

Geoprocessamento aplicado à análise das concentrações de mercúrio em solos na bacia do rio Mutum Paraná, estado de Rondônia

Déborah Pereira Linhares da Silva^{1, 2}

Joiada Moreira da Silva Linhares^{1, 2}

Wanderley Rodrigues Bastos²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM/Campus Lábrea
Av. 22 de outubro, s/n, Vila Falcão – Lábrea - AM, Brasil
{deborah.silva} {joiada.linhares}@ifam.edu.br

² Laboratório de Biogeoquímica Ambiental Wolfgang C. Pheiffer – LABIOGEOQ/UNIR
Rodovia BR 364, Km 9,5 – Sentido Acre – Porto Velho RO, Brasil
bastoswr@unir.br

Abstract. Due to mineral prospecting activity at Amazon Basin Southwest (Rondonia) a high amount of mercury (Hg), a chemical element extremely harmful to environment and mankind, was released at aquatic, atmospheric and terrestrial regional ecosystems. This fact is becoming a current research object, especially at the environmental matrix soil. The present study had the aim to analyze the spatial variability [Hg] at 17 soil profiles at Mutum Parana River Basin, Rondonia, Brazil. There were used four analysis methods: i) images processing and interpretation, ii) soil morphology description, iii) soil gradation analysis per total dispersion, iv) atomic absorption spectrometry to Hg. At the basin three pedologic classes are predominant: latosol, argisol and gleisol. There were observed median concentrations of 106,62 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ Hg at argisol profiles, while the gleisol profiles presented 66,10 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ Hg. The higher Hg concentrations were registered at Mutum Parana river nascent area, distant from the contamination fount. However, at estuary area, where still exists gold prospecting activity, there were registered the lowest Hg levels at soil.

Palavras-chave: soil; mercury, green coverage, clay, solo; mercúrio, cobertura vegetal, argila.

1. Introdução

O estado de Rondônia, localizado no sudoeste da bacia Amazônica, apresenta um sítio geológico com potencial mineral de expressivo valor econômico. Dentre as reserva minerais destaca-se a do Madeira, uma das mais importantes em virtude dos impactos socioeconômicos e ambientais: crescimento demográfico desordenado, assoreamento e erosão das margens dos rios e o lançamento direto de elementos químicos nos ecossistemas. O ouro encontrado na bacia do Madeira é de granulação finíssima, o que dificulta sua separação dos demais minerais sedimentares extraídos no processo de garimpagem. Diante desta característica a técnica empregada para recuperação do ouro é a amalgamação com mercúrio (Hg^0). Procedimento que historicamente tornou-se comum e amplamente utilizado pelos garimpeiros, ainda que proibido devido seu alto potencial poluidor (Decreto 97.507/89). Além disso, sua toxicologia está relacionada a contaminação humana.

A partir deste processo histórico podem ter sido lançados para os ecossistemas terrestre, aquático e atmosférico do bioma amazônico entre 68t e 90t de mercúrio no período do auge da exploração aurífera do Madeira; mesmo elemento químico que na sua forma mais tóxica (metil-mercúrio) vazou de uma indústria química para a Baía de Minamata no Japão e causou mortes e implicações, principalmente neurológicas, à saúde da população local. Acidente ambiental que associado a outros ocorridos nas décadas de 50 e 60 motivaram a comunidade cientista sueca a solicitarem junto a Organização das Nações Unidas – ONU a reunião geral (Estocolmo 1972) para tratarem sobre os problemas ambientais em escala mundial (PFEIFFER & LACERDA, 1988).

Lacerda et. al (2004) ao analisarem a distribuição de mercúrio em solos na região de Alta Floresta no estado de Mato Grosso (Amazônia meridional) observou concentrações de Hg entre 25 e 210 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ na camada superficial, em Latossolos vermelho-amarelo com cobertura de florestas. Os quais atingiram valores elevados nas proximidades dos antigos garimpos de Arosto e do rio Peixoto, entre 150 e 210 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$. E variações entre 9 e 42 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ em solos com pastagem, mantendo-se neste patamar nas adjacências de garimpos já extintos. Os mesmos experimentos foram realizados por Malm *et. al* (1993) em solo de floresta na bacia do rio Madeira, cujos teores de Hg foram de 0,03 a 0,34 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$. Resultados aproximadamente da mesma ordem de grandeza foram observados em diferentes tipologias de solo marginais no alto rio Madeira até a cidade de Humaitá/AM (Silva *et. al*, 2003). Padrão de concentração mercurial registrados em solos sob floresta na Guiana Francesa e Venezuela no extremo setentrional da Amazônia (BASTOS & LACERDA, 2004).

