



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

TESE DE DOUTORADO

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO NA FOZ DO RIO TAPAJÓS E EXPOSIÇÃO AMBIENTAL À POPULAÇÃO DE SANTARÉM-PA, BRASIL

Linhas de Pesquisa:

Física do Clima

Tese apresentada por:

ENILSON DA SILVA SOUSA

Orientador:

Prof. Dr. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz (UFPA)

**BELÉM - PA
2016**

ENILSON DA SILVA SOUSA

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO NA FOZ
DO RIO TAPAJÓS E EXPOSIÇÃO AMBIENTAL À POPULAÇÃO
DE SANTARÉM-PA, BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, em convênio com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e o Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Física do clima.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz.

Belém
2016

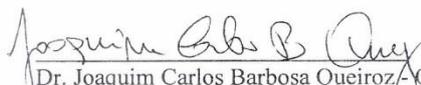
ENILSON DA SILVA SOUSA

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO NA BAÍA DO RIO
TAPAJÓS E EXPOSIÇÃO AMBIENTAL À POPULAÇÃO DE SANTARÉM-PA,
BRASIL**

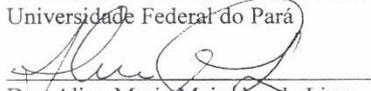
Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA – Amazônia Oriental. Área de concentração em Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Data de aprovação: 06 / 10 / 2016

Banca examinadora:



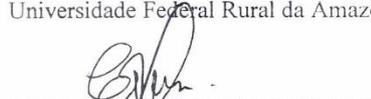
Dr. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz - Orientador
Doutor em Geociências e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará



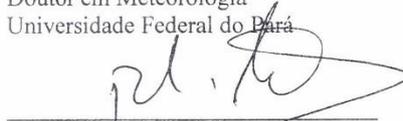
Dra. Aline Maria Meiguins de Lima
Doutor em Desenvolvimento Sustentável do Trópico
Úmido
Universidade Federal do Pará



Dra. Dulcidéia da Conceição Palheta
Doutora em Ciências Biológicas
Universidade Federal Rural da Amazônia



Dr. Everaldo Barreiros de Souza
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Dr. Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes
Doutor em Desenvolvimento Sustentável do Trópico
Úmido
Universidade Federal do Pará

*Ao criador do universo que me deu forças para superar a imensas
dificuldades que enfrentei durante os últimos anos. Amém!*

Em memória de Maria Elza de Sousa Almeida

Aos meus pais, José Maria da Silva e Maria de Lourdes da Silva Sousa

Minha esposa, filhos e filha, Patrícia Cancela Sousa, João Victor, Pedro Enilson e Ana

Patrícia Cancela Sousa

AGRADECIMENTOS

A minha amada esposa Patrícia e a meus filhos João Victor, Pedro Enilson e Ana Patrícia e todas minhas irmãs;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Joaquim Carlos Barboza Queiroz, que aceitou o desafio de orientar um geógrafo, sabendo das possíveis limitações de minha formação acadêmica;

Aos meus professores do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, da Universidade Federal do Pará/Museu Paraense Emílio Goeldi/Embrapa Amazônia Oriental, com os quais mantivemos contato mais de perto;

Aos servidores do PPGCA, que incansavelmente prontificaram-se de imediato a solucionar quaisquer dúvidas ou dificuldades que surgiram durante todo esse percurso laborioso do doutorado;

Aos meus colegas de turma do PPGCA 2013, especialmente, ao Camil Wadih Salame, pela amizade anacrônica e filosoficamente improvável.

"O bem que praticares, em algum lugar, é teu advogado em toda parte. Todas as nossas figurações mentais, o conjunto de nossas lembranças, as nossas alegrias íntimas e os nossos ressentimentos, as nossas dores, as nossas aspirações, elas formam o conjunto do clima em que a nossa desencarnação se verificará."

"Tenho aprendido com os benfeitores espirituais que a paz é a doação que podemos oferecer aos outros, sem tê-la para nós mesmos. Mas nunca persigas, não atrapalhes, não desconsideres, não menosprezes e nem prejudiques a ninguém, porque sofrer é muito diferente de fazer sofrer e a dívida é sempre uma carga dolorosa para quem a contraiu."

Chico Xavier/Emmanuel

RESUMO

Nas últimas décadas do século XX, os trabalhos acadêmicos voltados para discussão da problemática do mercúrio na Amazônia brasileira apontavam para uma contaminação mercurial de origem antropogênica, especialmente, proveniente de atividades garimpeiras auríferas artesanais. Em meados da década de 1990 e nos primeiros anos do século XXI, com o avanço das pesquisas na área da geoquímica, essa discussão aponta para uma possível origem geogênica desta contaminação, e a exposição ambiental da população local estaria relacionada ao consumo de proteína de origem animal, proveniente do pescado e atividades laborais. O objetivo desse trabalho é analisar a especiação de Hg e Metil-Hg em solo e material particulado na foz do rio Tapajós, e a percepção, capacidade de mobilização e ação política sobre a contaminação por esse metal na população de Santarém-PA. Além disso, pretendeu-se elaborar mapas do mercúrio a partir de dados espacialmente distribuídos, utilizando-se da geoestatística para inferir resultados para a localização e risco de contaminação desse metal ao longo da foz do rio Tapajós, em Santarém; mapas de probabilidades de contaminação por esse metal, que possibilitaram a classificação e quantificação das áreas contaminadas para diversos níveis de confiança na e no entorno da foz do rio Tapajós; e quantificar e avaliar as concentrações de mercúrio total em água e material particulado e levantar hipóteses sobre a origem dessa contaminação na baía do Tapajós. Os procedimentos metodológicos incluíram a confecção de mapas de localização, georreferenciamento dos pontos de coleta e identificação da área da pesquisa; aplicação de Questionários Integrados para medir o Índice de Capital Social – QI – MCS, proposto pelo Banco Mundial; mapas das concentrações de mercúrio na área de estudo e elaborar mapas da distribuição espacial dessas concentrações; e mapas da distribuição espacial dessas concentrações e uso da geoestatística (Krigagem fatorial), que possibilitou a elaboração de mapas em diferentes escalas de variabilidade associadas a atividades antrópicas ou de origem geogênica. Foram realizadas duas campanhas: nos meses de julho e dezembro de 2014, com 37 e 45 pontos amostrais em cada uma. Os resultados apontam para uma possível contaminação da área em alguns pontos, apresentando índices acima do recomendado pela resolução n. 357/2005, do CONAMA. Os resultados da krigagem fatorial apontam para a possibilidade de as concentrações de mercúrio serem associadas ao próprio meio natural, embora se possa ter contribuições devido a atividade antrópica, como garimpos e atividades industriais ao longo da bacia.

Palavras-chave: Amazônia. Geoestatística. Tapajós. Mercúrio. Capital Social.

ABSTRACT

In the last decades of the twentieth century, academic work focused on discussion of the mercury problem in the Brazilian Amazon pointed to a mercury contamination of anthropogenic origin, especially from artisanal gold mining prospecting activities. In the mid-1990s and early years of this century, with the advancement of research in the field of geochemistry focused on this discussion, point to a possible geogenic origin of this contamination, and environmental exposure of the local population would be related to protein intake of animal origin, from the fish and work activities. The aim of this study is to analyze the speciation of Hg and methylmercury in soil and particulate matter in the mouth of the Tapajós River, and perception, mobilization capacity and political action on contamination by this metal of the population of Santarém; Elaborate mercury maps from spatially distributed data using up geostatistics to infer results for the location and risk of contamination of the metal along the mouth of the Tapajós River, Santarém-Pa.; and maps of contamination probability that this metal, which enabled the classification and quantification of contaminated areas for different confidence levels in and around the mouth of the Tapajós River; and quantify and evaluate the total mercury concentrations in water and particulate matter and hypotheses about the origin of this contamination in the Tapajos bay. The methodological procedures included the making location maps, georeferencing of points of collection and identification of the search area; Application Integrated Questionnaires for Measuring Social Capital Index - SC-IQ, proposed by the World Bank; Maps of the quantify the mercury concentrations in the study area and prepare maps of the spatial distribution of concentrations; and maps of the spatial distribution of concentrations and use of geostatistics (factorial kriging), which enabled the development of maps at different scales of variability associated with anthropogenic or geogenic origin activities. Two campaigns one in July and December 2014, with 37 and 45 sampling points in each were conducted. The results point to a possible contamination of the area at some points, with indexes to the top of the type recommended by the resolution n. 357/2005, of CONAMA. The results of the factorial kriging point to the possibility that mercury concentrations are associated with the natural environment itself, although it may have contributions due to human activity such as mining and industrial activities in the basin.

Keywords: Amazon. Geostatistics. Tapajos. Mercury. Share capital.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 -	O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico.....	20
Figura 2 -	Mapa de localização do município de Santarém no contexto da bacia do rio Tapajós.....	26
Figura 3 -	Mapa geomorfológico interpretado de Santarém.....	30
Figura 4 -	Mapa de hidrografia da área de Santarém.....	32
Figura 5 -	Mapa de curvas de níveis e drenagem da área da pesquisa.....	34
Figura 6 -	Desenho amostral da área da pesquisa.....	36
Figura 7 -	Mapa de localização de coleta de solo.....	38
Figura 8 -	Área de amostragem em Santarém, com os respectivos pontos de coleta na primeira e segunda campanha de 2014.....	40
Figura 9 -	Gráfico de localização temporal das campanhas nas curvas envoltórias das cotas diárias observadas em Santarém (1930 a 2012) no rio Tapajós.	40
Figura 10	Fotos de materiais usados em trabalho de campo.....	44
-		
Figura 11	Fotos de materiais usados em trabalho de campo.....	45
-		

CAPÍTULO II

Figura 1 –	Mapa de localização da bacia do rio Tapajós e área do município de Santarém.....	61
Figura 2 –	Mapa de localização dos pontos de coleta de material em suspensão e solos.....	63
Figura 3 –	Localização dos pontos de aplicação dos questionários em Santarém.....	65
Figura 4 –	Dendograma – Hg _{Total} Fração Fina.....	74
Figura 5 –	Dendograma – Hg _{Total} Fração Grossa.....	74
Figura 6 –	Dendograma – MeHg Fração Fina.....	75
Figura 7 –	Dendograma MeHg e Hg _{Total} Fração Fina.....	76
Figura 8 –	Dendograma – MeHg e Hg _{Total} Fração Fina.....	77

CAPÍTULO III

Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Tapajós e Santarém.....	97
Figura 2 – Área de amostragem em Santarém, com os respectivos pontos de coleta na primeira e segunda campanha de 2014.....	99
Figura 3 – Etapas da modelagem Geoestatística.....	101
Figura 4 – Modelo de semivariograma esférico.....	102
Figura 5 – Histograma para variável Hg, na primeira campanha de 2014.....	106
Figura 6 – Semivariograma experimental (linha contínua) e modelo ajustado (linha tracejada) para o mercúrio.....	107
Figura 7 – Mapa da concentração de Hg para as amostras 2014 A, com a hidrografia.....	108
Figura 8 – Mapas de probabilidade das concentrações de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm.....	109
Figura 9 – Mapa de Classificação com probabilidade acima de 80% de contaminação de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm.....	110
Figura 10 – Mapa de Classificação com probabilidade acima de 85% de contaminação de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm.....	111
Figura 11 – Mapa de Classificação com probabilidade acima de 95% de contaminação de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm.....	112

CAPÍTULO IV

Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Tapajós e Santarém.....	124
Figura 2 – Área de amostragem em Santarém, com os respectivos pontos de coleta na primeira e segunda campanha de 2014.....	126
Figura 3 – Etapas da modelagem geoestatística.....	128
Figura 4 – Parâmetro do semivariograma: alcance (a), patamar (C), efeito pepita (Co, <i>nugget</i>)	128
Figura 5 – Semivariograma de superfície para variável Hg.....	131
Figura 6 – Semivariograma experimental (linha contínua) e modelo ajustado (linha tracejada) para o mercúrio.....	131
Figura 7 – Modelo semivariográfico em escala local para o Hg.....	132
Figura 8 – Modelo semivariográfico na escala regional para o Hg.....	133
Figura 9 – Mapa geológico da área de estudo.....	134
Figura 10 – Mapa de Krigagem fatorial em escala local para o Hg.....	135

Figura 11 – Mapa de Krigagem fatorial em escala regional para o Hg.....	136
--	-----

QUADROS

CAPÍTULO I

Quadro 1 – Transtornos mentais e de comportamento relacionados como trabalho e seus agentes etiológicos.....	21
Quadro 2 – Quadro com espécies da savana (Cerrado)	28
Quadro 3 – Coordenadas da área da pesquisa.....	35
Quadro 4 – Pontos de coleta de solo e sedimentos.....	39
Quadro 5 – Pontos de coleta de água (Material particulado)	39
Quadro 6 – Caracterização dos principais pontos de coleta de amostras campo.....	42
Quadro 7 – Material de Referência Certificada (CRM) IAEA-SL-1.....	43
Quadro 8 – Parâmetros de Qualidade Analítica.....	47
Quadro 9 – Resultados da análise do Hg.....	47

CAPÍTULO II

Quadro 1 – Material de Referência Certificada (CRM) IAEA-SL-1.....	67
---	----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1 – Estatística descritiva para o Mercúrio Total ($\mu\text{g/g}$) em frações finas e grossa de solos.....	69
Tabela 2 – Concentrações de Mercúrio Total ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solos.....	70
Tabela 3 – Concentrações de Mercúrio Total ($\mu\text{g/g}$) em frações grossas de solo.....	70
Tabela 4 – Concentrações de Mercúrio Total e MeHg ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solo	70
Tabela 5 – Participação absoluta e relativa dos indicadores de capital social do <i>ICS</i>	79
Tabela 6 – Tabela da categoria Grupos e Redes, representando o pensamento dos membros dos grupos relacionados à identificação por Raça/Etnia.....	80
Tabela 7 – Tabela da categoria Grupos e Redes, representando o pensamento dos membros dos grupos relacionados à identificação por escolaridade.....	80
Tabela 8 – Tabela da categoria Confiança e Solidariedade.....	81
Tabela 9 – Avaliação dos membros do governo local.....	82
Tabela 10 – Avaliação dos membros do governo estadual.....	82
Tabela 11 – Avaliação dos membros do governo central.....	82
Tabela 12 – Avaliação dos membros em relação ao crime e à violência.....	83
Tabela 13 – Avaliação dos membros em relação à capacidade de mobilização.....	84
Tabela 14 – Avaliação dos membros em relação às fontes de contaminação por mercúrio	85

CAPÍTULO III

Tabela 1a – Resultados das amostras de água na primeira campanha.....	104
Tabela 1b – Resultados das amostras de água na primeira campanha (Cont.)	104
Tabela 2 – Resumo estatístico para as concentrações de mercúrio (ppb), 2014.....	105

CAPÍTULO IV

Tabela 1 – Resumo estatístico para Krigagem fatorial.....	130
Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados.....	131

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.3 PROBLEMA DA PESQUISA.....	24
1.4 HIPÓTESES	24
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	25
1.5.1 Área de estudo	25
1.5.2 Caracterização climatobotânica	26
1.5.3 Geomorfologia local	28
1.5.4 Rede hidrográfica de Santarém	30
1.6 AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO DE IMAGENS E CONFECCÃO DE MAPAS	32
1.6.1 Extração da drenagem, curvas de níveis e dados integrados de sensoriamento remoto	33
1.6.2 Desenho Amostral	35
1.7 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETAS DAS AMOSTRAS	37
1.8 ORGANIZAÇÃO AMOSTRAL EM LABORATÓRIO E AVALIAÇÃO DOS TEORES DE MERCÚRIO	43
1.9 CÁLCULO DOS LIMITES DE DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO.....	45
1.9.1 Método visual e método da relação sinal - ruído	45
1.9.2 Método baseado em parâmetros da curva analítica	46
1.10 ESTRUTURAÇÃO DA TESE	48
REFERÊNCIAS.....	49
2 ESPECIAÇÃO DE MERCÚRIO EM SOLO E MATERIAL PARTICULADO E AFERIÇÃO DO ÍNDICE DE CAPITAL SOCIAL (ICS) NA FOZ DO RIO TAPAJÓS, AMAZÔNIA-BRASIL	55
INTRODUÇÃO	57
MATERIAIS E MÉTODOS	60
Caracterizações da área da pesquisa	60
Localizações dos pontos de coleta de solo	62
Localização dos pontos de aplicação dos QI-MCS	64
Métodos de Análise dos dados de QI-MCS	66
Análises laboratoriais das amostras de solo	66
Análises estatística	67

Análise de agrupamento (<i>clusters</i>) (AC)	67
RESULTADOS OBTIDOS	68
Principais estatísticas descritivas da variável Hg em solo	68
Resultado para análise de agrupamento (AC) em solo	73
Resultados obtidos para QI-MCS	79
Análises Descritivas das Dimensões do QI-MCS	79
CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS.....	88
3 AVALIAÇÃO DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS	
ÁREAS CONTAMINADAS POR MERCÚRIO NA FOZ DO RIO TAPAJÓS, PARÁ,	
BRASIL.....	92
INTRODUÇÃO	94
MATERIAIS E MÉTODOS	95
Caracterização da área da pesquisa.....	95
Localização dos pontos de coletas das amostras	98
Determinação dos teores de mercúrio nas amostras	98
Método geoestatístico	100
O risco probabilístico na Geoestatística	103
RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
Resultados analíticos para água em 2014	103
Principais estatísticas descritivas da variável Hg em 2014.....	105
Resultados das análises geoestatísticas	106
MAPAS DE PROBABILIDADES OU DE RISCOS DE CONTAMINAÇÃO.....	108
Modelos de incerteza locais para o risco de contaminação.....	108
Mapas de Classificação com probabilidade de contaminação acima de 80%, 85% e	
90%	110
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	112
CONCLUSÃO	115
REFERÊNCIAS.....	116
4 AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCURIO NA FOZ DO RIO	
TAPAJÓS, PARÁ, BRASIL, COM USO DE KRIGAGEM FATORIAL.....	118
INTRODUÇÃO	120
MATERIAIS E MÉTODOS	123
Caracterizações da área da pesquisa	123
Localização dos pontos de coletas das amostras	125

Aquisição, processamento e confecção de mapas	125
Avaliação dos teores de mercúrio.....	125
Método Geoestatístico	127
Krigagem fatorial	128
RESULTADOS E DISCUSSÕES	130
Principais estatísticas descritivas da variável Hg	130
Discussão dos resultados	136
CONCLUSÃO	139
REFERÊNCIAS.....	141
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
REFERÊNCIAS.....	151
APÊNDICES	162
APÊNDICE A - FIGURAS COM ASPECTOS MAIS IMPORTANTES DOS LOCAIS DE COLETA.....	163
APÊNDICE B - FIGURA COM ASPECTOS IMPORTANTES DO LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MERCÚRIO.....	169
APÊNDICE C - TABELA COM OS DADOS DE LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E ATRIBUTOS DE CADA AMOSTRA DA 1ª CAMPANHA 2014.....	170
APÊNDICE D - TABELA COM OS DADOS DE LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E TRIBUTOS DE CADA AMOSTRA DA 2ª CAMPANHA 2014.....	171
ANEXOS.....	173
ANEXO A - ANÁLISE EXPLORATÓRIA NO “R”.....	174
ANEXO B - ANÁLISE EXPLORATÓRIA NO “R” – CAPÍTULO IV	178

1 INTRODUÇÃO

O mercúrio (Hg) é um metal usado como medicamento há mais de 3.500 anos e seu processo de amalgamação do ouro já era conhecida pelos fenícios em 2.700 a.C. (MMA, 2010). Na natureza, ele existe em diferentes formas e as mais importantes são a metálica (Hg^0), a divalente (Hg^{2+}) e a metilada (CH_3Hg^+), esta última é usualmente formada a partir da transformação do Hg^{2+} e apresenta maior toxicidade (DAMAS; BERTOLDO; COSTA, 2014).

No ambiente e em condições normais, a fase metálica se volatiliza muito lentamente; na atmosfera seu vapor é estável e é nesse estágio que pode ser transportado em escala global, afetando áreas naturais remotas, longe de fontes pontuais de contaminação (LACERDA; MALM, 2008). Esse metal é considerado de maior potencial tóxico no ambiente e o único que comprovadamente sofre biomagnificação ao longo da cadeia trófica, atingindo sua forma mais tóxica no sistema aquático (SIQUEIRA et al., 2005), enquanto normalmente é encontrado em níveis traços na biosfera. É na hidrosfera, o ambiente de maior importância no ciclo biogeoquímico do mercúrio e onde ocorre a principal biomagnificação através da cadeia biológica/trófica.

Na biosfera, o Hg é normalmente encontrado em níveis de metais traço e o aumento de sua concentração no ambiente aquático tem relação direta com o acúmulo nos organismos vivos pelos processos de bioacumulação e biomagnificação na cadeia trófica (DA SILVA, 2015).

Na Amazônia, o conhecimento dessa dinâmica mercurial é importante tanto para o estabelecimento de políticas públicas de saúde das populações ambientalmente expostas quanto para a proteção dos ecossistemas aquáticos e terrestres no âmbito regional e global (SAMPAIO, 2006).

Foi a partir das décadas de 1950 e 1960, com a contaminação por mercúrio na cidade de Minamata, no Japão, onde milhares de pessoas morreram, em um evento que ficou conhecido como *Mal de Minamata*, que houve o interesse súbito por parte dos cientistas que tentavam entender como o mercúrio atinge o homem (WASSERMAN et al., 2001). Diversos estudos sucederam indicando que o grande responsável pelas mortes no Japão seria o mercúrio na forma de metilmercúrio (forma orgânica) e não o mercúrio na forma inorgânica. O mercúrio orgânico é resultado da transformação causada por bactérias presentes no ambiente.

Na década de 1970, ocorre, em âmbito mundial, o crescimento dos movimentos ambientalistas que resultaram na realização das Conferências de Estocolmo (1972) e da Biosfera (1978) (PASSOS, 2009), o que suscitou uma mobilização para a implementação de agenda ambiental global com importantes reflexos no cenário político mundial.

A partir daí, aumentaram as preocupações com as questões ambientais e ocorreram amplos debates em muitos países sobre a degradação do meio ambiente e a perda na qualidade de vida no que tange a saúde e o bem-estar coletivo (QUEIROZ, 2003).

O debate ambientalista avança na década de 1980 e aponta para os garimpos clandestinos na Amazônia como os maiores responsáveis pela contaminação por Hg na bacia do rio Tapajós e seus afluentes (ESTRELA, 2012). Neste momento, se alertou para hipótese do maior bioma do planeta estar sendo sucumbido por tamanha calamidade, o que gerou ampla mobilização para compreender como ocorria o processo de contaminação e exposição ao Hg de populações ribeirinhas que tinham no peixe sua principal fonte proteica (TRASANDE et al., 2010).

Até o início da década de 1990, a poluição associada aos garimpos de ouro foi considerada a principal fonte de Hg na bacia amazônica (FORSBERG et al., 1995). Mais tarde, com a descoberta de elevados níveis de contaminação mercurial em solos, peixes e populações humanas, longe de qualquer atividade industrial, este conceito começou a mudar (FORSBERG et al., 1995; FORSBERG et al., 1999; ROULET et al., 1998a).

Em meados dessa década, um novo paradigma surge no debate acerca do Hg na Amazônia, pois estudos apontaram que seria necessário dez vezes mais garimpos para justificar as quantidades observadas nos solos da região, concluindo que 90% do Hg presente nos solos seria de origem natural (ROULET et al., 1998b).

Para Roulet et al. (1998a) e Fadini; Jardim (2001), este metal pesado estaria presente em todos os tributários da bacia amazônica, sem ignorar que parte possui origem antropogênica, proveniente do uso indiscriminado nos garimpos de ouro e atividades industriais, mas a maioria seria aparentemente de origem natural. As primeiras evidências da origem natural na Amazônia vêm de estudos com solos da bacia central amazônica que são excepcionalmente ricos em mercúrio de origem natural (ROULET et al., 1998a; ZEIDEMANN, 1999; FOSTIER; OLIVEIRA; GUIMARÃES, 1999; FADINI et al., 2001; LECHLER et al., 2000).

Nesses estudos, foi estimado que apenas o primeiro metro de solo na bacia do rio Negro contém 40 vezes mais mercúrio do que foi liberado pelos garimpos em toda a

região amazônica durante os últimos 30 anos, e mais que 10 vezes a quantidade liberada pelos garimpos de ouro e prata em toda a América do Sul durante os últimos 500 anos (NRIAGU, 1994; FADINI; JARDIM, 2001).

Integrando os níveis de mercúrio encontrados em profundidade na área, ficou claro que o solo era o principal reservatório na região e a fonte mais provável no sistema fluvial, portanto, a quantidade de mercúrio naturalmente presente nos solos seria maior que aquela introduzida na região pela atividade garimpeira.

As pesquisas realizadas por Forsberg et al. (1999) na região do alto rio Negro, na Amazônia brasileira, apontaram que este rio, drenado por águas pretas e terrenos baixos com florestas densas, no noroeste do estado do Amazonas, seria um importante sítio de metilação, devido a suas características bem peculiares. Suas águas escuras são ácidas, com baixa concentração de material orgânico em suspensão, e presença de ácidos orgânicos dissolvidos, localizados em uma grande área de solos podzóis (EMBRAPA, 2003), que seriam os responsáveis pela presença do Hg orgânico na bacia deste rio.

Estudos de pesquisadores brasileiros e canadenses mostraram também concentrações elevadas de Hg em solos amazônicos, em especial, em áreas alagadas e alagáveis (solos hidromórficos e podzóis) (SOUSA, 2009). Para eles, o Hg formaria algum tipo de complexo com o Ferro (Fe) (WASSERMAN et al., 2001). A natureza destes complexos é ainda uma incógnita, já que a relação entre estes dois metais foi detectada a partir de coeficientes de correlação feitos em perfis de solo, porém, esta associação seria amplamente verificável em toda a Amazônia. Deste modo, o Hg nos solos da região seria mais de origem natural e não antropogênica como se imaginava (WASSERMAN et al., 2001).

Na planície amazônica, no ambiente aquático, o sedimento do rio tem estreita relação com a água, o tempo todo e a deposição de matéria orgânica está diretamente relacionada com a formação de MeHg por conta da maior proliferação de bactérias pseudomonas que fazem a metilação do Hg⁰. Por isso, a bioacumulação de Hg-tot, é menor em animais terrestres; quando comparados com animais aquáticos e deve-se ao fato da região estar diretamente ligada à ambientes terrestres (solo) e aquáticos (sedimentos de rio) (PALHETA; TAYLOR, 1995).

Análises de Hg e outros elementos em águas da bacia do rio Tapajós indicaram que outro mecanismo pedológico estaria controlando a dinâmica do mercúrio nesta bacia (ROULET et al. 1998b). A maior parte de mercúrio nestas águas foi associada à fração

particulada, indicando que o Hg_{tot} neste rio foi derivado predominantemente da erosão em áreas recentemente antropizadas, como áreas de mineração e terras agrícolas (ROULET et al., 1998b). Corroborando com essa hipótese, Fadini; Jardim (2001) e Lacerda et al. (2004), afirmam que os estudos em áreas da Amazônia onde o garimpo não está presente, aliadas as projeções mais recentes sobre o desmatamento, indicam que a dispersão do Hg pode estar mais associada ao uso da terra e à erosão.

Nas décadas seguintes, novos estudos apontaram para a origem geogênica do Hg, Bergquist et al. (2007) diz que em estado natural (Hg_{tot}), o mercúrio não traz grandes problemas à saúde humana, mas, quando ocorre a metilação (MeHg), sérios e graves problemas atingem as populações (BASTOS; LACERDA, 2004). A concentração de Hg na maioria dos rios é variável, mas extremamente baixa e só representa uma ameaça à saúde pública quando se encontra na forma de metilmercúrio (MeHg), que é facilmente assimilado e bioacumulado na cadeia alimentar aquática, podendo contaminar populações ribeirinhas que dependem de peixe para obter proteínas (BASTOS; LACERDA, 2004).

A mobilização de Hg nos solos e liberação para os sistemas fluviais estaria associada a condições hidromórficas, que são comuns em áreas alagáveis fluviais e interfluviais (GRIGAL, 2002). A erosão e o subsequente liberação na forma particulada também foi identificado como um importante mecanismo que contribui para a carga fluvial (FORSBERG et al., 1989; SKOLE; TUCKER, 1993; LACERDA, 1995; GODOY et al., 2002).

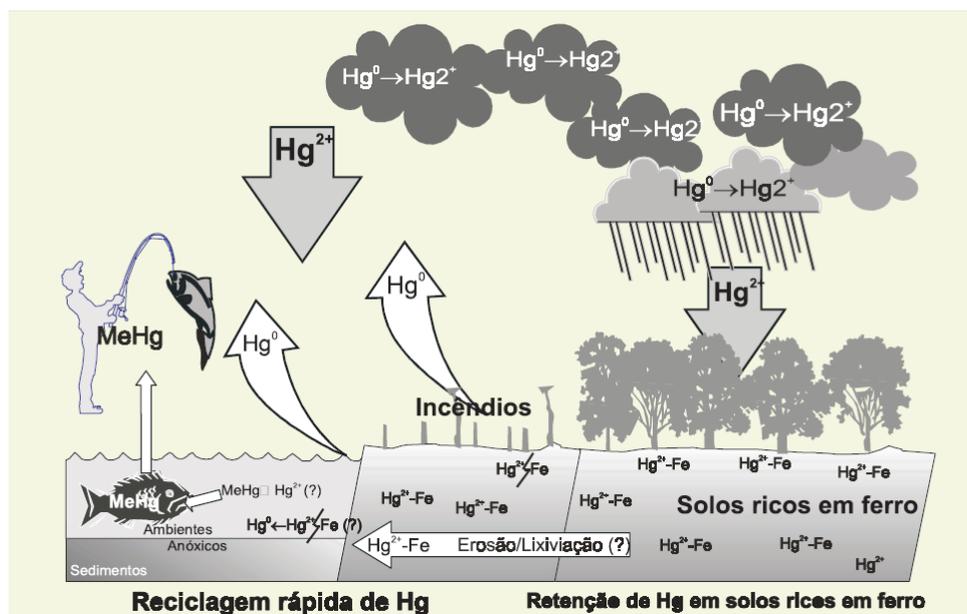
Recentemente, diversos estudos científicos que discutem a contaminação por mercúrio na bacia amazônica têm posto em destaque a importância dos solos como grandes reservatórios de mercúrio natural (BURAK et al., 2008; MARTINS et al., 2011; ESTRELA, 2012; BASTOS; LACERDA, 2004). Para Resende et al. (2007), o solo é uma das principais fontes de nutrientes e sedimentos que vão para os rios, lagos e mares. Logo, uma contemporânea ameaça de contaminação dos ecossistemas aquáticos tem sido vislumbrada a partir desta fonte (PELEJA, 2002).

Outrossim, a forma de dispersão do Hg ao longo dos rios Tapajós e Amazonas e o encontro dessas águas com o estuário do Marajó poderia estar associada ao transporte do Hg através do material particulado, o que possibilitaria o longo alcance do Hg a partir de fontes distantes e conseqüente bioacumulação na biota aquática mesmo em áreas distantes destas fontes de emissão (PALHETA et al., 2011). Estudos pioneiros na região do Tapajós reforçam ainda mais que os solos da Amazônia constituem os principais reservatórios naturais de Hg, que liberam quantidades substanciais de metal no meio

aquático (ecossistemas), por meio da erosão e lixiviação decorrentes de práticas de desmatamento, como "cortar e queimar" para a agricultura e/ou pecuária (PASSOS et al., 2008).

Uma vez que o Hg entra no sistema fluvial, uma série de fatores e processos contribui para sua metilação e bioacumulação na cadeia alimentar (Figura 1).

Figura 1 - O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico



Fonte: Wasserman et al. (2001)

Exposição ambiental ao mercúrio

A contaminação no ser humano pode ocorrer basicamente de duas maneiras: pela atividade profissional ou ambiental (FARIAS, 1996; BUENO, 2011; PINHEIRO, 2000). Trabalhadores ligados a atividades profissionais, como mineração (ouro), indústrias ou fábricas de cloro-soda e lâmpadas fluorescentes, estão mais suscetíveis a esta contaminação (FARIAS, 1996). O diagnóstico pode ser identificado a partir da quantificação da dosimetria do mercúrio na urina (BUENO, 2011; SANTOS, 1999).

Endemicamente, o mercúrio ao entrar no sistema orgânico humano, é depositado em tecidos, causando lesões graves nos rins, fígado, aparelho digestivo e sistema nervoso central. A exposição aguda, por inalação, acarreta fraqueza, fadigas, anorexia, perda de peso e perturbações gastrointestinais (TINÔCO, 2010).

A contaminação por cloreto de mercúrio, provoca úlceras gastrointestinais e necrose tubular aguda. Já a exposição excessiva pode levar a reações psicóticas: delírios,

alucinações e tendências suicidas (TINOCO, 2010). Os efeitos sobre a saúde humana, relacionados com a bioacumulação, transformação e transporte global do mercúrio inorgânicos, se devem quase exclusivamente à conversão dos compostos de mercúrio em metilmercúrio (CH₃Hg) (SOUZA; BARBOSA, 2000; BASTOS; LACERDA, 2004).

O mercúrio é o mais volátil de todos os metais e em estado de vapor é altamente tóxico para o ser humano quando entra na cadeia alimentar (MICARONI, 2000). Os resultados desses contatos são danosos ao Sistema Nervoso Central, o que significa que essa contaminação pode dificultar a coordenação motora, acuidade visual humana, dificuldades táteis e até efeitos teratogênicos. A contaminação mercurial ocorre principalmente pelas vias respiratórias e, às vezes, pelas vias digestiva e cutânea, sendo que após sua absorção acumula-se principalmente nos rins, fígado e centros nervosos e causa sérios danos à saúde do indivíduo (LACERDA; SALOMONS, 1995; CAMARGO, 2005).

Quando uma mulher grávida é exposta a produtos químicos, o feto também é exposto, já que a placenta não é uma barreira ineficaz para produtos químicos que circulam no sangue (VIMY et al. 1990; GRIGOLETTO, 2008). Produtos químicos teratogênicos são compostos que, quando assimilados pela mãe durante a gravidez, são transferidos para o embrião ou o feto, causando má-formação acompanhada ou não da morte do feto, sem causar danos aparentes à mãe (SCHNEIDER, 2010; PEREIRA, 2004) e alguns efeitos sobre a saúde humana, relacionados ao Hg estão no quadro 1, abaixo.

Quadro 1 – Transtornos mentais e de comportamento relacionados, como trabalho e seus agentes etiológicos

Transtornos mentais	Agentes etiológicos
Outros transtornos mentais decorrentes de lesão e disfunção cerebrais e de doenças físicas. Transtorno cognitivo leve	Mercúrio e seus compostos tóxicos
Transtornos de personalidade e de comportamento decorrentes de doença, lesão e de disfunção. Transtorno orgânico de personalidade. Outros transtornos de personalidade e de comportamento decorrentes de doenças, lesão e de disfunção cerebral	Mercúrio e seus compostos tóxicos
Transtorno mental orgânico ou sintomático não especificado	Mercúrio e seus compostos tóxicos
Episódios depressivos	Mercúrio e seus compostos tóxicos
Neurastenia (inclui síndrome de fadiga)	Mercúrio e seus compostos tóxicos

Fonte: Adaptado de Camargo (2005)

A contaminação ambiental, por sua vez, é provocada pela dieta alimentar, comumente pela ingestão de peixes de água doce ou salgada, sendo absorvido e ocasionando alterações crônicas no Sistema Nervoso Central (SOUZA; BARBOSA, 2000). A grande preocupação é o elevado consumo de peixes, como fonte de proteína, pela população amazônica, sendo a principal via de exposição humana ao metil mercúrio local (TRASANDE et al., 2010).

A comprovação dessa contaminação pode ser feita pela determinação do mercúrio no cabelo ou sangue, onde são detectados os sais de mercúrio. Os compostos orgânicos de mercúrio, predominantemente o metil mercúrio, são responsáveis pela contaminação ambiental, em especial, pela dieta com base em peixes contaminados, a ocupação trófica desses peixes, assim como idade e tamanho, determinará o nível de contaminação humana (FARIAS, 2006).

Outra fonte significativa de exposição para os trabalhadores e as populações vizinhas, são os garimpos clandestinos em pequena escala, que utilizam a amálgama ouro-mercúrio para extrair ouro do minério (ESTRELA, 2012). Os garimpeiros queimam a amálgama ouro-mercúrio para vaporizar o mercúrio e recuperar o ouro, assim, os mineiros e as populações locais podem ter alta exposição aos vapores de mercúrio. Além disso, os resíduos de mercúrio metálico são geralmente despejados próximos ou em cursos de água, podendo elevar as concentrações de metilmercúrio em peixes desses corpos d'água e, dessa forma, resultando em ingestão de níveis elevados de metilmercúrio por moradores da comunidade (WHO, 2008).

Nesse contexto, a Amazônia passa a ser um importante elo no processo de exposição ambiental humana, devido sua geografia e a presença de uma vasta rede hidrográfica. O monitoramento e avaliação da dinâmica mercurial na região e suas consequências para população local, ecossistema regional e global é de grande importância para sugerir políticas públicas e mitigar possíveis danos à saúde e meio ambiente. Isto porque, nas últimas décadas, os níveis de mercúrio no ambiente global aumentaram consideravelmente, resultado da crescente poluição, trazida pelos usos industriais, ocupacionais e medicinais (ESTRELA, 2012).

Têm-se observado concentrações bastante elevadas de mercúrio em peixes amazônicos, particularmente aqueles carnívoros (do topo da cadeia trófica) e que tem maior longevidade. O fenômeno é explicado pela elevada bioacumulação do mercúrio ao longo da cadeia trófica. Assim, as algas e plantas aquáticas apresentam concentrações poucas vezes maiores do que as das águas (PALHETA, 2011).

Então, os peixes que consomem exclusivamente estas algas e plantas têm concentração algumas vezes maiores que às das algas e plantas e, assim por diante, até atingir peixes, como o pintado ou a piranha, que apresentam concentrações até um milhão de vezes superiores às da água. O enriquecimento dos peixes de maior longevidade está relacionado ao fato de o mercúrio ser dificilmente eliminado pelo organismo. Assim, à medida que o organismo envelhece, suas concentrações em mercúrio aumentam constantemente e os organismos que vivem mais tempo apresentarão maiores concentrações de mercúrio (WASSERMAN et al., 2001).

Logo, a contaminação humana por mercúrio, depende da quantidade consumida de alimento contaminado e da espécie de peixe consumida (PEREIRA, 2004). A eliminação do metilmercúrio e o desenvolvimento de sinais e sintomas de intoxicação dependem de fatores genéticos ainda desconhecidos que, de certa forma, protegem o indivíduo da intoxicação (SANTOS, 2007). Estes fatores estão relacionados ao sexo, idade, hormônios, taxa de hemoglobina e capacidade de indução das metalotioneínas que podem funcionar como barreiras protetoras do cérebro e, sobretudo, do cerebelo, onde o acúmulo é mais pronunciado (SOUZA, 2000).

Para identificar e analisar a capacidade de organização e empoderamento da população da área da pesquisa: região de Alter-do-Chão e entorno da foz do rio Tapajós, frente à exposição ambiental por mercúrio, testou-se a proposta de aferição do índice de capital social a partir do Questionário Integrado para Medir o Índice de Capital Social – *QI-MCS*, proposto pelo Grupo de Trabalho em Capital Social do Banco Mundial (GROOTAERT et al., 2003).

A utilização dessa metodologia pode ser uma alternativa para medir o capital social de uma população, com isso, detectando qual a capacidade organizacional e mobilização frente a fatos extremos que possam comprometer suas organizações societárias, bem-estar coletivo, mensurar seu poder de mobilização e ação política à exposição ambiental ao mercúrio.

O Índice de Capital Social (ICS) foi definido em um primeiro momento por Pierre Bourdieu, como sendo o “o agregado dos recursos efetivos ou potenciais ligados à posse de uma rede durável de relações mais ou menos institucionalizadas de conhecimento ou reconhecimento mútuo” (PORTES, 2000). Tal índice será analisado nesta Tese para mensurar a capacidade de mobilização e ação política, quando exposta a um risco ambiental, no caso, a contaminação mercurial.

Para a análise quantitativa do mercúrio na área de estudo, foram utilizadas ferramentas da geoestatística na elaboração de mapas da distribuição das concentrações de mercúrio e mapas de riscos, baseados em probabilidades de ocorrência de concentrações acima de determinado valor de corte, em geral, relacionado ao valor máximo permitido pela legislação (CONAMA). Com base nesses mapas, foi possível produzir mapas de classificação de áreas contaminadas para diversos níveis de confiança. Neste caso, foi possível, para nível de confiança, estimar a área contaminada da área de estudo. Finalmente, foram elaborados mapas em duas escalas de variabilidade (escala local e escala regional) que, associados a mapas hidrogeológicos, possibilitaram uma discussão sobre prováveis fontes de contaminação do mercúrio na área de estudo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a distribuição de mercúrio na foz do rio Tapajós, em Santarém, Pará e a resposta da população face à possível exposição ambiental ao mercúrio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a especiação de mercúrio em solo e material particulado, com aferição do índice de Capital Social (ICS) na foz do rio Tapajós, Amazônia-Brasil.
- b) Realizar um estudo do mapeamento da distribuição espacial do mercúrio, com a elaboração de mapas de riscos para a realização da classificação das áreas contaminadas por mercúrio na foz do rio Tapajós, Pará, Brasil.
- c) Avaliar a distribuição das possíveis fontes de contaminação por mercúrio na foz do rio Tapajós, Pará, Brasil, com uso de Krigagem Fatorial.

1.3 PROBLEMA DA PESQUISA

A dispersão do mercúrio ao longo da bacia do Tapajós tem impacto ambiental significativo na área da foz do rio Tapajós?

1.4 HIPÓTESES

- Os questionários integrados para medir o Índice de Capital Social (QI-MCS), do Banco Mundial, podem quantificar a mobilização e ação política da população local à exposição ambiental ao Hg?
- A contaminação por mercúrio na bacia do rio Tapajós atinge a foz desse rio.

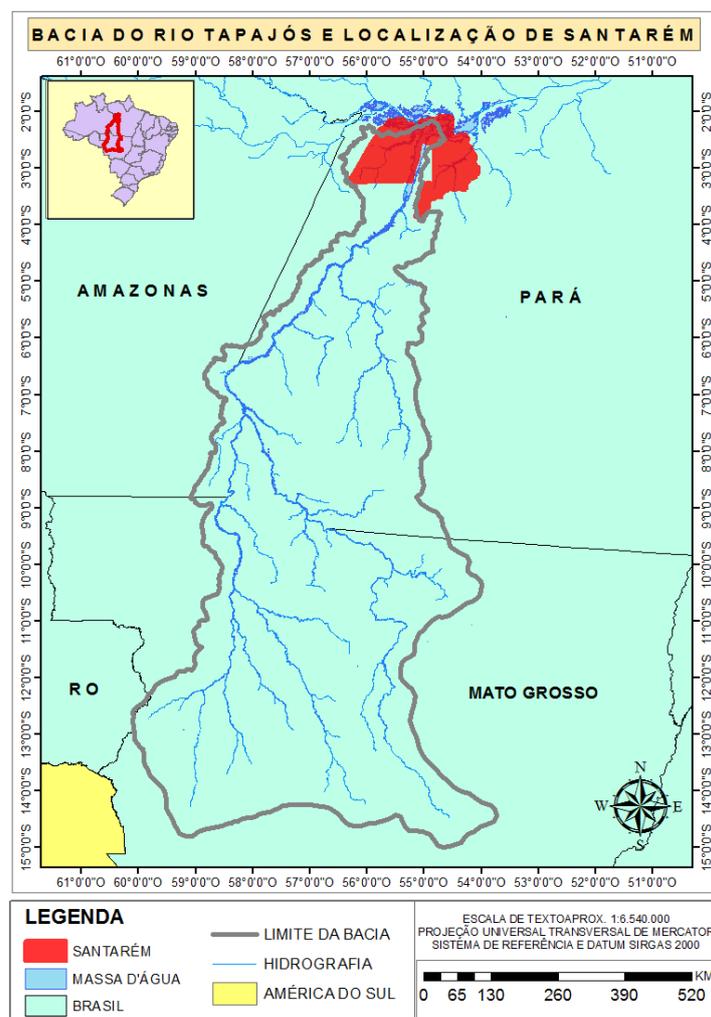
- Pode-se quantificar a contaminação por mercúrio no entorno da foz do rio Tapajós e estudar possíveis fontes de contaminação com uso da geoestatística.
- A população do entorno da foz do Tapajós possui capital social para uma mobilização e ação política à exposição ambiental ao mercúrio.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

1.5.1 Área de estudo

O município de Santarém, área específica da pesquisa, está localizado, entre os paralelos 2° 20' S e 2° 40' S e os meridianos 54° 35' W e 55° 05' W, (IDESP/SEPOF-PA, 2016), na bacia do Tapajós (Figura 2). Possui área de 22.886,624 km², população estimada para 2013 de 288.462 mil habitantes, área de 22.887 km² e densidade demográfica de 12,8 hab./km² (IBGE, 2015). A área urbana situa-se na confluência do rio Tapajós com o Amazonas, é um antigo centro urbano cuja existência remonta à ocupação colonial. A área pertence à mesorregião 011, do Baixo Amazonas e à microrregião 032, de Santarém, (TANCREDI, 1996). Possui os seguintes limites geográficos: ao Norte, Alenquer; ao Sul, Rurópolis e Placas; a Leste: Prainha; a Oeste: Juruti; a Noroeste: Monte Alegre; Nordeste: Óbidos e Juruti; Sudeste: Prainha e Uruará; Sudoeste: Belterra.

