogeoquímica Ambiental Wolfgang C. Pfeiffer / Universidade Federal de Rondônia. Rodovia BR 364, Km 9,5, Sentido Acre. Porto Velho – RO, CEP 78.900-500 Porto Velho – RO, Brasil.

⁵ Professor Associado do Departamento de Química ICE/ UFAM Departamento de Química - ICE, Av. Gal. Rodrigo Octávio, 3.000, Coroado II, Manaus, Amazonas. gsantana@ufam.edu.br



1. Introdução

A Amazônia é foco de diversos estudos com o objetivo de desvendar os segredos da maior biodiversidade do mundo. Dentre as questões mais estudadas se encontra o Hg, um metal bastante conhecido por ter alto potencial bioacumulativo e nocivo à saúde humana. Uma vez no ambiente, o Hg se distribui por todos os compartimentos, por exemplo, solo, sedimentos, água, peixes etc. (OLIVEIRA et al., 2007). Além disso, o Hg interage e transforma-se em seus estados de oxidação 0, 1+ e 2+ (MELAMED, 2002). O Hg, naturalmente, deposita-se da atmosfera em ambientes terrestres e aquáticos; distribuindo-se local e globalmente (ARTAXO et al., 2000). No ambiente aquático, o Hg deposita-se naturalmente em sedimentos (e.g. FADINI e JARDIM, 2001; AZEVEDO, 2003; LACERDA e MALM, 2008).

Apesar de estar presente em todos os compartimentos ambientais da Amazônia, as investigações já realizadas foram focadas basicamente na questão global privilegiando: i) concentração de Hg_{tot} em água, solos, sedimentos, peixes, cabelo e sangue (e.g. DOLBEC et al., 2001; BARROS et al., 2004; BASTOS et al., 2007; BARBOSA JR et al., 2009; NEVADO et al., 2010) e ii) as altas concentrações de Hg se devem a atividade antrópica (LACERDA, 1997; LECHLER et al., 2000) ou de caráter natural (e.g. WASSERMAN et al., 2001; FADINI e JARDIM, 2001; DA SILVA et al., 2009).

Por outro lado, impactos regionais da atividade antrópica por Hg ainda não são avaliados atenciosamente. Por exemplo, alguns trabalhos reportam apenas altos níveis de Hg nos solos que compõem a área urbana e a reserva Adolpho Ducke de Manaus, inclusive mostrando o seu estado de valência (VALLE et al., 2005 e 2006).

Por outro lado, a cidade de Manaus é remarcada pelo seu crescimento populacional desordenado, tendo como fontes de

contaminação o esgoto doméstico, o aterro sanitário e um Polo Industrial que despeja altas quantidades de efluentes contaminados nos leitos de seus igarapés (SANTANA e BARRONCAS, 2007; PIO et al., 2014).

Dentre as questões regionais, qual seria o papel da Cidade de Manaus no ciclo do Hg na Amazônia? Nesse contexto, um estudo da distribuição de Hg em sedimentos de fundo da orla do rio Negro contribuiria para conhecer qual o papel da cidade de Manaus. Essa afirmação está baseada no fato de que os sedimentos de fundo são amplamente utilizados como indicadores de contaminação dos ecossistemas aquáticos. Esses sedimentos atuam como um compartimento de acumulação ou sumidouros de elementos-traço, também como transportadores e fontes de contaminação em potencial (MARINS et al., 2004). Sendo assim, estudos de Hg em sedimentos de fundo são importantes para registrar os efeitos de contaminação, detectando o nível que a área está sujeita e reunindo dados sobre o impacto ambiental (HORTELLANI et al., 2008).

É evidente que estudar distribuição de contaminantes no ambiente é uma tarefa que exige o uso de técnicas analíticas adequadas (e.g. MCGRATH et al., 2004; LOURENÇO et al., 2005; AHMED et al., 2011). Dentre as ferramentas utilizadas para o estudo da distribuição de contaminantes, a geoestatística tem sido amplamente aplicada como a ciência que estuda a variabilidade de uma medida usando um modelo probabilístico. É possível correlacionar espacialmente às observações e prever os valores em locais não amostrados (CARO et al., 2013). Dentre as técnicas utilizadas na geoestatística, a krigagem ordenária se destaca. Essa técnica é baseada em uma função estacionária de segunda ordem, cujo resultado principal é uma previsão de valores em áreas não estudadas diretamente (KASMAEE et al., 2010).