Ao longo de três décadas estudos têm sido realizados na bacia do Madeira e seus principais afluentes devido ao histórico de exploração de ouro nesta região. Dentre estes o rio Mutum Paraná destaca-se porque foram constatadas concentrações elevadas de mercúrio em amostras de sedimentos, inclusive, maiores que os já encontrados em outros rios da bacia do Madeira, em áreas de exploração de ouro. Especificamente na bacia do rio Mutum Paraná as discussões teóricas e metodológicas atinentes ao ciclo biogeoquímico do Hg em solos na bacia do rio Mutum Paraná são recentes quanto a origem e dinâmica neste geossistema. Mas estudos desenvolvidos por Oliveira et al (2007) na bacia do rio Negro revelaram que os solos de textura argilosa têm alta capacidade de reter mercúrio, podendo acumular-se durante anos. Porém, com a remoção da cobertura vegetal esse metal pode ser transferido (emissão e re-emissão) por processo de evaporação, erosão e lixiviação para outros ecossistemas, contaminando os seres vivos, inclusive ao homem que esta no topo da cadeia trófica.

Diante destes fatos e da necessidade de dados concretos de toda a bacia do rio Mutum Paraná, para auxiliar na compreensão do ciclo do mercúrio na Amazônia, o estudo teve o objetivo de analisar a variabilidade espacial das concentrações de mercúrio em 17 perfis de solos na bacia do rio Mutum Paraná-RO

1.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na bacia do rio Mutum Paraná, localizada na porção noroeste de Rondônia, com uma área de 3.559,92 Km², delimitada pelas coordenadas geográficas 9°34'40" e 10°01'49" de latitude Sul e 65°15'34" e 64°57'51" de longitude Oeste (Figura 1).

A área de estudo faz parte do complexo de 06 (seis) sub-bacias que formam a bacia hidrográfica do rio Madeira - Rondônia situada Amazônia ocidental. O rio Mutum Paraná tem suas nascentes nas terras indígenas do Karipunã, no complexo geológico gnáissico-migmatítico do Jarú, pertencente ao escudo central de Rondônia. É formado por rochas caracterizadas por notável aleitamento tectônico de alto e médio grau de metamorfismo. Embasamento que se encontra capiado por formações sedimentares do Terciário e Quaternário (QUADROS *et al*, 2007). O relevo está condicionado a estrutura geológica local como predomínio de ambientes sedimentares, no médio curso e foz, originários de processos erosivos oriundos de intemperismo de rochas do cristalino rondoniense. Assim o relevo da bacia do rio Mutum Paraná foi agrupado em dois conjuntos: a) formas de denudação de alta, média e baixa dissecação e b) formas de acumulação representadas por terraços e planícies inundáveis e vales de rios secundários.

Foram identificadas três grandes classes de solo: a) Latossolos, que correspondem a 77,14% da área total; b) Argissolos, que representam 10,38% dos solos mapeados e c) Gleissolos, que equivalem a 12,48% dos solos da bacia Mutum Paraná (RONDÔNIA, 1998).

A cobertura vegetal divide-se em dois grandes grupos: a) vegetação original, composta por floresta ombrófila aberta e uma estreita porção por floresta ombrófila densa; b) vegetação cultivada, originária da atividade agropastoril (BRASIL, 1992).