Figura 2 - Mapa de localização do município de Santarém no contexto da bacia do rio Tapajós



Fonte: Do autor (2016)

1.5.2 Caracterização climatobotânica

A relações entre os domínios e as características específicas do clima local no bioma, ou seja, a relação entre clima e flora na região de Santarém apresenta-se, segundo o IDESP/SEPOF-PA (2016), com temperatura média anual de 25,6° C e umidade relativa com valores acima de 80% em quase todos os meses do ano. A pluviosidade se aproxima dos 2.000 mm anuais, com certa irregularidade durante todo o ano. As estações chuvosas coincidem com os meses de dezembro a junho, e as menos chuvosas com os meses de julho a novembro.

O tipo climático da região é o *Ami*, (clima com mensal de temperatura mínima superior a 18° C, estação menos chuvosa de pequena duração e amplitude térmica inferior a 5° C entre o mês mais quente e o menos quente). O excedente de água no solo, segundo o balanço hídrico, corresponde aos meses de fevereiro a julho, com um excedente de mais

de 750 mm, sendo março o mês de maior índice. A deficiência de água se intensifica entre agosto e dezembro, sendo setembro o mês de maior carência, ao constatar-se em menos de 90mm.

Segundo a classificação de Köppen, proposta em 1900, os tipos climáticos tropicais chuvosos (*Afi*, *Ami* e *Awí*), com base nas temperaturas médias dos meses, que nunca são inferiores a 18° C e as variações do clima não têm verão ou inverno estacional. O clima *Ami*, possui regime pluviométrico anual com uma estação relativamente seca, mas o total de chuvas é suficiente para manter o período (EMBRAPA, 2016).

A cobertura vegetal do município de Santarém e região é composta por quatro formações florestais bem distintas: floresta equatorial subperenifólia e cerrado equatorial subperenifólio, terra firme, floresta equatorial higrófila de várzea e campos equatoriais higrófilos de várzeas, nas áreas sujeitas à inundação (EMBRAPA, 2001). A vegetação que predomina é do tipo floresta ombrófila densa latifoliada, comum das regiões tropicais e caracterizada por ser uma mata pesada e mista que pode se apresentar com cobertura florestal de maneira uniforme ou presença de árvores emergentes.

Em menor proporção, dependendo da região geomorfológica aparecem savanas (Quadro 2), campinaranas, refúgio ecológico, ora apresentando vegetação caracterizada como floresta de igapó, inundada permanentemente ao longo do ano. Em virtude das modificações antrópicas impressas na paisagem, principalmente nas duas últimas décadas, houve formação de áreas significativas de vegetação secundária (capoeiras) (ZEE BR-163, 2008).

Quadro 2 – Quadro com espécies da savana (Cerrado)

ESPÉCIES DA SAVANA (Cerrado)	
Nome Vulgar	Nome Científico
Açaí	<i>Euterpe oleracea</i> Mart.
Buriti	<i>Mauritia flexuosa</i> Mart
Caraubeira	<i>Tabebuia caraiba</i> (Mart.) Bur
Enviras	<i>Xylopia</i> spp.
Faveira	<i>Piptadenia peregrine</i> (L) Benth.
Ingá	<i>Ingá</i> spp.
Jatobás	<i>Hymeneae</i> spp
Lixeira	<i>Curatella Americana</i> L.
Murici-do-campo	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L) Kth
Piquiá	<i>Caryocar</i> spp.
Sucupira-do-campo	<i>Bowdichia virgilioides</i> H. B. K.
Tarumã	<i>Vitex flaves</i> H. B. K.
Outros.	

Fonte: BRASIL (1976)

1.5.3 Geomorfologia local

A metodologia do mapeamento geomorfológico tem como base o ordenamento dos fatos geomorfológicos em uma taxonomia hierarquizada que identifica, de acordo com a ordem de grandeza, subconjuntos que incluem os Domínios Morfoestruturais, as Regiões Geomorfológicas, as Unidades Geomorfológicas, os tipos de Modelados e feições que, devido à sua dimensão espacial, são representadas por símbolos.

As informações obedecem a orientação metodológica do tema, dispondo, juntamente à representação cartográfica, aquelas existentes no banco de dados e oriundas de pesquisa bibliográfica, trabalhos de campo e de gabinete. As Unidades Geomorfológicas, que agregam tipos de modelados fisionomicamente semelhantes e com gênese comum, também estão representadas por cores, com a mesma tonalidade dos Domínios Morfoestruturais a que estão associadas (IBGE, 2016).

Na planície de inundação do rio Amazonas e foz do Tapajós, as principais feições geomorfológicas encontradas estão vinculadas ao processo de erosão e deposição imposto pela dinâmica dos dois rios e suas interações: depósitos de sedimentos inconsolidados organizados em bancos, cordões e barras de deposição de material dominante sílticos arenoso finos, argilas e alguns cascalhos. O relevo é sempre rebaixado, geralmente plano, ou em suaves ondulações seguindo a organização espacial das linhas de barra de canal (SOUSA, 2009).

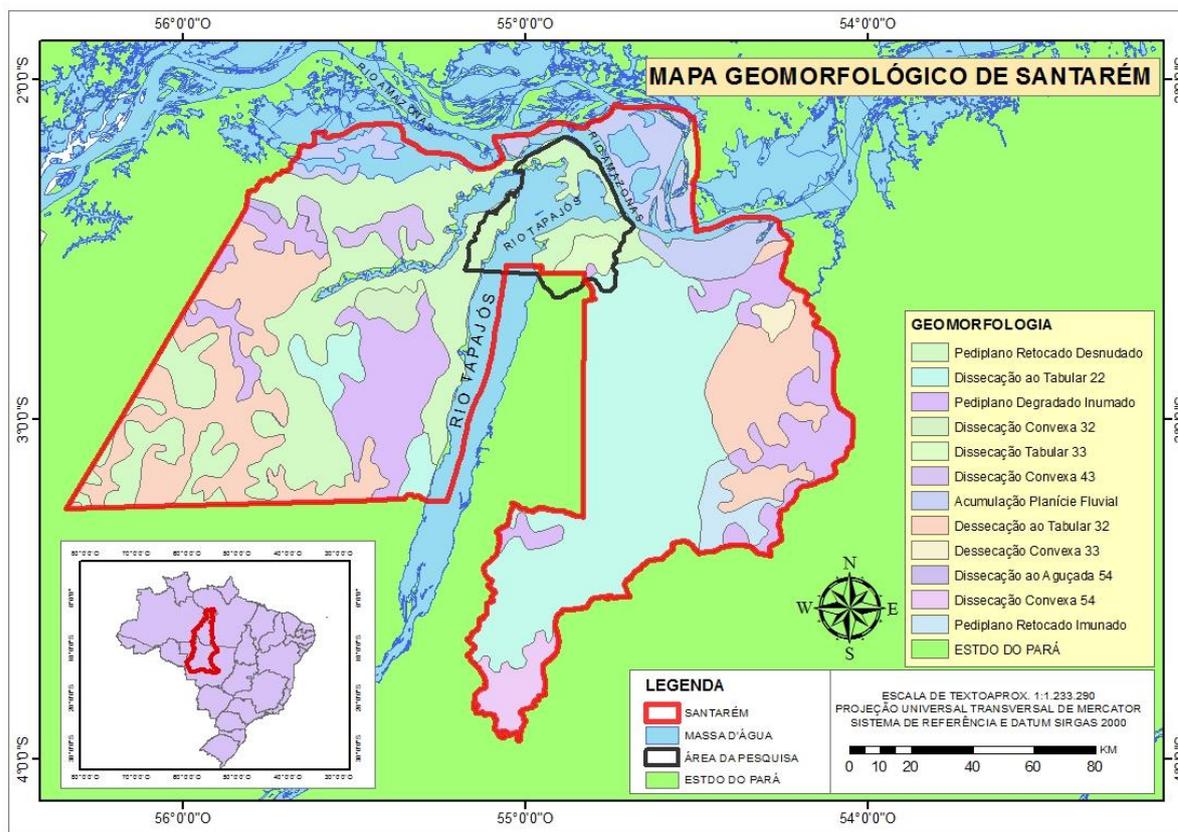
A zona dissecada das margens do rio Tapajós corresponde aos terrenos de relevo dissecado das margens do rio, mas se prolonga para o sul, formando uma faixa que alcança localmente mais de 15 km de largura em cada margem do rio. Geralmente, nesta zona, é observado um relevo mais acidentado com morros testemunhos, serras e cristas de topo arredondado e vales encaixados, no contexto limite norte desta zona, já próximo as margens do rio Tapajós e Amazonas, as feições dominantes são as falésias, que atingem localmente até 30m de altura, onde se expõem as rochas da *Fm. Alter-do-Chão* (BRASIL, 1976).

O planalto pediplanizado está associado à ocorrência de superfícies de pediplanas e platôs, que se estendem para o sul, para fora dos limites da área estudada. A densidade de drenagem é menor que nos dois outros domínios e os vales são amplos e pouco escavados. A esse domínio estão associadas às coberturas lateríticas e de solos melhores desenvolvidos (CAPUTO; RODRIGUES; VASCONCELOS, 1972).

No que diz respeito aos domínios litológicos identificados, destaca-se a *Fm. Alter-do-Chão*, caracterizada por apresentar falésias, *inselbergs* e vales escavados com vegetação, tipo savanas. As planícies de inundação Amazonas/Tapajós confundem-se com as demais planícies amazônicas, com exceção das que acompanham o rio Tapajós, onde cordões, barras, praias fluviais aparecem com relevos que variam de 0 a 15m (SOUSA, 2009). Os Planaltos Pediplanizados, encontrados mais a sul do município, apresentam platôs e vales amplos, associados à vegetação de floresta densa, com picos variando em torno de 115m/Cota máxima local 197 m (IBGE, 2015).

A partir de *downloads* no site da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (SEMAS-PA) foi gerado o mapa geomorfológico do município de Santarém, onde está inserida a área da pesquisa. O mapa foi gerado a partir de *shapes files* disponibilizados por esta secretaria para a delimitação dos eventos geomorfológicos (Figura 3).

Figura 3 - Mapa geomorfológico interpretado de Santarém



Fonte: Do autor (2016); IBGE/SEMAS (2016)

1.5.4 Rede hidrográfica de Santarém

A bacia hidrográfica do rio Amazonas é constituída pela mais extensa rede hidrográfica do globo terrestre, ocupando uma área total da ordem de 6.110.000 km², desde suas nascentes nos Andes Peruanos até sua foz no oceano Atlântico (na região norte do Brasil), desse total 63% encontra-se em território brasileiro (BRASIL, 2016). A bacia dos rios Juruena-Teles Pires e Tapajós, parte importante dessa pesquisa é, na verdade, uma subbacia da margem direita do rio Amazonas.

As subbacias hidrográficas dos afluentes do rio Amazonas pela margem direita são caracterizados por apresentar uma homogeneidade de fatores geológicos, geomorfológicos, hidrográficos, hidrológicos, econômicos e sociais que permitem a organização do planejamento com vistas ao aproveitamento dos recursos hídricos da bacia (BRASIL, 2016).

O Plano Estratégico de Recursos Hídricos dos afluentes da margem direita do rio Amazonas (BRASIL, 2016) afirma que a subbacia do Tapajós está distribuída pelos estados do Mato Grosso, Pará, Rondônia e Amazonas, ocupando uma área total de

492.263 km², que apresenta largura da ordem de 555 km e comprimento de 1.457 km, com uma direção geral SSE-NNW. 73 municípios estão situados nessa bacia, sendo 59 em Mato Grosso, 11 no Pará, 2 no Amazonas e 1 em Rondônia. A altitude varia de cerca de 800 m, nas nascentes do Juruena e Teles Pires, até cerca de 7 metros acima do nível do mar, junto à foz no rio Amazonas.

A região central da bacia é cortada pela Serra do Cachimbo, que condiciona a drenagem do rio Teles Pires para WNW, fazendo com que o rio Tapajós corra, no seu trecho inicial, bem próximo ao seu divisor de águas com a Bacia do Rio Madeira.

O rio Tapajós é formado pela confluência do rio Teles Pires com o rio Juruena, em Barra de São Manuel na fronteira entre Pará e Mato Grosso, e percorre uma extensão de aproximadamente 800 km até desaguar no Amazonas (BRASIL, 2016; MIRANDA et al., 2009). É considerada uma das mais importantes subbacias do Amazonas, com importante papel socioeconômico na ocupação da região e para o ciclo hidrológico da bacia amazônica. Ele apresenta como principais afluentes, o rio Arapiuns, pela margem esquerda, e o Cupari, pela margem direita. O Arapiuns tem extensão aproximada de 300 km, apresentando uma área de drenagem aproximada de 15.295 km² e desagua próximo à foz do Tapajós. As cidades de maior destaque ao longo do rio são Santarém, Belterra e Aveiro (BRASIL, 2016), sendo que, na foz deste rio, até 325 km, a montante, tem-se a Unidade de Planejamento Hídrico (UPH do baixo Tapajós).

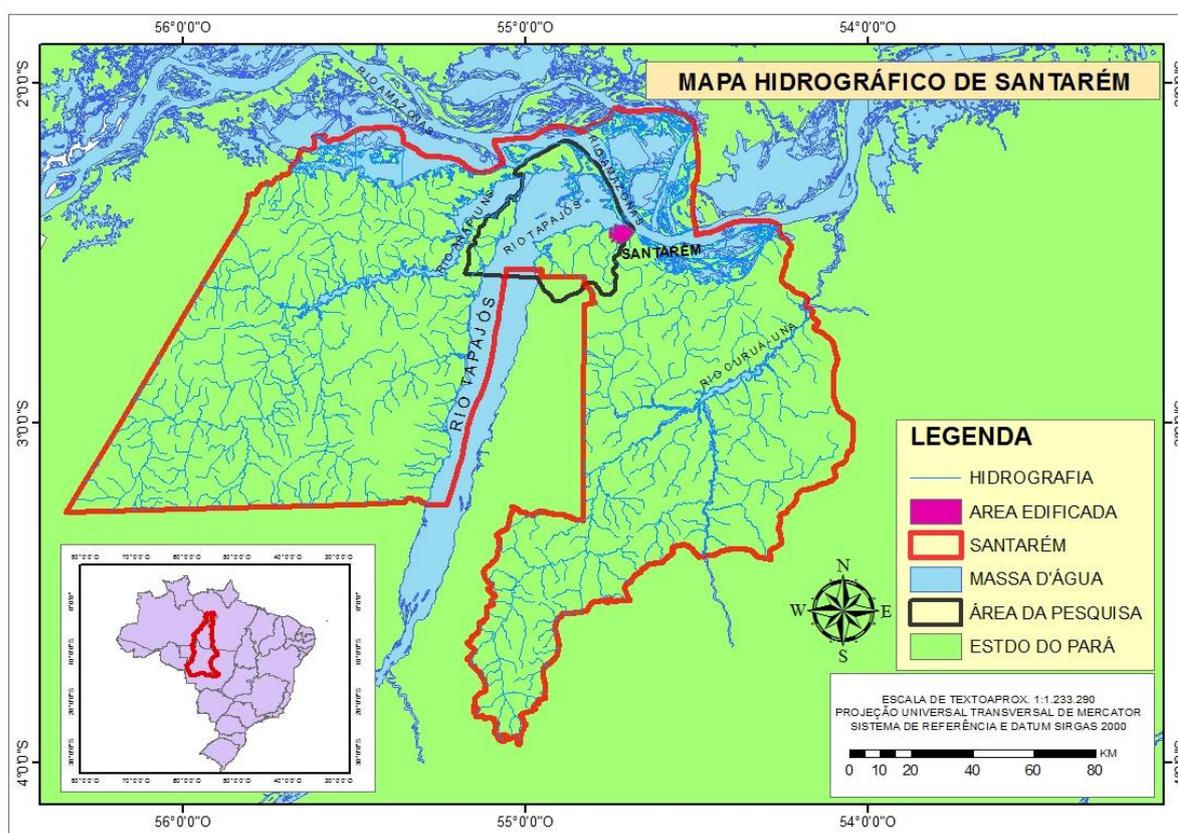
Um pouco a montante de Itaituba, o Tapajós caracteriza-se pela presença de ilhas cobertas de vegetação, pela baixa declividade e pela largura de seu curso, que atinge 13 km de largura e, a partir de Aveiro, a montante, reduz-se a 2,5 km. O Tapajós deságua no Amazonas através de um canal de apenas 1,5 km de largura (BRASIL, 2016).

No baixo curso, compreendido entre a localidade de São Luiz do Tapajós e a cidade de Santarém, ele é francamente navegável em todos os seus 345 km, em qualquer época do ano. Apresenta uma declividade média de 9,6 cm/km, trechos com grande número de ilhas cobertas de vegetação, entre estas as de São Luiz do Tapajós (DNIT, 2015).

A influência da maré, registrada na foz do Tapajós, provoca uma oscilação de 0,40 cm, aproximadamente (ICMBIO, 2009). Quando se fala em sua navegabilidade, deve-se acentuar que ele possui sérios problemas nos meses de outubro, novembro e dezembro, quando, em seu leito, expõem-se extensos lajeiros de pedras, formando verdadeiras ilhas, o que torna bastante perigosa a sua navegação (EMBRAPA, 2001).

A bacia do rio Mojuí e seus afluentes é formada de uma malha hídrica existente na chamada "Região do Planalto", composta por inúmeros igarapés e rios de pequeno porte. Estes pequenos corpos hídricos, na maioria das vezes, permanecem escondidos sob a copa das árvores. A bacia alimenta o rio Mojuí, que é tributário da bacia do rio Moju, que tributa na bacia do rio Curuá-Una, sendo assim responsáveis pelo abastecimento da Hidrelétrica do Curuá-Una (SILVA, 2012). Todos drenam suas águas para o rio Amazonas, sendo o rio Tapajós, o maior e o mais importante afluente nessa região. A partir de *downloads* no site do IBGE (2016), foi gerado o mapa da rede hidrográfica do município de Santarém, com identificação dos principais rios (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de hidrografia da área de Santarém



Fonte: Do autor (2016): IBGE/SEMAS (2016)

1.6 AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO DE IMAGENS E CONFECÇÃO DE MAPAS

Para corroborar as informações obtidas em campo e referencial teórico, mapas com dados interferométricos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*: Missão

Topográfica por Radar do Ônibus Espacial – NASA, 2015), auxiliados com *shape files* do IBGE (2015), do CPRM (2016), da Ana (2016) e da Embrapa (2016)¹.

Foi criado um mapa-base da bacia do rio Tapajós e principais tributários e que serviu de padrão para todos os mapas temáticos deste trabalho, em escala variada, de acordo com as necessidades específicas. Imagens de satélite da série LANDSAT foram solicitadas e disponibilizadas pelo Inpe (2015). Os dados topográficos SRTM foram utilizados também como suporte na interpretação da rede de drenagem e geomorfologia.

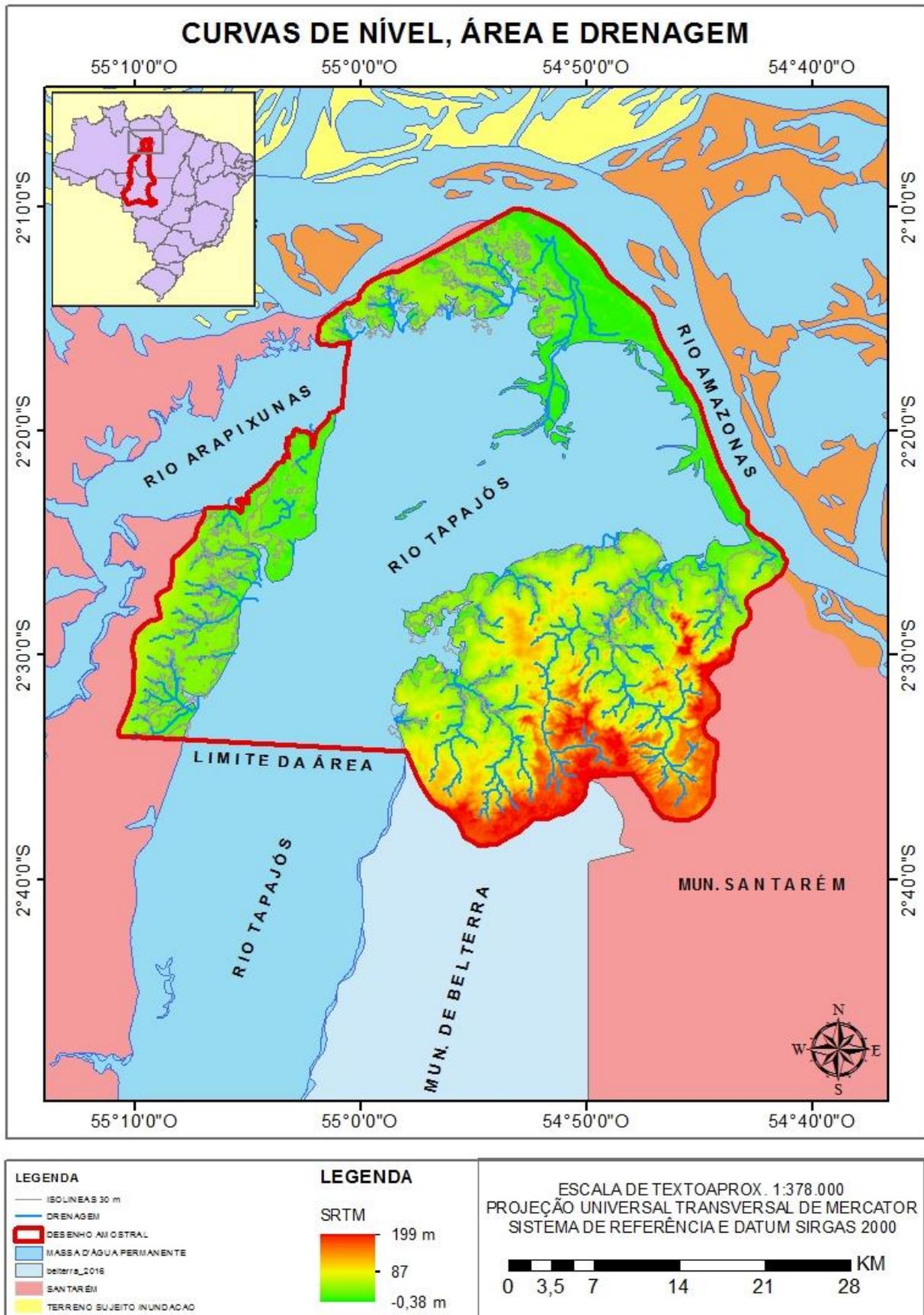
O tratamento e processamento digital das imagens orbitais e dos *shape files* foram realizados no software *Arc Gis* (Arcmap 10.1), no Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT/UFPA em Belém-PA). O datum SIRGAS 2000 foi usado no georreferenciamento das imagens e *shape file* neste trabalho.

1.6.1 Extração da drenagem, curvas de níveis e dados integrados de sensoriamento remoto.

Os mapas de drenagem foram confeccionados a partir de dados SRTM. Para efeitos de comparação, utilizou-se o modelo numérico de terreno para gerar curvas de níveis com equidistância de 30 metros. A partir do modelo numérico de terreno foi possível a geração da rede de drenagem da área de estudo (Figura 5).

¹ Respectivamente, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Agência Nacional de Águas (ANA) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Figura 5 - Mapa de curvas de níveis e drenagem da área da pesquisa



Fonte: Do autor (2016)

Para as imagens LANDSAT, enfatizou-se a análise dos padrões de drenagem e relevo, tanto nas bandas isoladas quanto nas composições coloridas, imagens de radar SAR/JERS-1 foram utilizadas na caracterização e individualização das zonas de várzea e terra firme, os dados SRTM auxiliaram na identificação, interpretação de feições, relevo e drenagem, o que aumentou o grau de percepção e interpretação. O resultado desta complexa interpretação levou à elaboração dos mapas diversos da área.

1.6.2 Desenho Amostral

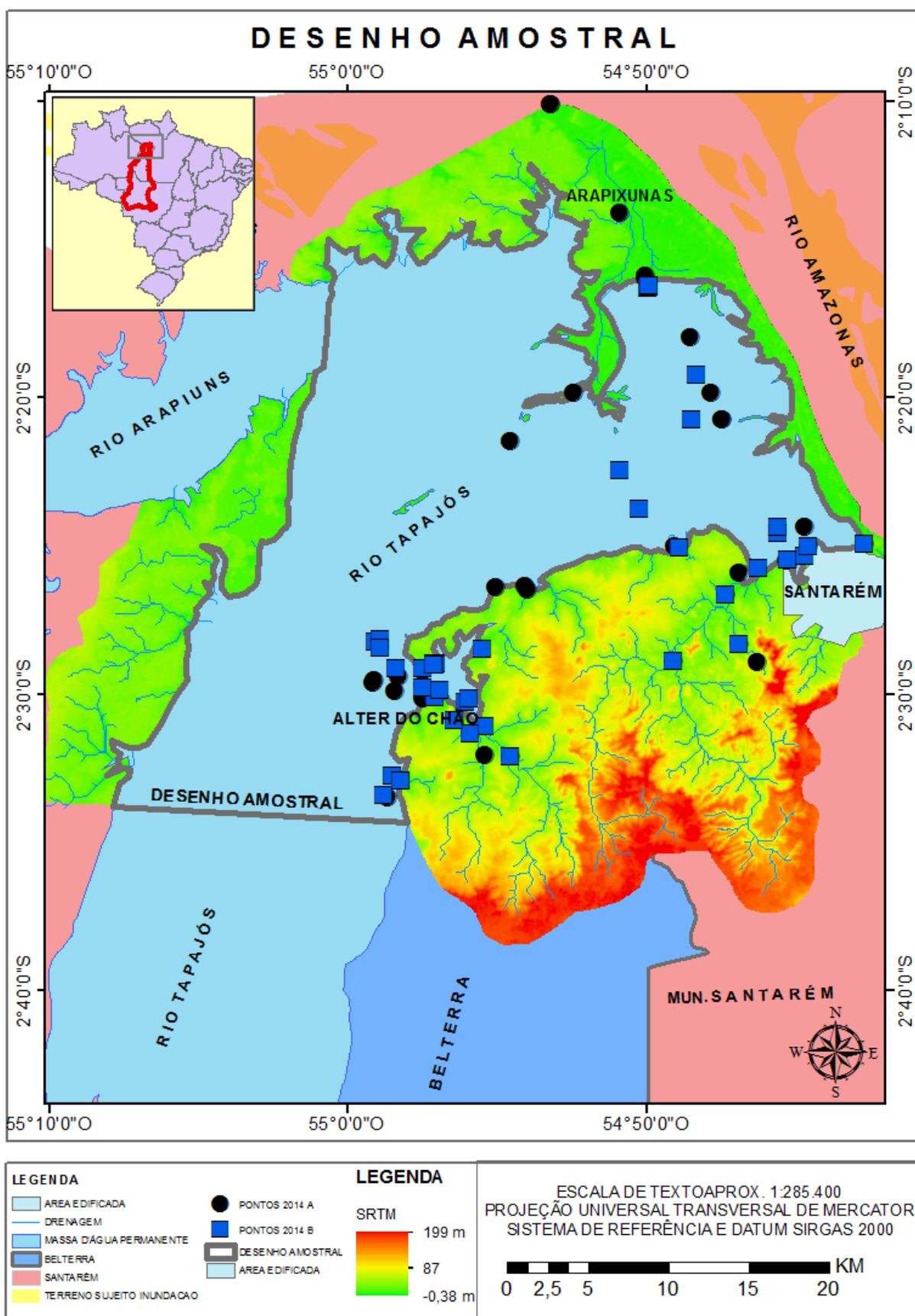
Para delimitar o recorte da foz a ser estudada e que pudesse ser representada pelas amostras coletadas, foi delimitada uma área aproximada de 115,950 km² com a seguinte descrição: a aresta sul-sudeste foi o limite Sul da APA Alter-do-Chão, que coincide com a divisa entre os municípios de Santarém e Belterra, segundo o memorial descritivo desta área de proteção (PMS, 2003), no paralelo de 02°32'52''S e meridiano 54° 58' 58'' W; seguindo cerca de 22 km em linha reta na em direção oeste (02° 33' 36''S e 55° 10' 41''W); para seguir os limites das sub-bacias (drenagens) que desaguam para oeste (dentro da foz), cruzando o rio Arapiuns em sentido norte (2° 18' 58'' S e 55° 00' 50'' W (margem direita), com 02° 16' 8''S e 55° 00' 36'' W (margem esquerda), até encontro o vértice Noroeste (ponto contato pelo autor: 02° 10' 05'' S e 54° 53' 12'' W), de forma que a Barra do Tapajós e Furo do Arapixunas, estivessem contidos neste polígono. Seguindo os limites da Barra e o Rio Amazonas no sentido Oeste em direção à área urbana de Santarém até o ponto 02° 24' 25''S e 54° 42' 40'' W; depois a sul no limite das sub-bacias que desaguam a leste, para dentro da foz, até encontrar com o vértice inicial (Quadro 3 e Figura 6).

Quadro 3 – Coordenadas da área da pesquisa

TABELA DE PONTOS DOS VÉRTICES DO DESENHO AMOSTRAL			
No.	ID	Latitude (X)	Longitude (Y)
1	Vértice SE	-2,573	-54,967
2	Vértice SO	-2,56	-55,1781
4	Vértice NO	-2,166	-54,89
3	Vértice NE	-2,407	-54,711
6	Arapixunas 1	-2,269	-55,01
5	Arapixunas 2	-2,316	-55,014

Fonte: Do autor (2016)

Figura 6 - Desenho amostral da área da pesquisa



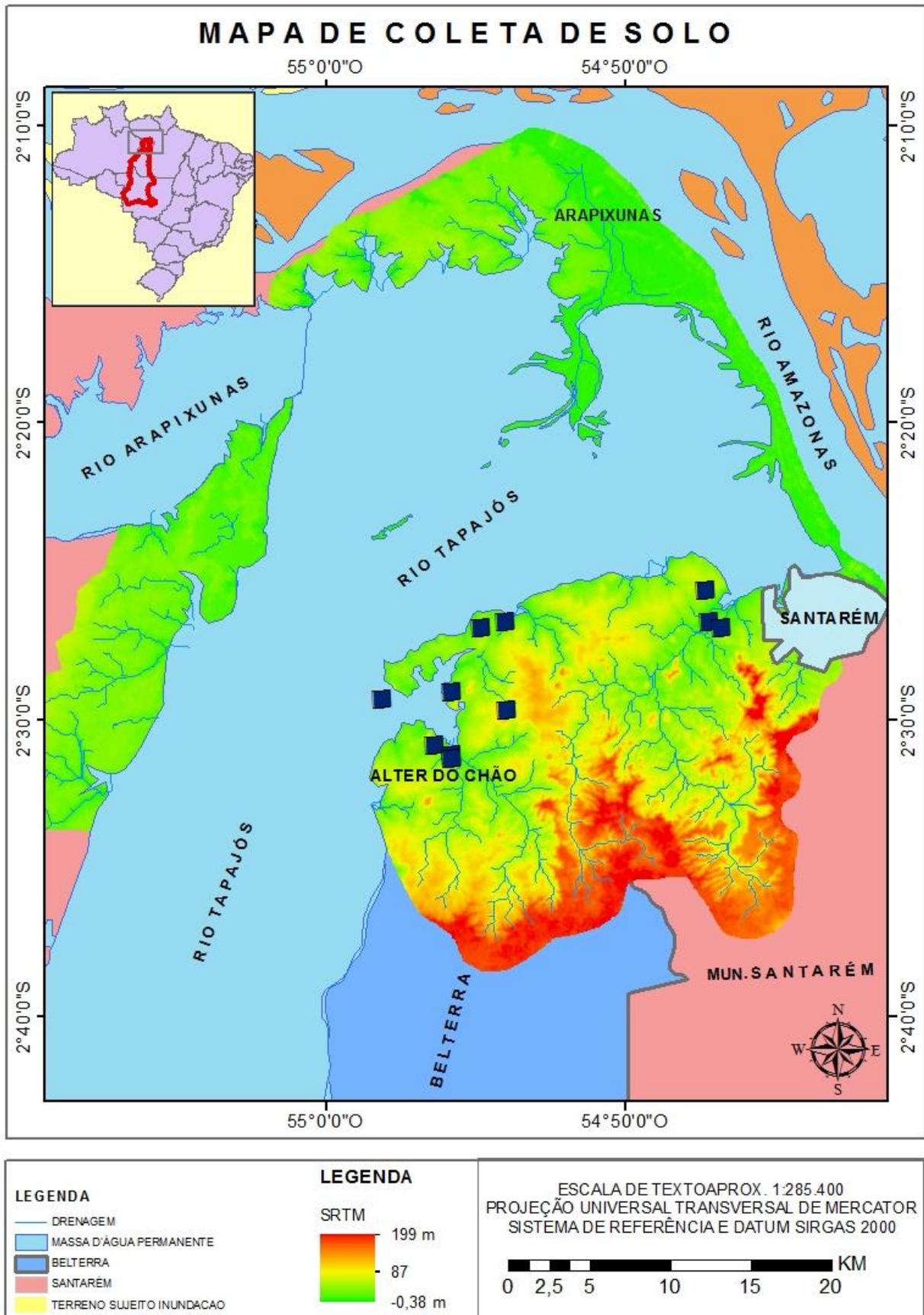
Fonte: Do autor (2016)

A partir da delimitação da área, foram realizadas coletas em diversos pontos do rio (fz) e drenagem do entorno, a delimitação do recorte *shape*, a partir de dados do IBGE, adaptados e ajustados pelo autor e com os quais foram confeccionados os mapas de variáveis e extração do vetor a ser gerado para a krigagem.

1.7 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETAS DAS AMOSTRAS

Para seleção dos locais de coleta das amostras de solo e material particulado, analisados em laboratórios, foram utilizadas 26 amostras para coleta de solo e de sedimentos e 5 pontos de coleta de material particulado em Santarém, Pará entre os dias 26 a 30 de setembro de 2011 (Figura 7 e Quadro 4 e 5).

Figura 7 - Mapa de localização de coleta de solo



Fonte: Do autor (2016)

Quadro 4 – Pontos de coleta de solo e sedimentos

POTOS / DESCRIÇÃO	LAT em GEO	LONG em GEO
PT 1A – Rod. Everaldo Martins	02°. 26' 43,3''	54°. 47' 14,1''
PT 1B – Lago do Juá	02°. 25' 55,6''	54°. 46' 50,3''
PT 2A – Lago do Itapari	02°. 26' 43,8''	54°. 54' 00,7''
PT 3A – Alter do Chão: Ponta do Tauá	02°. 29' 05,2''	54°. 58' 18,2''
PT 3B – Lago Verde: Caminho das Pedras	02°. 31' 12,2''	54°. 55' 50,1''
PT 3C – Lago Verde: Caranazal	02°. 31' 18,6''	54°. 55' 49,7''

Fonte: Do autor (2016)

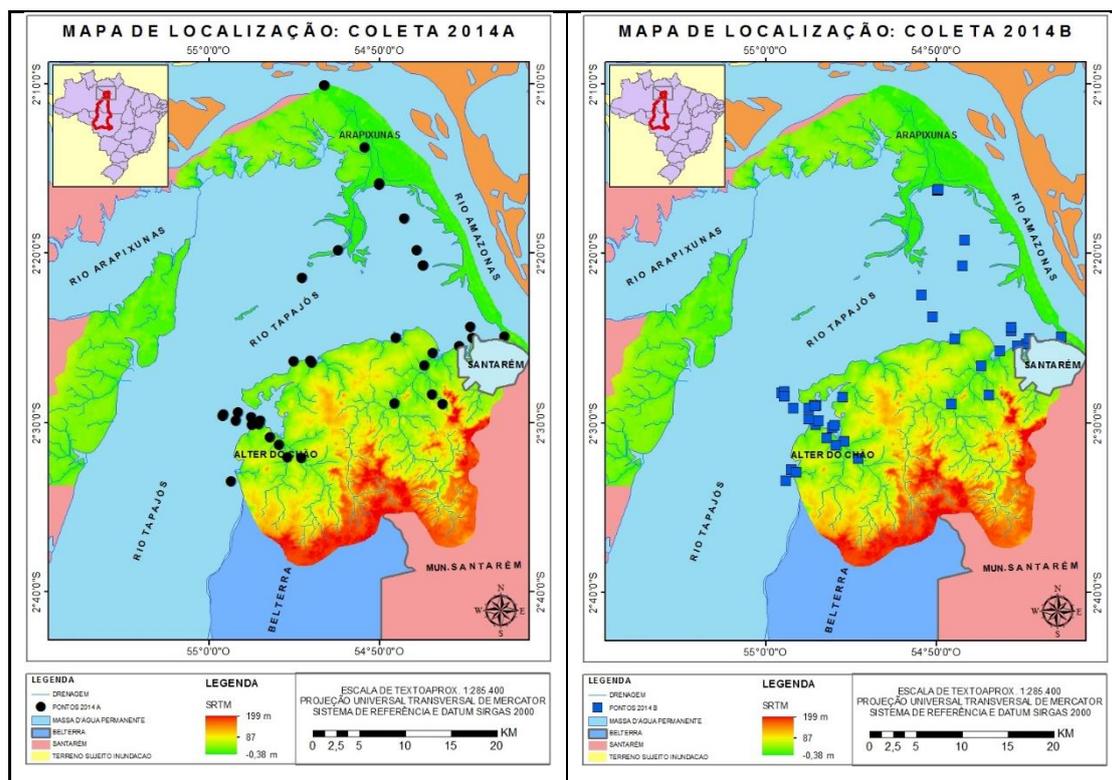
Quadro 5 – Pontos de coleta de água (Material particulado)

PT 1A – Igarapé do Juá	02°. 26' 39,7''	54°. 47' 19,9''
PT 1B – Lago do Juá	02°. 25' 55,6''	54°. 46' 50,3''
PT 2A – Lago do Itapari	02°. 26' 43,8''	54°. 54' 00,7''
PT 3A – Alter do Chão: Ponta do Tauá	02°. 29' 05,2''	54°. 58' 18,2''
PT 3B – Rod. Everaldo Martins: Próx. à Serra do Cairé	02°. 30' 53,3''	54°. 56' 23,7''
PT 3C - Lago Verde: Caranazal	02°. 31' 18,6''	54°. 56' 49,7''

Fonte: Do autor (2016)

Foram selecionadas 37 (trinta e sete) estações de amostragem ao longo da foz do rio Tapajós, na camada superficial, durante a primeira campanha, no período sazonal de maior precipitação pluviométrica (dias 18 a 28 de julho de 2014) e 45 (quarenta e cinco) estações de amostragens, na segunda campanha, no período sazonal de menor precipitação pluviométrica (13 a 20 de dezembro de 2014) no total de 82 amostras nos meses de julho e dezembro, respectivamente (Figura 8).

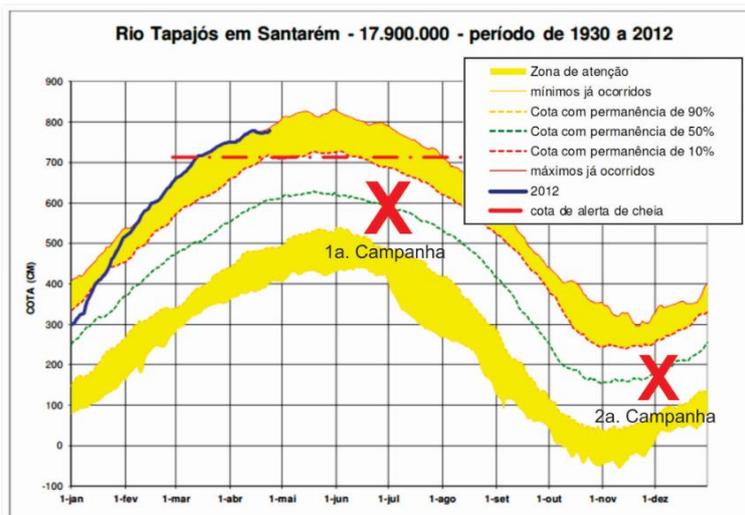
Figura 8 - Área de amostragem em Santarém, com os respectivos pontos de coleta na primeira e segunda campanha de 2014



Fonte: Do autor (2016)

Gráfico de localização temporal das campanhas nas curvas envoltórias das cotas diárias observadas em Santarém (1930 a 2012), do rio Tapajós (BRASIL, 2012) (Figura 9).

Figura 9 - Gráfico de localização temporal das campanhas nas curvas envoltórias das cotas diárias observadas em Santarém (1930 a 2012) no rio Tapajós



Fonte: Adaptado pelos autores baseado em Brasil (2012)

Todas as amostras localizam-se em regiões que apresentam vegetação de cerrado desenvolvida sobre os terrenos mais acidentados, às vezes mais densa, com árvores de porte pequeno a médio, localizados nas margens do rio Tapajós ou sobre bancos arenosos. Aparece também vegetação essencialmente de gramíneas desenvolvida em terrenos mais baixos e planos da planície de inundação do rio Amazonas.

Há três domínios geomorfológicos distintos: o da Planície de Inundação Amazonas/Tapajós, o da Zona Dissecada do vale do rio Tapajós e dos Planaltos Pediplanizados (SOUSA, 2009) e que se situam nas proximidades da área urbana do município: Rodovia Everaldo Martins (Igarapé do Juá), lagos do Juá e Itaparí, Ponta do Tauá (Vila de Alter-do-Chão), Caminho das Pedras, comunidade do Caranazal, lagos do Juá e Itaparí, Ponta do Tauá (Vila de Alter-do-Chão), proximidade da Serra do Çairé e lago do Caranazal (Lago Verde), e foz do Tapajós.

A escolha da região para desenvolver este estudo, está entre outros fatores à associação de Hg aos solos lateríticos e à presença de área alagadas ou alagáveis, o que segundo Brabo (2010), são ambientes favoráveis e associados à presença desse metal. Outro fator levantado por Roulet et al. (1998a) é a associação de origem antropogênica, proveniente do uso indiscriminado de mercúrio em atividades garimpeiras no médio e alto curso do rio ou pelo desflorestamento, que caracteriza a região da foz do Tapajós, área potencialmente associada à presença desse metal (Quadro 6).

Quadro 6 – Caracterização dos principais pontos de coleta de amostras de campo

Alter-do-Chão	Fundada em 6 de março de 1926 pelo português Pedro Teixeira. Foi com Francisco Xavier de Mendonça Furtado elevada à categoria de Vila em 6 de março de 1758. Localizada na margem direita do Tapajós, dista cerca de 30 km de Santarém por estrada pavimentada (PA-457). O acesso por via fluvial leva cerca de 3 horas, através do rio Tapajós. O distrito recebe anualmente um elevado número de turistas e navios de cruzeiros marítimos de diversos lugares do mundo. Por esta razão, é importante polo turístico da região. As praias de areias brancas paradisíacas são as marcas do lugar, especialmente em decorrência das águas verde-turquesa do rio Tapajós. A beleza dessas praias se associa ao lendário Lago Verde ou Lago dos Muiraquitãs. É nesta comunidade que a tradicional Festa do Çairé é apresentada durante os meses de setembro, conhecida por apresentar uma mistura de elementos religiosos e profanos, com grande participação popular. O turismo de aventura e natural é plenamente realizado em quase todas as extensões da vila.
Maracanã	Distante cerca de 6 km por via terrestre, estrada totalmente pavimentada e sinalizada, Maracanã é uma das praias mais próximas da cidade. Seu acesso pode ser feito também por via fluvial.
Maria José	O acesso por via terrestre foi interdito em função de obras no Aeroporto Internacional, limitando-se à via fluvial. Situa-se entre as praias do Juá e Arariá.
Pajuçara	Seu acesso é feito por via terrestre, pela Rodovia Fernando Guilhon, passando por propriedades particulares, não havendo impedimentos para tal. O acesso também pode ser feito por via fluvial.
Ponta do Cururu	Localiza-se na margem direita do rio Tapajós, às proximidades de Alter-do-Chão, na extremidade de uma falésia na foz do rio.
Ponta de Pedras	A distância do centro da cidade de Santarém até a entrada da praia, por via terrestre, é de aproximadamente 23 km, sendo que o acesso se dá pelas rodovias Fernando Guilhon e Everaldo Martins, ambas pavimentadas. Em seguida, continua por uma estrada não pavimentada, com extensão de 12 km. O acesso também pode ser efetuado por via fluvial, através do rio Tapajós. A praia de Ponta de Pedras apresenta suas formações rochosas (beach rock) e a presença de vegetação próxima às margens.
Lago Verde	Localizado no distrito de Alter-do-Chão apresenta uma vegetação característica da área, possuindo uma vasta região de savana em seu entorno e recebe várias drenagens de diversas sub-bacias que drenam para o rio Tapajós.
Foz do Tapajós	Últimos 100 km, o rio que forma um largo estuário, onde a distância entre as margens chega a alcançar 18km, afunilando-se na foz, no rio Amazonas, desaguando através de um canal de apenas 1.124 m de largura, até a barra deste rio no município de Santarém.