Portanto, como forma de contribuir para o conhecimento do impacto regional, causado pelas bacias hidrográficas de Manaus, este trabalho teve como objetivo estudar geostatisticamente o Hg_{tot} contido em sedimentos de fundo.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de Estudo

O rio Negro, que banha a orla sul da cidade, drena uma área de aproximadamente 700.000 Km² por cerca de 1.700 km de extensão. Nasce na serra do Junai, na Colômbia, e por todo

seu curso drena áreas de baixo relevo e terrenos consolidados, até a confluência com o rio Solimões para formar o rio Amazonas. Sua cor negra é, em parte, devido à drenagem dos solos ricos em solutos húmicos, provenientes da matéria orgânica em decomposição da floresta. A área de estudo abrange a orla do rio Negro, que banha a cidade de Manaus (AM), e as quatro principais bacias hidrográficas (Figura 1) que contribuem para a mudança das características naturais de suas águas (Tarumã-Açu, São Raimundo, Educandos e Puraquequara).

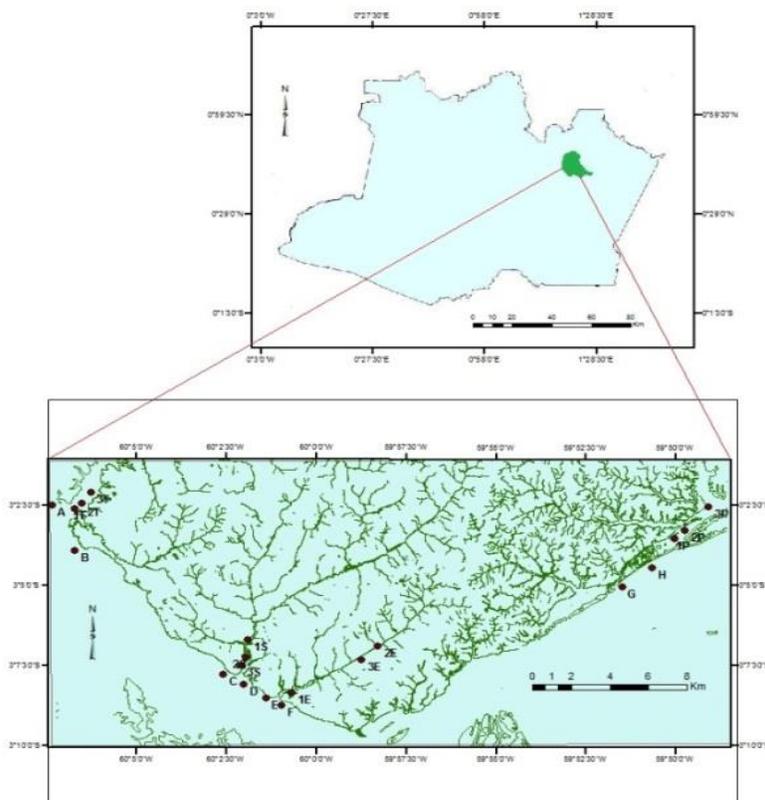


Figura 1. Mapa da área de estudo evidenciando os pontos de coleta.

A Bacia hidrográfica do Educandos, com 3.833,80 ha de área, é formada pelos igarapés do Educandos, Quarenta, Cachoeirinha, Manaus, Bittencourt, Mestre Chico e demais afluentes. Suas nascentes estão localizadas na Reserva

Sauim Castanheira, no Distrito Industrial e em terrenos dos bairros Zumbi dos Palmares e Armando Mendes. No seu curso superior drena a área do Distrito Industrial de Manaus, onde

recebem efluentes provenientes de atividades industriais (PIO et al., 2014).

A bacia do São Raimundo tem como principais tributários o igarapé do Mindú, igarapé dos Franceses, igarapé do Bindá e igarapé Manaus. Uma parte de suas margens apresenta cobertura vegetal, outra parte é desmatada e totalmente habitada recebendo em seu percurso esgotos domésticos e resíduos orgânicos liberados pela comunidade.

A bacia do Puraquequara é composta do rio Puraquequara e seus afluentes, tendo grande parte de sua extensão localizada na área de expansão urbana da cidade, no entanto, é considerada Área de Proteção Ambiental. A bacia do Tarumã-Açu é uma bacia mista, pois uma parte se encontra na área urbana e a outra em área rural. Os tributários pela margem esquerda, os quais estão inseridos na área urbana são igarapé do Gigante, igarapé Leão, igarapé do Mariano, igarapé da Bolívia e o igarapé do Tarumazinho, integralmente dentro do Bairro do Tarumã. Na área rural ainda apresenta cobertura vegetal significativa, características de ambiente preservado, além de algumas nascentes localizadas em áreas protegidas como as do igarapé do Bolívia que estão na área da Reserva florestal Adolpho Ducke. O principal tributário desta bacia é o igarapé do Gigante, que, assim como os demais igarapés da cidade, também teve uma ocupação desordenada, refletindo no atual cenário de degradação dos corpos d'água e das áreas do entorno da bacia. Essa bacia é caracterizada por receber um aporte de chorume do único aterro sanitário de Manaus. A região se encontra com altas concentrações de metais pesados (SANTANA e BARRONCAS, 2007; OLIVEIRA e SANTANA, 2010).