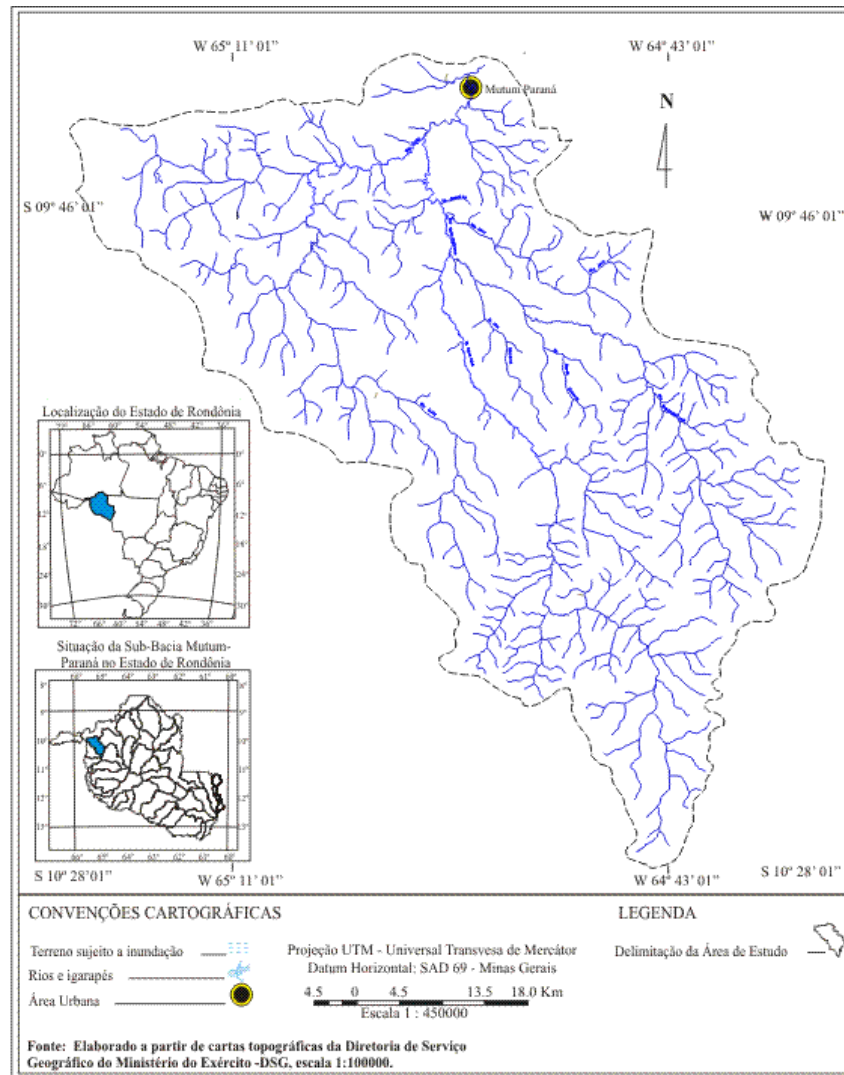


Figura 1. Localização da microbacia Mutum Paraná, área de estudo.

2. Metodologia de Trabalho

Os procedimentos metodológicos foram organizados em quatro etapas: 1) preparação da base cartográfica e processamento digital de imagens (cálculo dos índices de desflorestamento dos anos de 1993, 2005 e 2009); 2) observação do uso e cobertura da terra e coleta das amostras de solo; 3) procedimentos laboratoriais e 4) aplicação de métodos espaciais e não-espaciais.

2.1 Preparação da base cartográfica e processamento digital de imagem

Para registro das imagens foi elaborada uma base cartográfica a partir de cartas topográficas digitais (Divisão do Serviço Geográfico do Exército - DSG) com dois temas (vetoriais): rede de drenagem e rodovias, na escala de 1/100.000. Posteriormente foi selecionada a imagem do satélite LANDSAT 5/TM, 232/67 – Colorado do Oeste, com resolução espacial (pixel) de 30 metros. Esta foi geoprocessada através do “módulo *Impima*”

do SPRING 5.0 (MOREIRA, 2001), com uso da composição de imagem colorida RGB (TM3 = vermelha, TM4 = verde TM5 = azul) para identificação das formas e padrões espaciais de uso e cobertura da terra, e banda TM4 (monocromática) na atualização e delimitação da rede hidrológica.