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Santarém (2015)

1.8 ORGANIZAÇÃO AMOSTRAL EM LABORATÓRIO E AVALIAÇÃO DOS TEORES DE MERCÚRIO

A síntese metodológica pode ser assim descrita: amostras de solos e material particulado para análises de Hg_{Total} e MeHg, ocorreram em 6 pontos de amostragem na Formação Alter-do-Chão, município de Santarém. Para cada perfil estratigráfico de 60 cm, subdividido em frações de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60 cm. Uma massa de 200 mg dos materiais foi submetida à secagem e separação granulométrica (fração grossa/fina para cada amostra), digestão ácida e análise por sistema aberto de circulação do fluxo de ar (CVAAS) e as determinações de Hg realizadas por espectrofotometria de absorção atômica, com geração de vapor frio no Laboratório de Toxicologia da Seção de Meio Ambiente (SAMAM), do Instituto Evandro Chagas.

Este procedimento está relacionado à redução de íons Hg^{2+} na solução da amostra com cloreto estanhoso para gerar vapor de mercúrio elementar (Hg^0) e a introdução de vapor de mercúrio no celular de foto-absorção para a medida de absorbância a 253,7 nm (SOUZA, 2004).

Segundo a autora, este método pode ser aplicado diretamente à digestão de amostras biológicas inclusive cabelo, sangue e peixe, como também em várias amostras sólidas: sedimento e solo. Em laboratório, as amostras foram homogeneizadas com o método de quarteamento e passaram por uma peneira de malha de 2,0 mm para preparar uma amostra para análise. As amostras que continham um conteúdo alto de água foram centrifugadas para remover o sobrenadante até ocorrer a mistura bem homogeneizada antes de submetê-la à análise (SOUZA, 2004).

Todo procedimento de análise de Hg-tot e MeHg em amostras de solo/sedimentos e material particulado da pesquisa foi realizado segundo Akagi (SOUZA, 2004). No quadro 7 aparecem os valores de Material de Referência Certificada (CRM) IAEA-SL-1 utilizados para garantia exatidão analítica e comparação dos resultados obtidos.

Quadro 7 – Material de Referência Certificada (CRM) IAEA-SL-1

Controle de Qualidade Analítica				
CRM	Valor de Referência	N	Média de Hg total ($\mu g/g$)	% Recuperação
IAEA-SL-1	0,18	5	0,183	101,7%

Fonte: IEC (2010).

A coleta das amostras de solo/sedimentos foi realizada com coletor em “T” de aço inoxidável e, após amostragem, foram separadas frações e armazenadas em sacos plásticos com espessura reforçada (Figura 10). A identificação das amostras ocorreu

imediatamente com papel do tipo manteiga com as informações dos pontos de amostragem escritos com lápis (grafite) dentro dos sacos com as amostras. Também foram identificados os sacos, externamente, com esparadrapo, usando caneta esferográfica azul ou preta para garantir que não ocorram perdas ou trocas na identificação.

Figura 10 - Fotos de materiais usados em trabalho de campo



Fotos: Do autor (2016)

Para o material particulado, foram coletados cerca de 5 litros de amostras em frascos de polipropileno. O procedimento de decantação/floculação com sulfato de alumínio foi feito esvaziando o sobrenadante em campo e transferindo os resíduos úmidos para tubos do tipo *Falcon*. Quando houve necessidade de outro tipo de procedimento, em virtude das dificuldades logísticas na região amazônica, ocorreu o procedimento para material particulado/suspensão amostrada, diretamente em frascos *Falcon* com centrifugação em campo, segundo o protocolo metodológico indicado pelo LACEN (Figura 11). Assim:

A) Tubo tipo *Falcon*, de 50 ml, novos e não reutilizável, usado para armazenar em campo a amostra decantada para transporte ao laboratório; 2) Processo de decantação

de amostras de água, em galão de polipropileno de 5 litros de água mineral descartada em campo para evitar contaminação; C) Sulfato de Alumínio, utilizado no processo de decantação da água, para retirar o sobrenadante; D) Tubos tipo *falcons*, em campo, aguardando armazenamento e transporte.

Figura 11 - Fotos de materiais usados em trabalho de campo

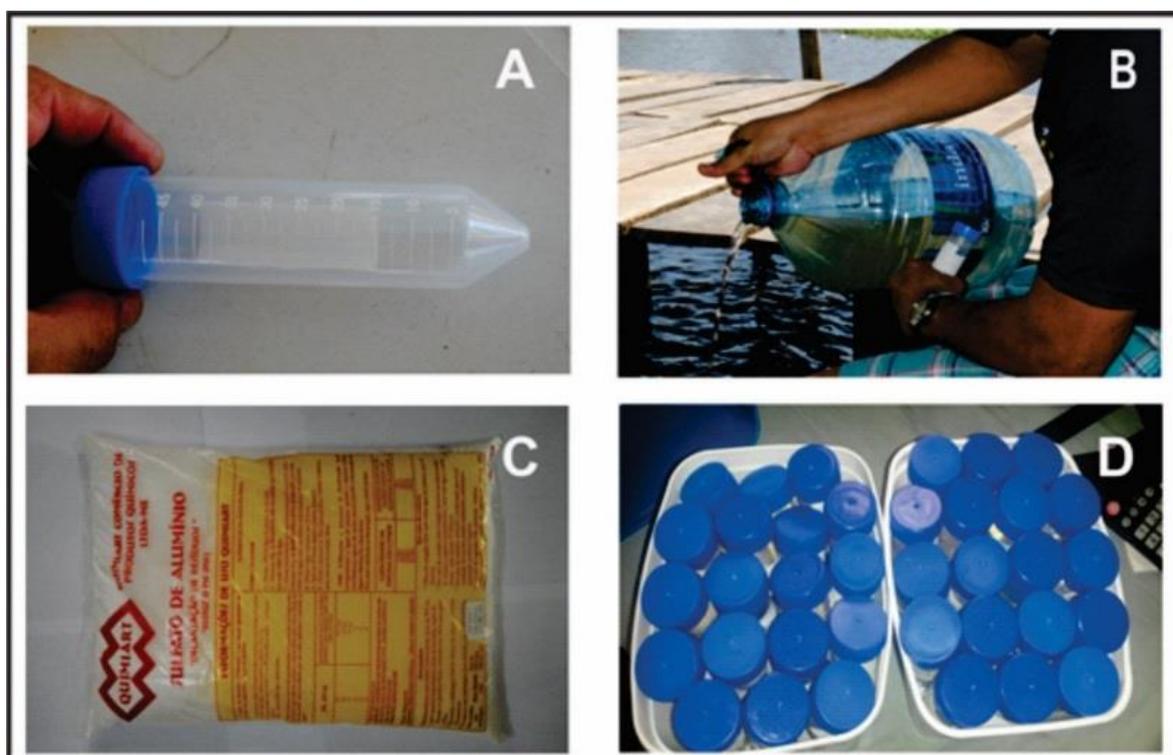


Foto: Do autor durante a etapa de campo.

1.9 CÁLCULO DOS LIMITES DE DETECÇÃO E QUANTIFICAÇÃO

O limite de detecção (LD) representa a menor concentração da substância em exame que pode ser detectada, mas não necessariamente quantificada, utilizando um determinado procedimento experimental (ICH, 1995; INMETRO, 2003). O LD pode ser calculado de três maneiras diferentes: método visual, método relação sinal-ruído, método baseado em parâmetros da curva analítica.

1.9.1 Método visual e método da relação sinal - ruído

É utilizado para determinar o limite de detecção utilizando a matriz com adição de concentrações conhecidas da substância de interesse, de tal modo que se possa distinguir entre ruído e sinal analítico pela visualização da menor concentração visível

(detectável). Este procedimento também pode ser feito através do instrumento, utilizando parâmetros de detecção no método de integração.

Este método pode ser aplicado somente em procedimentos analíticos que mostram o ruído da linha de base. Para determinar a relação sinal-ruído, é feita a comparação entre a medição dos sinais de amostras em baixas concentrações conhecidas do composto de interesse na matriz (GARP apud RIBANI et al., 2004) e um branco (matriz isenta do composto de interesse) destas amostras. Assim, é estabelecida uma concentração mínima na qual a substância pode ser facilmente detectada. A relação sinal-ruído pode ser de 3:1 ou 2:1, proporções geralmente aceitas como estimativas do limite de detecção.

1.9.2 Método baseado em parâmetros da curva analítica

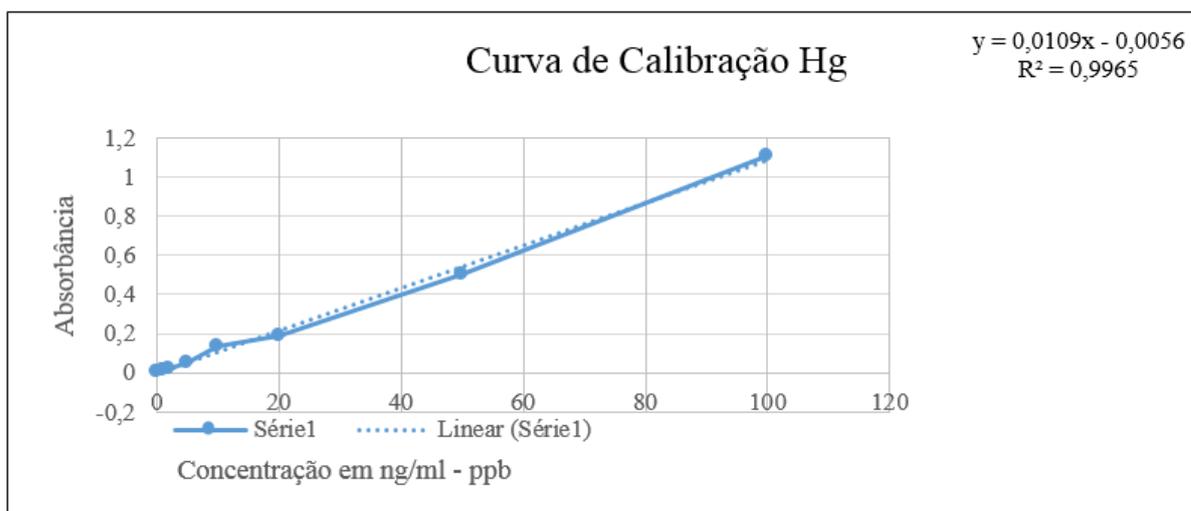
O mínimo valor detectável ou limite de detecção é dado por:

$$LOD = \frac{3,29S}{B}$$

Onde, S é o desvio padrão de 10 leituras de uma amostra branco e B é o coeficiente angular da função linear. Os mesmos critérios de LOD podem ser adotados para o LOQ, utilizando a relação 10:1, ou seja, o LOQ pode ser calculado utilizando o método visual, a relação sinal-ruído ou a relação entre a estimativa do desvio padrão da resposta (S) e a inclinação da curva analítica (B), em níveis próximos ao LOQ, a partir da equação e gráfico 2:

$$x_Q = \frac{10 \times S}{B}$$

Figura 12 – Gráfico com a Curva de Calibração do Hg



Fonte: LACEN (2015)

Todos os procedimentos de análise de mercúrio total das amostras de água e material particulado foram realizados com base em normas nacionais e internacionais. Os parâmetros de qualidade analíticos encontram-se na Quadro 8 e tiveram como referência a resolução do CONAMA n. 357/05, com sua síntese descrita no quadro 9.

Quadro 8 – Parâmetros de Qualidade Analítica

Parâmetros Analíticos						
Elemento	$\lambda(nm)$	LOD ($\mu g/L$)	LOQ ($\mu g/L$)	a	[B]	R^2
Hg	253,7	0,011	0,113	0,0109	-0,0056	0,9965

Fonte: LACEN (2015)

Quadro 9 – Resultados da análise do Hg

RESULTADOS DA ANÁLISE DO Hg	
Elemento Químico ($\mu g/L$)	
Amostras Hg	Referência
CONAMA 357/05	0,0002 mg/L Hg
	0,2 $\mu g/L$ Hg

Fonte: LACEN (2015)

1.10 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

Esta tese está estruturada em 5 (cinco) capítulos, incluindo a parte introdutória e a conclusão geral.

Na Introdução, contextualiza-se a pesquisa, o objetivo geral e os específicos, o problema da pesquisa, hipóteses, materiais e métodos, área de estudo e a caracterização de Santarém (climatobotânica, geomorfológica, da Formação Alter-do-Chão, rede hidrográfica etc.), aquisição e processamento de imagens e confecção de mapas, extração de drenagem, curvas de níveis e dados integrados de sensoriamento remoto, desenho amostral, localização dos pontos de coletas e avaliação dos teores de mercúrio.

No capítulo 2 é discutido a “Especiação de mercúrio em solo e material particulado e aferição do índice de Capital Social (ICS) na foz do rio Tapajós, Amazônia-Brasil”, fazendo uma contextualização social a partir da aplicação do QI-MCS e a contaminação por mercúrio na área da pesquisa.

O mesmo procedimento foi adotado no capítulo 3 para “Avaliação do risco de contaminação e classificação das áreas contaminadas por mercúrio na foz do Rio Tapajós, Pará, Brasil”, onde foram utilizadas ferramentas da geoestatística na elaboração de mapas de concentrações e mapas de risco de contaminação de mercúrio, com os respectivos mapas de classificação de áreas contaminadas;

No capítulo 4, “Avaliação da contaminação por mercúrio na foz do rio Tapajós, Pará, Brasil, com uso de Krigagem Fatorial”, que permite levantar hipóteses sobre a origem das possíveis fontes de contaminação de mercúrio na área da pesquisa.

Para o capítulo 5, são apresentadas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

BASTOS, W. R.; LACERDA, L. D. A contaminação por mercúrio na bacia do Rio Madeira: uma breve revisão. **Geochim. Brasil**, v. 18, n. 2, p. 99-114, 2004.

BERGQUIST, B. A. et al. Mass-Dependent and - Independent Fractionation of Hg Isotopes by Photoreduction in Aquatic Systems. **Science**, v. 318, n. 417, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Água. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

_____. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

_____. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

_____. Disponível em: <<http://margemdireita.ana.gov.br/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

_____. Programa de Integração Mineral em Municípios da Amazônia. **Caracterização Preliminar das Potencialidades Hidrogeológicas da Vila Mojuí dos Campos, com Projeto de Poço Tubular**. Brasília, 1999.

_____. Programa Municipal de Agropecuária. **Inventário Florestal Preliminar do Potencial Madeireiro do Município de Santarém 1996**. Brasília, 1996.

_____. **Relatório do meio físico da Flona do Crepori: Plano de manejo das florestas nacionais do Crepori, Jamanxin e Amanã, localizado no Estado do Pará**. Curitiba: ICMBIO, 2009.

BUENO, P. C. et al., Exposição humana a mercúrio: subsídios para o fortalecimento das ações de vigilância em saúde. **Cad. Saúde Colet.**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 443-7, 2011.

BURAK, D. L. et al. Metais pesados em solos: aspectos gerais. **Estudos avançados em produção vegetal**, p. 571-592, 2008.

CAMARGO, D. A. et al. Psiquiatria ocupacional II: síndromes psiquiátricas orgânicas relacionadas ao trabalho. **Jornal Brasileiro de Psiquiatria**, v. 54, n. 1, p. 21-33, 2005.

CAPUTO, M.V., RODRIGUES, R., VASCONCELOS, D. N. N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, s.l. **Anais...** p. 36-46, 1972.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

DAMAS, G. B.; BERTOLDO, B.; COSTA, L.T., Mercúrio: da antiguidade aos dias atuais. **Rev. Virtual Química**, v. 6, n. 4, p. 1010-1020. Acesso em: 22 mai. 2016.

DA SILVA, M.W., ESTANISLAU, C.A.M. Concentração de mercúrio em peixes da Amazônia. **Boletim A B Limino**, v. 41, n. 1, p. 8-14, 2015.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/hidrovias/hidrovias-interiores/hidrovia-do-tapajos>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental. **Sistemas de Produção**. 2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo; Embrapa Brasília, 2013.

_____. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/pa/pa.htm>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

_____. **Caracterização dos solos da área do planalto de Belterra, município de Santarém, Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001 (Documentos, 115).

ESTRELA, M. A. A., ROHLFS, D. B. Mercúrio: implicações para a saúde e o meio ambiente. In: 7ª MOSTRA DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU DA PUC GOIÁS, 1., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2012.

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

FARIAS, L.A. **Avaliação do conteúdo de mercúrio, metilmercúrio e outros elementos de interesse em peixes e em amostras de cabelos e dietas de pré-escolares da região amazônica**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FORSBERG, B. et al. Development and erosion in the Brazilian Amazon. A geochronological case study. **GeoJournal**, 19, p. 402-405, 1989.

FORSBERG, B. et al. High levels in fish and human hair from the rio Negro (Brazilian Amazon): Natural background or anthropogenic contamination. In: PROC. INT. WORKSHOP ON ENVIRONMENTAL MERCURY POLLUTION AND ITS HEALTH EFFECTS IN THE AMAZON RIVER BASIN. 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Nat. Inst. for Minamata Disease/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. p. 33-40.

FOSTIER, A. H. et al. Mercury accumulation in natural forested Amazonian soils. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MERCURY AS A GLOBAL POLLUTANT. 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999.

GODOY, J. M. et al. Evaluation of the siltation of River Taquari, Pantanal, Brazil, through PB-210 geochronology of floodplain lake sediments. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 13, p. 71-77, 2002.

GRIGAL, D. F. **Inputs and outputs of mercury from terrestrial watersheds: a review**. Disponível em: <<http://er.nrc.ca/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

GRIGOLETTO, J. C. et al. Exposição ocupacional por uso de mercúrio em odontologia: uma revisão bibliográfica. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 533-542, 2008.

GROOTAERT, C. et al. **Questionário integrado para medir capital social (QI-MCS)**. Washington, D.C.: World Bank., 2003.

IBGE. **Dados do município de Santarém/PA**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Glossário Geológico**. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Santarém-Pa**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Notas técnicas: Histórico da investigação sobre cor ou raça nas pesquisas domiciliares do IBGE**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

IBAMA. **Estudo Matriz para o Projeto Manejo Sustentável dos Recursos Naturais da Várzea**. Brasília, 2000.

IDESP. **Indicadores de Vulnerabilidade do Pará**. Belém, 2012. Disponível em: <www.sepof.pa.gov.br>. Acesso em: 10 fev. 2015.

INPE. Disponível em: <www.inpe.gov.br>. Acesso em: 10 fev. 2015.

LACERDA, L. D. et al. Mercury and the new gold rush in the South In: Biogeodynamics of Pollutants in soils and Sediments. In: SALOMONS, W.; STIGLIANI, W. M. (Eds.). **Biogeodynamics of Pollutants in Soils and Sediments**. Berlin: Springer Verlag, 1995. p. 213-245.

LACERDA, L. D. Amazon Mercury emissions. **Nature**, n. 374, p. 20-21, 1995.

LACERDA, L. D.; 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 enrichment? **Sci. Total Environ**, 2000.

MARTINS, C.A.S. et al. A dinâmica de metais-traço no solo. **Revista Brasileira Agrocência**, Pelotas, v.17, n.3-4, p.383-391, 2011.

MICARONI, R. C. C. M. et al. Composto de mercúrio: revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. **Química Nova**, n. 23, n. 4, 2000.

MIRANDA, R. G. Qualidade dos recursos hídricos da Amazônia-Rio Tapajós: avaliação de caso em relação aos elementos químicos e parâmetros físico-químicos. **Ambiente e Água**, v. 4, n. 2, p. 75-92, 2009.

MMA. **Perfil do Gerenciamento de Mercúrio no Brasil incluindo seus resíduos: Diagnóstico Preliminar sobre o Mercúrio no Brasil**. Brasília, 2010.

NASA. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 18 out. 2015.

NRIAGU, J. O. Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas. **Sci Total Environ**, 1994.

PALHETA, D.C.; TAYLOR, A. Mercury in Environmental and Biological Samples from a Gold Mining Area in the Amazon Region of Brazil. **The Science of the Total Environment**, 1995.

PALHETA, D. C. et al. Mercúrio e alumínio em tecidos de peixe no estado do Pará: considerações sobre neurotóxicos na região amazônica do Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, p. 979-981, 2011.

PASSOS, C. J.; MERGLER, D. Exposição humana ao mercúrio e efeitos adversos à saúde na Amazônia: uma revisão. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, n. 24, 2008.

PASSOS, P.N.C. A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente. **Direitos Fundamentais e Democracia**, Curitiba, v. 6, 2009.

PELEJA, J. R. P. **Os fatores que influem nos níveis de mercúrio (Hg) na água e plâncton de lagos associados aos rios Tapajós e Negro**. 2002. 73 f. Dissertação (Mestrado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2002.

PEREIRA, D.; YALLOUZ, A.V. Recicladora artesanal de lâmpadas fluorescentes: estudo de caso do potencial de aplicação de método alternativo de determinação de mercúrio In: JORNADA INTERNA CIENTÍFICA, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2004. 1 CD-ROM.

PINHEIRO, M.C.N. et al. Avaliação da contaminação mercurial mediante análise do teor de Hg total em amostras de cabelo em comunidades ribeirinhas do Tapajós, Pará, Brasil. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, Uberaba, v. 33, n. 2, 2000.

PORTES, A. Capital Social: Origens e aplicações na sociologia contemporânea. **Sociologia, Problemas e Práticas**, Lisboa, n. 33, p. 133-158, 2000.

QUEIROZ, J. C. B. **Utilização da geoestatística na quantificação do risco de contaminação por metais pesados, na área portuária de Santana- Amapá**. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Unesp, Rio Claro, 2003.

_____; STURARO, J. R.; RIEDEL, P. S. Geostatistic Mapping of Arsenic, Manganese and Iron Contamination Risk in the Port of Santana, Amapa, Brazil. In: CONFERENCE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL AND GEOLOGY, 2001, Cancun. **Anais...** Cancun, 2001. Disponível em <www.kgs.ukans.edu/Conferences/IAMG/Sessions/G/g.html>. Acesso em: 10 out. 2015.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. Lavras: Ed. UFLA, 2007.

ROULET M. et al. The geochemistry of Hg in Central Amazonian soil developed on the Alter do Chão formation of the lower Tapajós River Valley, Pará state, Brazil. **Sci. Total Environ**, 1998a.

_____. Distribution and partition of total mercury in waters of the Tapajós river basin, Brazilian Amazon. **Sci. Total Environ**, 1998b.

ROULET, M.; GUIMARÃES, R. R. D.; LUCOTTE, M. Methyl Hg production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain - effect of seasonal inundation. **Water Air Soil Pollut**, n. 128, p. 41-60, 2001a.

SAMPAIO, D. et al. Mercúrio nos peixes do Rio Tapajós, Amazônia brasileira. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, 2006.

SANTOS, E. C. O.; JESUS, I. M. D. et al. Estudo de Saúde e Exposição ao Mercúrio da Comunidade Ribeirinha de Brasília Legal, Estado do Pará, Brasil. **Cad. Saúde Colet**. Rio de Janeiro: Fundação José Bonifácio, v. 7, n. 2, 1999.

SANTOS, A.C.P. et al. Avaliação da ingestão diária de micronutrientes e mercúrio em pré-escolares de algumas comunidades do estado do Amazonas, Brasil. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE. Santos, 2007. **Anais...** Santos, 2007.

SCHNEIDER, L. Assessment of non-invasive techniques for monitoring mercury concentrations in species of Amazon turtles. **Toxicological and Environmental Chemistry**, p. 1-13, 2010.

SIQUEIRA, G.W. et al. Distribuição do mercúrio em sedimentos de fundo no Estuário de Santos SP/Brasil. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 4, p. 309-316, 2005.

SKOLE, D.; TUCKER, C. J. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, n. 260, p. 1905-1910, 1993.

SOUSA, E. S. Avaliações da concentração de mercúrio total em solo e material particulado em áreas alagáveis na foz do rio Tapajós-PA, Fm. Alter do Chão, com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto. **Novos Cadernos NAEA**, v. 15, n. 2, p. 315-341, 2012.

SOUSA, E. S. **Uso integrado de dados de sensoriamento remoto para o estudo da geologia e geomorfologia da área da foz do rio Tapajós, Santarém-PA**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

SOUZA, M. C. S. (Trad.). **Manual de análises de mercúrio**, Tóquio: Laboratório de Análises de Mercúrio do DNPM 5°. DS/PA, 2004.

SOUZA, J. R.; BARBOSA, A. C. Contaminação por mercúrio e o caso da Amazônia. **Química e sociedade**, n. 12, 2000.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.21 - SANTARÉM**. Rio de Janeiro, 1976.

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para o uso e proteção**. 1996. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) – UFPA, Programa de pós-graduação em em Geologia e Geoquímica, Belém, 1996.

TINÔCO, A.A.P. et al. Avaliação de contaminação por mercúrio em Descoberto, MG. **Eng. Sanitária Ambiental**, v.15, n.4, 2010.

TRASANDE, L. et al. Methyl mercury exposure in a subsistence fishing community in Lake Chapala, Mexico: an ecological approach. **Environmental Health**, v. 9, n. 1, 2010.

VIMY, M. J.; TAKAHASHI, Y.; LORSCHIEDER, F. L. Material fetal distribution of mercury (203 Hg) released from dental amalgam filling. **Am. J. Physiol.**, v. 258, n. 4, p. 939-945, 1990.

WASSERMAN, J. C.; HACON, S. S.; WASSERMAN, M. A. O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico. **Mundo e Vida**, v. 2, n. 1/2, 2001.

WHO. **Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure**.Genebra, 2008.

ZEIDEMANN, V. K. **A geoquímica de mercúrio em solos da bacia do rio Negro e sua influência no ciclo regional do mercúrio**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – INPA/UA, 1999.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DA BR-163. Disponível em: <<http://zeebr163.cpatu.embrapa.br/index.php>>. Acesso em: 20 set. 2015.

**2 ESPECIAÇÃO DE MERCÚRIO EM SOLO E MATERIAL PARTICULADO E
AFERIÇÃO DO ÍNDICE DE CAPITAL SOCIAL (ICS) NA FOZ DO RIO
TAPAJÓS, AMAZÔNIA-BRASIL**

Enilson da Silva Sousa (1)
Marcelo Oliveira Lima (2)
Dulcidaia da Conceição Palheta (3)
Joaquim Carlos Barbosa Queiroz (4)

Universidade Federal do Pará – UFPA (1)
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail:enilson@ufpa.br ou prof.enilson@gmail.com

Instituto Evandro Chagas – IEC (2)
Seção de Meio Ambiente (SAMAM) – Instituto Evandro Chagas (IEC)
Secretaria Nacional de Vigilância em Saúde (SVS) – Ministério da Saúde (MS)
Fones: (91) 32142096 / 988396255 / 982470800
E-mail:marcelolima@iec.pa.gov.br

Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA (3)
Avenida Presidente Tancredo Neves 2501 -
66077-530 Belém - PA
Telefone: (91) 274 3493/(91) 274 0900 Fax: (91) 274 3814
Site: www.ufra.edu.br. E-mail:deiapalheta@hotmail.com

Universidade Federal do Pará – UFPA (4)
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail:joaquim@ufpa.br

RESUMO

A região de Santarém, no estado do Pará, foi escolhida para a realização desta pesquisa pelo fato de estar no centro das discussões da contaminação por mercúrio na Amazônia. O objetivo deste artigo é a análise da especiação de Hg e Metil-Hg em solo e material particulado na foz do rio Tapajós; e a quantificação da percepção, capacidade de mobilização e ação política sobre a contaminação por esse metal da população de Santarém. Os procedimentos metodológicos incluíram classificação, quantificação de material em suspensão e sedimentos das áreas identificadas, aplicação de Questionários Integrados para Medir o Índice de Capital Social - QI-MCS, proposto pelo Banco Mundial, por meio de entrevistas individuais. Para determinar o mercúrio total e metil-Hg nas amostras, elas foram submetidas à digestão ácida e determinações de Hg realizadas por Espectrofotometria de Absorção Atômica, com geração de vapor frio. A avaliação das concentrações de mercúrio nos pontos amostrados e de profundidade foi realizada com a ajuda da análise de agrupamentos, utilizando o método do Agrupamento (*clustering*) Hierárquico. Os resultados obtidos foram que a variável mercúrio total em solo apresentou ocorrência de valores muito elevados nas análises de mercúrio total com granulometria para fração fina e fração bruta. O Índice de Capital Social calculado foi de 0,810, o que corresponde a um alto nível de acúmulo de capital social de acordo como a proposta do BM. Os valores de concentração média de Hg foram mais elevados em material particulado em suspensão, frações finas e brutas e a população envolvida na pesquisa apresenta um elevado Capital Social, indiciando uma capacidade de mobilização e ação política a exposição ambiental ao mercúrio por parte dela.

Palavras-chave: Amazônia. Tapajós. Santarém. Mercúrio. Capital Social

INTRODUÇÃO

Os efeitos sobre a saúde humana, relacionados com a bioacumulação, transformação e transporte mundial do mercúrio inorgânicos se devem quase exclusivamente à conversão dos compostos de mercúrio em metilmercúrio (CH_3Hg), conforme a observação feita por Souza; Barbosa (2000).

Quanto à toxicidade, o mercúrio ao ser absorvido pelo sistema orgânico humano é depositado em tecidos, causando lesões graves nos rins, fígado, aparelho digestivo e Sistema Nervoso Central. A exposição aguda por inalação acarreta fraqueza, fadigas, anorexia, perda de peso e perturbações gastrointestinais (PASSOS et al., 2007)

A contaminação ambiental, por sua vez, é provocada pela dieta alimentar, comumente pela ingestão de peixes de água doce ou salgada, o que, na prática, afeta diretamente a corrente sanguínea, provocando problemas no Sistema Nervoso Central (SOUZA; BARBOSA, 2000). A grande preocupação é o elevado consumo de peixes pelas populações amazônicas, fonte de proteína e, conseqüentemente, a principal via de exposição humana ao metilmercúrio na Amazônia, como aponta os estudos de Trasande et al. (2010).

O garimpo clandestino em pequena escala e de forma artesanal, que utiliza a amálgama ouro-mercúrio para extrair ouro do minério, é outra fonte significativa de exposição para os trabalhadores e as populações vizinhas a essas áreas (ESTRELA, 2012). Os garimpeiros queimam a amálgama ouro-mercúrio para vaporizar o mercúrio e recuperar o ouro, assim, os mineiros e as populações locais podem ter alta exposição aos vapores de mercúrio. Além disso, os resíduos de mercúrio metálico são geralmente despejados próximos ou em cursos de água, podendo levar as concentrações de metilmercúrio em peixes desses corpos d'água. Dessa forma, o consumo desses peixes contaminados por moradores da comunidade pode resultar em ingestão de níveis elevados de metilmercúrio (WHO, 2008).

Nesse contexto, a Amazônia é a região por excelência no processo de exposição ambiental humana, devido a sua geografia e a presença de uma vasta rede hidrográfica. O monitoramento e a avaliação da dinâmica mercurial na região e suas conseqüências para população local, ecossistema regional e global são de grande importância para sugerir políticas públicas e mitigar possíveis danos à saúde e ao meio ambiente.

Uma ampla literatura aborda os possíveis efeitos do mercúrio inorgânico ou metilado, sobre as populações locais da região do Tapajós. As populações amazônicas, principalmente ribeirinhos e indígenas, são potencialmente expostos a baixas

concentrações de mercúrio total, ao longo de toda a vida (PINHEIRO et al., 2007) e a maioria dos estudos mostra uma relação positiva entre o consumo de peixe e elevados níveis de Hg no cabelo (SANTOS et al., 1999; PASSOS et al., 2007).

As maiores concentrações (>500 ppb) foram encontradas em espécies carnívoras, como na *Plagioscion squamosissimus* (pescada branca), *Pseudoplatystoma* spp. (surubim), *Brachyplatystoma filamentosum* (filhote), *B. fravicans* (dourada) e os *Ciclídeos Cichla* spp. (tucunaré), entre outros carnívoros (PINHEIRO et al., 2007), largamente ingeridos e comercializados pelas comunidades locais. Dessa forma, o comprometimento do pescado local irá afetar sobremaneira a dinâmica econômica e ambiental dessas populações, em especial, o comércio de exportação que é controlado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 1998).

Alguns desses estudos, reportam-se aos efeitos sobre o sistema cardiovascular nessas populações amazônicas e mostram que, por exemplo, as pressões sistólicas e diastólicas são relativamente baixas, no entanto, há evidências de que ocorre o aumento dessa com a idade, e está relacionada significativamente com as elevadas concentrações de Hg total, em uma população com fatores de risco mínimos para hipertensão e com elevadas concentrações ambientais de Hg (FILLION et al., 2006).

Por outro lado, estudos sobre a catarata relacionada à idade (ARG) conduzida no baixo rio Tapajós (PROJETO CARUSO, 2010), indicaram que um terço (n = 69; 32.7%) dos participantes apresentaram ARG, e apresenta indivíduos dessa população com elevados níveis de Hg, os efeitos cataratogênicos do Hg podem ser diminuídos pela ingestão de selênio (Se) nas suas dietas (LEMIRE et al., 2010). O MeHg é primariamente um agente neurotóxico, mas sua ação poderia ser antagonizada por fatores nutricionais, como a ingestão de vitaminas antioxidantes presentes nas frutas amazônicas (PASSOS et al., 2007), aminoácidos (glicina, metionina, cisteína) (FARINA et al., 2011) e minerais, como o selênio (PINHEIRO et al., 2007; RODRIGUES et al., 2008; LEMIRE et al., 2006., LEMIRE et al., 2011).

A ingestão adequada de Se é essencial para diversas selenoenzimas envolvidas nos processos antioxidantes, manutenção do estado redox, regulação imune e regulação tireoidiana (REEVES; HOFFMANN, 2009). A população amazônica, embora exposta a elevadas concentrações de mercúrio através da dieta piscívora, poderá estar protegida pela cultura da ingestão de alimentos ricos em Se oriundos da floresta (LEMIRE et al., 2011).

O maior ou menor impacto das elevadas concentrações de Hg total nos alimentos ingeridos pelas populações locais e o diagnóstico das doenças neurais, em constante

estudo, ressalta a importância da implementação e manutenção de programas de saúde pública para os habitantes locais, em especial, ribeirinhos e indígenas. Como os habitantes percebem esse problema e como será a relação com a doença mercurial crônica, fato a ser considerado, é a outra questão do estudo aqui em foco a partir da aplicação do QI-MCS.

Dessa forma, no presente artigo, busca-se identificar e analisar a especiação de Hg e Metil-Hg em solo e material particulado na foz do rio Tapajós, e os possíveis impactos sobre a saúde das populações do entorno e a percepção, capacidade de mobilização e ação política sobre a contaminação por esse metal na população de Santarém. Essa análise será efetivada a partir da aplicação de Questionários Integrados para Medir o Índice de Capital Social - QI-MCS, proposto pelo Banco Mundial, em 2003.

O Índice de Capital Social (ICS) definido em um primeiro momento por Pierre Bourdieu (1989), como sendo o “o agregado dos recursos efetivos ou potenciais ligados à posse de uma rede durável de relações mais ou menos institucionalizadas de conhecimento ou reconhecimento mútuo” (PORTES, 2000), será analisado neste trabalho, uma aferição da população de Santarém, estado do Pará, Amazônia brasileira, para mensurar a capacidade de mobilização e ação política, quando exposta a um risco ambiental, no caso, a contaminação mercurial.

Para Bourdieu (1989), o ICS surge na tentativa de superar o foco da teoria econômica tradicional que fixa seus olhos e atenção apenas no capital econômico e humano, desconsiderando outras formas de trocas sociais (HIGGINS, 2005). Já Fialho (2004) afirma que toda ação individual torna possível a mobilização da estrutura social, possibilitando um ganho individual e coletivo. Este seria um recurso disponível apenas às classes privilegiadas, enquanto que as classes baixas seriam desprovidas deste poder no interior da estrutura societária. No entanto, esse fator pode ser inferido devido a sua posição na pirâmide social, como afirma Bourdieu (1989).

O Capital Social enfatiza o fato de que formas e relações não monetárias podem ser importantes fontes de poder e influência, mesmo quando a literatura corrente evidencia que, devido ao conceito ser entendido e avaliado de diferentes formas, muitas críticas têm sido feitas quanto ao seu uso (PATTUSSI, 2006). Sendo difícil aferir, pois está alojado nas relações entre indivíduos e grupos individuais. Do ponto de vista ideológico, capital social pode ser o empoderamento da cidadania, o pluralismo e a democratização.

Dentro dessa perspectiva, adotar-se-á o ponto de vista de Coleman (1990), onde o capital social se manifesta por meio de redes de cooperação e normas de reciprocidades

coletivas para propor políticas públicas voltadas a atender demandas da população local em relação ao acesso à informação, prevenção e controle de possível contaminação por mercúrio na área da pesquisa. Esta situação só é possível devido o indivíduo estar imerso em uma rede de relações sociais densas, segundo este autor.

No entanto, na maioria das vezes, o conceito de capital social é utilizado como categoria analítica que busca explicar de que forma indivíduos e coletividade têm acesso a recursos diferenciados na sociedade. Mais especificamente, busca compreender como se articulam diferentes redes de relacionamento, podendo trazer benefícios individuais ou coletivos, muito embora se origine em uma rede de relacionamentos, e é um atributo individual que permite o acesso a recursos diferenciados não apenas de natureza econômica, mas também aqueles referentes ao *status* social – capital simbólico – e bens culturais – capital cultural (PRATES; VENEROSO, 2014).

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterizações da área da pesquisa

O município de Santarém localiza-se na região da foz do rio Tapajós, confluência com o rio Amazonas, mesorregião do Baixo Amazonas e à microrregião Santarém, na porção oeste do estado, com coordenadas 02° 25' 30" S e 54° 42' 50" W Gr (Figura 1). Segundo o IBGE (2015), o município possui população de 294.580 habitantes, área de 22.887 km² e uma densidade demográfica de 12,8 hab./km².

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do rio Tapajós e área do município de Santarém

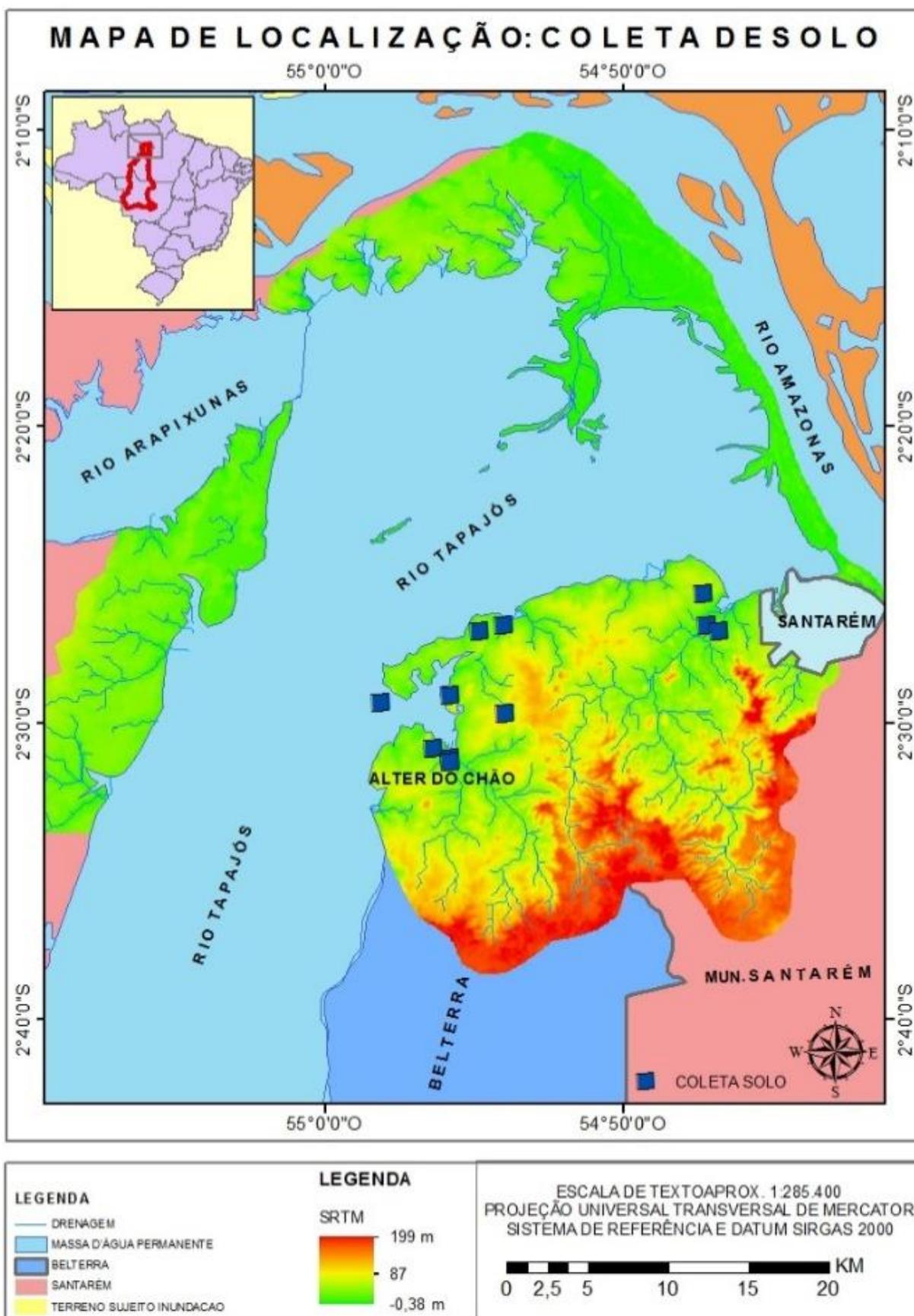


Fonte: Do autor (2016)

Localizações dos pontos de coleta de solo

Para a amostragem de solo foram selecionados os 6 pontos, com perfil estratigráfico possuindo 60 cm cada, subdivididos em frações de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60 cm, totalizando 30 amostras, para Fração Grosso e 30 para Fração Fina e coletadas em período de estiagem da região amazônica (setembro e outubro). As amostras de água e material particulado coletadas foram realizados nos seis locais amostrados.

Figura 2 – Mapa de localização dos pontos de coleta de material em suspensão e solos

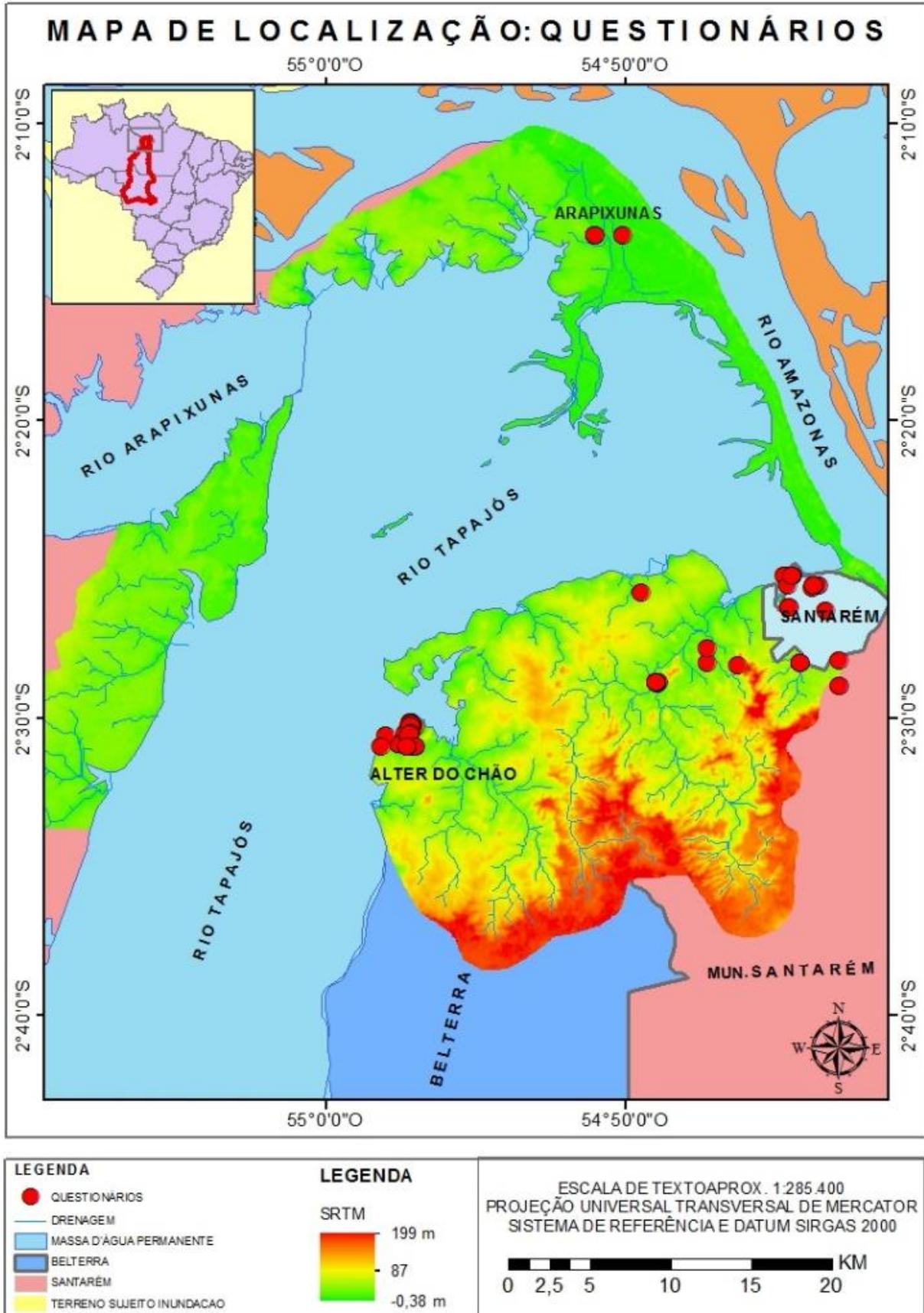


Fonte: Do autor (2016)

Localização dos pontos de aplicação dos QI-MCS

A área urbana de Santarém foi escolhida por ser o município diretamente associado à contaminação por este metal. A Vila de Alter-do-Chão funciona como um importante polo turístico, no cenário estadual e nacional e, portanto, uma área diretamente impactada com possível divulgação de contaminação ambiental por Hg. A Comunidade de Arapixunas, localizada no furo homônimo, possui sua base proteica no consumo do pescado, além de receber influências sazonais das águas dos rios Amazonas e Tapajós e de comunidades ao longo da Rodovia Everaldo Martins (Santarém-Alter-do-Chão), área conhecida como Eixo Forte (Figura 3).