2.2. Coleta das Amostras

As amostragens foram realizadas em dois períodos: seca (novembro de 2010) e cheia (março de 2011). Para cada período foram coletadas 20 amostras de sedimentos; três em cada bacia hidrográfica e as demais na

desembocadura e pela orla do rio Negro (Figura 1). As amostras de sedimento foram coletadas com auxílio de um amostrador de fundo tipo Ekman. Após o lançamento e recolhimento do amostrador de fundo e a verificação da integridade do sedimento, foi selecionada somente a área central e superficial da amostra, uma vez que este amostrador é feito de aço inox. Esta é uma medida preventiva, pois a draga não tem Hg na sua constituição, no entanto com esse procedimento possibilita a determinação de outro metal potencialmente tóxico. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos previamente identificados e resfriadas para serem transportadas até o laboratório, onde foram mantidas sob refrigeração a <5 °C.

2.3. Determinação do Hg_{tot}

No laboratório as amostras foram submetidas à peneiração úmida em malhas de 200 mesh (fração <0,074mm), secas em estufa a 50 °C e maceradas para posterior análise. Para a extração de Hg_{tot} das amostras de sedimentos de fundo, pesou-se cerca de 1g (peso seco) em tubos de ensaio com adição de HCl:HNO₃ (3:1) e KMnO₄ (5%) e colocado em bloco digestor à cerca de 60 °C por 1h (BASTOS et al., 1998). Após essa extração forte as amostras foram filtradas por gravidade em filtros de celulose (Whatman 44, New Jersey, USA) e o Hg_{tot} determinado por espectrofotometria de absorção atômica acoplada ao gerador de vapor frio (FIMS-400, Perkin-Elmer, Alemanha). O controle de qualidade analítico foi realizado fazendo uso de brancos, replicas e material certificado da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA-356, Viena, Áustria).

2.4. Análise Estatística

Inicialmente, os dados foram avaliados por meio da estatística descritiva e análise de quartis para a verificação de valores extremados (*outliers*). Empregou-se também o teste de normalidade Ryan-Joiner e a análise de dependência espacial. A classificação da

dependência espacial entre os dados pode ser forte, moderada ou fraca, dependendo da relação efeito pepita e patamar. Quando o efeito pepita é inferior ou igual a 25% do patamar é considerada de forte dependência espacial, se o efeito pepita for superior a 25% e inferior ou igual a 75% do patamar é dita moderada, e quando o efeito pepita for superior a 75% a dependência espacial é considerada fraca.

2.5. Análise Geoestatística

A análise geoestatística consistiu no cálculo de semivariogramas experimentais para a variável Hg nos períodos da seca e da cheia, a partir da ferramenta “GeoStatistical Wizard” do Arcgis 9.2®. O método escolhido foi a interpolação por Krigagem ordinária. A seleção do modelo de semivariograma baseou-se em identificar a variabilidade espacial dos valores de mercúrio observados, comparando os modelos circular, esférico, exponencial e gaussiano. Para a seleção do modelo de semivariograma que melhor se adequou foram avaliados dois critérios: o grau de dependência espacial (GDE) e as estimativas dos erros pela técnica de validação cruzada.

3. Resultados e Discussão

Os resultados referentes ao Hg_{tot} e a análise descritiva são apresentados na Tabela 1,

cuja principal característica é estarem abaixo daqueles valores encontrados na bacia do rio Negro. Os sedimentos da bacia do rio Negro têm concentrações que variam de 0,070 a 0,721 mg kg^{-1} (BISINOTI et al., 2007). Apesar da discrepância com os valores da literatura, nota-se que o de Hg_{tot} nos sedimentos de fundo da orla de Manaus também varia significativamente. Em princípio esse comportamento já era esperado. Essa afirmação é consubstanciada nas condições físicas e químicas de um ambiente eutrofizado. Geralmente, essas condições são diferenciadas com valores aleatórios de variáveis como pH, E_h e concentrações de contaminantes como sulfetos, cloretos, metais pesados, entre outros.