2.2 Observação do uso e cobertura da terra e coleta das amostras de solo

Após o georreferenciamento das imagens foi realizada pré-interpretação através do método de classificação “supervisionada” com uso do algoritmo máximo verossimilhança, em que foram consideradas três classes de uso da terra: 1) área desmatada; 2) área de floresta nativa e 3) área urbana (infra-estrutura). A partir destas informações foi confeccionado o mapa temático exploratório de uso e ocupação da terra para subsidiar o levantamento amostral de solos em campo (SILVA *et al*, 2010).

As amostras de solo foram coletadas em 17 perfis pedológicos (mini-trincheira, corte de estrada e barranco), onde a profundidade variou de 0 a 120 cm. Os pontos foram selecionados a partir de cartas-imagem temáticas considerando predominância no uso e cobertura da terra no perímetro da bacia. No total foram extraídas 91 amostras, 59 horizontes de solo em 11 perfis localizados na área de nascente e médio curso (distante da mineração aurífera) e 32 horizontes de solo em 6 perfis nas proximidades da foz e do garimpo de Mutum Paraná. Em campo foram registradas as características morfológicas e do ambiente, com retirada de uma alíquota de 2Kg de amostra de cada horizonte, que foram identificadas e armazenadas para posterior análise em laboratório.

2.3 Procedimentos laboratoriais

Os procedimentos laboratoriais foram realizados em duas etapas. 1) análises granulométrica - Foi determinada conforme o método de pipeta (dispersão total) onde as amostras passaram por hidroxidação e a solução foi agitada durante 15 min. para os solos pré-classificados em campo como argilosos e 5 min. para os de textura média e arenosa. As amostras ficaram no dessecador até atingir a temperatura ambiente e foram pesadas (0,0001g) para argilas. A fração areia (grossa + fina) foi separada por peneiramento (0,2 mm nº 70). A fração silte foi determinada para cada amostra por cálculo de diferença (BRASIL, 2006). 2) a determinação de Hg total em solo (fração < 200 mesh; < 0,075mm) foi baseada no método de Bastos et al (1998). Foi feita extração ácida com HCl: HNO₃ (3:1) e oxidação com KMnO₄ a 5%. As Concentrações foram medidas por espectrofotometria de absorção atômica com geração de vapor frio (*Flow Injection Mercury System FIMS 400*, Perkin-Elmer).

2.4 Aplicação do método de análise espacial e não-espacial

A aplicação do método adotado na pesquisa consistiu na integração (Modelagem Numérica de Terreno – MNT) das informações de uso e cobertura da terra, classificação hierárquica da rede de drenagem e das características geoambientais (solo, relevo, vegetação, geologia, etc.), através de Sistemas de Informação Geográfica - SIG/SPRING 5.0. A partir dessas variáveis foram confeccionados mapas temáticos seguindo a proposta de representação cartográfica de Martinelli (2003). Os dados não espaciais foram submetidos a tratamentos estatísticos no software Estat D+ (YAMAMOTO & AKAMINE, 1998).

3. Resultados e Discussão

A partir dos resultados analíticos (físico-químico) e com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido por Brasil (2006) identificou-se na bacia do rio Mutum Paraná, conforme o processo de formação do solo, três grupos pedogenéticos e cinco classes de solos. O primeiro, originário do processo de intemperismo e lixiviação dos elementos para o lençol freático e rede de drenagem superficial existente no ambiente, a exemplo das manchas de latossolo amarelo nos pontos P-01, P-02, P-16, e latossolo vermelho-amarelo no

ponto P-10. O segundo grupo corresponde a eluviação de argila, matéria orgânica e sesquióxidos do horizonte A para o B, observado nos perfis: P-04, P-06, P-07 e P-08 de argissolo vermelho.

O terceiro grupo compreende os solos cuja origem está relacionada ao retrabalhamento das partículas de solo (transporte e deposição), que por ação dos cursos d'água e da variação do lençol freático podem apresentar encharcamento permanente ou periódico. O que, por sua vez, influencia a disposição das camadas ou horizontes, a partir da dinâmica hidrológica local. Foram identificadas três classes de solo na bacia do rio Mutum Paraná: gleissolos (P-09, P-12, P-13, P-14 e P-15), neossolo litólicos e flúvicos (P-03 e P-17 respectivamente) e plintossolo (P-05 e P-11).