Figura 3 – Localização dos pontos de aplicação dos questionários em Santarém



Fonte: Do autor (2016)

Métodos de Análise dos dados de QI-MCS

O Índice de Capital Social (ICS) considera variáveis que expressam as relações interpessoais entre os membros da localidade, além de sua participação em associações de caráter participativo e cooperativo. O Índice de Capital Social (MENDONÇA; PINHEIRO, 2008; MOREIRA, 2009) é definido matematicamente como:

$$ICS = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{\sum_{i=1}^m E_{ij}}{\sum_{i=1}^m E_{max,i}} \right] \quad (1)$$

A contribuição de cada variável (ou indicador) no ICS é dado por

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{max,i}} \quad (2)$$

Onde

ICS : Índice de Capital Social

E_{ij} : escore do *i*-ésimo indicador obtido pelo *j*-ésimo entrevistado

E_{max,i} : escore máximo do *i*-ésimo indicador

C_i : contribuição do indicador “*i*” no Índice de capital social

i = 1, ..., *m* : número de indicadores

j = 1, ..., *n* : número de indivíduos entrevistados

O valor do Índice de Capital Social varia de zero a um, sendo 1 o maior nível de acumulação de capital social, enquanto que zero representa o menor nível, ou seja:

- $0 < ICS \leq 0,5$, significa baixo nível de acumulação de capital social
- $0,5 < ICS \leq 0,8$, significa médio nível de acumulação de capital social
- $0,8 < ICS \leq 1,0$, significa alto nível de acumulação de capital social

Análises laboratoriais das amostras de solo

Todo procedimento de análise de Hg_{Total} e MeHg em amostras de solo/sedimentos e material particulado da pesquisa foi realizado segundo o método Akagi (SOUZA, 2004), assim, uma massa de 200 mg dos materiais foi submetida à secagem e separação granulométrica (fração grossa/fina para cada amostra), digestão ácida e análise por sistema aberto de circulação de fluxo de ar e as determinações de Hg realizadas por espectrofotometria de absorção atômica, com geração de vapor frio (CVAAS). Para controle de qualidade, foram utilizadas leituras de Material de Referência Certificada (CRM IAEA-SI-1) e o método demonstrou excelente recuperação analítica (101,7%).

Este procedimento está relacionado à redução de íons Hg^{2+} na solução da amostra com cloreto *estanhoso* para gerar vapor de mercúrio elementar (Hg^0); e a introdução de vapor de mercúrio no celular de fotoabsorção para a medida de absorbância a 253,7 nm (SOUZA, 2004).

Segundo a autora, este método pode ser aplicado diretamente à digestão de amostras biológicas inclusive cabelo, sangue e peixe, como também em várias amostras sólidas: sedimento e solo.

Em laboratório, as amostras foram homogeneizadas com o método de quarteamento e passaram por uma peneira de malha de 2,0 mm para preparar uma amostra para análise. As amostras que continham um conteúdo alto de água foram centrifugadas para remover o sobrenadante até ocorrer a mistura bem homogeneizada antes de submetê-la à análise (SOUZA, 2004).

No quadro 1 aparecem os valores de Material de Referência Certificada (CRM) IAEA-SL-1 utilizados para garantia da exatidão analítica e comparação dos resultados obtidos.

Quadro 1 – Material de Referência Certificada (CRM) IAEA-SL-1

Controle de Qualidade Analítica				
CRM	Valor de Referência	N	Média de Hg total ($\mu\text{g/g}$)	% Recuperação
IAEA-SL-1	0,180	5	0,183	101,7%

Fonte: Do autor (2016)

Análises estatística

Análise de agrupamento (*clusters*) (AC)

A análise de agrupamento é uma técnica de análise exploratória multivariada que permite separar ou classificar objetos observados em um grupo ou em número específico de subgrupos ou conglomerados (*clusters*) mutuamente exclusivos, de modo que os subgrupos formados tenham características de grande similaridade interna e grande dissimilaridade externa.

Existem três métodos para aplicar esta técnica: *joining* (*tree clustering*), *k-means clustering* e *two-way joining*, cujos objetivos são idênticos. A análise de clusters (AC) pode ser resumida nos seguintes procedimentos, segundo Pereira (1999):

a) Cálculo das distâncias euclidianas entre os objetos estudados no espaço multiplano de todas as variáveis consideradas. As principais medidas de distâncias são: (1) euclidiana; (2) euclidiana ao quadrado; (3) *city block*; (4) *chebychev*;

b) Sequência de agrupamento por proximidade geométrica. As regras para agrupamento mais utilizadas são o *single linkage*, que é o cálculo a partir do objeto mais próximo, e o *complete linkage*, que é computado pela maior distância entre dois objetos;

c) Reconhecimento dos passos de agrupamento para identificação coerente de grupos dentro do universo de objetos estudados. Por fim, terminado o procedimento de análise de agrupamentos, passa-se à interpretação dos resultados. Para essa interpretação é preciso analisar o comportamento de suas variáveis originais dentro dos grupos identificados.

d) Representação dos grupos formados na forma de dendograma. Um *dendograma* é um meio prático de sumarizar um padrão de agrupamento. Este começa com todos os indivíduos separados (“folhas”) fundindo-se progressivamente em pares (folhas, ramos, galhos, tronco) até chegar a uma única raiz. A ordem dos indivíduos mostrada no dendograma e a ordem na qual os grupos entram no agrupamento (MOORI, 2002). As distâncias entre os objetos formados no dendograma originam uma matriz denominada de matriz cofenética. Quanto maior for a correlação entre a matriz cofenética e a matriz de dissimilaridades (ou distâncias observadas entre os objetos) melhor será a representação dos grupos formados na análise de agrupamento.

A análise de clusters (AC) é uma técnica multivariada que utiliza algoritmos para reunir em aglomerados ou clusters dados relacionados entre si, através de medidas e suas relações de proximidades (ou similaridade) e separando tais grupos segundo suas distâncias (ou dissimilaridades). É um método taxonômico estatístico (CÂMARA, 2008).

RESULTADOS OBTIDOS

Principais estatísticas descritivas da variável Hg em solo

Na avaliação dos dados de concentração de mercúrio, a Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas para a variável mercúrio total em solo, em que se observa a ocorrência de valores muito elevados nas análises de mercúrio total com granulometria para fração fina e fração bruta em ($\mu\text{g/g}$) encontrados em solo nas amostras coletadas em campo, na primeira campanha, nas regiões do Igarapé do Juá (Rodovia Everaldo Martins) (I.J.); Lago do Juá (L.J.); Lago do Itapari (L.I.); Alter-do-Chão: Ponta do Tauá (P.T.); Lago Verde: Caminho das Pedras (C.P.); Lago Verde: Caranazal (L.V.C.), nos perfis de 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-60, em solo, valores próximos das concentração de mercúrio em solos e outros materiais de alteração intempérica encontradas por Roulet; Lucotte (1995) e Oliveira et al. (1998), para a região da bacia do Tapajós.

O coeficiente de variação dá uma idéia da precisão do experimento. Tendo em vista os coeficientes de variação obtidos comumente nos ensaios agrícolas de campo, podemos considera-los baixos, quando inferiores a 10%, médios, quando de 10 a 20%, altos, quando de 20 a 30%, muito altos, quando superiores a 30% (PIMENTEL-GOMES, 1985; FERREIRA, 1991).

Neste caso, apenas em alguns pontos os valores não foram significativos, a exemplo de Igarapé do Juá, para Fração fina, onde os valores foram de 9,68 %, bem abaixo do esperado; No Lago do Itapari, 28,42 %, para Fração bruta e Lago Verde, comunidade do Caranazal, para Fração bruta, valores de 23,96%, ainda assim são considerados resultados significativo para essas amostragens, os demais foram significativos.

Os valores máximos encontrados foram para as regiões do Igarapé do Juá (Fração fina 0,117($\mu\text{g/g}$) e bruta 0,265($\mu\text{g/g}$); Lago do Juá (Fração fina 0,199($\mu\text{g/g}$)), Caminho das Pedras (Fração fina 0,238($\mu\text{g/g}$)) e Caranazal (Fração fina 0,234($\mu\text{g/g}$)) muito alto para os valores apontados pelos autores acima para região.

Tabela 1 – Estatística descritiva para o mercúrio total ($\mu\text{g/g}$) em frações finas e grossa de solos

	I. J. (F. f)	I. J. (F. b.)	L. J. (F. f.)	L. J. (F. b.)	L. I. (F. f.)	L. I. (F. b.)	P. T. (F. f.)	P. T. (F. b.)	C. P. (F. f.)	C. P. (F. b.)	L. V. C. (F. f.)	L. V. C. (F. b.)
Tamanho da amostra	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Mínimo	0.093	0.028	0.084	0.022	0.120	0.023	0.024	0.027	0.102	0.027	0.111	0.023
Máximo	0.117	0.265	0.199	0.087	0.269	0.047	0.059	0.065	0.238	0.081	0.234	0.042
Amplitude Total	0.024	0.237	0.115	0.065	0.149	0.024	0.035	0.038	0.136	0.054	0.123	0.019
Média Aritmética	0.101	0.116	0.114	0.039	0.177	0.032	0.038	0.036	0.163	0.057	0.152	0.033
Variância	0.0001	0.011	0.002	0.0007	0.003	0.0001	0.0002	0.0003	0.003	0.000	0.002	0.0001
Desvio Padrão	0.009	0.108	0.047	0.027	0.061	0.009	0.015	0.016	0.060	0.021	0.049	0.007
Coefficient e de Variação	9.68%	92.74 %	41.64 %	69.68 %	34.53 %	28.42 %	39.91 %	44.11 %	36.84 %	37.11 %	32.46 %	23.96 %

Legenda: (*) I. J. – Igarapé do Juá; L. J. – Lago do Juá; L. I. – Lago do Itapari; P. T. – Ponta do Tauá;

C. P.: Caminho das Pedras; L. V. C. – Lago Verde: Caranazal.

(**) F. f. – Fração fina; F. g. – Fração grossa

Fonte: Do autor (2016)

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os valores para o mercúrio total nos perfis de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30, 30 a 40 e 40 a 50, sua respectiva localização georreferenciada, o nome local das amostras e os teores desse metal, tanto nas frações finas e grossa de solo analisadas na área de Santarém, para cada tabela.

Tabela 2 – Concentrações de Mercúrio Total ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solos

Resultados das Análises de Mercúrio Total									
PONTO	COORD. EW UTM	COORD. NS UTM	IDENTIFIC.	F. FINA 0 a 10 cm	F. FINA 10 a 20 cm	F. FINA 20 a 30 cm	F. FINA 30 a 40 cm	F. FINA 40 a 60 cm	UNID
PT 1ª	746.063.203	9.729.508.740	Rod. Everaldo Martins	0,103	0,093	0,093	0,117	0,102	($\mu\text{g/g}$)
PT 1B	746.801.160	9.730.973.183	Lago do Juá	0,199	0,101	0,084	0,087	0,103	($\mu\text{g/g}$)
PT 2ª	733.497.686	9.729.513.656	Lago do Itaparí	0,12	0,13	0,162	0,207	0,269	($\mu\text{g/g}$)
PT 3ª	725.533.810	9.725.181.601	Alter do Chão: Ponta do Tauá	0,049	0,059	0,029	0,024	0,029	($\mu\text{g/g}$)
PT 3B	730.104.058	9.721.272.609	Lago Verde: C. das Pedras	0,102	0,117	0,144	0,214	0,238	($\mu\text{g/g}$)
PT 3C	730.116.106	9.721.075.958	Lago Verde: Caranazal	0,143	0,16	0,111	0,116	0,234	($\mu\text{g/g}$)

Fonte: Do autor (2016)

Tabela 3 – Concentrações de Mercúrio total ($\mu\text{g/g}$) em frações grossas de solo

Resultados das Análises de Mercúrio Total									
PONTO	COORD. EW UTM	COORD. NS UTM	IDENTIFIC.	F. GROS SA 0 a 10 cm	F. GROS SA 10 a 20 cm	F. GROS SA 10 a 30 cm	F. GROS SA 30 a 40 cm	F. GROS SA 40 a 60 cm	UNID
PT 1ª	746.063.203	9.729.508.740	Rod. Everaldo Martins	0,046	0,199	0,265	0,028	0,045	($\mu\text{g/g}$)
PT 1B	746.801.160	9.730.973.183	Lago do Juá	0,022	0,087	0,029	0,024	0,033	($\mu\text{g/g}$)
PT 2ª	733.497.686	9.729.513.656	Lago do Itaparí	0,047	0,035	0,028	0,029	0,023	($\mu\text{g/g}$)
PT 3ª	725.533.810	9.725.181.601	Alter do Chão: Ponta do Tauá	0,031	0,029	0,03	0,027	0,065	($\mu\text{g/g}$)
PT 3B	730.104.058	9.721.272.609	Lago Verde: C. das Pedras	0,027	0,05	0,081	0,073	0,054	($\mu\text{g/g}$)
PT 3C	730.116.106	9.721.075.958	Lago Verde: Caranazal	0,023	0,042	0,031	0,029	0,04	($\mu\text{g/g}$)

Fonte: Do autor (2016)

Na Tabela 4 são apresentadas as concentrações de Hg total e MeHg ($\mu\text{g/g}$), encontrado nas frações finas de solo, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60 cm; e variação entre Hg e MeHg, para cada profundidade, as quais serão discutidas abaixo.

Tabela 4 – Concentrações de Mercúrio Total e MeHg ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solo.

(continua)

Resultados das Análises de Mercúrio Total e MeHg ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solo.									
PONTO	COORD. EW UTM	COORD. NS UTM	IDENTIFIC.	F. FINA 0 a 10 cm Hg	F. FINA 0 a 10 cm MeHg	% Variação	F. FINA 10 a 20 cm / Hg	F. FINA 10 a 20 cm/MeHg	% Variação
PT 1ª	746.063.203	9.729.508.740	Rod. Everaldo Martins	0,103	0,017	17%	0,093	0,017	18%
PT 1B	746.801.160	9.730.973.183	Lago do Juá	0,199	0,018	9%	0,101	0,014	14%
PT 2ª	733.497.686	9.729.513.656	Lago do Itaparí	0,12	0,009	8%	0,13	0,009	7%
PT 3ª	725.533.810	9.725.181.601	Alter do Chão: Ponta do Tauá	0,049	0,004	8%	0,059	0,009	15%
PT 3B	730.104.058	9.721.272.609	Lago Verde: C. das Pedras	0,102	0,019	19%	0,117	0,023	20%
PT 3C	730.116.106	9.721.075.958	Lago Verde: Caranazal	0,143	0,014	10%	0,16	0,014	9%

(*) Continua.

Tabela 4 – Concentrações de Mercúrio Total e MeHg ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solo.

(conclusão)

Resultados das Análises de Mercúrio Total e MeHg ($\mu\text{g/g}$) em frações finas de solo.								
F. FINA 20 a 30 cm Hg	F. FINA 20 a 30 cm MeHg	% Variação	F. FINA 30 a 40 cm / Hg	F. FINA 30 a 40 cm/MeHg	% Variação	F. FINA 40 a 60 cm / Hg	F. FINA 40 a 60 cm/MeHg	% Variação
0,093	0,014	15%	0,117	0,017	12%	0,102	0,019	19%
0,084	0,014	17%	0,087	0,087	16%	0,103	0,016	16%
0,162	0,012	7%	0,207	0,207	8%	0,269	0,024	9%
0,029	0,004	14%	0,024	0,024	38%	0,029	0,004	14%
0,144	0,014	10%	0,214	0,214	6%	0,238	0,014	6%
0,111	0,012	11%	0,116	0,016	15%	0,234	0,017	7%

Fonte: Do autor (2016)

A região do Igarapé do Juá foi o único lugar onde o Coeficiente de Variação está abaixo de 15%, o que representa baixa dispersão, ou seja, os dados são mais homogêneos para fração bruta, enquanto que no mesmo local, quando se analisa a amostra de fração fina, a situação se inverte.

Neste caso foi observado que, apenas em alguns pontos, os valores não foram significativos, a exemplo de Igarapé do Juá, para fração fina, em que os valores foram de 9,68 %, bem abaixo do esperado; Lago do Itapari, 28,42 %, para fração bruta e Lago Verde, comunidade do Caranazal, para fração bruta, valores de 23,96%, não significativo para essas amostragens, os demais foram significativos.

Os resultados encontrados de Hg_{Total} nos solos-sedimentos para fração bruta variam entre 0,022 e 0,199-265 $\mu\text{g/g}$, com média de $0,054 \pm 0,034 \mu\text{g g}^{-1}$, e 0,024 e 0,269 $\mu\text{g/g}$, para fração fina, enquanto que os resultados de mercúrio total no material particulado foram relativamente altos, a variação foi de 12,050 a 74,880 $\mu\text{g/g}$ e média de $0,098 \pm 0,037$, nesse caso, os teores de Hg_{Total} nos materiais analisados encontram-se dentro da faixa dos valores observados para os rios amazônicos “não poluídos” (MASCARENHAS et al., 2004).

Chama a atenção os níveis de Hg no material particulado em suspensão encontrados no rio Rato por Silva (1999), acima de 0,119 $\mu\text{g/g}^{-1}$, e nos afluentes do rio Acre, de 0,116 $\mu\text{g/g}^{-1}$, relatado por Mascarenhas et al. (2004). As amostras tinham valores médios muito elevados de Hg neste material, com pico de 74,88 $\mu\text{g/g}$, em Alterdo-Chão, na Ponta do Tauá e 12,05 $\mu\text{g/g}$, no Igarapé do Juá.

Na Rodovia Everaldo Martins, a variação entre Hg total e MeHg ($\mu\text{g/g}$), manteve-se entre 17, 18, 15, 12 e 19%, nas respectivas profundidades, com média de 16,2% entre todas as profundidades, não apresentando grandes variações. Este ambiente localizado antes da ponte sobre o Igarapé do Juá, passa parte do ano alagado, representando uma

região pantanosa, com solo superficial arenoso durante o período de estiagem, em decorrência do relevo que circunda toda a área e apresenta fácil capacidade de erosão.

Na região do Lago do Juá, o ambiente apresenta características muito semelhantes a anterior, com a presença de um lago de várzea que drena para o rio Tapajós, hoje, bastante assoreado devido à expansão urbana do município. A variação foi de 9, 14, 17, 16 e 16%, respectivamente, com média de 14,4%. A baixa concentração média de MeHg, na profundidade de 0-10 cm, pode estar associada à topografia do terreno, que na foz do Tapajós é suave e existem evidências que as concentrações de material em suspensão têm aumentado recentemente (ROULET et al., 2001b).

No Lago do Itapari, a variação entre as concentrações de Hg total e MeHg foi de 7, 8 e 9%, nas diferentes profundidades, relação muito baixa, apesar da região apresentar um ambiente muito favorável a ser um importante sítio de metilação (GUIMARÃES et al., 2000a e 2000b; ROULET et al., 2000b; 2001). Este fato pode ser atribuído ao local específico da coleta da amostra em questão, é provável que outras amostras da mesma área apresentem valores diferentes. No entanto, os valores de Hg total do local foram os mais elevados de todas, ficando atrás apenas da amostra do Caminho das Pedras, na profundidade de 30-40 cm, 0,207 e 0,214 ($\mu\text{g/g}$), respectivamente, não representando uma diferença significativa entre elas. Esses índices elevados de Hg total encontrado, apontam para que novas pesquisas sejam desenvolvidas no local e que possam corroborar ou não com os resultados aqui apresentados.

Nas amostras da Ponta do Tauá, a variação foi de 8, 15, 14, 38 e 14%, média de 17,8%. Nestas amostras de solos/sedimentos, foram encontradas as menores concentrações de Hg total, fato que pode ser atribuído ao processo de erosão e lavagem que o solo apresenta, por estar localizada no sopé da falésia que dá nome ao local, facilitando, assim, os constantes processos de deposição e retirada do solo do local para dentro do leito do rio, contribuindo para uma renovação sazonal do terreno.

No Caminho das Pedras, a variação foi de 19, 20, 10, 6 e 6%, média de 12,2%. Observa-se que nas primeiras profundidades, a concentração de MeHg foi maior que nas duas últimas. O ambiente local é bem característico, localizado entre a *laterita* da *Fm. Alter-do-Chão* e o ambiente *pantanoso* do lago do Verde-Caranazal, fato que pode ter contribuído para essa correlação. Chama-se atenção para o elevado teor de Hg total nas amostras, com pico de 0,214 e 0,238 ($\mu\text{g/g}$), nas profundidades maiores, muito semelhantes aos encontrados no Lago do Itaparí, que apresenta ambiente muito similar.

Nas amostras do Lago Verde, na região do Caranazal, a variação foi de 10, 9, 11, 15 e 7%, com média de 10,4%, entre as concentrações de Hg e MeHg. As amostras apresentaram elevados valores na concentração de Hg total, mesmo apresentando baixa variação, para MeHg, para esse local.

Para análise das amostras de água foram avaliadas apenas as concentrações de MeHg, sendo que as concentrações deste elemento químico nos pontos do Igarapé do Juá, Lago do Juá, Lago do Itapari, Ponta do Tauá, Rodovia Everaldo Martins, próximo ao Cairé e Lago Verde: Caranazal foram muito elevadas na Ponta do Tauá, com 74,88 ($\mu\text{g/g}$), essa discrepância pode ser atribuída à proximidade de uma *falésia* sedimentar presente no local, fato que pode contribuir para contínua liberação de Hg do solo na água, outrossim, vale lembrar que este ponto encontra-se na foz do Lago Verde, fator que deve ser levado em consideração em futuros estudos, como possível fonte de liberação de Hg para o ambiente.

Resultado para análise de agrupamento (AC) em solo

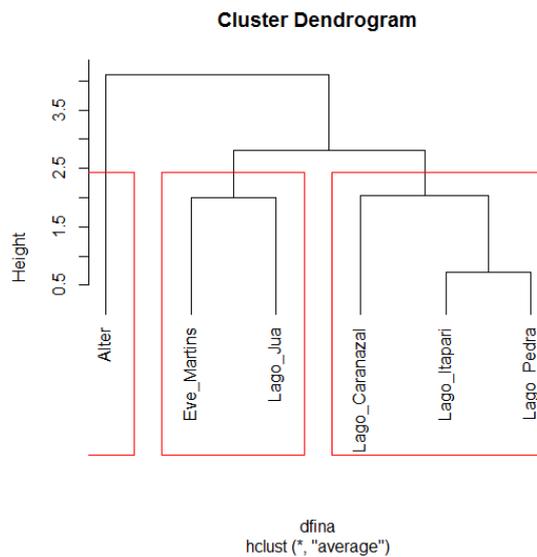
A avaliação das concentrações de mercúrio nas localidades (pontos amostrados) e profundidade foi realizado com a ajuda da análise de agrupamentos. Para avaliação dos grupos homogêneos de localidades foram utilizadas as amostras de Hg_{Total}, para fração fina e fração grossa; MeHg, para fração fina em várias profundidades. A avaliação de grupos homogêneos para as profundidades utilizou as amostras de Hg_{Total} e MeHg nas várias localidades para fração fina de solo.

Neste trabalho foi utilizado o método agrupamento (*clustering*) hierárquico, ele agrupa objetivos em grupos cada vez maiores, segundo o aumento da dissimilaridade (distâncias) entre eles. Em todos os casos, a distância euclidiana foi utilizada como coeficiente de associação. Os resultados são representados em forma de gráfico denominados de dendograma ou os grupos formados são indicados por linhas vermelhas.

O dendograma da Figura 4 mostra os grupos formados para as localidades em relação à concentração de Hg_{Total}, em solo na Fração Fina em várias profundidades. O método de agrupamento das médias (“*Average*”) apresentou melhor resultado, ou seja, a melhor capacidade de evidenciar a estrutura dos dados, indicado pela correlação entre a matriz de dissimilaridade, ou matriz de distâncias entre cada localidade e a matriz cofenética, gerada pelo dendograma. Neste caso, a correlação foi de 0,851, que caracteriza um ajuste muito bom. Três grupos homogêneos foram formados: um grupo formado pela localidade Alter-do-Chão (grupo 1), outro pelas localidades Everaldo Martins e Lago Juá

(grupo 2), e um terceiro, pelas localidades Lago Caranazá, Lago Itapari e Lago Pedra (grupo 3).

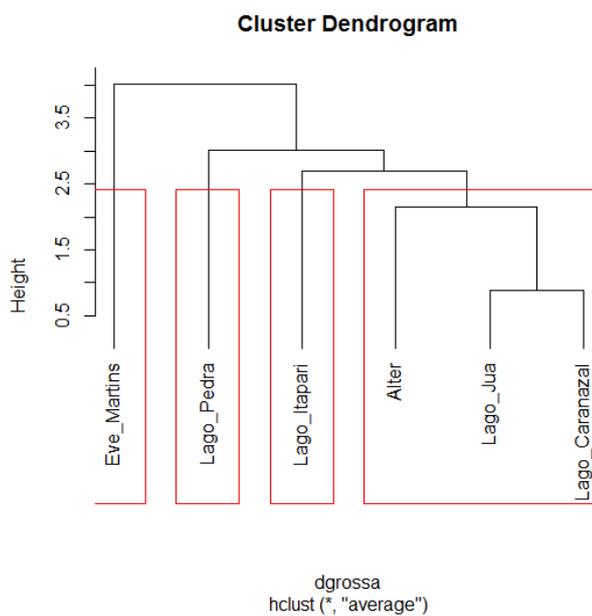
Figura 4 – Dendrograma - Hg_{Total} Fração Fina



Fonte: Do autor (2016)

Para a concentração de Hg_{Total}, em solo na Fração Grossa nas várias profundidades, o dendrograma (Figura 5) mostrou 4 grupos homogêneos: Everaldo Martins (grupo 1), lago Pedra (grupo 2), Lago Itapari (grupo 3) e Alter-do-Chão, Lago Juá e Lago Caranazal (grupo 4). A correlação entre a matriz de distâncias e a matriz cofenética foi de 0.945, o que indica uma ótima representação dos grupos.

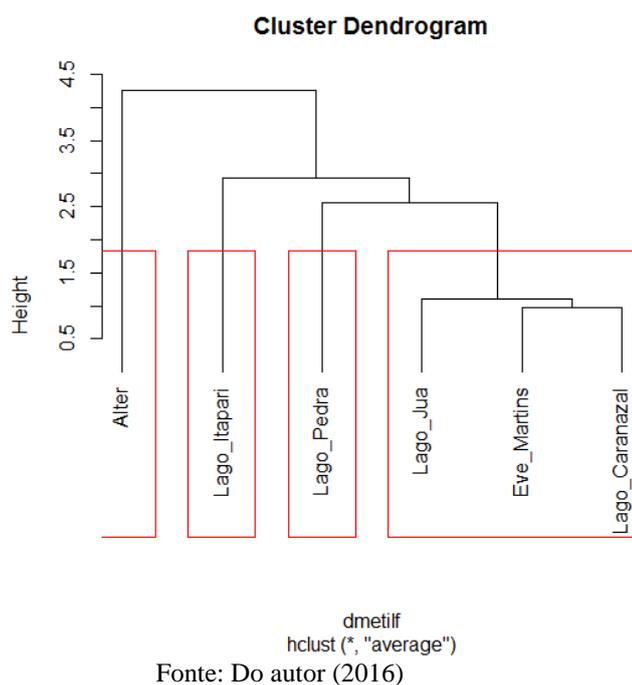
Figura 5 – Dendrograma – Hg_{Total} Fração Grossa



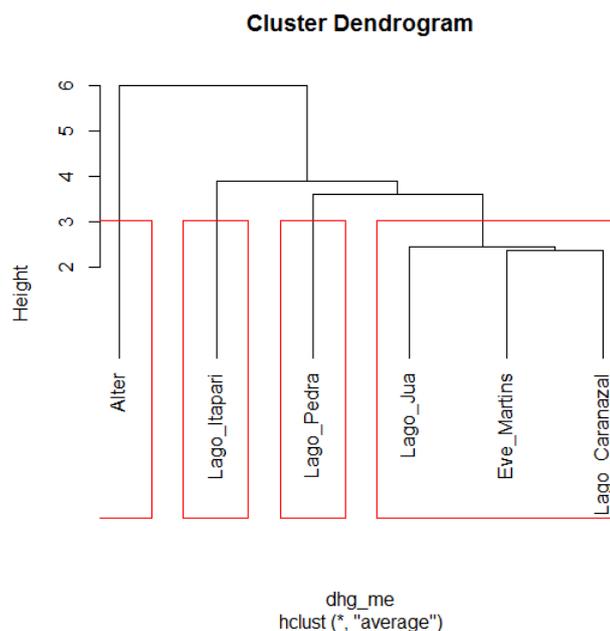
Fonte: Do autor (2016)

A análise da concentração de MeHg, em solo na fração fina nas várias profundidades geraram o dendograma (Figura 6). Quatro grupos homogêneos foram formados: Alter-do-Chão (grupo 1), Lago Itapari (grupo 2), Lago Pedra (grupo 3) e Lago Juá, Everaldo Martins e Lago Caranazal (grupo 4). A correlação entre a matriz de distâncias e a matriz cofenética foi de 0.945.

Figura 6 – Dendograma – MeHg Fração Fina

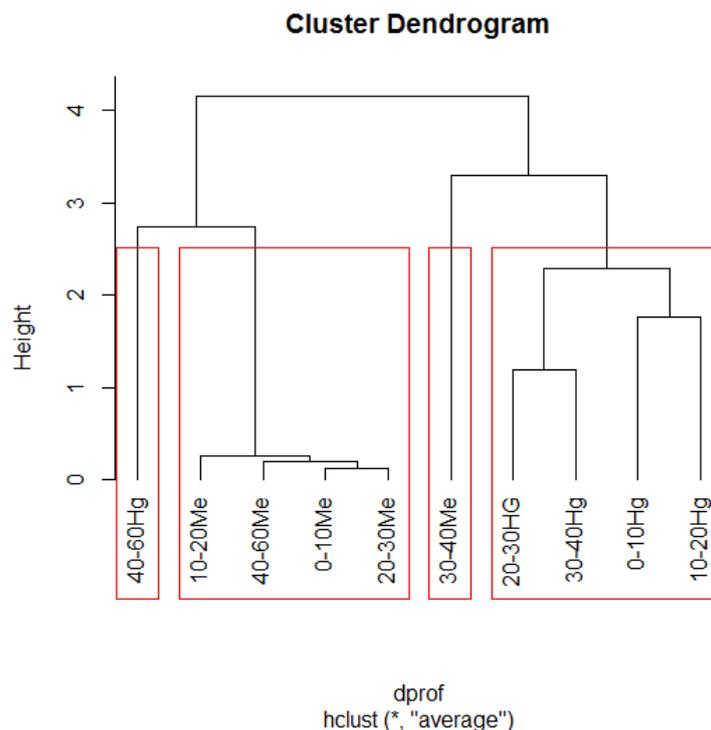


Considerando as concentrações de MeHg e Hg_{Total}, em solo na Fração Fina nas várias profundidades, se obteve o dendograma da Figura 7 e foram formados os mesmos grupos mostrados no dendograma da Figura 6, ou seja, Alter-do-Chão (grupo 1), Lago Itapari (grupo 2), Lago Pedra (grupo 3) e Lago Juá, Everaldo Martins e Lago Caranazal (grupo 4). A correlação entre a matriz de distâncias e a matriz cofenética foi igual a 0.956.

Figura 7 – Dendograma MeHg e Hg_{Total} Fração Fina

Fonte: Do autor (2016)

A avaliação das profundidades nas várias localidades utilizando as concentrações de MeHg e Hg_{Total}, em solo na fração fina, gerou o dendograma da Figura 8. Neste caso, os grupos formados foram: 40 – 60 Hg (grupo 1), 10 – 20 MeHg, 40 – 60 MeHg, 0 – 10 MeHg, 20 – 30 MeHg (grupo 2), 30 – 40 MeHg (grupo 3) e 0 – 10 Hg, 10 – 20 Hg, 20 – 30 Hg, 30 – 40 Hg (grupo 4). Observa-se que as concentrações de MeHg e Hg_{Total} ficaram em grupos diferentes. A correlação entre a matriz de distâncias e a matriz cofenética foi 0.943.

Figura 8 – Dendrograma - MeHg e Hg_{Total} Fração Fina

Fonte: Do autor (2016)

Técnicas da estatística multivariada como análise de agrupamento e análise discriminante foram utilizadas em estudos geoquímicos (MOURA, 1985; OLIVEIRA; COSTA; CRUZ et al., 1998) e de inter-relações entre atributos do solo e produtividade de cultivos (CORREIA, 1993), e apresentaram potencial para uso no estabelecimento e proposição de valores de referência de metais em solos.

Fadigas (2006) usou a análise de agrupamento para separar áreas poluídas com teores de metais pesados encontrados num dado solo, com aqueles em condições naturais, ou seja, não poluídos, ou com valores de referência (padrão). Com base nas características dos solos presentes em cada grupo, foi possível propor um modelo para obtenção das concentrações de metais pesado em solo a partir da correlação com outros metais, além de estabelecer limite de tolerância e limite de referência para os mais diversos tipos de solo brasileiro.

Os grupos obtidos, em estudos de solo, por semelhança entre as amostras, também se compõem de solos de diferentes classes pedológicas, uma vez que solos de classes pedológicas diferentes podem apresentar alguns atributos químicos e de composição granulométrica em comum (EMBRAPA, 2013); assim, amostras de um horizonte A, B ou transicionais de um mesmo solo ou de solos distintos, podem estar presentes em um

mesmo grupo, desde que as concentrações de algumas das variáveis consideradas na análise de agrupamento sejam próximas.

Deste modo, utilizou-se a análise de agrupamento neste ensaio para agrupar ambientes que apresentem as mesmas características em relação à presença ou não de mercúrio, levando em consideração os valores encontrados e correlacionados com a presença de traços desse metal na fração fina e fração grossa (granulometria) em diferentes profundidades do solo amostrado. No caso em questão, na avaliação das concentrações de Hg nas localidades observou-se que os agrupamentos estavam correlacionados com as características de cada ambiente agrupado e os subgrupos apresentaram características mais homogêneas entre si.

Foram agrupadas quatro classes homogêneas, com os resultados para os grupos de localidades em relação à concentração de Hg_{Total} , em solo na Fração Fina, em várias profundidades e da seguinte maneira: Alter-do-Chão (grupo 1), Everaldo Martins e Lago Juá (grupo 2) e Lago do Caranazal, Lago do Itapari e Lago do Caminho das Pedra (grupo 3), esses ambientes caracterizam-se por se localizarem próximas entre si espacialmente e com características ambientais semelhantes.

Os agrupamentos para a análise da concentração de MeHg, em solo na fração fina, nas várias profundidades, como Alter-do-Chão (grupo 1), Lago Itapari (grupo 2), Lago Pedra (grupo 3) e Lago Juá, Everaldo Martins e Lago Caranazal (grupo 4).

Considerando as concentrações de MeHg e Hg_{Total} , em solo na fração fina nas várias profundidades, o índice de correlação foi de 95%, com o seguinte agrupamento: Alter-do-Chão (grupo 1), Lago Itapari (grupo 2), Lago Pedra (grupo 3) e Lago Juá, Everaldo Martins e Lago Caranazal (grupo 4).

Entre os grupos formados para a avaliação das profundidades nas concentrações de MeHg e Hg_{Total} , em solo na fração fina tem-se: 40-60 Hg (grupo 1), 10-20 MeHg, 40-60 MeHg, 0-10 MeHg, 20-30 MeHg (grupo 2), 30-40 MeHg (grupo 3) e 0-10 Hg, 10-20 Hg, 20-30 Hg, 30-40 Hg (grupo 4). Observou-se que as concentrações de MeHg e Hg_{Total} ficaram em grupos diferentes. Em todos os casos, as correlações foram significativas e os ambientes correlacionados apresentam características de paisagem, ambiente e proximidade geográfica muito próximas.

Resultados obtidos para QI-MCS

O Índice de Capital Social calculado foi de 0,810, o que corresponde a um alto nível de capital social, conforme a escala que classifica o nível de acumulação, descrito na Tabela 5, a qual mostra também a participação dos indicadores na constituição do ICS.

Tabela 5 – Participação absoluta e relativa dos indicadores de capital social do ICS

Questão/Indicador	C_i	$C_i(\%)$
1. 7. Disposição de outras pessoas em oferecer dinheiro emprestado	0,025	1,683
2. 9_A. Pessoas dispostas a ajudar	0,032	1,683
3. 9_B. Chance de alguém tirar vantagem	0,038	2,783
4. 10_A. Confiança em membros do governo local	0,064	4,644
5. 10_B. Confiança em membros do governo central	0,066	6,568
6. 10_C. Confiança em membros do governo estadual	0,068	8,533
7. 14. Cooperação em problemas de abastecimentos de água	0,027	9,320
8. 17. Diferenças entre as características das pessoas	0,047	10,68
9. 23. Sentimento em relação à crime e violência	0,035	11,70
10. 24. Sentimento de felicidade	0,029	12,54
11. 25. Capacidade de mudar a vida	0,066	14,44
12. 26. Número de vezes que pessoas pediram em favor da comunidade	0,341	15,42
ICS	0.810	100

Fonte: Do autor (2015)

Os responsáveis pelo menor nível de acumulação de capital social dos itens apresentados foram a disposição de outras pessoas em oferecer dinheiro emprestado; pessoas dispostas a ajudar; chance de alguém tirar vantagem sobre terceiros e confiança em membros do governo local. Por outro lado, os indicadores que mais contribuíram para incrementar a acumulação de capital social foi o número de vezes que pessoas pediram em favor da comunidade; a capacidade de mudar a vida; o sentimento de felicidade e o sentimento em relação à crime e violência. Isto indica pessoas dispostas em lutar pelo bem-estar coletivo (altruísmo que deve ser levado em consideração), grande capacidade de enfrentar mudanças em suas vidas; sentimento de satisfação e felicidade; pessoas com capacidade pessoal e elevado grau de sociabilidade das pessoas residentes nas comunidades.

Análises Descritivas das Dimensões do QI-MCS

Os valores não declarados no percentual de cada categoria, a seguir, dizem respeito aos indivíduos que não souberam ou não responderam aos questionamentos em

cada item analisado. Nesses resultados são apresentados apenas as categorias mais significativas para conclusão da pesquisa.

Na categoria Grupos e Redes, a maioria dos entrevistados informou que pertencem ao mesmo grupo social, 61,87% da comunidade, contra 25,17%, que afirmam o contrário. No entanto, no item Religião, apenas 39,56%, dizem pertencer a mesma denominação religiosa, contra 49,64%. Chamou atenção as respostas relacionadas à identificação por grupos étnicos-raciais, nenhum, declarou-se da etnia Preta, segundo a denominação do IBGE (2008), enquanto 43%, declararam-se Pardos e 35,25%, Indígenas e outros 17,9%, apresentam-se sem declaração (Tabela 6).

Tabela 6 – Tabela da categoria Grupos e Redes, representando o pensamento dos membros dos grupos relacionados à identificação por Raça/Etnia

Pensando nos membros deste grupo, a maioria deles é do (a) mesmo (a) grupo?			
Identificação das respostas (GRUPO ÉTNICO)		N. ABSSOLUTO	%
01	Branca	03	2,15
02	Preta	00	0,0
03	Amarela	02	1,43
04	Parda	60	43
05	Indígena	49	35,25
06	Sem Declaração	26	17,9

Fonte: Do autor (2015)

No que tange à ocupação, os entrevistados pertencem ao mesmo ramo ocupacional, 64,74%, contra 24,17%, e mesma classe social. A escolaridade apresenta uma diferença significativa, 40,60%, afirmando não possuírem o mesmo nível de escolaridade dos demais membros do grupo familiar. Esta afirmação pode estar relacionada ao aumento das conquistas sociais alcançadas pela população de classes mais baixas, inclusive com acesso à educação formal (Tabela 7).

Tabela 7 – Tabela da categoria Grupos e Redes, representando o pensamento dos membros dos grupos relacionados à identificação por escolaridade

Os membros do grupo têm, em sua maioria, a mesma identificação?			
Identificação das respostas (ESCOLARIDADE)		N. ABSSOLUTO	%
00	N.S./N.R. (Não Sabe ou Não Respondeu)	48	34,53
01	SIM	29	20,86
02	NÃO	62	44,60

Fonte: Do autor (2015)

Os pesquisados, ocasionalmente, trabalham fora de suas comunidades, sendo este seu principal espaço onde desenvolvem suas atividades econômicas, 55,39%. Esta situação corrobora, para o grau de confiança entre os membros, que declaram

ocasionalmente (33,81%), conversam entre si, sobre assuntos particulares ou quando precisam de ajuda; outros 41,44%, afirmam que frequentemente lançam mão desse hábito. Chegam a declarar que possuem de uma a cinco pessoas de confiança em seu raio de ação, 51,79% dos entrevistados. Outros 62,58%, afirmam que se precisassem de uma pequena quantia em dinheiro, estes membros estariam dispostos a lhes fornecer.

Em Confiança e Solidariedade, quando questionados sobre o nível de confiança entre os membros dos grupos, falam sobre confiança mútua, porém, 79,85%, dizem que “nunca é demais ter cuidado”. Este item, questiona o grau de relação e confiança entre os membros individuais, comunidade diretamente relacionada e grupos (Tabela 8).

Tabela 8 – Tabela da categoria Confiança e Solidariedade

Em geral, você concorda ou discorda das seguintes afirmações?		
A. A maioria das pessoas neste (a) bairro/localidade estão dispostas a ajudar caso você precise.		
Identificação das respostas	N. ABSSOLUTO	%
01 Concordo totalmente	47	33,81
02 Concordo em parte	52	37,41
03 Nem concordo, nem discordo	19	13,66
04 Discordo em parte	12	8,63
05 Discordo totalmente	5	3,59
06 N.S./N.R. (Não Sabe ou Não Respondeu)	4	2,87

Fonte: Do autor (2015)

Nessa categoria, a participação e confiança nos membros dos governos locais, estaduais e centrais (federal) também foram avaliados e, em ambos os casos, a avaliação não foi muito receptiva. Em relação ao governo local, o índice de confiança (confio totalmente ou confio muito) ficou abaixo de 10%, enquanto confio muito pouco, com 47,48%, quase a metade dos entrevistados (Tabela 9).

Tabela 9 – Avaliação dos membros do governo local

Quanto você confia em...			
A. Membros do governo local			
Identificação das respostas		N. ABSOLUTO	%
01	Confio totalmente	7	5,03
02	Confio muito	11	7,91
03	Nem muito, nem pouco	22	15,82
04	Confio pouco	29	20,86
05	Confio muito pouco	66	47,48
06	N.S./N.R. (Não Sabe ou Não Respondeu)	4	2,87

Fonte: Do autor (2015)

Em relação aos membros do governo estadual, os índices são piores: 0,0% e 5,03% dos entrevistados declaram confiar totalmente ou confiar muito no governo. Em contrapartida, 53,95%, confiam muito pouco nas ações do governo estadual, representando um alto índice de rejeição e aprovação da população (Tabela 10).

Tabela 10 – Avaliação dos membros do governo estadual

Quanto você confia em...			
C. Membros do governo estadual			
Identificação das respostas		N. ABSOLUTO	%
01	Confio totalmente	0	0,0
02	Confio muito	7	5,03
03	Nem muito, nem pouco	24	17,26
04	Confio pouco	29	20,86
05	Confio muito pouco	75	53,95
06	N.S./N.R. (Não Sabe ou Não Respondeu)	4	2,67

Fonte: Do autor (2015)

As avaliações do governo central também não são das melhores, estando muito próximo dos índices de rejeição do governo estadual, com 0,0% e 7,19%, para confio totalmente e confio muito, respectivamente e 49,64% para confio muito pouco (Tabela 11).

Tabela 11 – Avaliação dos membros do governo central

Quanto você confia em...			
B. Membros do governo central			
Identificação das respostas		N. ABSOLUTO	%
01	Confio totalmente	0	0,0
02	Confio muito	10	7,19
03	Nem muito, nem pouco	26	18,70
04	Confio pouco	30	21,58
05	Confio muito pouco	69	49,64
06	N.S./N.R. (Não Sabe ou Não Respondeu)	4	2,87

Fonte: Do autor (2015)

Na Ação Coletiva e Cooperação foi aferida a resposta das comunidades, suas participações de atividades coletivas, voltadas para o bem-comum e se estariam dispostos a atuarem em soluções de um possível problema de abastecimento de água, mesmo que não o atingisse. As respostas foram bastante satisfatórias, com índice de 61,14%, dos entrevistados afirmando que muito provável, ajudariam na solução do problema.

Em Informação e Comunicação, foi considerada a quantidade de telefonemas recebidos pelos indivíduos, e quais as principais e mais importantes fontes de informação a respeito do que os governos estão fazendo para o bem-comum da população. A televisão e o rádio ainda são os principais meios de comunicação que socializam as ações dos governos para a sociedade, com 22,06% e 20,62%, respectivamente, mesmo quando é oportunizado a escolha de mais de um veículo, no total de três fontes de informação.