Particularmente para o Hg esse comportamento representa uma distribuição nos diversos comportamentos do ecossistema aquático. Bjrnberg et al. (1988) sugeriram um diagrama, que é apresentado na Figura 2. Nesse diagrama é possível observar as diversas formas do Hg em um ambiente aquático; variáveis como E_h e pH são responsáveis pela mudança do estado oxidação do Hg. É possível perceber que as espécies iônicas do Hg podem ser precipitadas ou complexadas com a matéria orgânica dissolvida no ecossistema aquático.

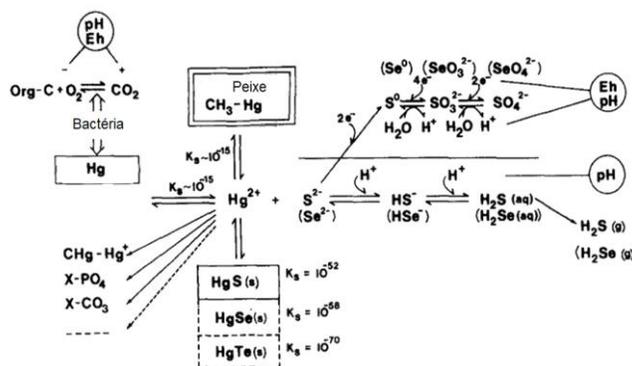


Figura 2. Distribuição de Hg no ambiente aquático. Fonte: Bjrnberg et al. (1988).

Tabela 1. Análise descritiva para Hg nos períodos de seca e cheia mg kg^{-1}

Variável	Seca	Cheia
Média	0,2928	0,6498
Desvio Padrão	0,3944	1,3795
CV (%)	134,7	212,3
Assimetria	2,7333	2,8482
Mínimo	0,0103	0,0729
Máximo	1,7901	5,7759

CV= Coeficiente de Variação, n = 20.

Os altos valores de coeficiente de variação (CV) refletem muito bem a existência outras fontes daquelas consideradas naturais. Existe também uma diferenciação entre a seca e

cheia. Sendo a segunda estação que contribui com a maior concentração de Hg_{tot} . A assimetria apresentada na análise descritiva sugere que as fontes de Hg são diferenciadas entre si.

Em termos de bacias hidrográficas, a concentração de Hg_{tot} é caracterizada por ter os maiores valores nas mais antigas (do Educandos e São Raimundo); ou seja, maior tempo de existência maior descarga de Hg (Figura 3). Observa-se também, nas bacias mais antigas, uma oscilação de concentração de Hg_{tot} maior entre os pontos de coletas. Por outro, a bacia do Puraquequara praticamente não há variação nas concentrações de Hg_{tot} , permanecendo praticamente constante.

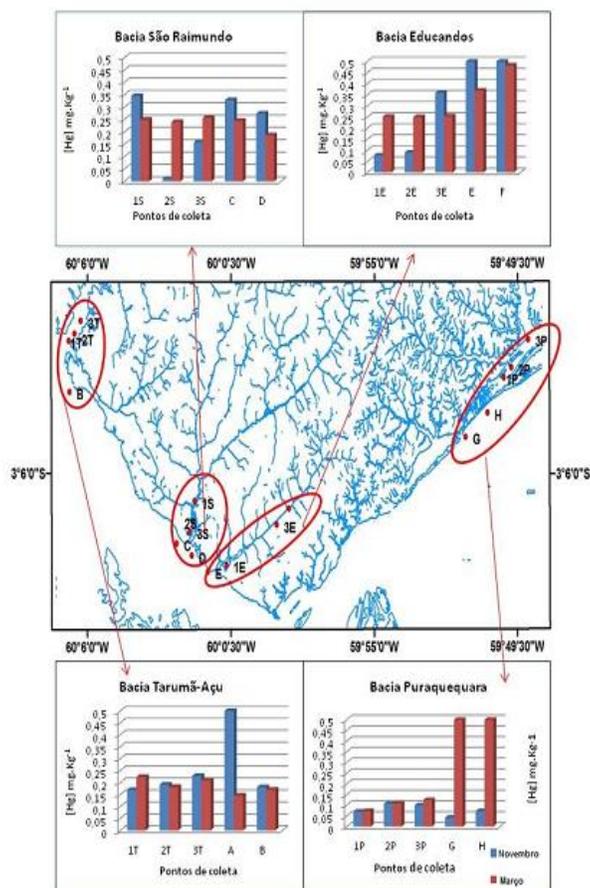


Figura 3 – Distribuição sazonal de Hg_{tot} nos sedimentos de fundo na em estudo (2011).