Dentre as classes de solo identificadas o argissolo vermelho apresentou as maiores concentrações médias de Hg, 106,62 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$, enquanto as mais baixas foram observadas nos gleissolos (média 66,10 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ Hg) e neossolos flúvicos (65,48 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ Hg) (Tabela 1).

Tabela 1. Concentração de Hg nas classes de solos na Bacia do rio Mutum Paraná

Tipos de solo	N.Perfis	N. Horizontes	Mercúrio mg/Kg^{-1}		
			Máximo	Mínimo	Mediana
Argissolos - P	4	23	183,19	61,60	106,62
Gleissolos - G	5	25	89,02	46,00	66,10
Latossolos - L	4	24	158,70	33,41	95,25
Neossolos Flúvicos- RY	1	5	73,19	60,52	65,48
Neossolos Litólicos - RL	1	4	150,44	33,41	76,48
Plintossolos - F	2	10	90,45	81,59	87,47

Apesar da foz do rio Mutum Paraná está na área de reserva garimpeira do rio Madeira (estima-se que neste ambiente foram lançadas 90 toneladas de Hg entre 1980 e meados de 1990), os teores médios de Hg registrados nas amostras de solo não são elevados quando comparados aos registrados nos estudos de Lechler et al. (2000), que detectaram em Oxisols (argissolo) [Hg] entre 232 ng /g a 406 ng /g e Linhares et al. (2009), que na mesma classe de solo observaram variabilidade entre 257,7 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$ a 390 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$.

A análise estatística comparativa da média de teores de Hg detectados no horizonte "A" (profundidade entre 0 - 20 cm) e os tipos de uso e cobertura vegetal do solo (vegetação nativa, pastagem, agricultura e solo exposto) demonstraram que as concentrações de mercúrio variaram conforme o tipo de uso da cobertura vegetal predominante na bacia estudada. Os níveis mais elevados de Hg em amostras de solo extraídas em ambientes desmatados recentemente (Med= 85,53 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$) e pastagens antigas (Med=89,72 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$), não refletem a realidade da dinâmica do mercúrio em solos no sudoeste da bacia amazônica. Pois Almeida et al (2009) explicam que a diminuição das [Hg] nas áreas antropizadas na bacia do rio Madeira deve-se a supressão da cobertura vegetal que expõe o solo a radiação ultravioleta que pode mediar reações de redução, transformando o Hg^{2+} do solo em Hg^0 . Assim como a elevação na temperatura do solo favorece a emissão do Hg^0 para atmosfera. As concentrações médias (84,88 $\mu\text{g.Kg}^{-1}$) nas amostras de solo coletados em área de floresta são similares aos resultados obtidos por Lacerda et al (2004) na região de Alta Floresta, onde cerca de 80% das amostras apresentaram intervalo de 50 a 100 ng g^{-1} de mercúrio. Na região da nascente estão os quatro perfis (P2, P4, P6 e P7) com maior concentração média de Hg. Destes, dois estão em área de pasto e dois em área de floresta, sob pressão do desmatamento (Figura 2).

Os testes de correlação realizados apenas com amostras de argissolo e latossolo dos perfis mencionados apresentaram relação linear negativa fracamente significativa entre [Hg] e os percentuais de argila ($r^2 = -0,3101$). Ínfima negativa para a fração silte e [Hg] ($r^2 = -0,0702$) e significativamente diferente das demais frações (fracamente linear positiva) para a fração

areia e as [Hg] ($r^2 = 0.2532$. De acordo com Oliveira et al, (2007) ao avaliar a distribuição do mercúrio em diferentes solos da bacia do médio rio Negro foram constatados que os teores de matéria orgânica e silte contribuíam de modo positivo e a areia negativamente na retenção do mercúrio em ambientes periodicamente inundáveis na Amazônia Setentrional.