Coesão e Inclusão Social: nesta modalidade é colocado ao entrevistado a oportunidade de avaliar as diferenças nas características entre as pessoas que vivem no mesmo bairro ou localidade, por exemplo, diferenças de renda, posição social, origem étnica, raça, casta ou tribo. Também puderam levar em consideração as diferenças de crenças religiosas, políticas, idade e sexo. Neste quesito, não foram identificadas pelos grupos, diferenças significativas que pudessem gerar algum distúrbio no coletivo. Entre as questões propostas nos questionários estão a diferença de educação, a posse de terras, a riqueza/posse material, a posição social entre homens e mulheres, de gerações, dos moradores novos e antigos, filiação política e crença religiosa, havendo um equilíbrio sob o ponto de vista dos entrevistados.

Quando perguntados sobre como se sentem em relação ao crime e à violência quando estão sozinho (a) em casa, os resultados fogem aos padrões dos grandes centros urbanos, pois 38,13% dos entrevistados declararam sentir-se Muito seguro (a) e 35,25%, Moderadamente seguro, apenas 7,91%, se acham muito inseguros, mostrando a relação de confiança entre os membros dos grupos sociais e seus familiares (Tabela 12).

Tabela 12 – Avaliação dos membros em relação ao crime e à violência

Em geral, como você sente em relação ao crime e à violência quando está sozinho (a) em casa?		
Identificação das respostas	N. ABSOLUTO	%
01 Muito seguro (a)	53	38,13
02 Moderadamente seguro (a)	49	35,25
03 Nem seguro (a), nem inseguro (a)	11	7,91
04 Moderadamente inseguro (a)	15	10,79
05 Muito inseguro (a)	11	7,91

Fonte: Do autor (2015)

Na categoria Autoridade ou Capitação (*Empowerment*) e Ação Política indicam uma população com elevados índices de satisfação pessoal. Quando perguntados: Como você se considera? Parte da população se considera muito feliz, 40,28% e moderadamente feliz, 46,76%, enquanto que apenas 0,71, se declaram muito infeliz. Esse grupo também tem poder para tomar decisões que podem mudar o curso de suas vidas, 42,44%, são geralmente capazes de mudar suas vidas. Nos últimos 12 meses já se reuniram para entregar, conjuntamente, uma petição a membros do governo ou líderes políticos pedindo algo em benefício da comunidade (Tabela 13), mostrando uma capacidade de mobilização do grupo, quando solicitados ou pressionados por eventos que possam atingir suas relações.

Tabela 13 – Avaliação dos membros em relação à capacidade de mobilização

Nos últimos 12 meses, quantas vezes as pessoas neste (a) bairro/localidade se reuniram para entregar conjuntamente uma petição a membros do governo ou a líderes políticos pedindo algo em benefício da comunidade?			
Identificação das respostas		N. ABSOLUTO	%
01	Nunca	51	36,69
02	Uma vez	32	23,02
03	Algumas vezes (<5)	10	7,19
04	Muitas vezes (>5)	46	33,09

Fonte: Do autor (2015)

Na última parte do *QI-MCS*, foi introduzido o Cadastro de Pesquisa de Hg, o qual não entrou como indicador para identificar o ICS, sendo considerado apenas com o intuito de quantificar e avaliar a capacidade de resposta da população a uma possível exposição ambiental por metais pesados (Hg), assessorado pelo *QI-MCS*. Inicialmente, o entrevistado é questionado qual sua opinião sobre o problema ambiental mais relevante na cidade sob o seu ponto de vista. Foram sugeridos os seguintes: Queimadas; Extinção de espécies da flora e fauna; Desmatamento; Contaminação dos solos e água por mercúrio; O lixo e os resíduos gerados. O lixo e resíduos humanos gerados, desmatamento e contaminação por mercúrio são os problemas ambientais que mais preocupam a população, com 30,93%, 28,77% e 25,89%, respectivamente.

Quando questionado sobre como tomou conhecimento da contaminação por mercúrio, 46,04%, informaram jornais, revistas e/ou televisão e 36,69%, por fontes diversas. Enquanto 0,0% citam que não tiveram nenhum tipo de informação proveniente das Secretarias de Meio Ambiente ou de Saúde dos governos. As campanhas de educação e conscientização ambiental, somam 3,59%, enquanto 13,66% a partir de conversas informais com amigos ou conhecidos.

Ainda no item Cadastro de Pesquisa de Hg, quando é perguntado: Que atividade você considera como responsável pela contaminação por mercúrio na área? A maioria atribui a atividade de Garimpos (41%), Desmatamento (15,82%), Mineração (9,35%), Agricultura (5,75%), e 28,05% outras fontes (Tabela 14).

Tabela 14 – Avaliação dos membros em relação as fontes de contaminação por mercúrio

Que atividade você considera como responsável pela contaminação por mercúrio na área?		
Identificação das respostas	N. ABSOLUTO	%
01 Mineração	13	9,35
02 Garimpos	57	41,00
03 Agricultura	8	5,75
04 Desmatamento	22	15,82
05 Outros	39	28,05

Fonte: Do autor (2015)

O nível de confiança nos órgãos governamentais responsáveis pela gestão de áreas contaminadas foi outro item reprovado na pesquisa, com 85,61% dos entrevistados que não confiam nestes órgãos, contra 11,51% afirmando que confiam.

Durante o levantamento foi observado que as comunidades afetadas pertencem ao mesmo grupo étnico-racial, com crenças religiosas muito semelhantes, pertencentes ao mesmo grupo social, apresentando ponderada homogeneidade em suas características avaliadas e, mesmo levando em conta o período eleitoral, quando da realização do levantamento: julho de 2014, não se pode desconsiderar o alto índice de rejeição a membros dos governos locais, estaduais e central. Este fator deve ser olhado com um olhar mais clínico, pois pode representar uma realidade factual e permanente, não obstante, é recomendável que novos levantamentos sejam realizados, pois muito podem corroborar ou não com os resultados ora apresentados.

Fechando o questionário, mesmo não tendo a pretensão de investigar os aspectos clínicos das entrevistadas, no tópico Cadastro de Pesquisa Hg, foi introduzido o questionamento sobre aborto espontâneo, aplicado a mulheres em idade fértil (15 a 65 anos - sugerido) para mapear sua história pregressa, e tentar observar possíveis alterações metabólicas relacionadas à contaminação por Hg, sugerido por Santos (1999), em estudos na região Brasília Legal, no médio rio Tapajós. Foi elaborado um item com esta temática e as mulheres tinham que responder se tiveram algum aborto espontâneo durante sua vida fértil: 12,23% informaram que sim, e 58,99%, não, outras 28,77%, não sabem ou não responderam. Quando avaliados os dados reprodutivos, 35,7% das mulheres em idade

fértil relataram história de aborto espontâneo. Nos resultados de Santarém, este número cai para 12,23%, mesmo assim, são resultados bastante significativos quando se trata de saúde pública.

A principal fonte de proteína consumida diariamente ali é: 52,51% consomem carne bovina como proteína, 25,89%, peixe, 19,42%, frango, e 2,15%, outras proteínas.

CONCLUSÃO

Com base nessa linha de raciocínio, foi elaborado esse ensaio sobre a presença de Hg e Metil-Hg em solo, material particulado e a percepção, capacidade de mobilização e ação política sobre a contaminação por esse metal da população de Santarém, a partir da aplicação de QI-MCS.

No que tange à contaminação por Hg, foram observados valores de concentração média de Hg mais elevada em material particulado em suspensão do que em solo, nas frações finas ou frações brutas. No entanto, a maior parte do mercúrio nestas águas está associada à fração particulada, indicando que o Hg_{Total} neste rio foi derivado predominantemente da erosão. Esse material particulado rico em matéria orgânica dissolvida, poderia estar absorvendo Hg^0 e MeHg, e distribuindo essas espécies químicas ao longo dos compartimentos bióticos e abióticos do ecossistema amazônico aqui estudado.

A conclusão após a aplicação do *QI-MCS* em Santarém é que as comunidades relacionadas possuem um elevado nível de capital social, onde se pode estimar uma capacidade de mobilização e ação política à exposição ambiental ao mercúrio na região da foz do rio Tapajós, por parte das comunidades locais. Especialmente quando se observou uma proatividade das populações envolvidas, relacionadas a eventos que comprometem o seu bem-estar coletivo. Muito embora tenha demonstrado a presença de capital social, parece não haver uma utilização efetiva desses recursos, em muitos casos, provavelmente devido à falta de lideranças ou meios mais convincentes de convencimento.

O uso da metodologia do *QI-MCS* permitiu recomendá-lo como um instrumento válido e confiável para a mensuração do conceito de qualidade de vida e elaboração de políticas públicas na região pesquisada. Recomenda-se a importância de introduzir a avaliação da qualidade de vida entre os indicadores de resultados em programas e intervenções de saúde, incorporando, assim, a perspectiva dos sujeitos-alvo dessas ações. E que novos estudos complementares possam ser desenvolvidos para elucidar a origem e os processos de disponibilidade do mercúrio na região-alvo deste trabalho e que corroborem as demais pesquisas sobre mercúrio em toda a bacia amazônica, especialmente na Amazônia central, onde a bacia do rio Tapajós está inserida, com aplicação de novos métodos e técnicas para tentar quantificar o empoderamento dessa população frente à contaminação mercurial.

REFERÊNCIAS

AMARAL SOBRINHO, N. M. B. **Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um podzólico Vermelho Amarelo**, 1993. Viçosa UFV. Tese Doutorado

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Portaria n. 685, de 27 de agosto de 1998. Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/ALIMENTOS/legis/especifica>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

BOURDIEU, P. **O poder simbólico**. Lisboa: Difel Editora Ltda., 1989.

CÂMARA, F. P. Psiquiatria e estatística. Parte I: Uso da análise de cluster na identificação e classificação de doenças. **Psychiatry On-Line Brazil**, 2008. Disponível em: <<http://www.polbr.med.br/ano08/cpc1108.php#1>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

COLEMAN, J. **Foundations of social theory**. Cambridge: Harvard University Press, 1990.

CORREIA, J. R. **Uso de técnicas multivariadas no estudo das interrelações de características do solo e a produtividade do eucalipto**. 1993. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental. **Sistemas de Produção**. 2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo; Embrapa Brasília, 2013.

_____. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/pa/pa.htm>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

_____. **Caracterização dos solos da área do planalto de Belterra, município de Santarém, Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001 (Documentos, 115).

ESTRELA, M. A. A., ROHLFS, D. B. Mercúrio: implicações para a saúde e o meio ambiente. In: 7ª MOSTRA DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU DA PUC GOIÁS, 1., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2012.

FADIGAS, F. S., Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, 2006.

FERREIRA, P. V. **Estatística Experimental aplicada à Agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991.

FIALHO, F. M. Capital Social: usos e definições do conceito nas Ciências Sociais. **Três Pontos**, Belo Horizonte, v. 10, p. 31-35, 2004.

FILLION, M. et al. A preliminar study of Mercury exposure and blood pressure in the Brazilian Amazon. **Environmental Health**, Londres, v. 5, n. 29, p. 1-9, 2006.

GUIMARÃES, J. R. et al. Mercury methylation potentials along a lake-forest transect in the Tapajós river floodplain, Brazilian Amazon: seasonal and vertical variations. **The Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 261, n.1, 2000a.

GUIMARÃES, J. R. et al. Hg methylation along a lake-forest transect in the Tapajós river floodplain, Brazilian Amazon: seasonal and vertical variations. **Sci Total Environ**, 2000b.

HIGGINS, S. S. **Fundamentos teóricos do capital social**. Chapecó: Argos, 2005.

IBGE. **Notas técnicas: Histórico da investigação sobre cor ou raça nas pesquisas domiciliares do IBGE**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

LEMIRE, M. et al. Elevated levels of selenium in the typical diet of Amazonian riverside populations. **Science of the total environment**, v. 408, n. 19, p. 4076-4084, 2010.

_____. Selenium from dietary sources and motor functions in the Brazilian Amazon. **Neurotoxicology**, v. 32, n. 6, p. 944-953, 2011.

_____. Elevated blood selenium levels in the Brazilian Amazon. **Science of the total environment**, v. 366, n. 1, p. 101-111, 2006.

_____. Biomarkers of selenium status in the Amazonian context: blood, urine and sequential hair segments. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 19, n. 2, p. 213-222, 2008.

MASCARENHAS, A. F. S. et al. Avaliação da concentração de mercúrio em sedimentos e material particulado no rio Acre, estado do Acre, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 1, p. 61-68, Manaus, 2004.

MAZUR, N. **Níquel, chumbo, zinco e cobre em solos que receberam composto de resíduos sólidos urbanos**. 1997. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

MENDONÇA, K. V.; PINHEIRO, J. C. V. Capital social como fator de desenvolvimento local. In: XLXI CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 1., Brasília: SOBER, 2008. **Anais...** Brasília, 2008.

MOREIRA, J. C. P., MAYORGA, R. D., KHAN, A. S., MAYORGA, M. I. D. O.; MENEZES, A. S. B. D. Capital Social como um dos fatores de sucesso das Cooperativas Agroindustriais. Documentos Técnico-científicos. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 40, n. 3, 2009.

MOURA, C. V. A. Aplicação de tratamento estatístico multivariado em dados geoquímicos de solo no mapeamento geológico na província de Carajás (alvo 2 – corpo 4). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.15, 1985.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CRUZ, C. D. Importância relativa dos metais pesados do solo na identificação e separação de materiais de origem. **Ceres**, Viçosa, v.45, n. 260, 1998.

PASSOS, C. J. S. et al. Epidemiologic confirmation that fruit consumption influences mercury exposure in riparian communities in the Brazilian Amazon. **Environmental Research**, v. 105, p. 183-193, 2007.

PATTUSSI, M. P.; MOYSÉS, S. J.; Junges, J. R.; Sheiham, A. Capital social e a agenda de pesquisa em epidemiologia. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 8, p. 1525-1546, 2006.

PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo/FAPESP, 1999.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 12. ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1985.

PINHEIRO, M. C. N. et al. Mercury pollution and childhood in Amazon riverside villages. **Environment International**, v. 33, p. 56-61, 2007.

PRATES, I.; VENEROSO, C. **Capital Social e Pobreza: implicações teórico-empíricas para estudos de Programas de Renda Mínima**. Disponível em: <<http://www.sinteseeventos.com.br/bien/pt/papers/ianpratesCapitalsocialepobreza.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2014.

PORTES, A. Capital Social: Origens e aplicações na sociologia contemporânea. **Sociologia, Problemas e Práticas**, Lisboa, n. 33, p. 133-158, 2000.

QUEIROZ, J. C. B. **Utilização da geoestatística na quantificação do risco de contaminação por metais pesados, na área portuária de Santana- Amapá**. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Unesp, Rio Claro, 2003.

RAMALHO, J. F. P. G.; Amaral Sobrinho, N. M. B.; Velloso, A. C. X. Contaminação da microbacia de Caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2000.

REEVES, M. A.; HOFFMANN, P. R. The human selenoproteome: recent insights into functions and regulation. **Cell Mol Life Sci**. v. 66, n. 15, p. 2457-78, 2009.

RODRIGUES, J. L. et al. A fast method for the determination of 16 elements in hair samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) with tetramethylammonium hydroxide solubilization at room temperature. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 23, n. 7, p. 992-996, 2008.

ROULET, M.; LUCOTTE, M., Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of a tropical rain forest in French Guiana, South America. **Water Air Soil Pollut**, n. 80, p.1079-1088, 1995.

_____; _____; GUIMARÃES, J. R. D.; RHEAL, I. MethylHg in water, seston, and epiphyton of na Amazonian river and its floodplain, Tapajós River, Brazil. **Sci. Total Environ**, 2000b.

_____; _____; _____. Methyl Hg production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain - effect of seasonal inundation. **Water Air Soil Pollut**, n. 128, p. 41-60, 2001.

SANTOS, E. C. O.; JESUS, I. M. D. et al. Estudo de Saúde e Exposição ao Mercúrio da Comunidade Ribeirinha de Brasília Legal, Estado do Pará, Brasil. **Cad. Saúde Colet**. Rio de Janeiro: Fundação José Bonifácio, v. 7, n. 2, 1999.

SILVA, A.P. **Projeto Itaituba**: programa de ciência e tecnologia ambiental. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq., 1997.

SILVA, A P.; SANTOS, E.C.; BRABO, E.S.; CÂMARA, V.M.; MASCARENHAS, A.F.S.; Jesus, I.M.; FAIAL, K.R.F., LOUREIRO, E.C.B. Contribuição ao estudo da poluição por mercúrio no Estado do Acre. **Revista Saúde e Ambiente**, 1999.

SOUSA, E. S. Avaliações da concentração de mercúrio total em solo e material particulado em áreas alagáveis na foz do rio Tapajós-PA, Fm. Alter do Chão, com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto. **Novos Cadernos NAEA**, v. 15, n. 2, p. 315-341, 2012.

SOUZA, J. R.; BARBOSA, A. C. Contaminação por mercúrio e o caso da Amazônia. **Química e sociedade**, n. 12, 2000.

SOUZA, M. C. S. (Trad.). **Manual de análises de mercúrio**, Tóquio: Laboratório de Análises de Mercúrio do DNPM 5°. DS/PA, 2004.

TRASANDE, L. et al. Methyl mercury exposure in a subsistence fishing community in Lake Chapala, Mexico: an ecological approach. **Environmental Health**, v. 9, n. 1, 2010.

VALADARES, J. M. A. S. Cobre em solos do Estado de São Paulo: cobre total. **Bragantia**, Campinas, v. 34, n. 4, 1975.

WHO. **Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure**. Genebra, 2008.

**3 AVALIAÇÃO DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS
ÁREAS CONTAMINADAS POR MERCÚRIO NA FOZ DO RIO TAPAJÓS,
PARÁ, BRASIL**

Enilson da Silva Sousa (1)
Joaquim Carlos Barbosa Queiroz (2)
Ronaldo Rocha (3)
Aline Maria Meiguins de Lima (4)

Universidade Federal do Pará – UFPA (1)
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail: enilson@ufpa.br ou prof.enilson@gmail.com

Universidade Federal do Pará – UFPA (2)
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail: joaquim@ufpa.br

Laboratório Central do Estado – LACEN (3)
Av. Augusto Montenegro, km 10 – Icoaraci – Belém-PA
E-mail: ronaldo.lacen@gmail.com

Universidade Federal do Pará – UFPA (4)
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail: alinemeiguins@gmail.com

RESUMO

A Geoestatística é uma ferramenta que, nos últimos anos, vem se destacando na análise de dados espaciais em diversas áreas, especialmente nas ciências ambientais, pois é uma técnica que apresenta vantagens em relação a outros métodos de interpolação espacial, sobretudo, pela possibilidade de análise de dados em pouca quantidade, informando os erros de estimativas e consideração da anisotropia. Neste trabalho foram elaborados mapas do mercúrio a partir de dados espacialmente distribuídos, utilizando-se da Geoestatística para inferir resultados para a localização e risco de contaminação desse metal ao longo da foz do rio Tapajós, Santarém-PA. Foram também construídos mapas de riscos ou de probabilidades de contaminação de mercúrio, que possibilitaram a classificação e quantificação das áreas contaminadas por esse metal para diversos níveis de confiança na e no entorno da foz do rio Tapajós. Foram realizadas duas campanhas: uma nos meses de julho e dezembro de 2014, com 37 e 45 pontos amostrais em cada uma. Os resultados apontam para uma possível contaminação da área em alguns pontos, apresentando índices acima do recomendado pela resolução 357/2005, do CONAMA.

Palavras-chave: Geoestatística. Contaminação por mercúrio. Rio Tapajós. Santarém.

INTRODUÇÃO

A Geoestatística trata de questões simples, mas importantes, que vão da interpolação espacial e quantificação da incerteza para variáveis que apresentam continuidade espacial, que podem ser medidas em qualquer ponto da área/região/zona em estudo e está baseada em conceitos estatísticos tradicionais. Ela está fundamentada na Teoria das Variáveis Regionalizadas, formalizada inicialmente por Matheron (1960), a partir de estudos práticos desenvolvidos para estimativas de reservas minerais realizados pelo engenheiro de minas, D. G. Krige e pelo estatístico H.S. Sichel, no cálculo de reservas nas minas de ouro da África do Sul nos anos 1950 (CAMARGO, 2002).

Atualmente, a Geoestatística é aplicada em vários campos, desde as ciências da terra e atmosfera, na agricultura, nas ciências dos solos e hidrologia, estudos ambientais e, mais recentemente, na epidemiologia.

É do 6^o. Congresso Internacional de Geoestatística realizado em abril de 2000, na África do Sul, onde foram destacados os trabalhos de Matheron e Sichel, além do extraordinário desenvolvimento e difusão do uso de computadores e programas voltados para estas áreas que impulsionaram um rápido desenvolvimento da Geoestatística. Foi neste período que se usou, pela primeira vez, estimativas de regressão para blocos de reserva mineral (CAMARGO, 2002).

Nos anos 1960, Matheron tornou essa técnica conhecida com o nome de *krigagem* e estabeleceu o primeiro modelo geoestatístico global para estimação de recuperação de reservas e muitos conceitos fundamentais em Geoestatística e válidos até hoje. A partir de lá, esse conhecimento foi disseminado no mundo seguindo a formação francesa (JOURNAL, 1984; KRIGE, 2000; QUEIROZ, 2003).

Nos anos 1970, ocorreu grande crescimento não só da comunidade geoestatística como também de novos modelos. Na década seguinte ocorreu uma rápida expansão dos computadores e *softwares*, especialmente os voltados para área do modelamento espacial (variogramas), krigagem e outras técnicas, como a krigagem indicativa e krigagem universal (QUEIROZ, 2003) e, assim, a geoestatística obteve um grande avanço. A década de 1990 foi o período em que várias ideias foram introduzidas na África do Sul, como a co-krigagem de áreas virgens usando dados limitados de furos de sondagem e dados adjacentes regularizados de outras áreas exploradas e estudos práticos dos efeitos e implicações de tendências condicionais em estimativas de bloco.

Em suma, foi na África do Sul que ocorreu uma significativa expansão das técnicas geoestatísticas na área de petróleo e estudos ambientais (KRIGE, 2000). Uma

marca registrada da geoestatística é sua praticidade, o que explica seu sucesso e aplicação em diversas áreas das ciências agrárias, da terra e ambientais. Os dados ambientais tais como concentrações de poluente gerados por séries de processos físicos (emissão, transporte, dispersão) que dão padrões nas distribuições de espaço/tempo desses dados, raramente se pode deixar de considerar as correlações no espaço e tempo desses dados ambientais.

A descoberta e modelamento destes padrões de correlações espaciais permitem um melhor entendimento dos processos físicos subjacentes, além de auxiliar na interpolação espacial. Em geral, deseja-se estimar a concentração de valores elevados de determinado elemento – e avaliar sua conectividade no espaço ou tempo – em vez dos valores médios espaciais e, por isso, geralmente as incertezas geradas precisam ser documentadas de modo quantitativo para ajudar na tomada de decisão.

Inicialmente, é realizada uma análise exploratória dos dados. Nestas análises exploratórias são apresentadas as características mais relevantes do conjunto de dados da área de estudo. Esta parte puramente descritiva é um passo preliminar para a construção de modelos de distribuição espacial das variáveis utilizadas que são utilizados na krigagem, que faz as estimativas de valores não amostrados da área de estudo.

Os dados de Hg foram tratados utilizando os procedimentos geoestatísticos, com objetivo de gerar um mapa de probabilidade das concentrações de Hg, que excederam o limite permitido pelo Conama (0,0002 ppm), e a partir daí construir mapas de classificação das áreas contaminadas para os valores médios e medianos. Neste caso, foi estabelecido os valores de 80%, 85% e 90%, ou seja, para os 20%, 15% e 10% valores acima dos estabelecidos pelo órgão regulador, respectivamente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área da pesquisa

O município de Santarém, parte importante da nossa pesquisa, está localizado entre os paralelos 2° 20' S e 2° 40' S e os meridianos 54° 35' W e 55° 05' W (IDESP, 2016), na região da foz do rio Tapajós, confluências com o rio Amazonas, mesorregião do Baixo Amazonas e à microrregião Santarém na porção oeste do estado, coordenadas 02° 25' 30" S e 54° 42' 50" W Gr, (IDESP, 2016 e BRASIL, 1976 – Figura 1). Possui área de 22.886,624 km², população estimada para 2013 de 288.462 mil habitantes, área de 22.887 km² e densidade demográfica de 12,8 hab./km² (IBGE, 2016). A área urbana situa-se na confluência do rio Tapajós com o Amazonas, e é um antigo centro urbano cuja

existência remonta à ocupação colonial. A área pertence à mesorregião n. 011, do Baixo Amazonas e a microrregião n. 032, de Santarém (TANCREDI, 1996).

Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Tapajós e Santarém



Fonte: Do autor (2016)

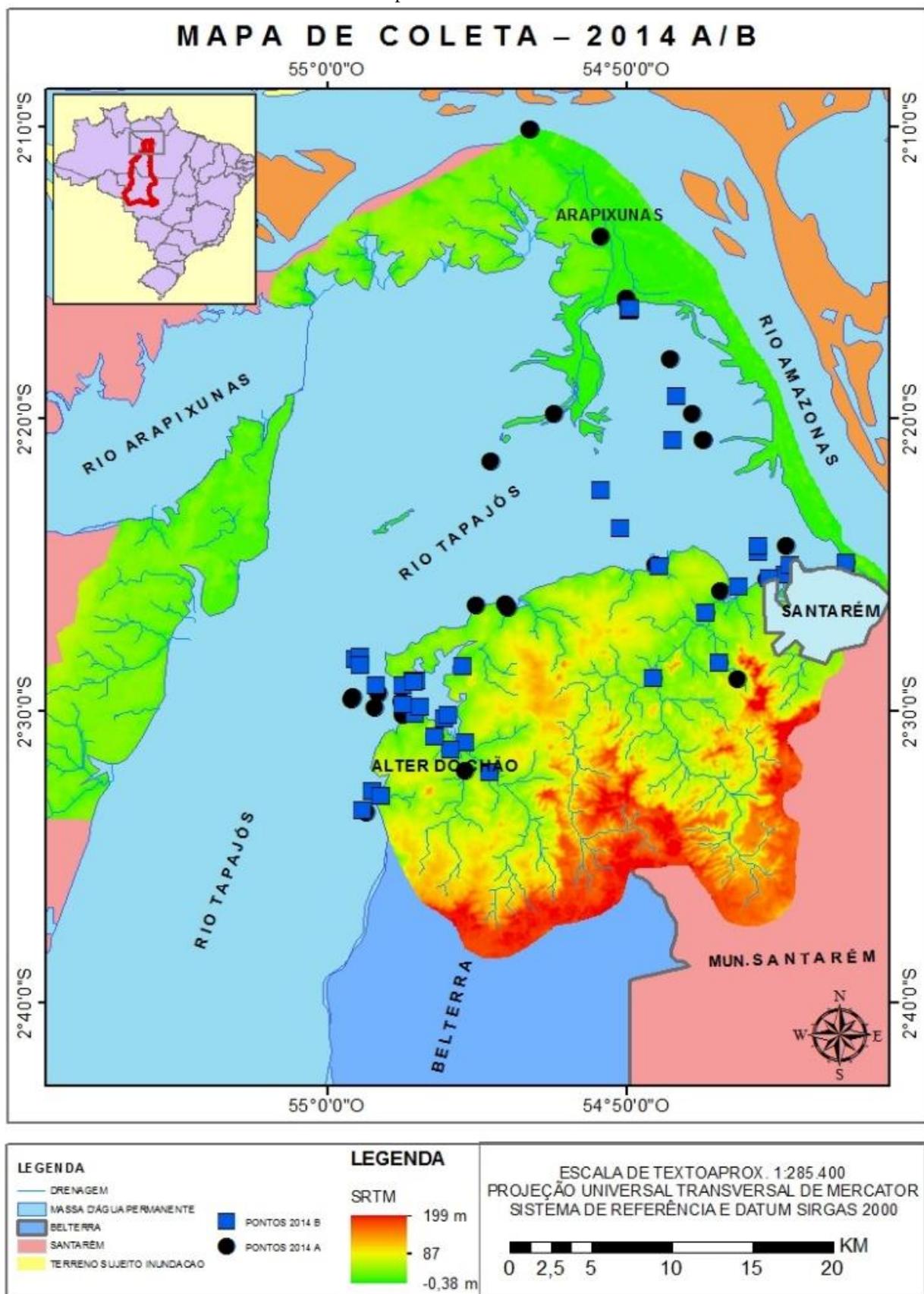
Localização dos pontos de coletas das amostras

Para seleção dos locais de coleta das amostras de água em 2014 foi utilizada como metodologia, 37 amostras na primeira campanha (nos dias 18 a 28 de julho de 2014) e 45 amostras na segunda campanha (13 a 20 de dezembro de 2014), no total de 82 amostras, no período que vai de chuvoso a menos chuvoso da bacia amazônica, respectivamente (Figura 2).

Determinação dos teores de mercúrio nas amostras

As análises laboratoriais para determinar os valores de mercúrio total encontrado nas amostras foram realizadas por Espectrofotometria de Absorção Atômica, com geração de vapor frio, no Laboratório Central do Estado do Pará, em Belém-PA. Os resultados tiveram como referência a resolução n. 357/05, do CONAMA. Em campo, foram coletados cerca de 5 litros de amostras, em frascos de polipropileno. O procedimento de decantação/floculação com sulfato de alumínio, foi feito esvaziando o sobrenadante em campo e transferindo os resíduos úmidos para tubos do tipo *Falcon*. Quando houve necessidade de outro tipo de procedimento, em virtude das dificuldades logísticas na região amazônica, ocorreu o procedimento para material particulado/suspensão amostrado diretamente em frascos *falcon* com centrifugação em campo, segundo o protocolo metodológico indicado pelo LACEN.

Figura 2 – Área de amostragem em Santarém, com os respectivos pontos de coleta na primeira e segunda campanha de 2014



Fonte: Do autor (2016)

Método geoestatístico

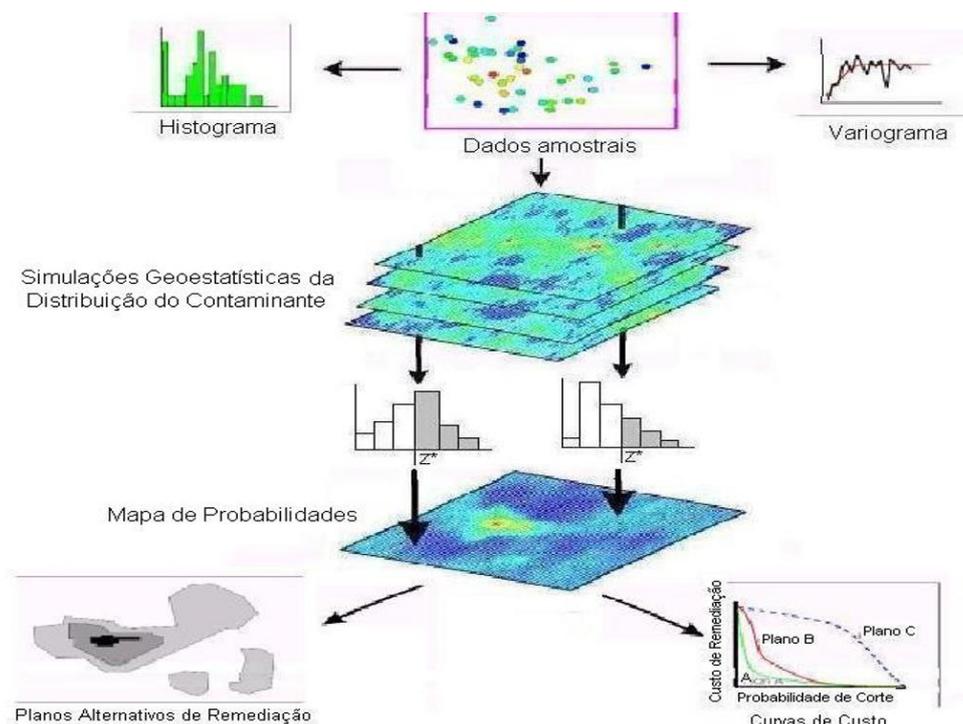
As principais etapas da modelagem geoestatística são apresentadas na Figura 3. Inicialmente é realizada a análise exploratória para averiguar se as distribuições das amostras satisfazem as exigências (normalidade e estacionaridade) para a construção dos modelos geoestatísticos. Em seguida, é feita a modelagem da distribuição espacial por meio de variogramas. Os parâmetros do modelo do semivariograma, incluindo alcance (a), patamar (C) e efeito da pepita (C_0) (QUEIROZ, 2001; 2003) (Figura 4).

- Alcance (a): A distância ao qual as amostras apresentam-se correlacionadas especialmente;
- Patamar (C): O valor do semivariograma corresponde a seu alcance (a). Deste ponto em diante, a variância da diferença entre pares de amostras $\{\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]\}$ torna-se aproximadamente constante;
- Efeito pepita (C_0): representam variações não explicadas pelo modelo de distribuição espacial. No caso ideal, (C_0) é igual 0.

Na prática, à medida que h tende para zero, $\gamma(h)$ aproxima-se de um valor positivo chamado efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma variabilidade ao acaso. Parte dessa descontinuidade pode ser também por erros de medição, sendo impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem (CAMARGO; FUNKS; CÂMARA, 1998).

Os resultados dos modelos espaciais são então utilizados para o mapeamento das variáveis em estudo. O mapeamento pode ser feito por krigagem ou simulação. Para mapeamento em escala regional, em geral, recomenda-se a krigagem. Em casos de mapeamentos de riscos, a simulação é mais recomendada. Nos dois casos, a Geoestatística permite que sejam avaliados os erros das estimativas / simulações por meio de mapas de variância ou desvios-padrão e que seja considerada a anisotropia se estiver presente na distribuição espacial dos dados (QUEIROZ, 2003).

Figura 3 – Etapas da modelagem geoestatística



Fonte: Queiroz (2003)

Uma das principais características da geoestatística é a utilização de modelos que descrevem a correlação espacial entre as amostras nas estimativas (ou simulações) de valores não amostrados, que permitem o mapeamento das variáveis em estudo. Neste caso, a principal ferramenta de análise de variabilidade espacial é o semi-variograma. Quando se combinam todos os $n(\mathbf{h})$ pares de dados da variável $Z(\mathbf{u})$ sobre a mesma área de estudo e sendo esses pares separados aproximadamente pelo mesmo vetor \mathbf{h} (em comprimento e direção), pode-se estimar o semivariograma característico (ou experimental) da variabilidade espacial como:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2n(\mathbf{h})} \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{h})} [z(\mathbf{u}_{\alpha}) - z(\mathbf{u}_{\alpha} + \mathbf{h})]^2 \quad (1)$$

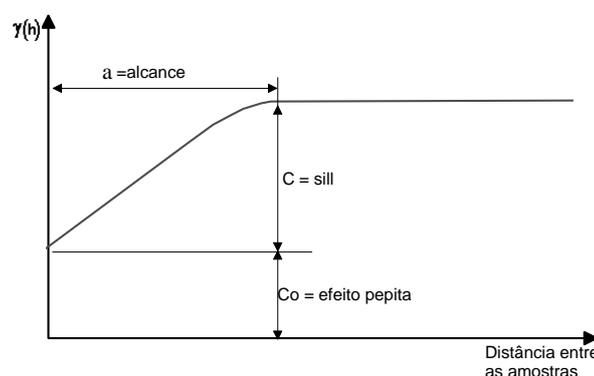
Para o modelamento do semivariograma, realizado depois de construído, é necessário que a hipótese de estacionariedade seja considerada. Ela estabelece, em resumo, que os dois primeiros momentos (média e variância) da diferença $[Z(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u} + \mathbf{h})]$ são independentes da localização \mathbf{u} e função somente do vetor \mathbf{h} .

O principal modelo de semivariograma, referido como *modelo esférico* (Figura 4) é expresso matematicamente, em termos gerais, como

$$\begin{aligned} \gamma(\mathbf{h}) &= C_0 && \text{para } \mathbf{h} = 0 \\ \gamma(\mathbf{h}) &= C_0 + C \left(\frac{3a}{2\mathbf{h}} - \frac{a^3}{2\mathbf{h}^3} \right) && \text{para } 0 < \mathbf{h} \leq a \\ \gamma(\mathbf{h}) &= C_0 + C && \text{para } \mathbf{h} > a \end{aligned} \quad (2)$$

Em que C_0 é a variabilidade aleatória inerente das amostras na distância zero, denominado efeito pepita. A distância na qual as amostras tornam-se independentes uma das outras é representada por a , referida como a faixa de influência (ou alcance). A semivariância constante onde os valores de $\gamma(h)$ são nivelados a distâncias maiores do que a , é representada por $C_0 + C$, onde C é referido como o patamar (ou *sill*) do semivariograma. Os parâmetros do modelo são determinados iterativamente por meio do ajuste do modelo aos resultados da análise do semivariograma amostral. O modelo resultante é uma medida da variabilidade da amostra assumindo que as amostras são representativas, ou seja, uma medida da variabilidade da variável regionalizada.

Figura 4 – Modelo de semivariograma esférico



Depois que o modelo de dependência espacial é estabelecido, pode-se direcionar o problema da estimação de um valor desconhecido $z(\mathbf{u})$ a partir dos valores disponíveis. O objetivo não é somente encontrar uma estimativa $z^*(\mathbf{u})$ do valor desconhecido, mas também o modelamento da incerteza sobre essa estimativa. A incerteza é dependente da informação disponível, dos valores observados $z(\mathbf{u}_\alpha)$'s e do modelo de dependência espacial estabelecido. A krigagem é a designação genérica adotada na Geoestatística para uma família de algoritmos de regressão por mínimos-quadrados baseados no estimador de regressão linear $Z^*(\mathbf{u})$ e definido como:

$$Z^*(\mathbf{u}) - m(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}(\mathbf{u}) [Z(\mathbf{u}_{\alpha}) - m(\mathbf{u}_{\alpha})] \quad (3)$$

Em que $\lambda_{\alpha}(\mathbf{u})$ é o peso atribuído a cada valor observado $Z(\mathbf{u}_{\alpha})$ localizado dentro de determinada vizinhança $W(\mathbf{u})$ centrado na localização \mathbf{u} . Os pesos $\lambda_{\alpha}(\mathbf{u})$ são calculados, a partir do modelo semivariográfico, de forma a minimizar a estimação ou erro da variância $\sigma_E^2(u) = Var[Z^*(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u})]$ sob a condição de não tendenciosidade do estimador.

O risco probabilístico na Geoestatística

O conceito de risco utilizado nessa pesquisa é o risco probabilístico da Geoestatística, como afirmam Opromolla; Dalben; Cardim (2006), que utilizaram técnicas de Geoestatística para a detecção das áreas de probabilidade de risco para hanseníase e quantificação da dependência espacial dos dados ou Lourenço (2006), que trabalha com mapas mostrando áreas de risco à saúde pública, com indicação dos locais com maiores probabilidades de contaminação do solo, e faz referência à necessária identificação das áreas que possam apresentar maior probabilidade de risco. Queiroz (2003) afirma que nos campos da saúde, segurança e ambiental, o risco é geralmente identificado como a probabilidade que indivíduos (ou uma população) estejam sujeitos à incidência de efeitos adversos, como danos, doenças ou morte causada por um agente químico em indivíduo exposto.

Na classificação do risco de contaminação na área de estudo foram utilizadas técnicas geoestatísticas que permitiram a caracterização da área no sentido de conhecer as estimativas da magnitude, extensão e localização das áreas contaminadas em localizações não amostradas, com a inclusão das medidas de incertezas associadas. Os dados de Hg foram tratados utilizando procedimentos geoestatísticos, que permitiram a análise e construção de mapas de variáveis, a partir de dados espacialmente distribuídos, para inferir resultados da localização e risco de contaminação ao longo da foz do rio Tapajós.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados analíticos para água em 2014

Os valores de Hg nas amostras coletadas ao longo do Furo do Arapixunas, especialmente na entrada do rio Amazonas, que é onde ele recebe um volume significativo de águas barrentas do rio, forçando-o para dentro da foz em sua extremidade

oposta, foram elevados, podendo estar relacionados à grande quantidade de matéria orgânica em suspensão trazidas por este rio para dentro do pequeno furo. Foi observado que a concentração de 5,15 ($\mu\text{g/L}$) na Boca do Arapixunas (Foz do Amazonas), seria um *out lie*, que exigiriam um monitoramento mais detalhado da contribuição do Amazonas para o sistema (Tabela 1a).

Tabela 1a – Resultados das amostras de água na primeira campanha

RESULTADOS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA NA PRIMEIRA CAMPANHA			
Material de Referência NIST 1641d		Elemento Hg	Concent. ($\mu\text{g/L}$)
01	Boca do Arapixunas (Saída para o Amazonas)	Hg	0,91
02	Boca do Arapixunas (Entorno de Macrofitas)	Hg	0,91
03	Boca do Arapixunas (Foz do Amazonas)	Hg	5,15
04	Vila de Arapixunas	Hg	1,25
05	Arapixunas (Saída pra Alter-do-Chão)	Hg	0,48
06	Arapixunas (Saída do Delta)	Hg	0,60
07	Ponta do Sururu	Hg	0,60
08	Ponta do Piriquito	Hg	0,48
09	Foz do Tapajós (Amostra 1)	Hg	0,63
PADRÃO 2ppb			1,99
BRANCO			0,06
NIST 1641d spike		1,00	0,94
Hg			94,50%

Fonte: Do autor (2016)

As concentrações em 5 amostras da primeira campanha de 2014 (Tabela 1), Ponta do Tauá, Foz do Tapajós (Ponta do Cururu), Foz do Tapajós (Amostra 4) e Foz do Tapajós (Amostra 5) apresentam limite ótimo de detecção (LOD - 0,011 ppb), menor do que pode ser quantificada por este procedimento experimental utilizado nesse trabalho. Com isso, não se pode afirmar que há concentrações de Hg nas amostras em questão, apenas não foram determinadas e quantificadas por essa técnica.

Tabela 1b – Resultados das amostras de água na primeira campanha

PADRÃO 5ppb			4,23
BRANCO			0,66
NIST 1641d			-0,18
32	Boca do Lago Verde (Fim)		1,51
33	Ponta do Cururu		0,83
34	Ponta do Tauá		0,011
35	Foz do Tapajós (Ponta do Cururu)		0,011
36	Foz do Tapajós (Amostra 4)		0,011
37	Foz do Tapajós (Amostra 5)		0,011

Fonte: Do autor (2016)

A média encontrada para amostras da primeira campanha de 2014 foi de 1,146 ($\mu\text{g/L}$) média acima de 0,119 $\mu\text{g/L}$, encontrados no rio Rato por Silva (1997) e nos afluentes do rio Acre de 0,116 $\mu\text{g/L}$, por Mascarenhas et al. (2004). Nas amostras da segunda campanha de 2014, somente 4 (quatro) amostras: Boca do Igarapé do Camarão, Boca do Igarapé do Camarão (Amostra Direta), Igarapé do Miritiapina (Nascente II) e Igarapé Miritiapina (Amostra Direta), apresentaram limite de detecção (LOD) acima do detectável. As demais amostras, 41, não puderam ser quantificadas, por estar abaixo do LOD. Esse fato pode ser justificado por ser um período de estiagem e a maioria das amostras encontram-se dentro da foz, fato que facilita a adsorção do mercúrio nesse tipo de ambiente.

Principais estatísticas descritivas da variável Hg em 2014

Na avaliação dos dados de concentração de mercúrio, a Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas para os meses de julho e dezembro de 2014, em que se observa a ocorrência de valores bem acima dos estabelecidos pelo CONAMA, principalmente, julho. No mês de dezembro, a maioria dos valores (mais de 75%) encontram-se abaixo do LOD. Devido à grande quantidade de valores abaixo do LOD observa-se maior variabilidade no mês de dezembro em relação a julho. Isso é mostrado pelos desvios-padrão e pelas medidas de média e mediana mais distantes entre si no mês de dezembro.

Tabela 2 – Resumo estatístico para as concentrações de mercúrio (ppb), 2014

Estatísticas	Dez.	Jul.
Mínimo	0,011	0,011
Quantil 25	0,011	0,710
Mediana	0,011	1,020
Média	0,443	1,155
Desvio padrão	2,622	1,016
Quantil 75	0,011	0,710
Máximo	17,6	5,15
Intervalo	17,589	5,139
Contagem	45,000	37,000
Conama	0,2	0,2

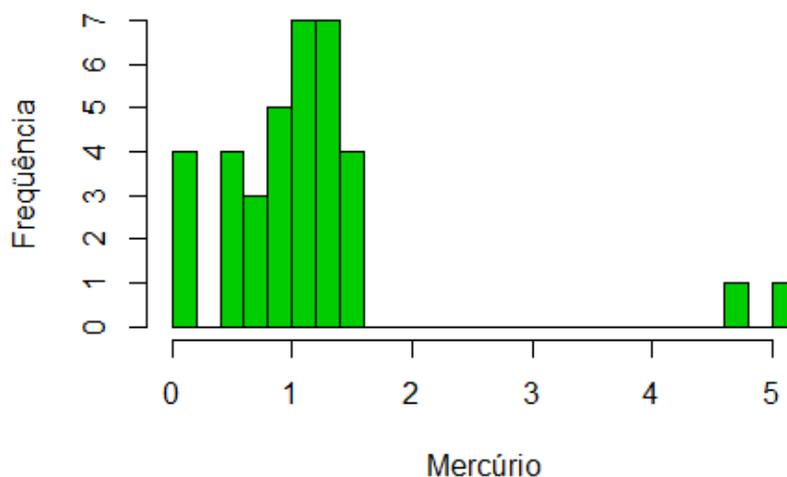
(*) LOD < 0,011 ppb

Fonte: Do Autor (2016)

A Figura 5 mostra o histograma das concentrações de mercúrio em mg/l Hg (equivalente partes por milhão (ppm)) na primeira campanha de 2014. A cauda mais longa

do histograma indica a presença de pequeno número de alta concentração. Muitas vezes é importante conhecer a proporção de valores que excedem um limite máximo permitido para que se tenha, por exemplo, uma ideia preliminar da ação de remediação a ser realizada.