3.1. Tratamento Geoestatístico

Essas características explicam a existência de assimetria positiva com elevada encontrada na estatística descrita, bem como a presença de *outliers*, mostrado na Figura 4. Foi verificada a hipótese de normalidade dos dados pelo teste de Ryan – Joiner. Para a aplicação da krigagem foi necessário retirar os *outliers*. Deve-se afirmar que a presença de *outliers* indica a existência de fontes difusas na região estudada. Uma vez retirado os *outliers* o conjunto dos dados passaram a ter uma distribuição normal (Tabela 2). Os valores de nível descritivo (*p*-value) passaram de 0,0010 para maiores que 0,100 e os coeficientes de Ryan-Joiner passaram de 0,766 para 0,956 no período da seca e de 0,623 para 0,965 no período da cheia, demonstrando que o desvio da distribuição normal não era significativo.

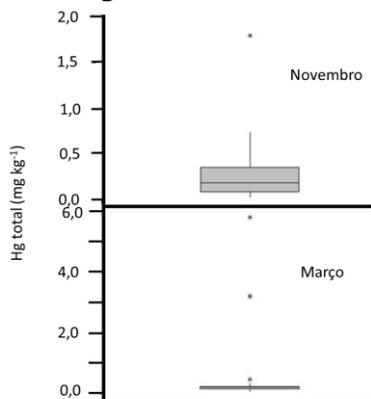


Figura 4 – Box-plot das concentrações Hg_{tot} nos dois períodos sazonais estudados

Para a aplicação da Krigagem ordinária, os ajustes dos semivariogramas foram feitos de maneira interativa com o software. Os parâmetros fundamentais do semivariograma, como patamar, efeito pepita e alcance, permaneceram da mesma maneira como preestabelecidos pelo algoritmo. Porém, algumas modificações foram feitas nos números de lags,

nas distâncias entre cada lag e nas larguras do bandwidth.

Tabela 2. Resultados do Teste Ryan - Joiner para verificar normalidade dos dados.

Período de coleta	Variável	Outliers	
		Com	Sem
Seca	n	20	18
	Média	0,293	0,185
	DP	0,394	0,136
	R-J	0,766	0,956
	<i>P</i>	<0,010	> 0,100
Cheia	N	20	17
	Média	0,65	0,209
	DP	1,38	0,071
	R-J	0,623	0,965
	<i>P</i>	<0,010	> 0,100

n = número de amostras, Dp = desvio padrão

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros ajustados para os modelos de semivariogramas obtidos para o período da seca. Observa-se que o efeito pepita, parâmetro que indica uma variabilidade não explicada pela distância de amostragem utilizada, teve valor zero para todos os modelos. Tal fato certifica que a distância na malha de amostragem foi satisfatória.

Tabela 3. Parâmetros ajustados para os modelos de semivariogramas para Hg no período da seca

Modelos	Parâmetro			
	EP	Alcance	Patamar	GDE
Circular	0,00	28,44	0,0234	forte
Esférico	0,00	28,44	0,0223	forte
Exponencial	0,00	28,44	0,0223	forte
Gaussiano	0,00	28,44	0,0255	forte

EF = efeito pepita

O modelo Gaussiano foi considerado bom, tendo a média estimada próxima de zero, a

raiz média quadrada mais próxima a um e os valores da raiz média quadrada/erro médio padrão baixos e próximos entre si (Tabela 4).

Tabela 4. Validação cruzada para a distribuição de Hg no período da seca.

Var.	Modelo			
	Circular	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Média	-0,0047	-0,0036	0,0026	-0,0093
RMQ	0,1374	0,1347	0,1402	0,1409
EMP	0,1469	0,1487	0,1523	0,1434
MP	-0,0092	-0,0025	0,0327	-0,0387
RMQP	0,9060	0,8750	0,8990	0,9920

RMQ = Raiz média quadrada, EMP = Erro médio padrão, MP = Média padronizada, RMQP = Raiz média quadrada padronizada.

O mapa de distribuição de probabilidade relacionado à seca está representado na Figura 5. As superfícies interpoladas apresentaram em maior detalhe as áreas mais críticas, ou seja, com maior concentração de Hg, localizadas na bacia do Educandos e do São Raimundo. Este fato provavelmente está relacionado com o alto nível de impacto industrial e tempo de ocupação existente nessas áreas. As menores concentrações de Hg foram encontradas na bacia do Puraquequara, que, até o momento, é a mais preservada da cidade quando comparadas as outras bacias.