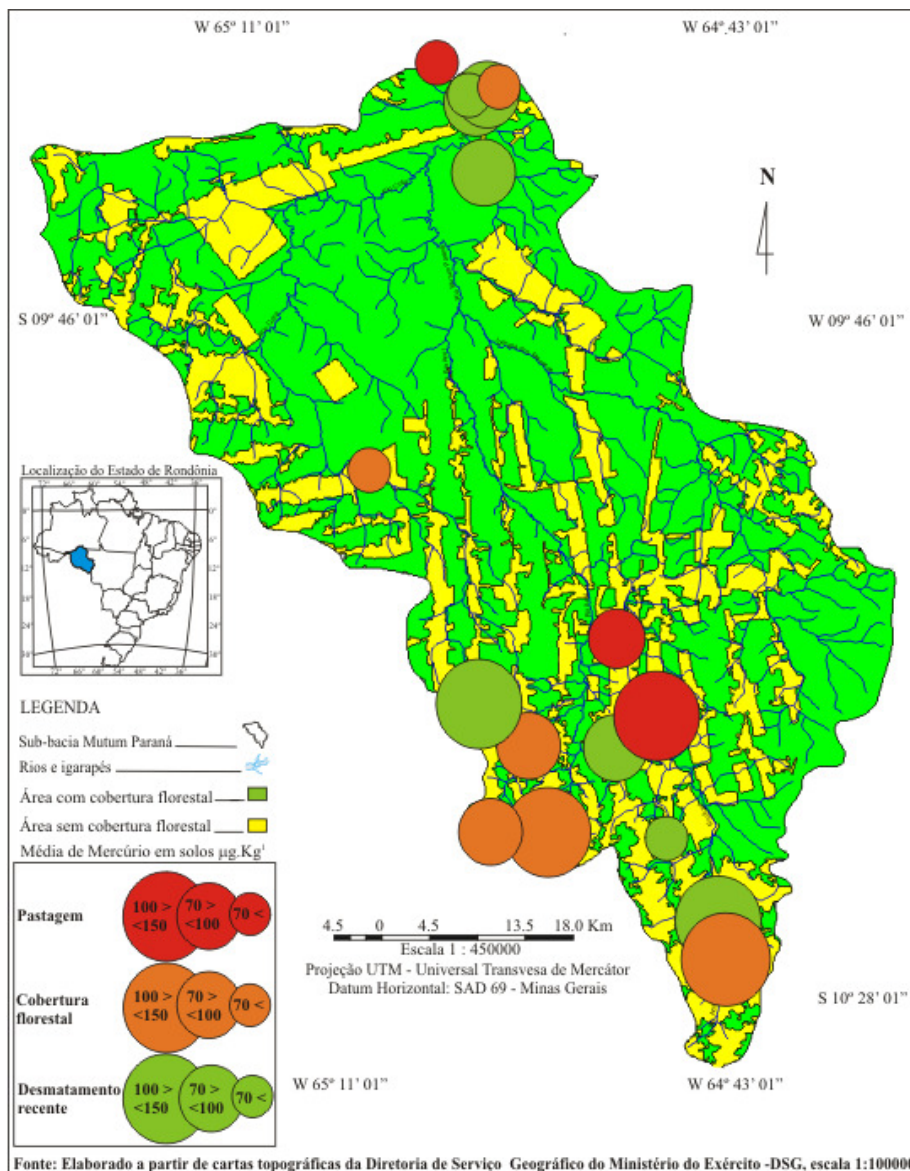


Figura 2. Variação das concentrações de Hg conforme o tipo de uso e cobertura do solo na microbacia hidrográfica Mutum-Paraná.

Os perfis P-9, P-12, P-13, P-14 e P-15 de gleissolos e P-17 de neossolo flúvico, situados na área da foz, portanto, na área de influência direta da Reserva Garimpeira do Madeira, apresentaram os menores teores de Hg, entre $56,52 \mu\text{g.Kg}^{-1}$ a $98,85 \mu\text{g.Kg}^{-1}$ (17 e 74cm de profundidade) e textura franco-argilo-siltosa.