Figura 5 – Histograma para variável Hg, na primeira campanha de 2014.



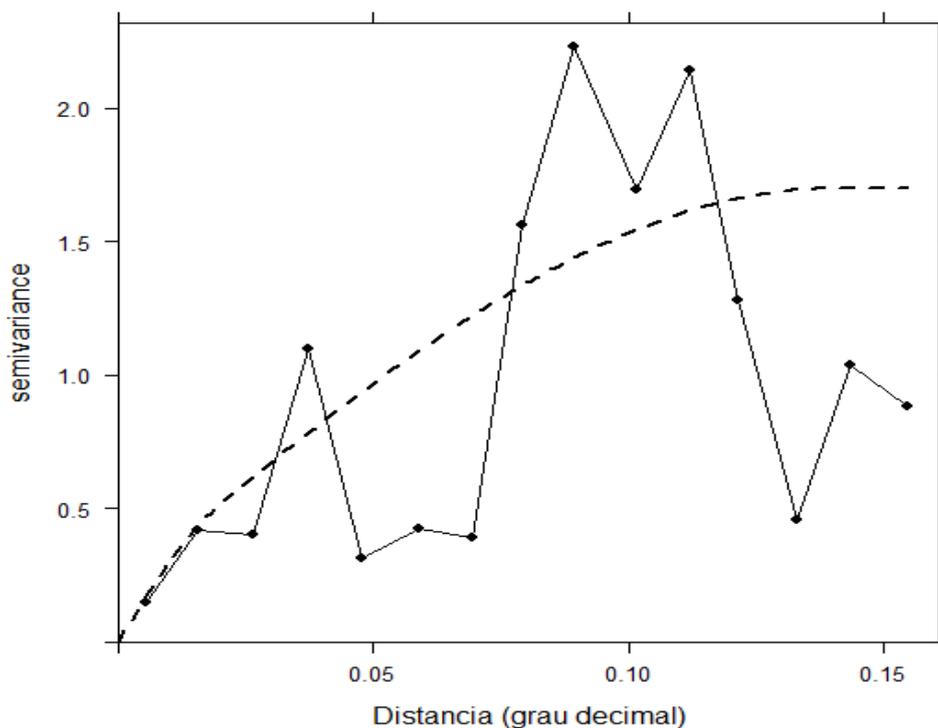
Fonte: Do autor no "R" (2016)

Resultados das análises geoestatísticas

Os dados foram submetidos à análise geoestatística para a realização do mapeamento das concentrações de mercúrio. Segundo Guimarães (2004), a escolha do modelo de variograma a ser utilizado é um dos aspectos mais importantes da Geoestatística. Todos os cálculos dependem do modelo de variograma ajustado e, conseqüentemente, se o modelo ajustado não for apropriado, todos os cálculos seguintes conterão erros que poderão afetar as inferências.

Para realizar predições espaciais por meio de krigagem é preciso construir um modelo de semivariograma aceitável. Parte da razão para isto é que o algoritmo de krigagem terá acesso a valores de semivariância para distâncias diferentes das utilizadas no semivariograma experimental. Na Figura 6 é apresentado o semivariograma experimental (linha contínua) e o modelo semivariográfico ajustado. Foi ajustado um duplo modelo esférico com efeito pepita ($C_0=0$), patamares $C_1 = 0,2$ e $C_2 = 1,5$, alcances $a_1 = 0.02$ e $a_2 = 0.14$.

Figura 6 – Semivariograma experimental (linha contínua) e modelo ajustado (linha tracejada) para o mercúrio



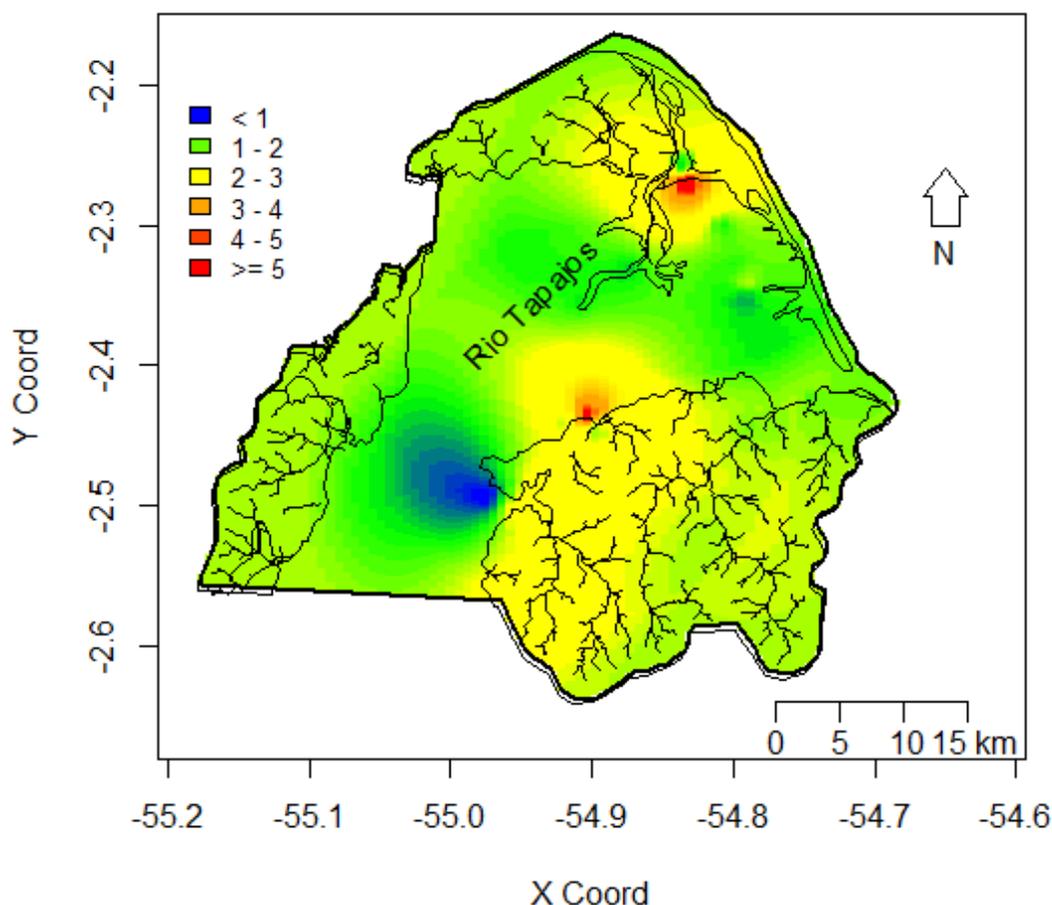
Fonte: Do autor no "R" (2016)

Com os resultados do modelo semivariográfico pôde-se aplicar a krigagem para o cálculo das estimativas dos valores de concentração de mercúrio em localizações não amostradas no campo. Com a malha de pontos interpolados, tem-se um maior detalhamento da área em estudo, e uma melhor visualização do comportamento da variável na região, devido ao aumento do número de observações (DEUTSCH; JOURNAL, 1997).

A partir dos dados interpolados pela krigagem pôde-se construir o mapa da distribuição da concentração do mercúrio na área de estudo (Figura 7), onde se pode observar duas zonas de concentração Hg ao longo da foz do Tapajós. A região do Lago Preto, na comunidade de Itaparí, margem direita do rio, e a foz interna do furo do Arapixunas (região dentro da foz: Boca do "rio" Arapixunas), estes são os locais que apresentam maior probabilidade de ocorrer contaminação por Hg.

Não foi possível construir o mapa das concentrações na segunda campanha em virtude da maioria das amostras encontrarem-se abaixo do limite de detecção do método. Nesta campanha, apenas quatro pontos puderam ser quantificados.

Figura 7 – Mapa da concentração de Hg para as amostras 2014 A, com a hidrografia



Fonte: Do autor (2016)

MAPAS DE PROBABILIDADES OU DE RISCOS DE CONTAMINAÇÃO

Modelos de incerteza locais para o risco de contaminação

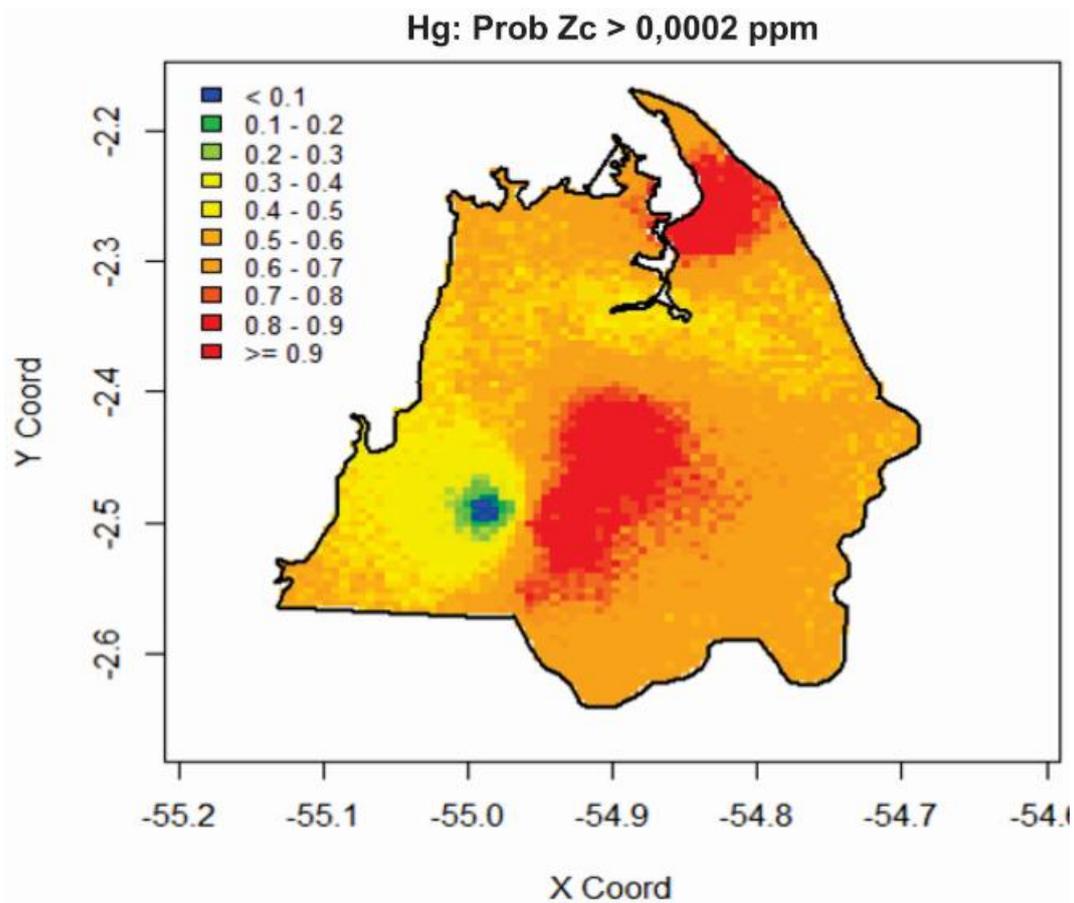
Uma localização não amostrada pode ser classificada com base na estimativa de seu verdadeiro valor ou, alternativamente, na probabilidade de que o ponto esteja abaixo (ou acima) de um determinado valor de corte. Estimativas envolvem erros. Erros estão sujeitos a custos. Se um ponto é incorretamente classificado como alto quando, na realidade, é baixo, há um custo de super classificação (ou super estimativa). Ao contrário, se o ponto é incorretamente classificado como baixo quando, na verdade, é alto, há um custo de subclassificação (ou subestimativa).

No caso de contaminação ambiental, a super estimativa da extensão da contaminação aumentará o custo de remediação, mas a subestimativa da contaminação poderá resultar em perdas prematuras de vidas, ou alto custo de saúde. Em tal situação, o

custo de subestimativa pode ser muito maior do que o custo de super estimativa. A unidade de custo de super estimativa e subestimativa depende de cada situação.

A avaliação da incerteza pode ser representada por mapas de probabilidades das concentrações da variável em estudo. Neste caso, são representadas as probabilidades de ocorrência acima de determinado ponto de corte, em geral, definido pela legislação. Na Figura 8 é mostrado o mapa de probabilidades para o mercúrio, com destaque para duas regiões com probabilidade acima de 80% das concentrações apresentarem valores superiores a 0,0002 ppm (limite estabelecido pelo CONAMA). Esses locais foram identificados nas regiões de Arapixunas e Itaparí, margem esquerda e direita do Tapajós, respectivamente.

Figura 8 – Mapas de probabilidade das concentrações de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm



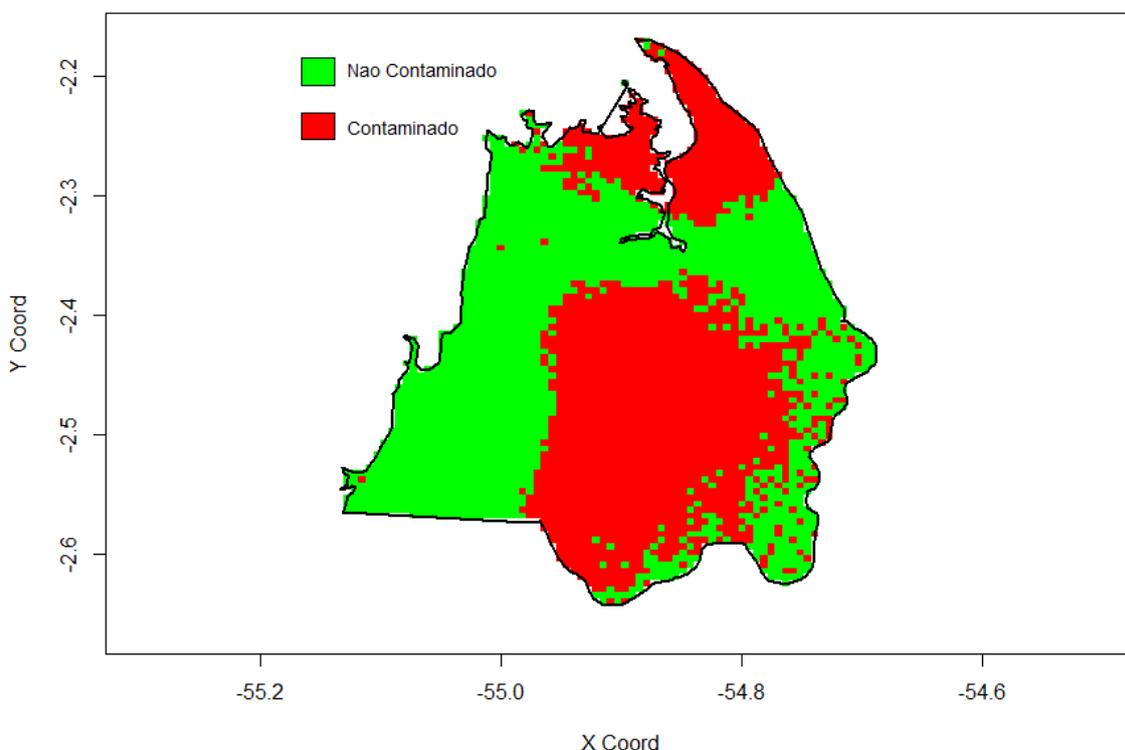
Fonte: Do autor (2016)

Mapas de Classificação com probabilidade de contaminação acima de 80%, 85% e 90%

Com base no mapa de probabilidade pôde-se construir mapas de classificação das áreas contaminadas para os valores médios, medianos ou *quantis*. Neste caso, foram elaborados mapas com os quantis, 80%, 85% e 90%, ou seja, para os 20%, 15% e 10% valores acima dos estabelecidos pelo CONAMA, respectivamente. A área da pesquisa corresponde a 115,950 km², a partir dos resultados gerados e o tamanho dos *pixels* do vetor produzido, foi possível chegar aos tamanhos das áreas classificadas como contaminadas ou não contaminadas, sendo que cada *pixel* tem uma área de 100x105 m.

Para o mapa de classificação que utilizou o quantil 80% (Figura 9), a área contaminada (em vermelho no mapa) corresponde a 30,06% da área total, o que corresponde a 34,06 km², e 69,93% de probabilidade de a área não estar contaminada, ou seja, 81,89 km², da área da pesquisa.

Figura 9 – Mapa de Classificação com probabilidade acima de 80% de contaminação de Hg exceder o limite máximo permitido de 0,0002 ppm

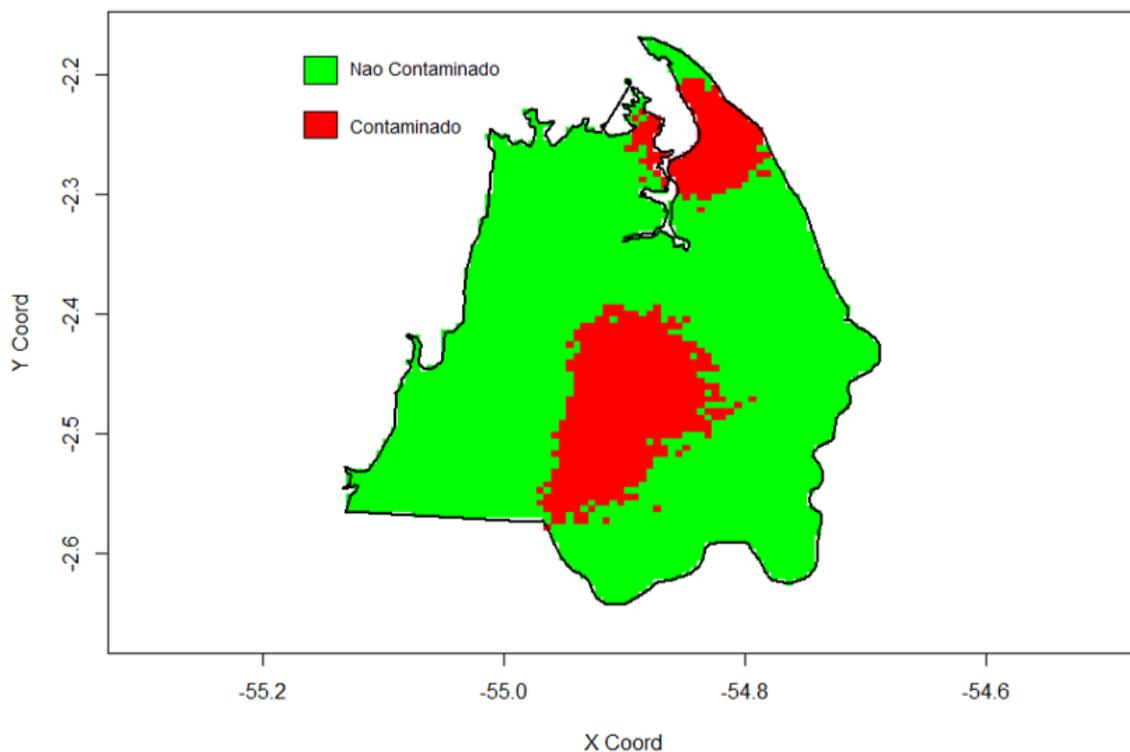


Fonte: Do autor (2016)

Para a classificação das localizações com base na probabilidade das concentrações acima dos limites máximos permitidos serem maiores do que 85% de contaminação

(Figura 10), foram encontrados os seguintes valores: de 7,81% de probabilidade da área estar contaminada, ou 9,05 km², e 92,18%, de probabilidade da área não estar contaminada ou 106,89 km².

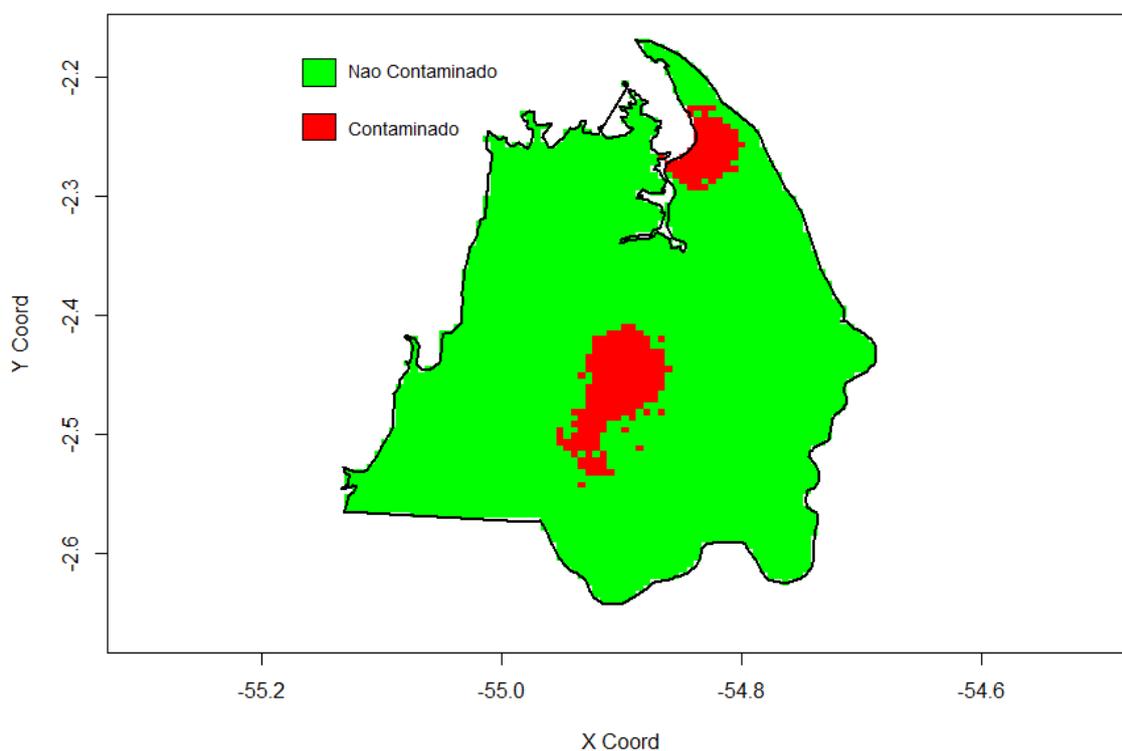
Figura 10 – Mapa de Classificação com probabilidade acima de 85% de contaminação de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm



Fonte: Do autor (2016)

Para classificação das localizações com base na probabilidade das concentrações acima dos limites máximos permitidos serem maiores do que 90% de contaminação (Figura 11). Esses valores são 7,81% de probabilidade da área está contaminada ou 3,30 km², e 92,18%, de probabilidade da área não estar contaminada ou 106,89 km² da área estudada.

Figura 11 – Mapa de Classificação com probabilidade acima de 95% de contaminação de Hg excederem o limite máximo permitido de 0,0002 ppm



Fonte: Do autor (2016)

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Entre as análises espaciais realizadas nos dados de Hg, considerando os meses de julho e dezembro, observou-se que a distribuição dos valores de Hg não ocorre da mesma proporção nos dois períodos. As amostras que apresentaram maiores valores de mercúrio ocorreram preponderantemente em julho e sofreram uma retração em dezembro, especialmente ao longo da foz, podendo estar associado à adsorção desse metal. Os valores mais elevados no período de cheia do rio Tapajós estão relacionados ao possível enriquecimento das concentrações de Hg nos sólidos em suspensão nesta região, devido aos solos regionais e ao aumento da erosão provocada pela expansão da agricultura, segundo Gomes (2007).

O padrão da distribuição espacial dos valores apresentados nos mapas de probabilidade sugere que, no período de julho, predomina os processos de deposição e mobilização do Hg no sedimento, pois a maior adsorção do mercúrio está associada ao aumento dos teores de compostos (óxidos e hidróxidos) de ferro, alumínio e manganês e matéria orgânica nos sedimentos. Neles, os teores iônicos principalmente de sódio e potássio, bastante elevados, contribuem significativamente para a elevação da força

iônica local, agindo de forma a promover a mobilização do mercúrio. Nos sedimentos, o mercúrio acha-se associado à matéria orgânica e pouca influência têm os óxido-hidróxidos presentes, evidenciado no diagrama triangular (Hg/Fe/Al) (HYPOLITO, 2005 e LONGO, 2012).

É nessa época que ocorre o maior aporte de material transportado das áreas mais altas para as mais planas, sobretudo de material particulado, funcionando como um importante veículo de transporte de Hg e se atribui a esse processo de erosão através do escoamento superficial da água das chuvas após lavagem e lixiviação dos solos da região, carregando elementos-traço para o talvegue (GOMES, 2007)

Com a chegada de dezembro, o Hg é adsorvido aos sedimentos da foz e eles são transportados para o sistema hidrológico da foz do Tapajós, até área mais distante (PALHETA, 2011). O transporte desse mercúrio se dá com maior eficiência em áreas próximas a canal, pois apresentam grande vazão e como o Tapajós é um rio de foz afogada (SOUSA, 2009), o estreitamento do canal próximo à área urbana de Santarém, empreende ao rio grande força e velocidade, interligando-o ao Amazonas. Foi observado em trabalho de campo que nesta área há um fluxo muito grande de água que drena a foz para dentro do rio Amazonas, conseqüentemente, facilitando o transporte de sedimentos do fundo da foz do Tapajós, com mercúrio adsorvido para o Amazonas (LACERDA, 2009).

A distribuição espacial das amostragens por krigagem ordinária evidenciadas, apontam para áreas de maior concentração de Hg, relacionadas a regiões de ocorrência das maiores deposições de sedimentos, presença de matéria orgânica em grandes concentrações, como na boca do Arapixunas e comunidade do Itapari. Tais observações diretas nos mapas de probabilidade mostram para uma correlação direta da presença de matéria orgânica e maior concentração de Hg. Muito embora não seja conclusivo estabelecer uma relação direta entre estes valores, é possível fazer uma correção entre a formação de zonas de preferências de deposição de sedimentos e acumulação de mercúrio (JAQUET, 1989).

A presença do furo do Arapixunas, que funciona como um canal de ligação entre os rios Amazonas e Tapajós, é outro fator a se considerar, pois no mês de julho, a bacia amazônica facilita a deposição de sedimentos pelo Amazonas dentro da foz do Tapajós e o sentido inverso por volta do mês de dezembro, daí a associação com os elevados valores encontrados na Boca do Arapixunas. Fenômeno parecido é apontado por Maurice-Bourgoin et al. (1999), quando estudou o rio Beni, afirmando que o Hg adsorvido as partículas sedimentares é enriquecido pelos solos regionais em óxido e hidróxido de Fe,

durante a estação chuvosa. Assim, ele seria transportado para área mais baixa e, por analogia, esse mesmo fenômeno pode estar ocorrendo na foz do Tapajós.

Outro fator a ser levado em consideração, apontado pela literatura especializada é a presença da Formação Alter-do-Chão no entorno da foz, a qual teria uma importante contribuição para essa correlação, pois é uma região de altitude média maior do que das do entorno da foz e possui uma grande concentração de Fe, que faria importantes ligações com o Hg, associado à matéria orgânica depositado pelo Amazonas, o que estaria justificando os elevados valores encontrados na localidade (BRABO, 2010; WASSERMAN, 2001).

O desflorestamento, a atividade de monocultura e agricultura de subsistência, responsável pelo processo erosivo ao longo da foz e a montante, libera o mercúrio contido no solo e arrasta o mercúrio adsorvido as partículas orgânicas e inorgânicas para dentro do sistema aquático, logo seria outra variável a ser levada em consideração para justificar o elevado valor quantificado de Hg em alguns pontos da área amostrada (LACERDA, 2009).

Levando em consideração que a bacia do rio Tapajós, ao longo das décadas, foi bastante impactada por projetos agropastoris e minerais, e grandes projetos, como a construção de hidrelétricas em andamento ou projetadas, pode ser outro fator responsável por esta contaminação e observação de valores mais elevados em amostras futuras, quando em função dos grandes empreendimentos hidrelétricos a montante da bacia estiverem em andamento ou implantados.

A atividade mineradora artesanal, ao longo das últimas décadas, é outra variável a ser considerada, pois, os garimpos artesanais ao longo das décadas de 1980 e meados de 1990, contribuíram para remoção do solo do médio e alto curso do rio, assim como a deposição direta de Hg, com o processo de amálgama da queima do ouro, sem a menor tentativa de conter o vapor ou o metal em estado líquido, mesmo considerando que o vapor entraria no sistema global de mercúrio (SANTOS et al. 1995; 2000).

No mês de dezembro, quando ocorreu a segunda campanha, a maioria dos valores (mais de 75%) encontram-se abaixo do LOD. Devido à grande quantidade de valores abaixo do LOD observa-se maior variabilidade no mês de dezembro em relação a julho. Isso é mostrado pelos desvios-padrão e pelas medidas de média e mediana mais distantes entre si no mês de dezembro.

Chama atenção esses resultados por ser um período não favorável a grandes concentrações de matéria orgânica, e a adsorção do Hg pode estar ocorrendo com mais

intensidade (não quantificados pelo método), podendo ser um fator que contribuiu para esses resultados.

CONCLUSÃO

A utilização da krigagem como método de interpolação foi de fundamental importância para o cálculo das estimativas dos valores de concentração do mercúrio em localização não amostradas durante as etapas de campo. Pôde-se, deste modo, obter um maior detalhamento da área de estudo e melhor visualização do comportamento da variável pesquisada ao longo da região, que foi visualizada no mapa de distribuição das concentrações.

O uso dessa ferramenta permitiu a avaliação quantitativa das concentrações de mercúrio na foz do rio do Tapajós. Com o mapeamento das concentrações pôde-se ter uma ideia das localizações, suas extensões e onde se concentram os mais altos níveis de concentração de mercúrio. Com o uso de mapas probabilísticos ou de riscos pôde-se quantificar, em termos percentuais ou probabilísticos, o grau do perigo que pode estar sendo submetida à população que se localiza nas áreas de maior risco.

Os mapas de classificação das áreas contaminadas podem servir de base para planos de remediação, de prevenção ou de segurança por parte das agências interessadas. Essa prática é utilizada em várias partes do mundo, sobretudo, quando se trata de contaminações de origem antrópica, como resíduos industriais, garimpos, fábricas etc., onde se pode utilizar mapas de classificação para a negociação de planos alternativos de remediação com os atores responsáveis pelo problema.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. **Análise geoestatística das concentrações de mercúrio no lago Puruzinho – Amazônia Ocidental**. 2006. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Núcleo de Ciências e Tecnologia, Porto Velho, 2006.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n. 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, 2005.
- DEUSTCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB. Geostatistical Software Library and Uses's Guide**. New York: Oxford University Press, 1997.
- GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: UFU, 2004.
- HYPOLITO, R; FERRER, L. M.; NASCIMENTO, S. C. Comportamento de espécies de mercúrio no sistema sedimento-água do mangue no município de Cubatão, São Paulo. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 15-24, 2005.
- IBGE. **Dados do município de Santarém/PA**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 21 out. 2011.
- _____. **Glossário Geológico**. Rio de Janeiro, 1999.
- _____. **Santarém-Pa**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2011.
- _____. **Notas técnicas: Histórico da investigação sobre cor ou raça nas pesquisas domiciliares do IBGE**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 fev. 2015.
- KRIGE, D. G. Half a Century of Geostatistics from a South African Perspective. In: 6TH INTERNATIONAL GEOSTATISTICS CONGRESS, 2000. **Anais...** 2000.
- JAQUET, O. Factorial kriging analysis applied to geological data from petroleum exploration. **Mathematical Geology**, v. 21, n. 7, 1989.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998.
- LACERDA, L. D.; MALM, O. Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: uma análise das áreas críticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 173-190, 2008.
- LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 150-160, 2005.
- MAURICE-BOURGOIN, L. et al. Mercury pollution in the Upper Beni River, Amazonian Basin: Bolivia. **Ambio**, n. 28, p. 302-306, 1999.

OPROMOLLA, P. A.; DALBEN, I.; CARDIM, M. Análise geoestatística de casos de hanseníase no Estado de São Paulo, 1991-2002. **Revista Saúde Pública**, 2006, v. 40, n. 5, p. 907-13.

PALHETA, D. C. et al. Mercúrio e alumínio em tecidos de peixe no estado do Pará: considerações sobre neurotoxicantes na região amazônica do Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, p. 979-981, 2011.

QUEIROZ, J. C. B. **Utilização da geoestatística na quantificação do risco de contaminação por metais pesados, na área portuária de Santana- Amapá**. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Unesp, Rio Claro, 2003.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.21 - Santarém**. Rio de Janeiro, 1976.

SOARES, A. **Geoestatística para ciências da terra e do ambiente**. 2.ed. Lisboa: IST Press, 2006.

SOUSA, E. S. **Uso integrado de dados de sensoriamento remoto para o estudo da geologia e geomorfologia da área da foz do rio Tapajós, Santarém-PA**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para o uso e proteção**. 1996. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) – Programa de pós-graduação em Geologia e Geoquímica, UFPA, Belém, 1996.

WENDLAND, E., BARRETO, C. E. A. G., GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, p. 261-269, 2007.

WHO. **Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure**. Geneva, 2008.

4 AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO NA FOZ DO RIO TAPAJÓS, PARÁ, BRASIL, COM USO DE KRIGAGEM FATORIAL

Enilson da Silva Sousa ⁽¹⁾
Joaquim Carlos Barbosa Queiroz ⁽²⁾
Ronaldo Rocha ⁽³⁾
Aline Maria Meiguins de Lima ⁽⁴⁾

Universidade Federal do Pará – UFPA ⁽¹⁾
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail: enilson@ufpa.br ou prof.enilson@gmail.com

Universidade Federal do Pará – UFPA ⁽²⁾
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail: joaquim@ufpa.br

Laboratório Central do Estado – LACEN ⁽³⁾
Av. Augusto Montenegro, km 10 – Icoaraci – Belém-PA
E-mail: ronaldo.lacen@gmail.com

Universidade Federal do Pará – UFPA ⁽⁴⁾
Instituto de Geociências – IG
Rua Augusto Corrêa, n. 1. CEP: 66075-110 – Guamá – Belém-PA
E-mail: alinemeiguins@gmail.com

RESUMO

Até a década de 1980, os trabalhos que discutiam a questão ambiental na Amazônia voltados para a problemática mercurial, indicavam que a interferência antrópica era a única fonte de contaminação desse metal. Em meados da década seguinte, os avanços nas pesquisas apontam para o solo amazônico como a principal fonte de mercúrio (Hg) para o sistema fluvial da região. O objetivo desse trabalho é quantificar e avaliar as concentrações de mercúrio total em água e material particulado e levantar hipóteses sobre a origem dessa contaminação na Baía do Tapajós. Para quantificar as concentrações de mercúrio na área de estudo e elaborar mapas da distribuição espacial dessas concentrações utilizou-se uma ferramenta da geoestatística (krigagem fatorial) que possibilita a elaboração de mapas em diferentes escalas de variabilidade que podem estar associadas a atividades antrópicas ou de origem geogênica. Deste modo, foi possível abrir uma discussão sobre a origem da contaminação de mercúrio na Baía do Tapajós. Foram realizadas duas campanhas, uma no período de cheia e outra no período de seca do verão amazônico do ano de 2014, com 37 e 45 pontos amostrais, respectivamente. Observou-se dois locais em destaque, com elevadas concentrações. Os resultados da análise apontam para a possibilidade das concentrações de mercúrio serem associadas ao próprio meio natural, muito embora se possa ter contribuições devido a atividade antrópica, como garimpos e atividades industriais ao longo da bacia do Tapajós.

Palavras-chave: Amazônia. Contaminação por mercúrio. Krigagem Fatorial. Geoestatística.

INTRODUÇÃO

Na década de 1970 ocorre em âmbito mundial o crescimento dos movimentos ambientalistas que resultaram na realização das conferências da Biosfera (1978) e de Estocolmo (1972) (PASSOS, 2009). Logo, em seguida, houve uma mobilização para implementação de uma agenda ambiental global com importantes reflexos no cenário político mundial. A partir daí, aumentaram as preocupações com as questões ambientais e ocorreram amplos debates em muitos países sobre a degradação do meio ambiente e a perda na qualidade de vida no que tange à saúde e o bem-estar coletivo (QUEIROZ, 2003).

Na década de 1980, este debate aponta para os garimpos clandestinos na Amazônia como os maiores responsáveis pela contaminação por Hg na bacia do rio Tapajós e seus afluentes (ESTRELA, 2012). Neste momento, se alertou para a hipótese do maior bioma do planeta estar sendo sucumbido por tamanha calamidade. Este fato gerou ampla mobilização voltada para compreender como ocorria o processo de contaminação e exposição ao Hg nas populações ribeirinhas que tinham no peixe sua principal fonte proteica (TRASANDE et al., 2010).

Um novo paradigma acerca do Hg na Amazônia surge na década de 1990, pois estudos mostraram que seriam necessários dez vezes mais garimpos para justificar as quantidades de Hg observadas nos solos da região. Esta informação permitiu a compreensão de que 90% do Hg presente nos solos seria de origem natural (ROULET et al., 1998).

As pesquisas realizadas por Silva-Forsberg et al. (1999), na região do alto rio Negro, na Amazônia brasileira, apontaram que este rio, drenado por águas pretas e terrenos baixos com florestas densas, no noroeste do estado do Amazonas, seria um importante sítio de metilação, devido as suas características bem peculiares. Suas águas escuras são ácidas, com baixa concentração de material orgânico em suspensão, e presença de ácidos orgânicos dissolvidos, além de ser localizado em uma grande área de solos podzóis, que seriam os responsáveis pela presença do Hg orgânico em sua bacia (EMBRAPA, 2003).

Estudos de pesquisadores brasileiros e canadenses mostraram também concentrações elevadas de Hg em solos amazônicos, em especial, em áreas alagadas e alagáveis (solos hidromórficos e podzóis) (SOUSA, 2009). Para eles, o Hg formaria algum tipo de complexo com o ferro (Fe) (WASSERMAN et al., 2001). Contudo, a natureza destes complexos é uma incógnita, pois a relação entre estes dois metais foi

detectada a partir de coeficientes de correlação e de perfis de solo e esta associação seria comum em toda a Amazônia. Deste modo, o Hg nos solos da região seria mais de origem natural e não antropogênica como se imaginava (WASSERMAN et al., 2001).

Recentemente diversos estudos científicos têm posto em destaque a importância dos solos amazônicos como grande reservatório de mercúrio natural (BURAK, et al., 2008; MARTINS, et al., 2011; ESTRELA, 2012). Para Resende et al. (2007), o solo é uma das principais fontes de nutrientes e sedimentos que vão para os rios, lagos e mares. Logo, uma contemporânea ameaça de contaminação dos ecossistemas aquáticos tem sido vislumbrada a partir desta fonte (PELEJA, 2002).

Uma ferramenta para elaborar o mapeamento geoespacial de contaminação e classificação das áreas contaminadas por mercúrio é a Geoestatística, usada para o mapeamento da distribuição espacial de fenômenos de seus interesses (QUEIROZ, 2003). A geologia, pioneira no uso da geoestatística, se destaca na predição de minerais de interesse econômicos. Entretanto, a biologia, agronomia e geografia são outras áreas do conhecimento que vêm se aperfeiçoando no uso desta ferramenta obtendo resultados importantes que contribuem para compreensão dos seus espaços de atuação e interesse científico (CÂMARA et al., 2004). Os fundamentos da geoestatística estão na Teoria das Variáveis Regionalizadas (TRV), desenvolvida por Matheron (1960), a partir de estudos práticos de Daniel G. Krige em 1951, durante o cálculo de reservas em minas de ouro na África do Sul (CAMARGO, 2002). Atualmente, ela é aplicada em vários campos, desde as ciências da terra, atmosfera, agricultura, ciências dos solos, hidrologia, estudos ambientais e mais recentemente na epidemiologia (GUIMARÃES, 2005).

Existem diferentes técnicas de análise espacial que permitem a produção de novos mapas a partir de dados já existentes. Estas análises também são chamadas de inferências espaciais e podem ser entendidas como a geração de planos de informação a partir de dados existentes (CÂMARA et al., 2001).

Os dados ambientais, tais como concentrações de poluente, são gerados por uma série de processos físicos (emissão, transporte, dispersão) que geram padrões nas distribuições de espaço/tempo desses dados. Raramente se pode deixar de considerar as correlações no espaço e tempo em dados ambientais. A descoberta e modelagem destes padrões de correlações espaciais permitem um melhor entendimento dos processos físicos subjacentes, além de auxiliar na interpolação espacial (CARLON et al., 2001).

Uma das características de aplicações ambientais é a escassez de dados detalhados, precisos e brutos, algo frequente e parcialmente compensada pela utilização

de dados *soft*. Por isso, as ferramentas estatísticas utilizadas devem ser de natureza espacial, isto é, considerar e valorizar os padrões autoespaciais e a correlação cruzada entre variáveis, serem flexíveis para a escassez de dados, permitir tipos diferentes de dados, privilegiando os melhores dados (QUEIROZ, 2003).

O objetivo da krigagem fatorial, no caso de concentração de um metal, é levantar hipóteses sobre a origem dessa concentração, logo, é uma técnica geoestatística que permite a filtragem dos componentes espaciais identificados pelos variogramas aninhados. Na análise variográfica espera-se que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Assim, o valor absoluto da diferença entre duas amostras $z(x)$ e $z(x+h)$ deveria crescer à medida que aumenta a distância entre elas, até um valor em que os efeitos locais não tenham mais influência (LIU, 2006). Na krigagem fatorial, o objetivo não é estimar o valor de z , mas entender a origem deste valor a partir das diferentes escalas de variação espacial. Este tipo de estimador é muito usado para rastrear a concentração de metais pesados no solo (CARVALHO, 2001).

Se as escalas nas quais os diferentes fatores (humanos, geológicos) operam são muito diferentes um do outro, então eles poderiam ser observados nos semivariogramas das concentrações dos metais, que podem revelar essas escalas de variação espacial: microescala, escala local (pequeno alcance) e escala regional (longo alcance) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; FELGUEIRAS, 1999). Por exemplo, traços de metais no solo ou na água podem originar-se naturalmente de rochas ou podem ser resultado de atividades humanas, tais como mineração, resíduos industriais ou agricultura. Enquanto pouco pode ser feito para corrigir ocorrências naturais de grandes concentrações de metais, medidas podem ser tomadas para prevenir o agravamento de poluições causadas por atividades antrópicas. Se as escalas nas quais os diferentes fatores (humanos, geológicos) operam são muito diferentes um do outro, então eles poderiam ser observados nos semivariogramas das concentrações dos metais. A análise estrutural realizada com modelos semivariográficos aninhados podem revelar essas escalas (QUEIROZ, 2003).

O objetivo deste trabalho é aplicar Krigagem fatorial para avaliar o potencial de contaminação de mercúrio em materiais particulados e a geração de mapas de Krigagem fatorial nas duas escalas para estimar sua origem, se antrópica ou derivada de eventos naturais, como a geologia e/ou a hidrografia.