Os valores dos parâmetros ajustados para a construção do semivariograma correspondente a distribuição de Hg no período da cheia está na Tabela 5. Para os modelos em verificação, observa-se a presença de baixos valores de efeito pepita, indicando pequena variação dos dados em distâncias menores que o espaço amostrado, com um alcance máximo (patamar) de 293,96 m.

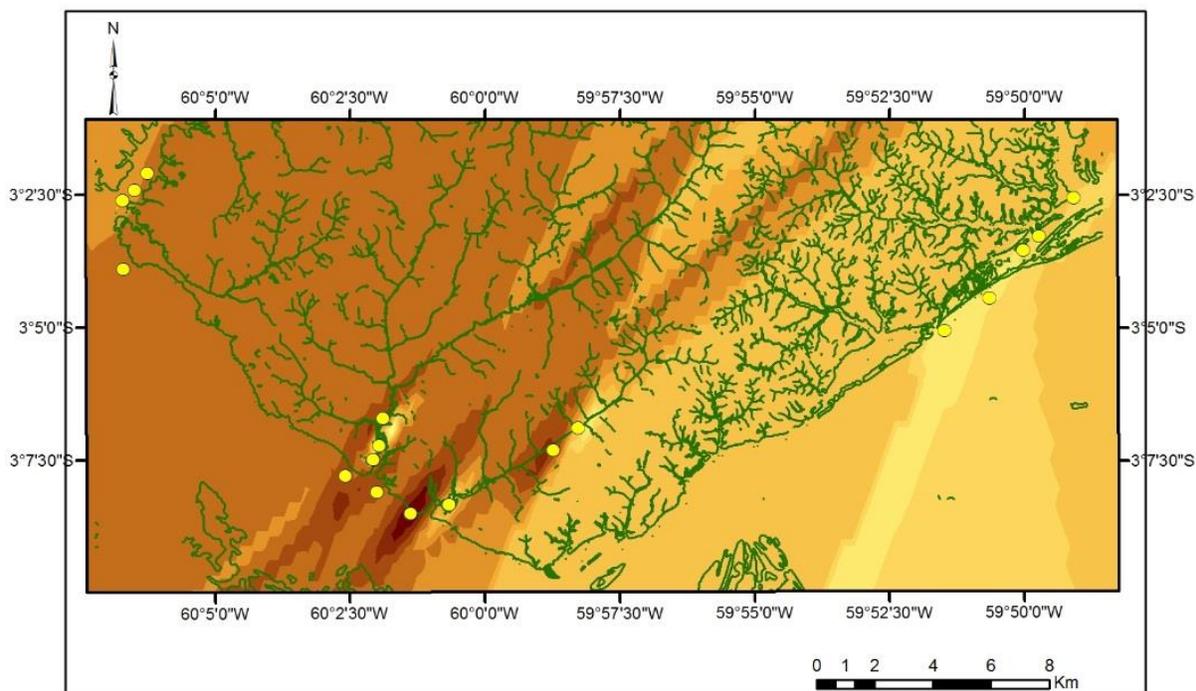


Figura 5. Mapa de probabilidade utilizando Krigagem Ordinária para Hg no período da seca.

Tabela 5. Parâmetros ajustados para os modelos de semivariogramas para Hg no período da cheia.

Modelos	Parâmetro			
	EP	Alcance	Patamar	GDE
Circular	0,0020	293,96	0,0046	moderada
Esférico	0,0019	293,96	0,0049	moderada
Exponencial	0,0013	293,96	0,0057	forte
Gaussiano	0,0021	293,96	0,0055	moderada

EF = efeito pepita

A análise de dependência espacial revelou-se forte apenas para o modelo exponencial, enquanto os demais modelos apresentaram dependência moderada. Segundo as estimativas dos erros obtidas pela validação cruzada (Tabela 6), o modelo com o melhor ajuste foi o exponencial, com a média estimada próxima a 0 e a raiz quadrada mais próxima a 1 quando comparado aos modelos circular, esférico e gaussiano.

Tabela 6. Validação cruzada para a distribuição de Hg no período da cheia.

Var	Modelo			
	Circular	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Média	0,0018	0,0020	0,0022	0,0014
RMQ	0,0463	0,0464	0,0048	0,0447
EMP	0,0538	0,5316	0,0509	0,0521
MP	0,0296	0,0331	0,0351	0,0239
RMQP	0,8773	0,8923	0,9844	0,8733

RMQ = Raiz média quadrada, EMP = Erro médio padrão, MP = Média padronizada, RMQP = Raiz média quadrada padronizada.