A análise espacial dos teores de Hg em solo da microbacia hidrográfica Mutum Paraná indica que na região da nascente há maior concentração de mercúrio, quando comparada a foz desta microbacia (Figura 3). E que os altos teores de mercúrio já identificados em estudos anteriores, realizados na área da foz, podem ser associados diretamente a atividade garimpeira

desenvolvida na confluência dos rios Mutum Paraná e Madeira. Visto que embora na nascente haja maior [Hg], estes ainda assim são menos expressivos que os historicamente encontrados por Pfeiffer et. al (1991) na foz. Contudo, todas as atividades que possam contribuir para a disponibilização de mercúrio retido nos solos da região da nascente, a exemplo de processos erosivos (naturais e/ou antrópicos), que podem carrear material sólido para o sistema de drenagem, possivelmente vai aumentar os níveis de mercúrio disponível na foz.

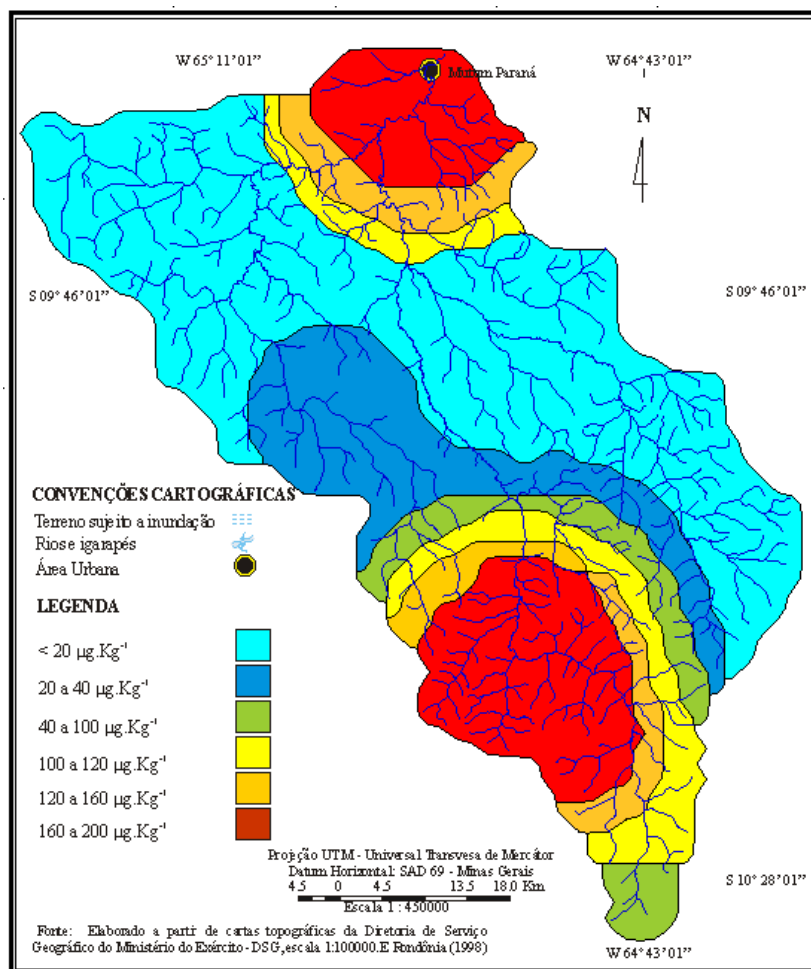


Figura 3. Variabilidade espacial de Hg⁰ na microbacia hidrográfica Mutum Paraná.

4. Conclusões

Das três classes pedológicas que predominam na microbacia hidrográfica Mutum Paraná, Latossolo, Argissolo e Gleissolo, os Argissolos apresentaram a maior concentração média de Hg, 106,62 µg.Kg⁻¹. Enquanto os Gleissolos média de 66,10 µg.Kg⁻¹ de Hg.

A variabilidade espacial das concentrações de mercúrio nos 17 perfis de solos na bacia do rio Mutum Paraná-RO, ocorreu conforme a classe pedológica, tipo de uso da terra e região analisada, predominando na região da nascente as maiores concentrações de Hg, onde não há histórico de garimpo de ouro, atividade que ainda existe na região da foz.

Referências Bibliográficas

Almeida, M.D.; Lacerda, L.D.; Saldanha, G.C.; Bastos, W.R. (2009) Variações nas concentrações de mercúrio em solos da reserva garimpeira do Alto rio Madeira. *Geochimica Brasiliensis*, 23(1), 139-150.