MATERIAIS E MÉTODOS

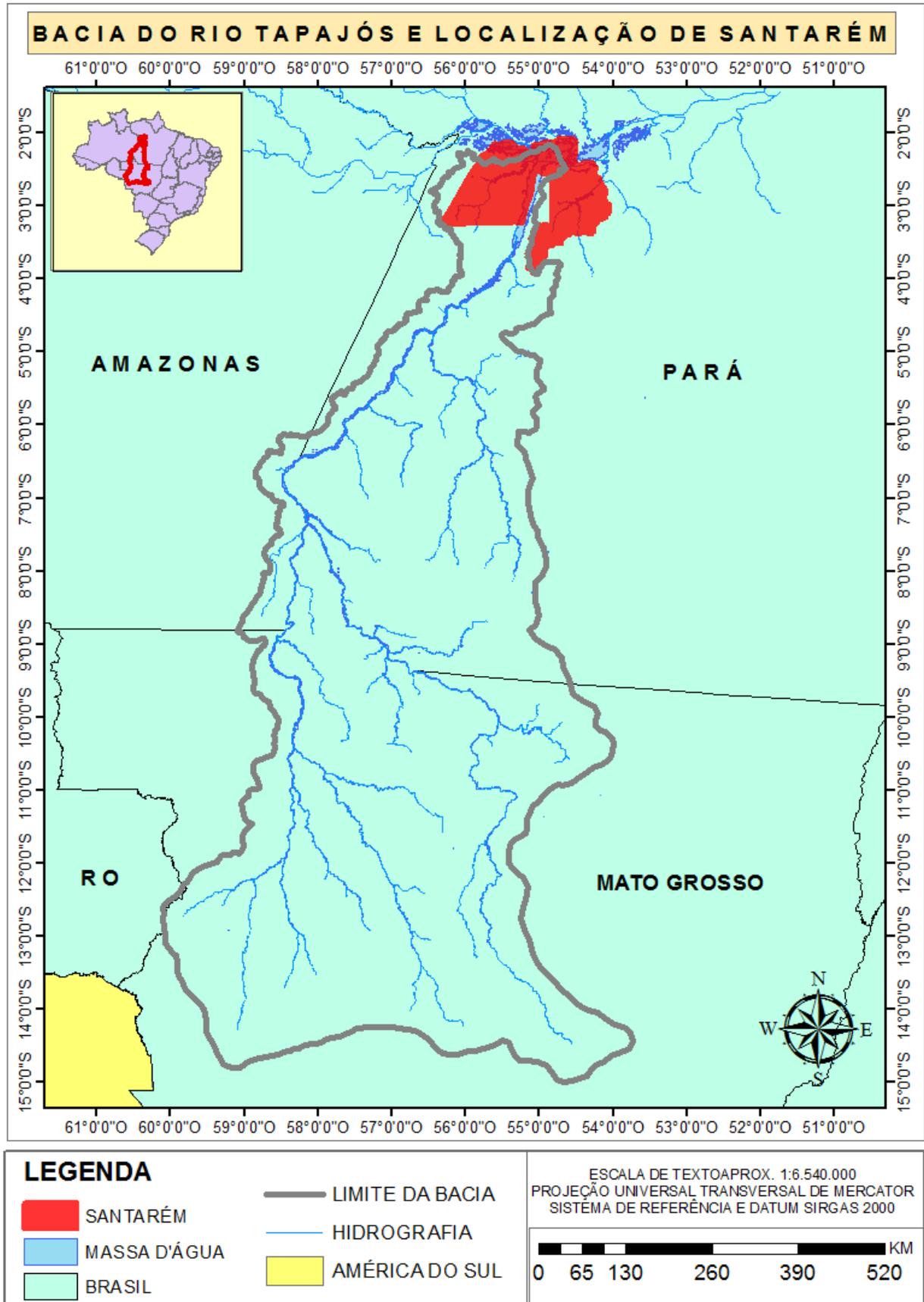
Caracterizações da área da pesquisa

O município de Santarém, área específica da pesquisa, está localizado, entre os paralelos 2° 20' S e 2° 40' S e os meridianos 54° 35' W e 55° 05' W, (IDESP/SEPOF-PA, 2016), na bacia do Tapajós (Figura 2). Possui área de 22.886,624 km², população estimada para 2013 de 288.462 mil habitantes, área de 22.887 km² e densidade demográfica de 12,8 hab./km² (IBGE, 2015). A área urbana situa-se na confluência do rio Tapajós com o Amazonas, é um antigo centro urbano cuja existência remonta à ocupação colonial. A área pertence à mesorregião 011, do Baixo Amazonas e à microrregião 032, de Santarém, (TANCREDI, 1996). Possui os seguintes limites geográficos: ao Norte, Alenquer; ao Sul, Rurópolis e Placas; a Leste: Prainha; a Oeste: Juruti; a Noroeste: Monte Alegre; Nordeste: Óbidos e Juruti; Sudeste: Prainha e Uruará; Sudoeste: Belterra.

Para a análise dos dados com uso da Geoestatística foram utilizados os programas “R” versão 2.10.0 (R. DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008) e o *Arcgis* versão 10.1.

Os dados utilizados nos processos são pontos georreferenciados referentes as localizações dos locais de coletas no entorno e ao longo da foz do Tapajós, margem direita, em Santarém. Totalizando 82 pontos, com coordenadas geográficas em grau decimal, a partir de receptor GPS (*Global Positioning System*) Garmin MAP 60CSx, ou ainda a partir de uma imagem previamente ortocorrigida da Universidade de Maryland, da área a ser pesquisada.

Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Tapajós e Santarém



Fonte: Do autor (2016)

Localização dos pontos de coletas das amostras

Foram selecionadas 37 (trinta e sete) estações de amostragem ao longo da foz do rio Tapajós, na camada superficial, durante a primeira campanha, no período sazonal de maior precipitação pluviométrica (dias 18 a 28 de julho de 2014) e 45 (quarenta e cinco) estações de amostragens, na segunda campanha, no período sazonal de menor precipitação pluviométrica (13 a 20 de dezembro de 2014) no total de 82 amostras nos meses de julho e dezembro, respectivamente (Figura 2).

Para análise e interpretação da Krigagem fatorial, foram utilizados apenas os resultados da primeira campanha. Nas amostras da segunda campanha de 2014, somente 4 (quatro) amostras: Boca do Igarapé do Camarão, Boca do Igarapé do Camarão (Amostra Direta), Igarapé do Miritiapina (Nascente II) e Igarapé Miritiapina (Amostra Direta) apresentaram limite de detecção (LOD) acima do detectável. As demais amostras, 41, não puderam ser quantificadas, por estarem abaixo do LOD. Esse fato pode ser justificado por ser um período de estiagem e a maioria das amostras encontram-se dentro da baía, o que facilita a adsorção do mercúrio nesse tipo de ambiente.

Aquisição, processamento e confecção de mapas

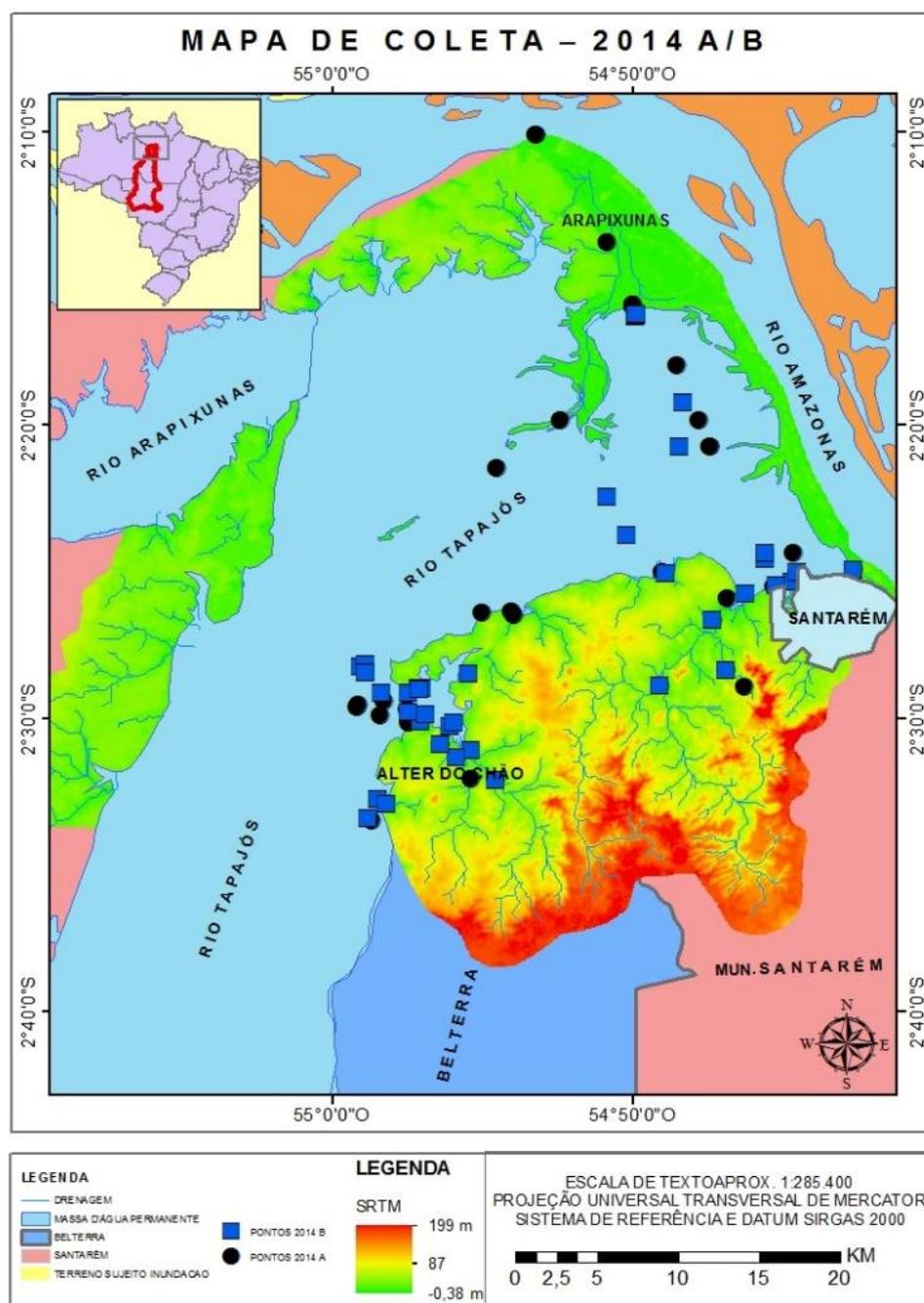
O tratamento e processamento digital das imagens orbitais e dos *shape files* foram realizados no software *Arc Gis* (Arcmap 10.1), no Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT/UFPA em Belém-PA). O datum SIRGAS 2000 foi usado no georreferenciamento das imagens e *shape file* neste trabalho e para a execução das operações de geoestatística e confecção de mapas foram utilizados os programas “R” versão 2.10.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008). Os mapas geológicos foram gerados a partir de *shapes files* da base geológica do estado do Pará da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) e IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Os dados topográficos SRTM foram utilizados também como suporte na interpretação da rede de drenagem e geomorfologia.

Avaliação dos teores de mercúrio

As análises laboratoriais para determinar os valores de mercúrio total encontrados nas amostras foram realizadas por Espectrofotometria de Absorção Atômica, com geração de vapor frio, no LACEN, em Belém-PA. Os resultados tiveram como referência a resolução n. 357/05, da CONAMA. Em campo, foram coletados cerca de 5 litros de amostras em frascos de polipropileno. O procedimento de decantação/floculação com

sulfato de alumínio foi feito esvaziando o sobrenadante em campo e transferindo os resíduos úmidos para tubos do tipo *Falcon*. Quando houve necessidade de outro tipo de procedimento, em virtude das dificuldades logísticas na região amazônica, ocorreu o procedimento para material particulado/suspensão amostrado diretamente em frascos *falcon* com centrifugação em campo, segundo o protocolo metodológico indicado pelo LACEN.

Figura 2 – Área de amostragem em Santarém, com os respectivos pontos de coleta na primeira e segunda campanha de 2014



Fonte: Do autor (2016)

Método Geoestatístico

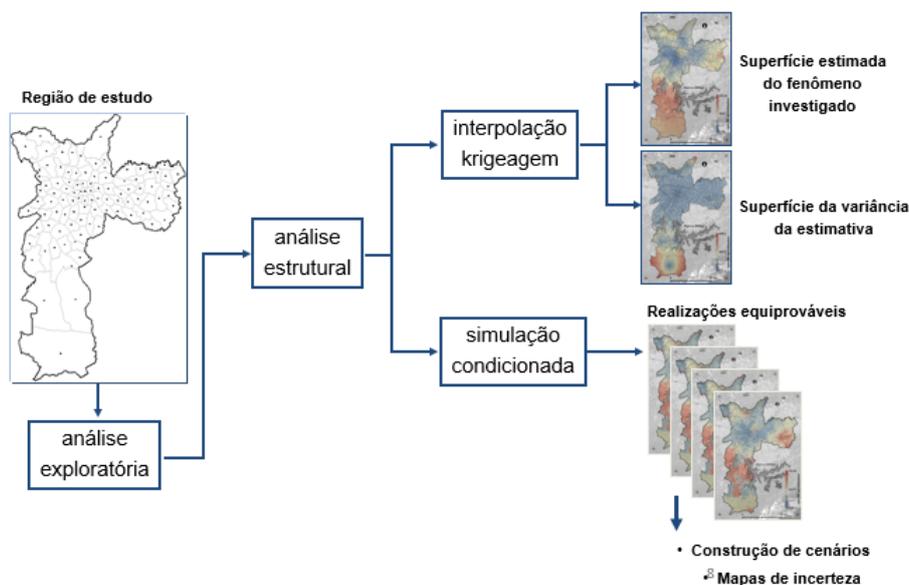
As principais etapas da modelagem geoestatística são apresentadas na Figura 3. Inicialmente é realizada a análise exploratória para averiguar se as distribuições das amostras satisfazem as exigências (normalidade e estacionaridade) para a construção dos modelos geoestatísticos. Em seguida, é feita a modelagem da distribuição espacial por meio de variogramas. Os parâmetros do modelo do semivariograma, incluindo alcance (a), patamar (C) e efeito da pepita (C_0), podem ser observados na Figura 4.

- Alcance (a): a distância ao qual as amostras apresentam-se correlacionadas especialmente;
- Patamar (C): o valor do semivariograma corresponde a seu alcance (a). Deste ponto em diante, a variância da diferença entre pares de amostras $\{\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]\}$ torna-se aproximadamente constante;
- Efeito pepita (C_0): representam variações não explicadas pelo modelo de distribuição espacial. No caso ideal, (C_0) é igual 0.

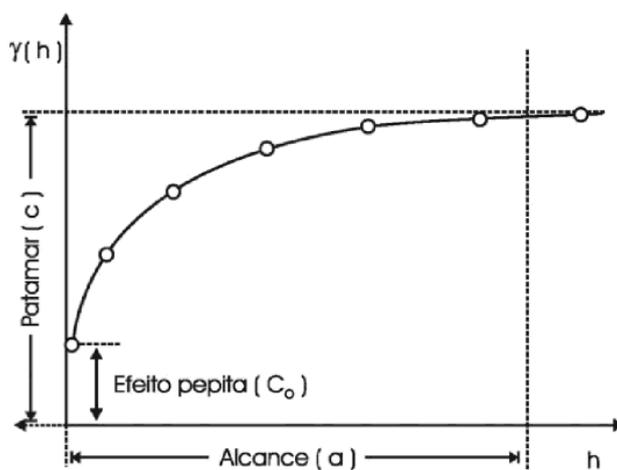
Na prática, à medida que h tende para zero, Z_h aproxima-se de um valor positivo chamado efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma variabilidade ao acaso. Parte dessa descontinuidade pode ser também por erros de medição, sendo impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem (CAMARGO; FUNKS; CÂMARA, 1998).

Os resultados dos modelos espaciais são então utilizados para o mapeamento das variáveis em estudo. O mapeamento pode ser feito por krigagem ou simulação. Para mapeamento em escala regional, em geral, recomenda-se a krigagem. Em casos de mapeamentos de riscos, a simulação é mais recomendada. Nos dois casos, a Geoestatística permite que seja avaliada os erros das estimativas/simulações por meio de mapas de variância ou desvios-padrão e que sejam consideradas a anisotropia se estiver presente na distribuição espacial dos dados.

Figura 3 – Etapas da modelagem geoestatística



Fonte: Camargo (2002)

Figura 4 – Parâmetro do semivariograma: alcance (a), patamar (C), efeito pepita (C_0 , *nugget*)

Fonte: Camargo; Funks; Câmara (2005)

Krigagem fatorial

A krigagem ordinária ou universal, de maneira geral, são métodos de interpolação utilizados para estimar um valor desconhecido de uma variável regionalizada z , em um local não amostrado. Já na krigagem fatorial, o objetivo não é estimar z , mas entender a origem deste valor. Este tipo de estimador é muito usado para rastrear a concentração de metais pesados no solo. Traços de metais em solo ou água podem ter origem geogênica ou antrópica, por exemplo, a mineração, resíduos industriais ou agrícolas (GOOVAERTS, 1999).

Quando a ocorrência é estimada para uma origem natural de grande concentração de um metal, pouco se pode fazer para controlar tal situação, no entanto, caso contrário medidas podem ser tomadas para prevenir o agravamento de poluição causada por atividades antropogênicas: a proibição da atividade humana responsável pela poluição ou mesmo ações mitigadoras para atenuar a complicação da situação ou do agente contaminante (QUEIROZ, 2003).

Se as escalas nas quais os diferentes fatores (humanos ou geológicos) operam são muito diferentes uma da outra, então elas poderiam ser observadas nos semivariogramas das concentrações dos metais em escala local (antropogênica) ou regional (geogênica). A análise estrutural realizada com modelos semivariográficos aninhados podem revelar essas escalas, apontando para uma hipótese sobre a origem do agente contaminante.

Uma vez que as escalas são identificadas no semivariograma, pode-se estimar e mapear o evento, utilizando-se da krigagem fatorial, em que cada componente espacial é associado com o respectivo semivariograma. Os perfis ou mapas das estimativas das componentes espaciais podem auxiliar na separação de características locais e regionais do fenômeno em estudo.

A análise estrutural realizada com modelos semivariográficos aninhados podem revelar essas escalas. A função aleatória $Z(\mathbf{u})$, com um modelo semivariográfico aninhado $\gamma(\mathbf{h})$, pode ser interpretada como a soma de $(S + 1)$, funções aleatórias independentes $Z^s(\mathbf{u})$, com média zero e semivariograma $b^s \gamma_s(\mathbf{h})$:

$$Z(\mathbf{u}) = \sum_{s=0}^S Z^s(\mathbf{u}) + m(\mathbf{u}) \quad (1)$$

Onde a componente $m(\mathbf{u})$ é assumida localmente constante como na prática da krigagem ordinária.

Uma vez que as diversas escalas são identificadas no semivariograma, a correspondente componente espacial $Z^s(\mathbf{u})$ pode ser estimada e mapeada utilizando-se a krigagem fatorial, sendo cada componente espacial associada com o respectivo semivariograma $\gamma_s(\mathbf{h})$. As características locais e regionais do fenômeno em estudo podem ser associadas aos perfis ou mapas das estimativas das componentes espaciais nas diferentes escalas. Em geral, o modelamento semivariográfico é feito em três escalas de variação espacial:

(1) micro-escala – correspondendo à componente do efeito pepita, onde o alcance é zero e as estimativas são nulas em qualquer localização não amostrada. Pode estar relacionada à remobilização local da concentração do poluente e/ou erros de medidas;

(2) Escala local (curto alcance) – podem estar relacionadas às concentrações anômalas do metal – acima do limite máximo tolerável – e podem ser resultado de rochas naturalmente ricas de tal metal ou originar-se de atividades humanas, cujo impacto é temporariamente balanceado por pequenas concentrações naturais.

(3) escala regional (longo alcance) – geralmente relacionada à influência da geologia regional.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Principais estatísticas descritivas da variável Hg

Na Tabela 1, observa-se o resumo estatístico para os dados de mercúrio. Valores da média e mediana próximos indicam pouca assimetria na distribuição. Neste caso, pode-se observar que os valores de média e mediana não se encontram muito distantes um do outro, indicando uma distribuição com pouca assimetria. Considerando o limite estabelecido pelo CONAMA (0.0002 mg/L. Hg) observa-se que acima de 75% (Quantil 25) das amostras estão acima desse limite, indicando contaminação por mercúrio na área de estudo.

Tabela 1 – Resumo estatístico para Krigagem fatorial

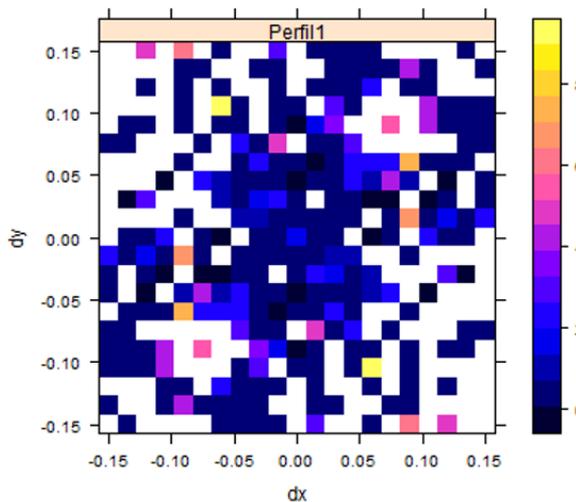
Estatísticas	Hg (mg/L)
Mínimo	0.000
Quantil 25	0.690
Mediana	1.025
Média	1.161
Quantil 75	1.343
Máximo	5.150
Conama	0.0002

Fonte: Do autor (2016)

Para realizar predições espaciais por meio de krigagem ou simulação estocástica, é necessário usar os resultados do modelo espacial ajustados ao semivariograma experimental. A verificação da anisotropia na distribuição dos dados pode ser avaliada pelo semivariograma de superfície, mostrado na Figura 5. Observa-se, neste caso, que não há indícios de forte anisotropia, sendo que, deste modo, foi ajustado aos dados um

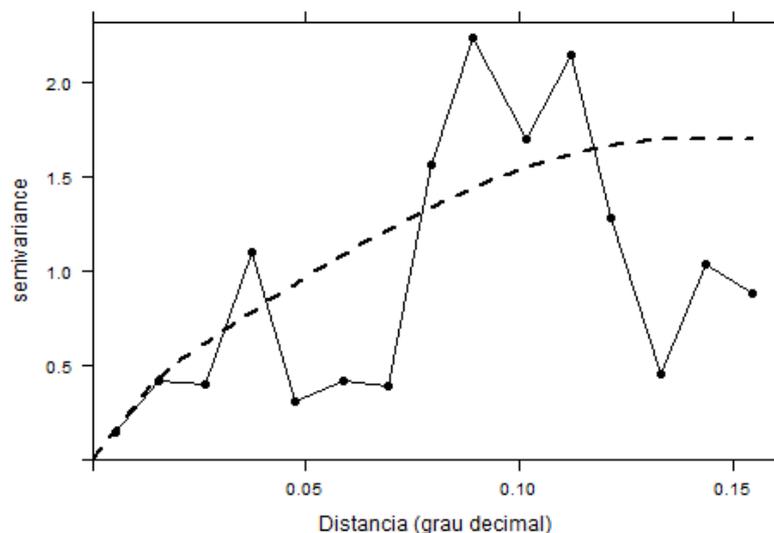
modelo semivariográfico aninhado omnidirecional (linha tracejada na Figura 6), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 2.

Figura 5 – Semivariograma de superfície para variável Hg



Fonte: Do autor (2016)

Figura 6 – Semivariograma experimental (linha contínua) e modelo ajustado (linha tracejada) para o mercúrio



Fonte: Do autor (2016)

Tabela 2 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados

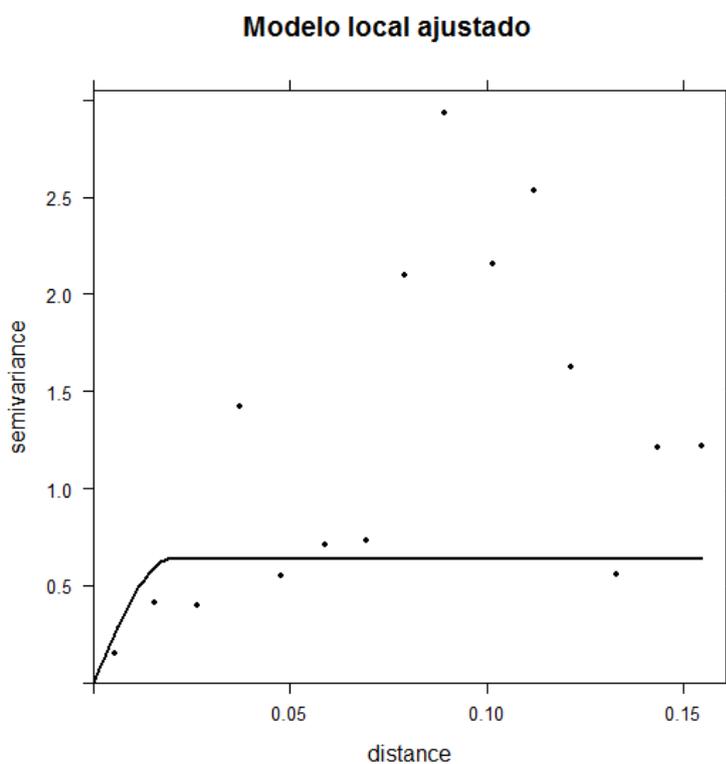
Modelo	Alcance (a) (grau decimal)	Sill (C)	Efeito Pepita (C_0)
1. Esférico	0.02 (~2.22 Km): Local	0.2	0
2. Esférico	0.14 (~15.54 Km): Regional	1.5	0

Fonte: Do autor (2016)

Os padrões espaciais são, em geral, descritos utilizando-se os semivariogramas experimentais. A partir da distribuição dos pontos nos semivariogramas experimentais é

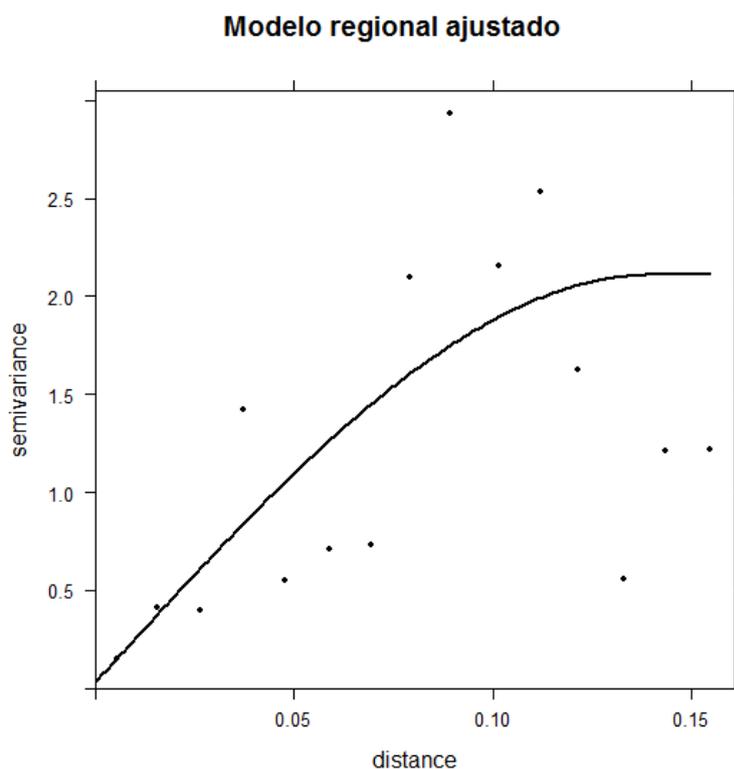
feito o modelamento da variabilidade das variáveis utilizando-se modelos preestabelecidos. Para a krigagem fatorial é importante, na análise estrutural ou variográfica, procurar identificar diferentes estruturas básicas, sendo o modelo considerado como uma soma dessas estruturas que são relacionadas à sua escala espacial. Deste modo, na análise do semivariograma experimental, foram consideradas duas escalas de variação espacial: uma em torno de 2,22 km, que poderia ser considerada como uma escala local; e outra com variação em torno de 15,54 km, que poderia caracterizar uma escala regional. As Figuras 7 e 8 mostram os modelos semivariográficos separados em cada escala de variabilidade.

Figura 7 – Modelo semivariográfico em escala local para o Hg



Fonte: Do autor no "R" (2016)

Figura 8 – Modelo semivariográfico na escala regional para o Hg

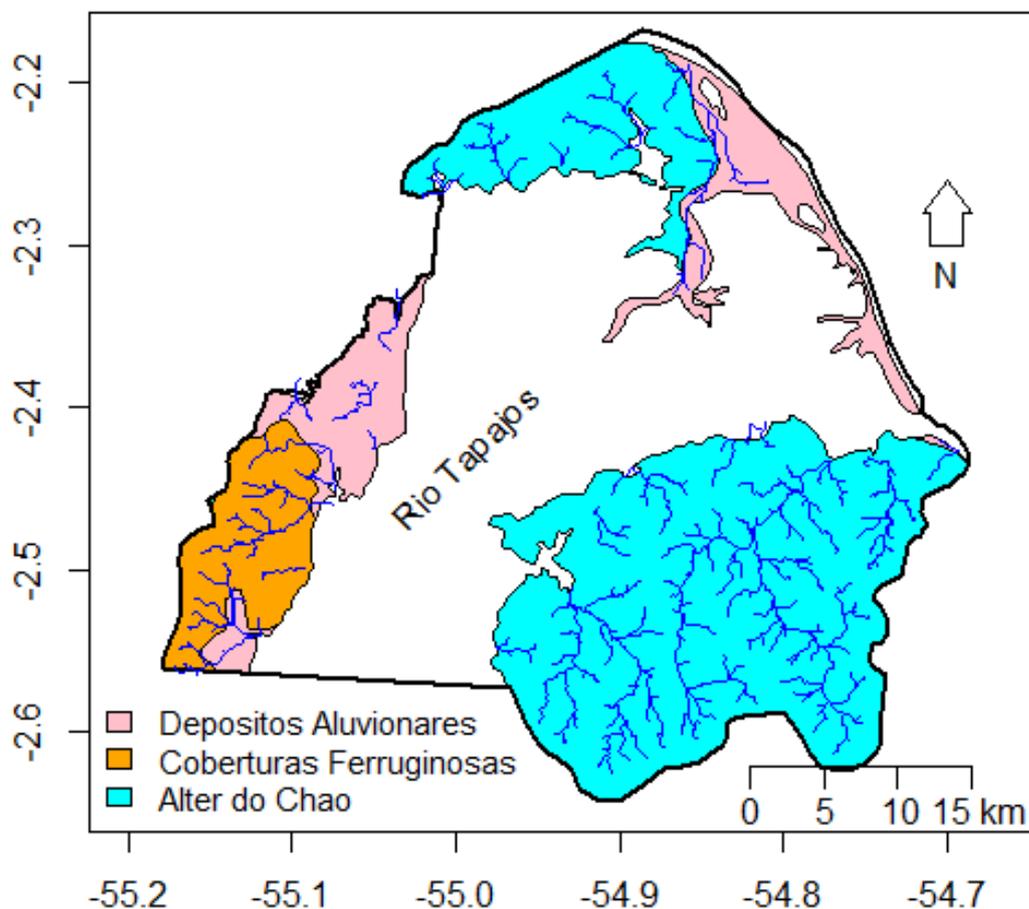


Fonte: Do autor no “R” (2016)

A partir dos modelos semivariográficos nas duas escalas de variabilidade pôde-se construir os perfis ou mapas das estimativas das componentes espaciais, com o uso da krigagem fatorial para a variável mercúrio da área de estudo, ou seja, foram gerados mapas nas escalas local e regional.

Na Figura 9 é apresentado o mapa com as principais unidades geológicas presentes na área de estudo e a drenagem local. A geologia da área é caracterizada pela presença dos “Depósitos Aluvionares, especialmente na região da Barra do Tapajós, “Cobertura Ferruginosa”, à noroeste da área da pesquisa e a “Formação Alter do Chão”, caracterizada como a principal unidade geológica do entorno. A presença da dessa unidade geológica segundo (BRABO, 2010; WASSERMAN, 2001), teria importantes contribuições para correlação com a associação com o mercúrio, em função da presença do solo lateríticos e de áreas alagadas ou alagáveis, que seriam ambientes favoráveis e associados a presença desse metal, especialmente na forma de metilmercúrio (ROULET et al. 1998a).

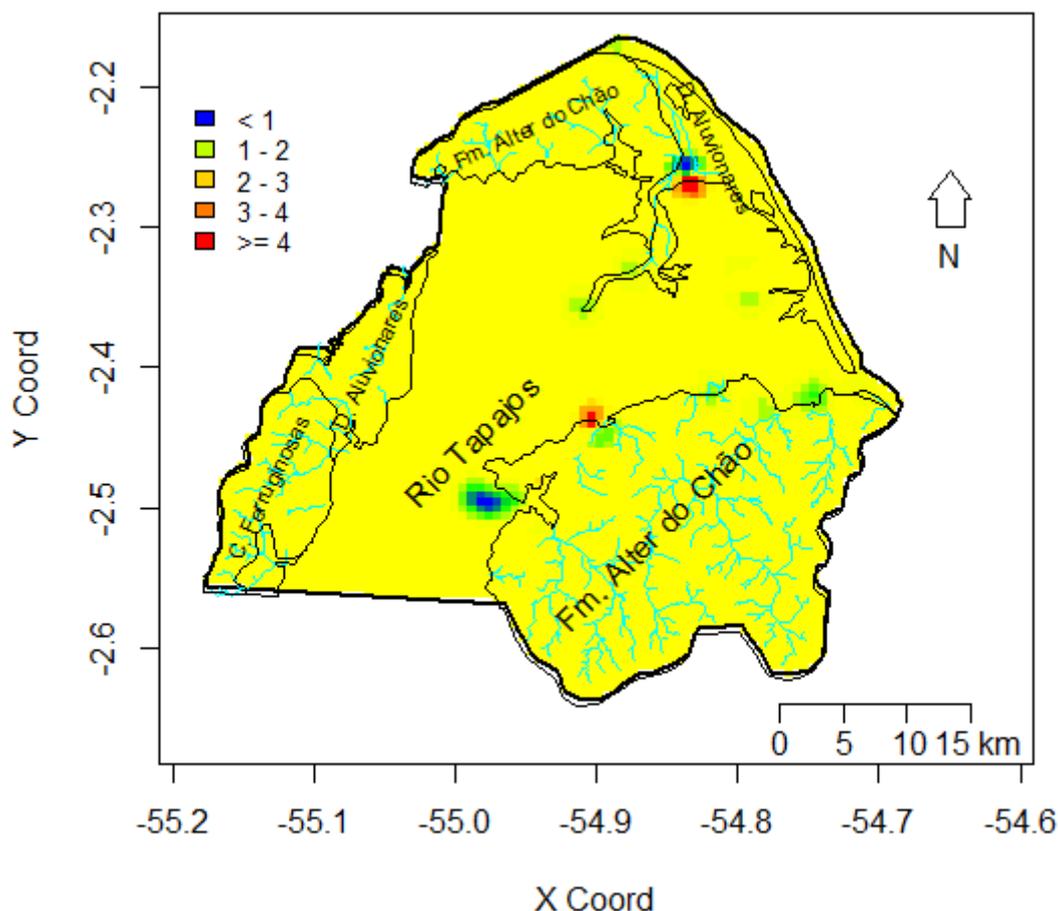
Figura 9 – Mapa geológico da área de estudo



Fonte: Do autor no "R" (2016)

O mapa de krigagem fatorial em escala local com a rede hidrográfica e a geologia local é mostrado na Figura 10. Pôde-se identificar duas anomalias positivas (indicativo de presença de mercúrio) na região do furo do Arapixunas na parte norte e outra mais ao sul nas proximidades da comunidade de Itaparí. Também pode-se observar uma anomalia negativa em frente à vila de Alter-do-Chão e outra menor mais ao norte sobre a *Fm.* Alter-do-Chão. Pela ausência de informações sobre possíveis atividades humanas nessas áreas, como garimpos, que pudessem ser responsáveis pelas altas concentrações observadas nessa escala de variabilidade, não se pode afirmar que essas anomalias positivas podem estar associadas à atividades antrópicas.

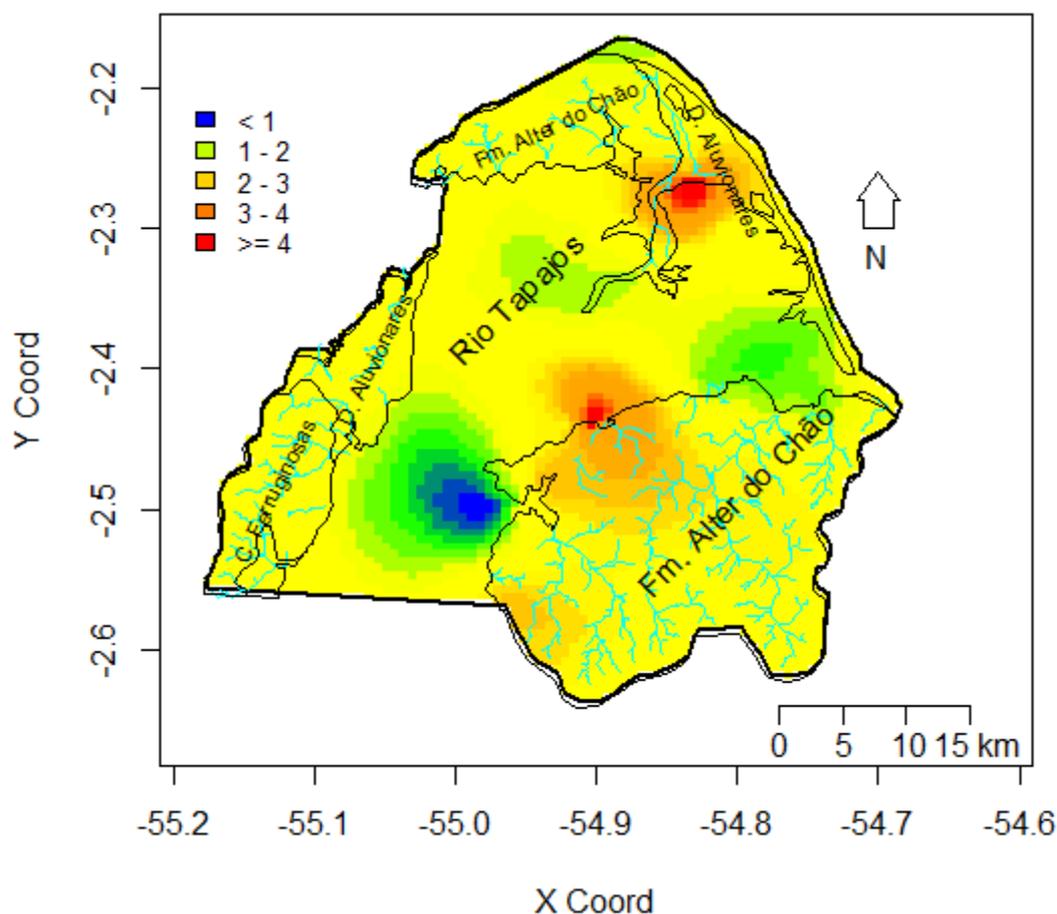
Figura 10 – Mapa de Krigagem fatorial em escala local para o Hg



Fonte: Do autor no "R" (2016)

O mapa para Krigagem fatorial, em escala regional é apresentado na Figura 11, evidenciando claramente duas anomalias positivas e uma negativa. A anomalia positiva mais ao norte ocorrendo nos limites dos depósitos aluvionares e Fm Alter-do-Chão. Outra anomalia positiva, mais ao centro da área de estudo, ocorre sobre a Fm Alter-do-Chão. Observa-se a possibilidade de alguma associação da Fm Alter-do-Chão com a presença de altas concentrações de mercúrio indicadas pelas duas anomalias positivas. Essas anomalias podem também estar associadas à existência de estruturas sedimentares ou mesmo devido à grande profundidade das regiões de ocorrência da anomalia, fato que pode levar a uma adsorção do mercúrio no ambiente. Também pode-se observar uma anomalia negativa sobre o rio Tapajós em frente à vila de Alter-do-Chão.

Figura 11 – Mapa de Krigagem fatorial em escala regional para o Hg



Fonte: Do autor no "R" (2016)

Discussão dos resultados

Até o início da década de 1990, a poluição associada aos garimpos de ouro foi considerada a principal fonte de Hg na bacia amazônica (FORSBERG et al., 1989; PFEIFFER et al., 1993; MALM et al., 1991; 1996). Mais tarde, com a descoberta de elevados níveis de contaminação mercurial em solos, peixes e populações humanas, longe de qualquer atividade industrial, este conceito começou a mudar (FORSBERG et al., 1995; FORSBERG et al., 1999; ROULET et al., 1998a).

As primeiras evidências da origem natural na Amazônia vêm de estudos com solos da bacia central amazônica que são excepcionalmente ricos em mercúrio de origem natural (ROULET et al., 1998b; ZEIDEMANN, 1999; FOSTIER; OLIVEIRA; GUIMARÃES, 1999; FADINI et al., 2001; LECHLER et al., 2000). Foi estimado, por exemplo, que apenas o primeiro metro de solo na bacia do rio Negro contém 40 vezes mais mercúrio do que foi liberado pelo garimpo em toda região amazônica durante os últimos 30 anos e mais que 10 vezes a quantidade liberada pelos garimpos de ouro e prata

em toda a América do Sul durante os últimos 500 anos (NRIAGU, 1994; FADINI; JARDIM, 2001).

Análises de Hg e outros elementos em águas do rio Tapajós indicaram que outro mecanismo pedológico está controlando a dinâmica do mercúrio nesta bacia (ROULET et al., 1998b). A maior parte de mercúrio nestas águas foi associada à fração particulada, indicando que o Hg total neste rio foi derivado predominantemente da erosão. Como o relevo na bacia do Tapajós é suave e existem evidências que as concentrações de material em suspensão têm aumentado recentemente (ROULET et al., 2001b) é provável que este mercúrio seja proveniente de erosão em áreas recentemente antropizadas, como áreas de mineração e terras agrícolas.

A partir dos resultados observados, não se pode desconsiderar a possibilidade de interferências geogênicas na origem e transporte do Hg encontrado em solo e águas na foz do rio Tapajós, provenientes do solo decomposto possivelmente da *Fm* Alter-do-Chão, onde o mercúrio formaria algum tipo de complexo com o ferro presente na rocha. Essa forte correlação do Fe com Al, já havia sido observada na fração particulada por Roulet; Lucotte (1995) e Roulet et al. (1998b). Essa associação foi atribuída, por eles, a partir de um coeficiente de correlação feita em perfis de solo e seria amplamente verificável em toda região amazônica, com isso, para os autores, o mercúrio encontrado em grande quantidade teria origem natural e não antropogênica.

No entanto, Wasserman (2001) afirma que a natureza destes complexos ainda seria uma incógnita. Outra hipótese para a origem do mercúrio na foz do Tapajós seriam as rochas localizadas a montante, no médio e alto curso do rio Tapajós, ou ainda de atividades antropogênicas na parte mais ao sul da bacia. Um estudo para determinação da assinatura geoquímica da região poderia auxiliar na discussão da origem desse mercúrio.

Outros autores, entre eles, Roulet et al., (1998a) e Fadini; Jardim (2001), que estudaram a problemática do Hg na bacia do Tapajós nesta década, também apontavam para essa condição, ao afirmarem que o mercúrio é um metal pesado presente em todos os tributários da bacia amazônica. Para eles, parte deste metal possui origem antropogênica, proveniente do seu uso indiscriminado nos garimpos de ouro e atividades industriais, mas a maioria seria aparentemente de origem natural. Estas atividades antropogênicas não poderiam ser as grandes responsáveis pelo elevado volume de mercúrio no sistema amazônico. A partir de estudos de balanço das emissões da retirada de ouro na Amazônia, segundo eles, seriam necessários dez vezes mais garimpos para

justificar as quantidades observadas, assim 90% do mercúrio presente no meio é de origem natural (ROULET et al., 1995; WASSERMAN, 2001).

Corroborando com essa hipótese, não foram observadas importantes atividades industriais ou auríferas ao longo da região estudada ou em municípios do entorno, que pudessem justificar a presença desses elevados valores de Hg encontrados nas águas e no solo da foz do Tapajós, o que leva a crer que a atividade humana, possível fonte dessa contaminação em nível local, está descartada e a origem natural seria a fonte mais aceitável.

Mesmo apontando para uma origem geogênica do Hg na foz do rio Tapajós, a participação antrópica não deve ser simplesmente descartada, pois a ação humana em garimpos artesanais, que revira o solo em busca de ouro e a amálgama ou queima do ouro com o mercúrio tem que ser levado em consideração, assim como as demais contribuições antropogênicas, como o desflorestamento, o desmatamento, a agricultura, entre outros, que ainda ocorrem em grande escala ao longo da bacia, especialmente no médio e alto curso.

Na tentativa de contribuir na discussão da origem da contaminação por mercúrio na foz do rio Tapajós, lançou-se mão da técnica de Krigagem fatorial neste estudo, onde a hipótese da origem geogênica ou antropogênica do mercúrio é discutida. A Krigagem fatorial representa um importante avanço na interpretação de dados geoquímicos, pois permite que variáveis sejam decompostas em diversos componentes básicos, em escalas diferentes de variabilidade, quantos forem identificados na estrutura do variograma (DEUTSCH; JOURNAL, 1997).

As vantagens da krigagem fatorial, utilizada neste trabalho são: 1) a presença de áreas com anomalias, associadas à litologia, com uma intensidade maior; 2) na ausência de zonas anômalas separadas das litologias com intensidade menor e 3) o uso da informação litológica com base nos resultados de PCA, permitem o desenvolvimento de um novo método de geoestatística, que enriquece o resultado da krigagem fatorial, melhorando as interpretações de áreas com anomalias (JAQUET, 1989). O uso deste tipo particular de krigagem requer o conhecimento da geologia em toda a área de estudo (BATISTA, 2016).

Não foi possível construir os perfis ou mapas das estimativas das componentes espaciais para a segunda campanha de 2014, em virtude da maioria das amostras encontrarem-se abaixo do limite de detecção do método (LOD). Nesta campanha, apenas quatro pontos puderam ser quantificados.

Nos mapas gerados pela KF, uma zona de grande valor pôde ser observada na região do furo do Arapixunas e na comunidade de Itaparí, margem esquerda e direita do rio Tapajós, respectivamente, onde se observa a presença da Formação Alter-do-Chão bem evidenciada. No primeiro caso, pôde-se observar em campo que a Vila de Arapixunas, onde foram coletadas as amostras na margem esquerda do rio, apresenta um *talude continental* (formação geológica) bem evidenciado, que em alguns momentos toca as águas do rio Amazonas que chegam pelo furo homônimo. Não obstante, não se pode negar que o rio Amazonas, através desse furo, pode estar contribuindo de alguma maneira para a elevação dos valores da contaminação por mercúrio na área de estudo, quando despeja milhares de litros de água na foz do rio Tapajós, com um grande volume de material em suspensão, que pode estar funcionando como veículos naturais de transporte do Hg.