Na Figura 6 está representado o mapa de distribuição do Hg no período da cheia, onde é possível observar que a zona de maior concentração abrange a Bacia do São Raimundo e a Bacia do Educandos, as duas bacias que estão integralmente inseridas na área urbana da cidade e acolhem um grande número de indústrias do Polo Industrial de Manaus.

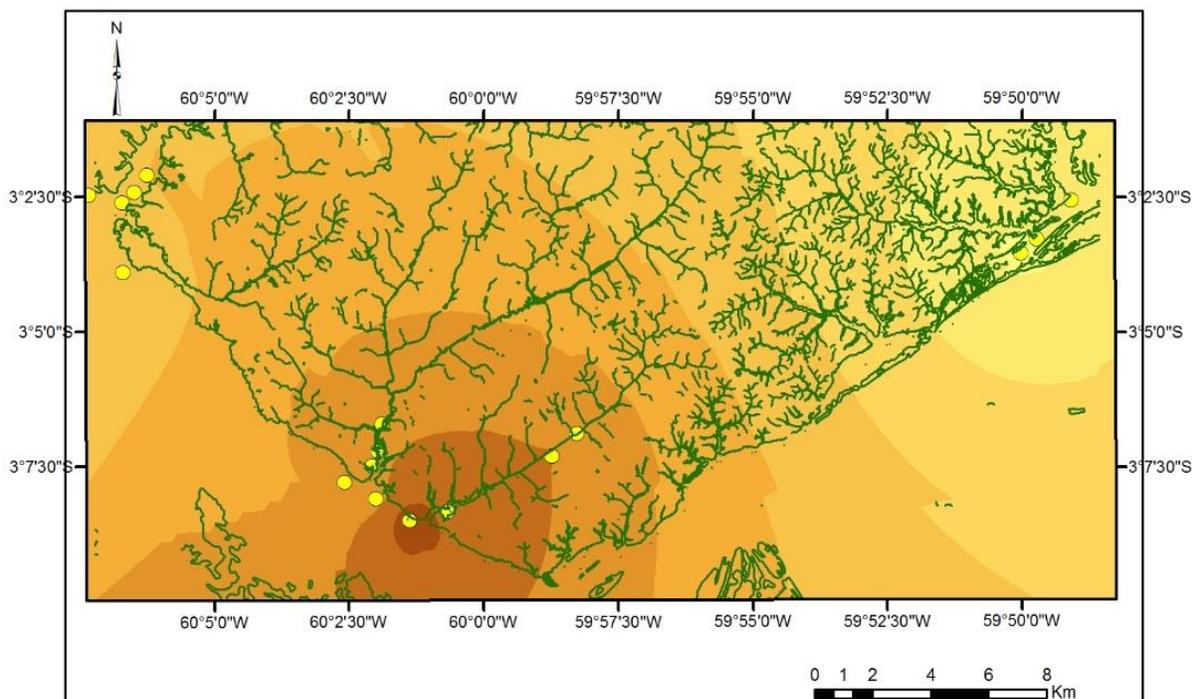


Figura 6. Mapa de probabilidade utilizando Krigagem Ordinária para Hg no período da cheia.



4. Conclusões

Os resultados deste estudo mostraram que as concentrações de Hg_{tot} nos sedimentos de fundo diferem da seca para a cheia, sendo que a estação cheia é a que mais contribui para os altos teores de Hg. As maiores concentrações de Hg foram encontradas nas sub-bacias do Educandos e do São Raimundo, como é possível verificar a partir dos semivariogramas para as duas estações.

Agradecimentos

A CAPES pelo apoio financeiro oferecido ao primeiro autor e à colaboração dos funcionários do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Unir por oferecer a estrutura para as análises de absorção atômica.

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. Os autores e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências

AHMED, Z. U. et al. Factors affecting paddy soil arsenic concentration in Bangladesh: prediction and uncertainty of geostatistical risk mapping. **The Science of the total environment**, v. 412-413, p. 324–35, 15 dez. 2011.

ARTAXO, P. et al. Large scale mercury and trace element measurements in the Amazon basin. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 4085–4096, 2000.

AZEVEDO, F. **Toxicology do mercúrio**. São Paulo: Rima e Intertox, 2003.

BARBOSA JR, F. et al. Elevated blood lead levels in a riverside population in the Brazilian Amazon. **Environmental Research**, v. 109, p. 594–599, 2009.

BARROS, E. et al. Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazon. **Applied Soil Ecology**, v. 26, p. 157–168, 2004.

BASTOS, W. R. et al. Establishment and analytical quality control of laboratories for Hg determination in biological and geological samples in the Amazon Brazil. **Ciência e Cultura**, v. 50, n. 255-260, 1998.