Bastos, W.R.; Lacerda, L.D.; Contaminação por mercúrio na bacia do rio Madeira uma breve revisão. R. Geochim. Brasil, 18 (2) 99-114, 2004.

Bastos, W.R.; Malm, O.; Pfeiffer, W.C.; Cleary, D. (1998) **Establishment and analytical quality control of laboratories for Hg determination in biological and geological samples in the Amazon-Brazil**. Ciência & Cultura, 50, 255-260.

Brasil, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Brasília-DF, p.306, 2006.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 1992, 92p.

Lacerda, L. D.; Souza, M.; Ribeiro, M.G.; The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon. R. Environmental Pollution, 129. 247-255, 2004.

Lecheler, P.J.; Miller J.R.; Lacerda, L.D.; Vinson, D.; Bonzongo, J.C.; Lyons, W.B. E Warwick, J.J. Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira river basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments. R. The Science of the Total Environment 260.p. 87-96, 2000.

Linhares, D. P.; Silva, J. M.; Lima, T.R.; Gomes, J.P.O.; Almeida, R.; Bastos, W. R. Mercúrio em diferentes tipos de solos marginais do baixo rio Madeira - Amazônia Ocidental. R. Geochimica Brasiliensis, 23 (1) 117-130, 2009.

Malm, O. Contaminação ambiental e humana por mercúrio na região garimpeira de ouro do rio Madeira, Amazônia. Tese de doutor em ciências. Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1993. p. 156.

Moreira, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. São José dos Campos: INPE, 2001, 250 p.

Oliveira, L. C.; Serudo, R. L.; Botero, W. G.; Mendonça, A. G. R.; Santos, A.; Rocha, J. C. E Neto, F. S. C. Distribuição de mercúrio em diferentes solos na bacia do médio rio Negro-AM: influência da matéria orgânica no ciclo biogeoquímico do mercúrio, 30,2, 274-280, 2007.

Orgânica em Solos no Baixo rio Madeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA. 11., 2003. Anais. Belém, livro de resumo expandidos, 2003. p.208-210.

Pfeiffer, W.C. & Lacerda, L.D. Mercury inputs to the Amazon region, Brazil. Environmental Technology Letters, 9: 325-350, 1988.

Pfeiffer, W.C.; Malm, O.; Souza, C.M.M.; Lacerda, L.D. De; Silveira, E.G.; Bastos, W.R. (1991) Mercury in the Madeira river ecosystem, Rondônia, Brazil. Forest Ecology and Management, 38, 239-245.

Quadros, M. L. E. S.; Rizzotto, G. J. Geologia e recursos minerais do estado de Rondônia. Porto Velho-RO: CPRM, 2007. 1 CD-ROM. 153p.

Rondônia. Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral. Diagnóstico Sócio-econômico-Ecológico do Estado de Rondônia e Assistência Técnica para Formulação da Segunda Aproximação do Zoneamento-Sócio-Econômico-Ecológico. Porto Velho: PLANAFLORO 1998. 141 p (Relatório Técnico de Solos, v. 5)

Silva, J. M. E Linhares, J.M.S. ; Linhares, D. P.; Bastos, W. R.. Geoprocessamento aplicado a análise integrada do uso da terra e qualidade de água na microbacia do rio Preto - Rondônia. Caminhos de Geografia (UFU), v. 11, p. 1-21, 2010.

Silva, J.M.; Nunes, D.D.; Bastos, W. R.; Silveira, E. G.; Mendes, A.M.; Oliveira, R.C.; Lima, T.R.; Linhares, D.P.; Lobato, L.C.H.; E Gomes, J.P.O. Correlação de Mercúrio e Matéria Orgânica em Solos no Baixo rio Madeira. In: Congresso Brasileiro De Geoquímica. 11., 2003. **Anais**. Belém, livro de resumo expandidos, 2003. p.208-210.

Yamamoto, K. R; Akamine, C. T. Estudos dirigidos de estatística descritiva. São Paulo, Érica 1998. 280p.