BASTOS, W. R. et al. Annual flooding and fish-mercury bioaccumulation in the environmentally impacted Rio Madeira (Amazon). **Ecotoxicology (London, England)**, v. 16, n. 3, p. 341–6, abr. 2007.

BISINOTI, M. C.; JÚNIOR, É. S.; JARDIM, W. F. Seasonal Behavior of Mercury Species in Waters and Sediments from the Negro River Basin, Amazon, Brazil. **Journal Brazilian Chemical Society**, v. 18, n. 3, p. 544–553, 2007.

BJRNBERG, A.; LARS, H.; LUNDBERG, K. A Theory on the Mechanisms Regulating the Bioavailability of Mercury in Natural Waters. **Environmental pollution**, v. 49, p. 53–61, 1988.

CARO, A et al. Map on predicted deposition of Cs-137 in Spanish soils from geostatistical analyses. **Journal of environmental radioactivity**, v. 115, p. 53–9, jan. 2013.

DA SILVA, G. S. et al. Major Aspects of the Mercury Cycle in the Negro River Basin, Amazon. **Journal Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p. 1127–1134, 2009.

DOLBEC, J. et al. Sequential analysis of hair mercury levels in relation to fish diet of an Amazonian population, Brazil. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 271, p. 87–97, 2001.

FADINI, P. S.; JARDIM, W. F. Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury? **The Science of the Total Environment**, v. 275, p. 71–82, 2001.

HORTELLANI, M. et al. Avaliação da contaminação por elementos metálicos dos



sedimentos do Estuário Santos-São Vicente. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 10, 2008.

KASMAEE, S. et al. Reserve estimation of the high phosphorous stockpile at the Choghart iron mine of Iran using geostatistical modeling. **Mining Science and Technology (China)**, v. 20, n. 6, p. 855–860, nov. 2010.

LACERDA, L. D. Contaminação por mercúrio no Brasil: Fontes industriais vs garimpo de ouro. **Química Nova**, v. 20, n. 2, p. 196–199, 1997.

LACERDA, L.; MALM, O. Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: uma análise das áreas críticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 173–190, 2008.

LECHLER, P. J. et al. 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, p. 87–96, 2000.

LOURENÇO, ROBERTO WAGNERLANDIM, LANDIM, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Caderno de Saúde Pública**, v. 21, n. 1, p. 150–160, 2005.

MARINS, R. et al. Distribuição de mercúrio total como indicador de poluição urbana e industrial na costa brasileira. **Química Nova**, v. 27, p. 763–770, 2004.

MCGRATH, D.; ZHANG, C.; CARTON, O. T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland. **Environmental Pollution**, v. 127, n. 2, p. 239–248, jan. 2004.

MELAMED, R. **Série Tecnologia Ambiental - Mecanismos de interação físico-química e mobilidade do mercúrio em solos,**

sedimentos e rejeitos de garimpo de ouro. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p. 48

NEVADO, J. J. B. et al. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: A review. **Environment International**, v. 36, n. 6, p. 593–608, 2010.

OLIVEIRA, D. L. DE; SANTANA, G. P. Influência do aterro municipal de Manaus sobre as águas superficiais 1 da circunvizinhança: um enfoque ao estudo de metais pesados. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 34, p. 75–83, 2010.

OLIVEIRA, L. C. DE et al. Distribuição de mercúrio em diferentes solos da bacia do médio rio Negro (AM): Influência da matéria orgânica no ciclo biogeoquímico do mercúrio. **Química Nova**, v. 30, n. 2, p. 274–280, 2007.

PIO, M. C. S.; SOUZA, K. S.; SANTANA, G. P. Capacidade da Lemna aequinoctialis para acumular metais pesados de água contaminada. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 203–210, 2014.

SANTANA, G. P.; BARRONCAS, P. S. R. Estudo de metais pesados (Co, Cu, Fe, Cr, Ni, Mn, Pb e Zn) na Bacia do Tarumã-Açu Manaus-(AM). **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 111–118, 2007.

VALLE, C. M. et al. Speciation and quantification of mercury in Oxisol, Ultisol, and Spodosol from Amazon (Manaus, Brazil). **Chemosphere**, v. 58, p. 779–792, 2005.

VALLE, C. M.; SANTANA, G. P.; WINDMÖLLER, C. C. Mercury conversion processes in Amazon soils evaluated by thermodesorption analysis. **Chemosphere**, v. 65, p. 1966–1975, 2006.

WASSERMAN, J. C. et al. O Ciclo do Mercúrio no Ambiente Amazônico. **Mundo & Vida**, v. 1/2, p. 46–53, 2001.