Antagonizando essa região, o mesmo comportamento também foi observado na região da comunidade de Itaparí na margem oposta, a qual apresenta a mesma configuração geológica, com a presença de rochas da Formação Alter-do-Chão. Apontando para esta unidade como sendo uma provável fonte de liberação mercurial de origem natural para a rede hídrica amazônica. Neste caso, a zona anômala observada adentra para o continente, acompanhando uma grande área desta formação geológica.

Ainda com base nos mapas de KF gerados, foram identificadas algumas regiões que apresentam anomalias negativas, com destaque para região próxima à Vila de Alter do Chão, muito por conta das amostras terem sido obtidas em um trecho mais profundo do rio Tapajós e relativamente distante da margem. A coleta de amostras nesse ambiente pode ter contribuído para essa situação, uma vez que essas amostras apresentaram um LOD abaixo do detectável pela metodologia aplicada. Isso, no entanto, pode não representar a ausência de contaminação, pois, muito embora não tenha sido detectado pela técnica, não significa afirmar que o Hg não se encontre na área, apenas não foi identificado pela metodologia aplicada. Pelas características, ou mesmo o Hg pode estar sendo adsorvido e encontra-se agregado aos sedimentos de fundo do rio, necessitando de novos estudos que observem essa condição.

CONCLUSÃO

Compreender a relação elementos-traço, sólido em suspensão é de extrema importância para a compreensão da origem das fontes de contaminação e,

consequentemente, para a implantação de políticas públicas e ações mitigadoras para os problemas de exposição ambiental ao Hg na Amazônia.

As análises de krigagem fatorial de mercúrio em sólidos em suspensão em água, neste estudo, demonstrou as concentrações em diferentes escalas de variabilidade espacial. Foi observada a importância de alguns fatores, como a influência das formações geológicas e hidrografia e a geomorfologia suave do baixo Tapajós, que pode ser outro fator determinante dessa contaminação.

Consequentemente, é de grande importância a descoberta ou o entendimento precoce da origem da contaminação em um determinado ambiente para poder propor atividades mitigadoras para o problema.

A separação de anomalias com variabilidade em pequena (local) e grande (regional) escala para os dados de concentração de mercúrio utilizando a técnica da Krigagem fatorial, demonstrou ser útil na interpretação das anomalias em nível regional e local. Os resultados das anomalias encontradas neste trabalho de pesquisa são confirmados pelos dados brutos das amostras encontradas em solo na primeira campanha, em especialmente nas amostras localizadas ao longo da Formação Alter-do-Chão, como nas amostras da comunidade Caminho das Pedras e Ponta do Cururu, ambas na vila de Alter-do-Chão.

Devido à existência de características bem específicas do rio Tapajós ao longo de sua foz, como o grande volume de água aportado nessa região e a sua largura expressiva, pode justificar a presença de uma longa e contínua anomalia negativa, na região da Vila de Alter-do-Chão, que se estendeu para dentro do rio no sentido norte-noroeste, e outra na região mais próxima do canal que faz a conexão com o rio Amazonas, bem próximo à área urbana de Santarém.

A partir da análise e interpretação dos resultados obtidos pela krigagem fatorial pode-se sugerir que o mercúrio provavelmente está vinculado a fontes de contaminações de origem regional (grande escala), ou seja, provenientes de atividades geogênicas e suas concentrações são provenientes do próprio meio natural, por causa da correlação mais forte com variações de longa escala desse elemento. Os processos físicos relacionados à geologia estariam controlando a distribuição espacial das concentrações de metais em uma área de estudo.

No entanto, a precisão do método da KF na filtragem de anomalias, como neste estudo de caso, depende da disponibilidade de informações complementares, como a análise da Geologia, Geomorfologia e Geoquímica, por exemplo. Essas informações

quando disponíveis, são indispensáveis para uma interpretação e discussão dos resultados de forma mais eficaz e robusta. De outro modo, é sempre importante que as amostras sejam representativas para a área a ser pesquisada, pois isso pode, sem dúvida, apresentar resultados mais próximos da realidade e bem mais eficazes. Recomenda-se, portanto, que pesquisas complementares, mais abrangentes e multidisciplinares sejam desenvolvidas na tentativa de elucidar a origem e os processos da disponibilidade de mercúrio no ambiente amazônico, especificamente em Santarém, objeto de estudo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BATISTA, A. C. et al, **Comparison of different types of Factorial Kriging maps in an environmental case study.** Disponível em: < <http://www.kgs.ku.edu/Conferences/IAMG//Sessions/D/Papers/batista2.pdf> >. Acesso em: 24 ago. 2016.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Relatório de Impacto Ambiental Pavimentação BR 163-BR 230.** Brasília, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n. 357, de 17 de março de 2005.** Brasília, 2005.

BURAK, D. L. et al. Metais pesados em solos: aspectos gerais. **Estudos avançados em produção vegetal**, p. 571-592, 2008.

CÂMARA, G. et al. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S. et al. **Análise Espacial de Dados Geográficos.** Brasília: EMBRAPA, 2004.

CÂMARA, G. et al. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001.

CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (SPRING).** 1998. 148 f. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 1998.

CAMARGO, E. C. G. et al. **A Análise espacial de superfícies: análise espacial de dados geográficos.** São José dos Campos: INPE, 2002

CAMARGO, E. C. G.; FELGUEIRAS, C. A.; MONTEIRO, A. M.V. A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis ambientais utilizando procedimentos geoestatísticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002.

_____; FUNKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de superfície.** São José dos Campos: INPE, 2005.

CARVALHO, J. R. P. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas – uma proposta.** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001.

DAMAS, G. B.; BERTOLDO, B.; COSTA, L.T., Mercúrio: da antiguidade aos dias atuais. **Rev. Virtual Química**, v. 6, n. 4, p. 1010-1020. Acesso em: 22 mai. 2016.

DA SILVA, M.W., ESTANISLAU, C.A.M. Concentração de mercúrio em peixes da Amazônia. **Boletim A B Limino**, v. 41, n. 1, p. 8-14, 2015.

DEUSTCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB. Geostatistical Software Library and Uses's Guide.** New York: Oxford University Press, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental. **Sistemas de Produção.** 2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solo.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo; Embrapa Brasília, 2013.

_____. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/pa/pa.htm>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

ESTRELA, M. A. A.; ROHLFS, D. B. Mercúrio: implicações para a saúde e o meio ambiente. In: 7ª MOSTRA DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU DA PUC GOIÁS, 1., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2012.

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

FELGUEIRAS, C. A. 1999. 181 f. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informações geográficas: paradigma geostatístico por indicação.** Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FORSBERG, B. et al. Development and erosion in the Brazilian Amazon. A geochronological case study. **GeoJournal**, 19, p. 402-405, 1989.

_____. High levels in fish and human hair from the rio Negro (Brazilian Amazon): Natural background or anthropogenic contamination. In: PROC. INT. WORKSHOP ON ENVIRONMENTAL MERCURY POLLUTION AND ITS HEALTH EFFECTS IN THE AMAZON RIVER BASIN. 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Nat. Inst. for Minamata Disease/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. p. 33-40.

FOSTIER, A. H. et al. Mercury accumulation in natural forested Amazonian soils. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MERCURY AS A GLOBAL POLLUTANT. 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives. **Geoderma**, n. 89, p. 1-45, 1999.

IBGE. **Dados do município de Santarém/PA**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Glossário Geológico**. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Santarém-Pa**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Notas técnicas: Histórico da investigação sobre cor ou raça nas pesquisas domiciliares do IBGE**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

IDESP. **Indicadores de Vulnerabilidade do Pará**. Belém, 2012. Disponível em: <www.sepof.pa.gov.br>/. Acesso em: 14 abr. 2016.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M.R. **Applied geostatistics**. Oxford: Oxford University Press, 1989.

_____. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1990.

JAUQUET, O. Factorial kriging analysis applied to geological data from petroleum exploration. **Mathematical Geology**, v. 21, n. 7, 1989.

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 enrichment? **Sci. Total Environ**, 2000.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. . 2. ed. Campo Grande: Ed. UNIDERO; Oficina de Textos, 2006.

MALM, O.; PFEIFFER, W. C.; SOUZA, C. M. M. Main pathways of mercury in the Madeira River área, Rondonia, Brazil. In: 8TH INTERN. CONF. HEAVY METALS IN THE ENVIRONMENT, Edimburgo, 1991. **Proceedings...** Edimburgo, 1991. p. 515-518.

_____; GUIMARÃES, J. R. D. Avaliação da contaminação dos peixes nos corpos hídricos próximos à cidade de Poconé – MT. In: OPAS. **Projeto de Avaliação de riscos à saúde na região amazônica relacionados com a contaminação ambiental por mercúrio**: Relatório final. Brasília, 1996.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Perfil do Gerenciamento de Mercúrio no Brasil, incluindo seus Resíduos: Diagnóstico Preliminar sobre o Mercúrio no Brasil**. Brasília, 2010.

MARTINS, C.A.S. et al. A dinâmica de metais-traço no solo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.17, n.3-4, p.383-391, 2011.

NRIAGU, J. O. Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas. **Sci Total Environ**, 1994.

PASSOS, C. J.; MERGLER, D. Exposição humana ao mercúrio e efeitos adversos à saúde na Amazônia: uma revisão. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, n. 24, 2008.

PASSOS, P.N.C. A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente. **Direitos Fundamentais e Democracia**, Curitiba, v. 6, 2009.

PELEJA, J. R. P. **Os fatores que influem nos níveis de mercúrio (Hg) na água e plâncton de lagos associados aos rios Tapajós e Negro**. 2002. 73 f. Dissertação (Mestrado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2002.

PELEJA, J. R. P. **Balanco de massas de mercúrio (Hg) total em duas microbacias da Amazônia Central**. 2007. Tese (Doutorado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2007.

PFEIFFER, W. C. et al. O Environment fate of Mercury from gold mining in the Brazilian Amazon. **Environmental Reviews**, v. 1, p. 26-37, 1993.

QUEIROZ, J. C. B. **Utilização da geoestatística na quantificação do risco de contaminação por metais pesados, na área portuária de Santana- Amapá**. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Unesp, Rio Claro, 2003.

_____; STURARO, J. R.; RIEDEL, P. S. Geostatistic Mapping of Arsenic, Manganese and Iron Contamination Risk in the Port of Santana, Amapa, Brazil. In: CONFERENCE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL AND GEOLOGY, 2001, Cancun. **Anais...** Cancun, 2001. Disponível em <www.kgs.ukans.edu/Conferences/IAMG/Sessions/G/g.html>. Acesso em: 10 out. 2015.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. Lavras: Ed. UFLA, 2007.

ROULET, M.; LUCOTTE, M., Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of a tropical rain forest in French Guiana, South America. **Water Air Soil Pollut**, n. 80, p. 1079-1088, 1995.

ROULET M. et al. The geochemistry of Hg in Central Amazonian soil developed on the Alter do Chão formation of the lower Tapajós River Valley, Pará state, Brazil. **Sci. Total Environ**, 1998a.

_____. Distribution and partition of total mercury in waters of the Tapajós river basin, Brazilian Amazon. **Sci. Total Environ**, 1998b.

ROULET, M. et al. Methyl Hg in water, seston, and epiphytes of na Amazonian river and its floodplain, Tapajós River, Brazil. **Sci. Total Environ**, 2000b.

ROULET, M. et al. Methyl Hg production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain - effect of seasonal inundation. **Water Air Soil Pollut**, n. 128, p. 41-60, 2001a.

SAMPAIO, D., et al. Mercúrio nos peixes do Rio Tapajós, Amazônia brasileira. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, 2006.

SILVA-FORSBERG, M. C.; FORSBERG, B. R.; ZEIDEMAN, V. K. Mercury contamination in humans linked to river chemistry in the Amazon basin. **Royal Swedish Academy of Sciences**, v. 28, p. 519-521, 1999.

SOUSA, E. S., LIMA, M. O., OLIVEIRA, P. C., SANO, E. E. Avaliações da concentração de mercúrio total em solo e material particulado em áreas alagáveis na foz do rio Tapajós-PA, Fm. Alter do Chão, com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto. **Novos Cadernos NAEA**, v. 15, n. 2, p. 315-341, 2012.

SOUSA, E. S. **Uso integrado de dados de sensoriamento remoto para o estudo da geologia e geomorfologia da área da foz do rio Tapajós, Santarém-PA**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

TRASANDE, L. et al. Methyl mercury exposure in a subsistence fishing community in Lake Chapala, Mexico: an ecological approach. **Environmental Health**, v. 9, n. 1, 2010.

WASSERMAN, J. C.; HACON, S. S.; WASSERMAN, M. A. O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico. **Mundo e Vida**, v. 2, n. 1/2, 2001.

ZEIDEMANN, V. K. **A geoquímica de mercúrio em solos da bacia do rio Negro e sua influência no ciclo regional do mercúrio**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – INPA/UA, 1999.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a maioria dos geólogos, não é simples definir o solo, por ser um material complexo e multifuncional e, por isso, diversos profissionais o definem de maneira diferente. Para os geólogos, “o solo é visto como fonte de matéria-prima” enquanto para as ciências da terra, o “considera como produto do intemperismo, do remanejamento e da organização das camadas superiores do regolito, sob ação da atmosfera, da hidrosfera, da biosfera e das trocas de energia envolvidas”. Logo, solos são constituídos de sedimentos inconsolidados, portanto não há muita diferença entre os dois termos (solos/sedimentos), a não ser para estudos mais especializados (TEIXEIRA, 2009).

No entanto, na planície amazônica, no ambiente aquático, o sedimento do rio tem estreita relação com a água, o tempo todo e a disponibilidade de matéria orgânica está diretamente relacionada com a formação de MeHg no ambiente, justamente por conta da proliferação de bactérias que fazem o processo de metilação do mercúrio. Por esse motivo, a bioacumulação de Hg_{Total} é maior em animais terrestres, quando comparados com animais aquáticos, pois está diretamente ligada a ambientes terrestres (solo) e aquáticos, como os sedimentos de rios.

Dessa forma, é muito difícil concluir que a presença de Hg_{Total} , na região da foz do rio Tapajós é exclusivamente de contribuição natural, sem mais informações sobre a evolução pedológica e estudos mais completos de toda a área da bacia. A presença de mercúrio no solo, na região amazônica, aponta para que independentemente do contexto onde a área encontra-se, os valores de mercúrio, com algumas exceções, são relativamente elevados quando comparados com os valores tidos como referência para ocorrência desse metal.

Foram observados nos resultados desta pesquisa, valores de concentração média de Hg mais elevada em material particulado em suspensão do que em solo nas frações finas ou brutas. É possível que o material particulado, rico em matéria orgânica, esteja adsorvendo o mercúrio total e metilmercúrio, daí os elevados valores encontrados.

Outra conclusão possível é de que a maior parte do mercúrio nestas águas associada à fração particulada ocorre predominantemente derivado da erosão. A geomorfologia da bacia do Tapajós é relativamente suave, indicando evidências de que as concentrações de material em suspensão têm aumentado ao longo do rio, especialmente em função do processo de ocupação da bacia nas últimas décadas, como mineração e terras agrícolas.

Na avaliação da concentração de mercúrio encontradas para fração fina e fração bruta, considerando a profundidade, indicam que existem diferenças entre as concentrações, mas, não há diferença entre a profundidade, logo, se pode concluir que o mercúrio se espalha homogeneamente pelo ambiente. O coeficiente de variação encontrado foi de 30% e estes valores são considerados significativos.

Foi observado que apenas em três pontos, os valores não foram significativos, a exemplo de Lago do Juá, para fração fina, bem abaixo do esperado. As três regiões que possuem maior semelhança na paisagem são Lago do Itapari, Caminho da Pedras e Caranazal, que apresentaram valores elevados e muito próximos entre si para o Hg total, enquanto a Rodovia Everaldo Martins, o Lago do Juá e a Ponta do Tauá apresentam valores baixos de desse metal.

Entre as análises espaciais realizadas nos dados de Hg, considerando o mês de julho e dezembro, como período mais chuvoso e menos chuvoso, observou-se que a distribuição dos valores de Hg não ocorre na mesma proporção nos dois períodos. As amostras que apresentaram maiores valores de mercúrio, ocorreram, principalmente, em julho e sofreram uma retração no período menos chuvoso, especialmente ao longo da foz, podendo estar associada à adsorção desse metal. A produção de MeHg nestes ambientes também varia em sincronia com o pulso de inundação, sendo maior em julho, quando a área alagada é mais extensa e condições anóxicas são mais frequentes e menores em dezembro.

O padrão da distribuição espacial dos valores apresentados nos mapas de probabilidade sugere que, em julho, predomina os processos de deposição de mercúrio, enquanto que no período de estiagem, predominam os processos de *remobilização* do Hg no sedimento.

É em julho que ocorre o maior aporte de material transportado das áreas mais altas para as mais planas, sobretudo de material particulado, funcionando como um importante veículo de transporte de Hg. Esse processo de erosão, conhecido como lixiviação, seria o grande responsável por esse fenômeno.

Com a chegada do período menos chuvoso, o Hg é adsorvido aos sedimentos da foz e transportado para o sistema hidrológico da bacia amazônica até área mais distante, como a foz deste rio. O transporte desse mercúrio se dá com maior eficiência em áreas próximas ao talvegue, que apresenta grande vazão. Como o Tapajós é um rio de foz afogada, o estreitamento do canal próximo à área urbana de Santarém, empreende ao rio grande força e velocidade, interligando-o à bacia amazônica. Nesta área, há um fluxo

muito grande de água que drena a foz para dentro do rio Amazonas e, conseqüentemente, facilitando o transporte de sedimentos do fundo da foz, juntamente com mercúrios adsorvidos.

A distribuição espacial das amostragens por krigagem ordinária evidenciadas, apontam para áreas de maior concentração de Hg, relacionadas à regiões de ocorrência das maiores deposição de sedimentos, presença de matéria orgânica em grandes concentrações, como na boca do Arapixunas e comunidade do Itapari, na margem direita do rio.

Tais observações diretas nos mapas de probabilidade mostram para uma correlação com a presença de matéria orgânica e maior concentração de Hg, muito embora não seja conclusivo estabelecer uma relação direta entre estes valores, é possível fazer uma correção entre a formação de zonas de preferências de deposição de sedimentos e acumulação de mercúrio.

A presença do furo do Arapixunas, que funciona como um canal de ligação entre os rios Amazonas e Tapajós, é outro fator a ser considerado, pois no período mais chuvoso da bacia amazônica, ele facilitaria a deposição de sedimentos pelo Amazonas para dentro da foz, daí a associação com os elevados valores de Hg encontrados na boca do Arapixunas associando-o à matéria orgânica depositada pelo Amazonas, justificando os elevados valores na localidade. Chama atenção os resultados da segunda campanha, quando o período menos chuvoso não é favorável a grandes concentrações de matéria orgânica, a adsorção do Hg contribui para os resultados não quantificados pelo método.

Quanto aos resultados das análises da aferição do Índice de Capital Social, de acordo com a metodologia do *QI-MCS* e aplicada no entorno da foz do rio Tapajós, permitiram recomendá-lo como um instrumento válido e confiável para mensuração do conceito de qualidade de vida e elaboração de políticas públicas na região pesquisada.

Durante o levantamento, foi observado que as comunidades aferidas pertencem ao mesmo grupo etnicoracial, com denominações religiosas muito semelhantes, pertencentes ao mesmo grupo social, apresentando ponderada homogeneidade em suas características avaliadas. Os resultados alcançados com a pesquisa estão dentro do esperado, salvo um ou outro item que saltam aos olhos.

Não se pode desconsiderar nesse levantamento, o alto índice de rejeição a membros dos governos locais, estaduais e central. Este fato deve ser visto com um olhar mais clínico, pois pode representar uma realidade factual e permanente, não obstante é

recomendável que novos levantamentos sejam realizados, para corroborar ou não com os resultados ora apresentados.

Outro fator que chamou a atenção, foi o número de abortos espontâneos declarados, os quais divergem aos encontrados no município de Brasília Legal, a montante do rio Tapajós. Quando avaliado os dados reprodutivos das mulheres em idade fértil um número relevante relataram história de aborto espontâneo para Brasília Legal. Nos resultados de Santarém, este número cai consideravelmente, mesmo assim, são resultados bastante significativos quando se trata de saúde pública.

As diferenças metodológicas aplicadas nas pesquisas ou a mudança nos hábitos alimentares das comunidades aferidas pode justificar tal diferença, isto para exemplificar dois parâmetros. Mesmo estando às margens de dois importantes rios amazônicos (Amazonas e Tapajós), os hábitos alimentares da população está modificando e sofrendo alterações significativas, que podem estar influenciando nos resultados de abortos espontâneos relacionados ao consumo de proteína do pescado associado ao Hg, apontado por este autor.

O nível de informação e comunicação dos comunitários apresenta a televisão e o rádio como os principais meios de comunicação. Fato que não impediu um número bastante significativo dos entrevistados de declararem que nos últimos 12 meses, já se reuniram para entregar conjuntamente uma petição a membros do governo ou líderes políticos pedindo algo em benefício da comunidade, mostrando uma capacidade de mobilização e ação política do grupo, quando solicitado ou pressionado por eventos que possam atingir suas relações.

Após a aplicação do *QI-MCS*, em Santarém, foi verificado que as comunidades relacionadas possuem bom nível de capital social, onde se pode estimar potencial de mobilização e ação política à exposição ambiental ao mercúrio na região da foz do rio Tapajós, por parte das comunidades locais, especialmente, quando observado uma proatividade das populações envolvidas, relacionadas a eventos que comprometem o seu bem-estar coletivo. Muito embora tenha demonstrado a presença de capital social, parece não haver uma utilização efetiva desses recursos, em muitos casos, provavelmente devido à falta de lideranças.

Em linhas gerais, mesmo sem dispor de dados que possam comprovar definitivamente a procedência e as rotas de migração predominantes de Hg, pode-se apontar o solo como importante elemento na liberação desse metal para o ambiente amazônico e hipótese aceitável para tal conclusão na foz do Tapajós.

Recomenda-se, no entanto, que pesquisas complementares, mais abrangentes e multidisciplinares sejam desenvolvidas na tentativa de elucidar a origem e os processos da disponibilidade de mercúrio no ambiente amazônico, especialmente, em Santarém, objeto de estudo desta pesquisa, corroborando para a elucidação sobre a problemática do mercúrio na bacia amazônica, principalmente, na região pesquisada.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. **Análise geostatística das concentrações de mercúrio no lago Puruzinho – Amazônia Ocidental**. 2006. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Núcleo de Ciências e Tecnologia, Porto Velho, 2006.
- BASTOS, W. R.; LACERDA, L. D. A contaminação por mercúrio na bacia do Rio Madeira: uma breve revisão. **Geochim. Brasil**, v. 18, n. 2, p. 99-114, 2004.
- BATISTA, A. C. et al, **Comparison of different types of Factorial Kriging maps in an environmental case study**. Disponível em: <<http://www.kgs.ku.edu/Conferences/IAMG//Sessions/D/Papers/batista2.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016.
- BERGQUIST, B. A. et al. Mass-Dependent and - Independent Fractionation of Hg Isotopes by Photoreduction in Aquatic Systems. **Science**, v. 318, n. 417, 2007.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.21 - SANTARÉM**. Rio de Janeiro, 1976.
- _____. Agência Nacional de Água. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.
- _____. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>. Acesso em: 18 mai. 2016.
- _____. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>. Acesso em: 22 mai. 2016.
- _____. Disponível em: <<http://margemdireita.ana.gov.br/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.
- _____. Programa de Integração Mineral em Municípios da Amazônia. **Caracterização Preliminar das Potencialidades Hidrogeológicas da Vila Mojuí dos Campos, com Projeto de Poço Tubular**. Brasília, 1999.
- _____. Programa Municipal de Agropecuária. **Inventário Florestal Preliminar do Potencial Madeireiro do Município de Santarém 1996**. Brasília, 1996.
- _____. **Relatório do meio físico da Flona do Crepori: Plano de manejo das florestas nacionais do Crepori, Jamanxin e Amanã, localizado no Estado do Pará**. Curitiba: ICMBIO, 2009.
- _____. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Portaria n. 685, de 27 de agosto de 1998. Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/ALIMENTOS/legis/especifica>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n. 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, 2005.

_____. Ministério dos Transportes. **Relatório de Impacto Ambiental Pavimentação BR 163-BR 230**. Brasília, 2002.

BOURDIEU, P. **O poder simbólico**. Lisboa: Difel Editora Ltda., 1989.

BUENO, P. C. et al., Exposição humana a mercúrio: subsídios para o fortalecimento das ações de vigilância em saúde. **Cad. Saúde Colet.**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 443-7, 2011.

BURAK, D. L. et al. Metais pesados em solos: aspectos gerais. **Estudos avançados em produção vegetal**, p. 571-592, 2008.

CÂMARA, F. P. Psiquiatria e estatística. Parte I: Uso da análise de cluster na identificação e classificação de doenças. **Psychiatry On-Line Brazil**, 2008. Disponível em: <<http://www.polbr.med.br/ano08/cpc1108.php#1>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

CÂMARA, G. et al. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S. et al. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CÂMARA, G. et al. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (SPRING)**. 1998. 148 f. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 1998.

CAMARGO, D. A. et al. Psiquiatria ocupacional II: síndromes psiquiátricas orgânicas relacionadas ao trabalho. **Jornal Brasileiro de Psiquiatria**, v. 54, n. 1, p. 21-33, 2005.

CAMARGO, E. C. G. et al. **A Análise espacial de superfícies: análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: INPE, 2002

CAMARGO, E. C. G.; FELGUEIRAS, C. A.; MONTEIRO, A. M.V. A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis ambientais utilizando procedimentos geoestatísticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002.

_____; FUNKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de superfície**. São José dos Campos: INPE, 2005.

CAPUTO, M.V., RODRIGUES, R., VASCONCELOS, D. N. N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, s.l. **Anais...** p. 36-46, 1972.

CARVALHO, J. R. P. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas – uma proposta**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

COLEMAN, J. **Foundations of social theory**. Cambridge: Harvard University Press, 1990.

CORREIA, J. R. **Uso de técnicas multivariadas no estudo das interrelações de características do solo e a produtividade do eucalipto**. 1993. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

DAMAS, G. B.; BERTOLDO, B.; COSTA, L.T., Mercúrio: da antiguidade aos dias atuais. **Rev. Virtual Química**, v. 6, n. 4, p. 1010-1020. Acesso em: 22 mai. 2016.

DA SILVA, M.W., ESTANISLAU, C.A.M. Concentração de mercúrio em peixes da Amazônia. **Boletim A B Limino**, v. 41, n. 1, p. 8-14, 2015.

DEUSTCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB. Geostatistical Software Library and Uses's Guide**. New York: Oxford University Press, 1997.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/hidrovias/hidrovias-interiores/hidrovia-do-tapajos>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental. **Sistemas de Produção**. 2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo; Embrapa Brasília, 2013.

_____. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/pa/pa.htm>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

_____. **Caracterização dos solos da área do planalto de Belterra, município de Santarém, Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001 (Documentos, 115).

ESTRELA, M. A. A., ROHLFS, D. B. Mercúrio: implicações para a saúde e o meio ambiente. In: 7ª MOSTRA DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU DA PUC GOIÁS, 1., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2012.

FADIGAS, F. S., Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, 2006.

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

FARIAS, L.A. **Avaliação do conteúdo de mercúrio, metilmercúrio e outros elementos de interesse em peixes e em amostras de cabelos e dietas de pré-escolares da região amazônica.** Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FELGUEIRAS, C. A. 1999. 181 f. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informações geográficas: paradigma geoestatístico por indicação.** Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FERREIRA, P. V. **Estatística Experimental aplicada à Agronomia.** Maceió: EDUFAL, 1991.

FIALHO, F. M. Capital Social: usos e definições do conceito nas Ciências Sociais. **Três Pontos**, Belo Horizonte, v. 10, p. 31-35, 2004.

FILLION, M. et al. A preliminar study of Mercury exposure and blood pressure in the Brazilian Amazon. **Environmental Health**, Londres, v. 5, n. 29, p. 1-9, 2006.

FORSBERG, B. et al. Development and erosion in the Brazilian Amazon. A geochronological case study. **GeoJournal**, 19, p. 402-405, 1989.

_____. High levels in fish and human hair from the rio Negro (Brazilian Amazon): Natural background or anthropogenic contamination. In: PROC. INT. WORKSHOP ON ENVIRONMENTAL MERCURY POLLUTION AND ITS HEALTH EFFECTS IN THE AMAZON RIVER BASIN. 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Nat. Inst. for Minamata Disease/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. p. 33-40.

FOSTIER, A. H. et al. Mercury accumulation in natural forested Amazonian soils. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MERCURY AS A GLOBAL POLLUTANT. 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999.

GODOY, J. M. et al. Evaluation of the siltation of River Taquari, Pantanal, Brazil, through PB-210 geochronology of floodplain lake sediments. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 13, p. 71-77, 2002.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives. **Geoderma**, n. 89, p. 1-45, 1999.

GRIGAL, D. F. **Inputs and outputs of mercury from terrestrial watersheds: a review.** Disponível em: <<http://er.nrc.ca/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

GRIGOLETTO, J. C. et al. Exposição ocupacional por uso de mercúrio em odontologia: uma revisão bibliográfica. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 533-542, 2008.

GROOTAERT, C. et al. **Questionário integrado para medir capital social (QI-MCS).** Washington, D.C.: World Bank., 2003.

GUIMARÃES, J. R. et al. Mercury methylation potentials along a lake-forest transect in the Tapajós river floodplain, Brazilian Amazon: seasonal and vertical variations. **The Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 261, n.1, 2000a.

_____. Hg methylation along a lake-forest transect in the Tapajos river floodplain, Brazilian Amazon: seasonal and vertical variations. **Sci Total Environ**, 2000b.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: UFU, 2004.

HIGGINS, S. S. **Fundamentos teóricos do capital social**. Chapecó: Argos, 2005.

HYPOLITO, R; FERRER, L. M.; NASCIMENTO, S. C. Comportamento de espécies de mercúrio no sistema sedimento-água do mangue no município de Cubatão, São Paulo. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 15-24, 2005.

IBGE. **Dados do município de Santarém/PA**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Glossário Geológico**. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Santarém-Pa**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. **Notas técnicas: Histórico da investigação sobre cor ou raça nas pesquisas domiciliares do IBGE**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

IBAMA. **Estudo Matriz para o Projeto Manejo Sustentável dos Recursos Naturais da Várzea**. Brasília, 2000.

IDESP. **Indicadores de Vulnerabilidade do Pará**. Belém, 2012. Disponível em: <www.sepof.pa.gov.br>. Acesso em: 10 fev. 2015.

INPE. Disponível em: <www.inpe.gov.br>. Acesso em: 10 fev. 2015.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M.R. **Applied geostatistics**. Oxford: Oxford University Press, 1989.

_____. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1990.

JAQUET, O. Factorial kriging analysis applied to geological data from petroleum exploration. **Mathematical Geology**, v. 21, n. 7, 1989.

KRIGE, D. G. Half a Century of Geostatistics from a South African Perspective. In: 6TH INTERNATIONAL GEOSTATISTICS CONGRESS, 2000. **Anais...** 2000.

LACERDA, L. D. et al. Mercury and the new gold rush in the South In: Biogeodynamics of Pollutants in soils and Sediments. In: SALOMONS, W.; STIGLIANI, W. M. (Eds.).

Biogeodynamics of Pollutants in Soils and Sediments. Berlin: Springer Verlag, 1995. p. 213-245.

LACERDA, L. D. Amazon Mercury emissions. **Nature**, n. 374, p. 20-21, 1995.

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

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

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 enrichment? **Sci. Total Environ**, 2000.

LEMIRE, M. et al. Elevated levels of selenium in the typical diet of Amazonian riverside populations. **Science of the total environment**, v. 408, n. 19, p. 4076-4084, 2010.

_____. Selenium from dietary sources and motor functions in the Brazilian Amazon. **Neurotoxicology**, v. 32, n. 6, p. 944-953, 2011.

_____. Elevated blood selenium levels in the Brazilian Amazon. **Science of the total environment**, v. 366, n. 1, p. 101-111, 2006.

_____. Biomarkers of selenium status in the Amazonian context: blood, urine and sequential hair segments. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 19, n. 2, p. 213-222, 2008.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto.** 2. ed. Campo Grande: Ed. UNIDERO; Oficina de Textos, 2006.

LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 150-160, 2005.

MALM, O.; PFEIFFER, W. C.; SOUZA, C. M. M. Main pathways of mercury in the Madeira River area, Rondonia, Brazil. In: 8TH INTERN. CONF. HEAVY METALS IN THE ENVIRONMENT, Edimburgo, 1991. **Proceedings...** Edimburgo, 1991. p. 515-518.

_____; GUIMARÃES, J. R. D. Avaliação da contaminação dos peixes nos corpos hídricos próximos à cidade de Poconé – MT. In: OPAS. **Projeto de Avaliação de riscos à saúde na região amazônica relacionados com a contaminação ambiental por mercúrio:** Relatório final. Brasília, 1996.

MARTINS, C.A.S. et al. A dinâmica de metais-traço no solo. **Revista Brasileira Agrocência**, Pelotas, v.17, n.3-4, p.383-391, 2011.

MASCARENHAS, A. F. S. et al. Avaliação da concentração de mercúrio em sedimentos e material particulado no rio Acre, estado do Acre, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 1, p. 61-68, Manaus, 2004.

MAURICE-BOURGOIN, L. et al. Mercury pollution in the Upper Beni River, Amazonian Basin: Bolivia. **Ambio**, n. 28, p. 302-306, 1999.

MAZUR, N. **Níquel, chumbo, zinco e cobre em solos que receberam composto de resíduos sólidos urbanos**. 1997. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

MENDONÇA, K. V.; PINHEIRO, J. C. V. Capital social como fator de desenvolvimento local. In: XLXI CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 1., Brasília: SOBER, 2008. **Anais...** Brasília, 2008.

MICARONI, R. C. C. M. et al. Composto de mercúrio: revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. **Química Nova**, n. 23, n. 4, 2000.

MIRANDA, R. G. Qualidade dos recursos hídricos da Amazônia-Rio Tapajós: avaliação de caso em relação aos elementos químicos e parâmetros físico-químicos. **Ambiente e Água**, v. 4, n. 2, p. 75-92, 2009.

MMA. **Perfil do Gerenciamento de Mercúrio no Brasil incluindo seus resíduos: Diagnóstico Preliminar sobre o Mercúrio no Brasil**. Brasília, 2010.

MOREIRA, J. C. P., MAYORGA, R. D., KHAN, A. S., MAYORGA, M. I. D. O.; MENEZES, A. S. B. D. Capital Social como um dos fatores de sucesso das Cooperativas Agroindustriais. Documentos Técnico-científicos. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 40, n. 3, 2009.

MOURA, C. V. A. Aplicação de tratamento estatístico multivariado em dados geoquímicos de solo no mapeamento geológico na província de Carajás (alvo 2 – corpo 4). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.15, 1985.

NASA. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 18 out. 2015.

NRIAGU, J. O. Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas. **Sci Total Environ**, 1994.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CRUZ, C. D. Importância relativa dos metais pesados do solo na identificação e separação de materiais de origem. **Ceres**, Viçosa, v.45, n. 260, 1998.

OPROMOLLA, P. A.; DALBEN, I.; CARDIM, M. Análise geoestatística de casos de hanseníase no Estado de São Paulo, 1991-2002. **Revista Saúde Pública**, 2006, v. 40, n. 5, p. 907-13.

PALHETA, D.C.; TAYLOR, A. Mercury in Environmental and Biological Samples from a Gold Mining Area in the Amazon Region of Brazil. **The Science of the Total Environment**, 1995.

PALHETA, D. C. et al. Mercúrio e alumínio em tecidos de peixe no estado do Pará: considerações sobre neurotóxicos na região amazônica do Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, p. 979-981, 2011.

PASSOS, C. J.; MERGLER, D. Exposição humana ao mercúrio e efeitos adversos à saúde na Amazônia: uma revisão. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, n. 24, 2008.

PASSOS, P.N.C. A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente. **Direitos Fundamentais e Democracia**, Curitiba, v. 6, 2009.

PASSOS, C. J. S. et al. Epidemiologic confirmation that fruit consumption influences mercury exposure in riparian communities in the Brazilian Amazon. **Environmental Research**, v. 105, p. 183-193, 2007.

PATTUSSI, M. P.; MOYSÉS, S. J.; Junges, J. R.; Sheiham, A. Capital social e a agenda de pesquisa em epidemiologia. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 8, p. 1525-1546, 2006.

PFEIFFER, W. C. et al. O Environment fate of Mercury from gold mining in the Brazilian Amazon. **Environmental Reviews**, v. 1, p. 26-37, 1993.

PELEJA, J. R. P. **Os fatores que influem nos níveis de mercúrio (Hg) na água e plâncton de lagos associados aos rios Tapajós e Negro**. 2002. 73 f. Dissertação (Mestrado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2002.

_____. **Balanço de massas de mercúrio (Hg) total em duas microbacias da Amazônia Central**. 2007. Tese (Doutorado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2007.

PEREIRA, D.; YALLOUZ, A.V. Recicladora artesanal de lâmpadas fluorescentes: estudo de caso do potencial de aplicação de método alternativo de determinação de mercúrio In: JORNADA INTERNA CIENTÍFICA, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2004. 1 CD-ROM.

PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo/FAPESP, 1999.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 12. ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1985.

PINHEIRO, M.C.N. et al. Mercury pollution and childhood in Amazon riverside villages. **Environment International**, v. 33, p. 56-61, 2007.

_____. Avaliação da contaminação mercurial mediante análise do teor de Hg total em amostras de cabelo em comunidades ribeirinhas do Tapajós, Pará, Brasil. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, Uberaba, v. 33, n. 2, 2000.

PRATES, I.; VENEROSO, C. **Capital Social e Pobreza**: implicações teórico-empíricas para estudos de Programas de Renda Mínima. Disponível em: <<http://www.sinteseeventos.com.br/bien/pt/papers/ianpratesCapitalsocialepobreza.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2014.

PORTES, A. Capital Social: Origens e aplicações na sociologia contemporânea. **Sociologia, Problemas e Práticas**, Lisboa, n. 33, p. 133-158, 2000.

QUEIROZ, J. C. B. **Utilização da geoestatística na quantificação do risco de contaminação por metais pesados, na área portuária de Santana- Amapá**. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Unesp, Rio Claro, 2003.

_____; STURARO, J. R.; RIEDEL, P. S. Geostatistic Mapping of Arsenic, Manganese and Iron Contamination Risk in the Port of Santana, Amapa, Brazil. In: CONFERENCE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL AND GEOLOGY, 2001, Cancun. **Anais...** Cancun, 2001. Disponível em <www.kgs.ukans.edu/Conferences/IAMG/Sessions/G/g.html>. Acesso em: 10 out. 2015.

RAMALHO, J. F. P. G.; Amaral Sobrinho, N. M. B.; Velloso, A. C. X. Contaminação da microbacia de Caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2000.

REEVES, M. A.; HOFFMANN, P. R. The human selenoproteome: recent insights into functions and regulation. **Cell Mol Life Sci**. v. 66, n. 15, p. 2457-78, 2009.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. Lavras: Ed. UFLA, 2007.

RODRIGUES, J. L. et al. A fast method for the determination of 16 elements in hair samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) with tetramethylammonium hydroxide solubilization at room temperature. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 23, n. 7, p. 992-996, 2008.

ROULET, M. et al. The geochemistry of Hg in Central Amazonian soil developed on the Alter do Chão formation of the lower Tapajós River Valley, Pará state, Brazil. **Sci. Total Environ**, 1998a.

_____. Distribution and partition of total mercury in waters of the Tapajós river basin, Brazilian Amazon. **Sci. Total Environ**, 1998b.

ROULET, M.; GUIMARÃES, R. R. D.; LUCOTTE, M. Methyl Hg production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain - effect of seasonal inundation. **Water Air Soil Pollut**, n. 128, p. 41-60, 2001a.

ROULET, M.; LUCOTTE, M. Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of a tropical rain forest in French Guiana, South America. **Water Air Soil Pollut**, n. 80, p.1079-1088, 1995.

_____; _____; GUIMARÃES, J. R. D.; RHEAL, I. MethylHg in water, seston, and epiphyton of na Amazonian river and its floodplain, Tapajós River, Brazil. **Sci. Total Environ**, 2000b.

SAMPAIO, D. et al. Mercúrio nos peixes do Rio Tapajós, Amazônia brasileira. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, 2006.

SANTOS, E. C. O.; JESUS, I. M. D. et al. Estudo de Saúde e Exposição ao Mercúrio da Comunidade Ribeirinha de Brasília Legal, Estado do Pará, Brasil. **Cad. Saúde Colet.** Rio de Janeiro: Fundação José Bonifácio, v. 7, n. 2, 1999.

SANTOS, A.C.P. et al. Avaliação da ingestão diária de micronutrientes e mercúrio em pré-escolares de algumas comunidades do estado do Amazonas, Brasil. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE. Santos, 2007. **Anais...** Santos, 2007.

SILVA, A.P. **Projeto Itaituba**: programa de ciência e tecnologia ambiental. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq., 1997.

SILVA, A P.; SANTOS, E.C.; BRABO, E.S.; CÂMARA, V.M.; MASCARENHAS, A.F.S.; Jesus, I.M.; FAIAL, K.R.F., LOUREIRO, E.C.B. Contribuição ao estudo da poluição por mercúrio no Estado do Acre. **Revista Saúde e Ambiente**, 1999.

SCHNEIDER, L. Assessment of non-invasive techniques for monitoring mercury concentrations in species of Amazon turtles. **Toxicological and Environmental Chemistry**, p. 1-13, 2010.

SIQUEIRA, G.W. et al. Distribuição do mercúrio em sedimentos de fundo no Estuário de Santos SP/Brasil. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 4, p. 309-316, 2005.

SKOLE, D.; TUCKER, C. J. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, n. 260, p. 1905-1910, 1993.

SILVA-FORSBERG, M. C.; FORSBERG, B. R.; ZEIDEMAN, V. K. Mercury contamination in humans linked to river chemistry in the Amazon basin. **Royal Swedish Academy of Sciences**, v. 28, p. 519-521, 1999.

SOARES, A. **Geoestatística para ciências da terra e do ambiente**. 2.ed. Lisboa: IST Press, 2006.

SOUSA, E. S., LIMA, M. O., OLIVEIRA, P. C., SANO, E. E. Avaliações da concentração de mercúrio total em solo e material particulado em áreas alagáveis na foz do rio Tapajós-PA, Fm. Alter do Chão, com auxílio de técnicas de sensoriamento remoto. **Novos Cadernos NAEA**, v. 15, n. 2, p. 315-341, 2012.

SOUSA, E. S. **Uso integrado de dados de sensoriamento remoto para o estudo da geologia e geomorfologia da área da foz do rio Tapajós, Santarém-PA**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

SOUZA, J. R.; BARBOSA, A. C. Contaminação por mercúrio e o caso da Amazônia. **Química e sociedade**, n. 12, 2000.

SOUZA, M. C. S. (Trad.). **Manual de análises de mercúrio**, Tóquio: Laboratório de Análises de Mercúrio do DNPM 5°. DS/PA, 2004.

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para o uso e proteção**. 1996. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) – UFPA, Programa de pós-graduação em em Geologia e Geoquímica, Belém, 1996.

TEIXEIRA, W, et al. (Org.) **Decifrando a Terra**. 2^a – São Paulo: Ed. Companhia Editora Nacional, 2009.

TINÔCO, A.A.P. et al. Avaliação de contaminação por mercúrio em Descoberto, MG. **Eng. Sanitária Ambiental**, v.15, n.4, 2010.

TRASANDE, L. et al. Methyl mercury exposure in a subsistence fishing community in Lake Chapala, Mexico: an ecological approach. **Environmental Health**, v. 9, n. 1, 2010.

WASSERMAN, J. C.; HACON, S. S.; WASSERMAN, M. A. O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico. **Mundo e Vida**, v. 2, n. 1/2, 2001.

WENDLAND, E., BARRETO, C. E. A. G., GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, p. 261-269, 2007.

WHO. **Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure**. Genebra, 2008.

VALADARES, J. M. A. S. Cobre em solos do Estado de São Paulo: cobre total. **Bragantia**, Campinas, v. 34, n. 4, 1975.

VIMY, M. J.; TAKAHASHI, Y.; LORSCHIEDER, F. L. Material fetal distribution of mercury (203 Hg) released from dental amalgam filling. **Am. J. Physiol.**, v. 258, n. 4, p. 939-945, 1990.

ZEIDEMANN, V. K. **A geoquímica de mercúrio em solos da bacia do rio Negro e sua influência no ciclo regional do mercúrio**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – INPA/UA, 1999.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DA BR-163. Disponível em: <<http://zeebr163.cpatu.embrapa.br/index.php>>. Acesso em: 20 set. 2015.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B. **Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um podzólico Vermelho Amarelo**, 1993. Viçosa UFV. Tese Doutorado

APÊNDICES

APÊNDICE A - FIGURAS COM ASPECTOS MAIS IMPORTANTES DOS LOCAIS DE COLETA

As Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 com fotografias, servem para corroborar e ilustrar este trabalho e apresentam de forma visual os ambientes estudados e as condições de trabalho de campo.



Figura 1 – A e B) Fotos panorâmicas do meio da foz do Tapajós, nas proximidades da Vila de Alter do Chão; C) Panorâmica da boca do Furo do Arapixunas com o rio Amazonas; D) Coleta de amostras de água na boca do Arapixunas com o Tapajós; E e F) Coletas de água no Igarapé de Cucurunã, ramal dos Coelhos, (Segunda Campanha, junho 2014).

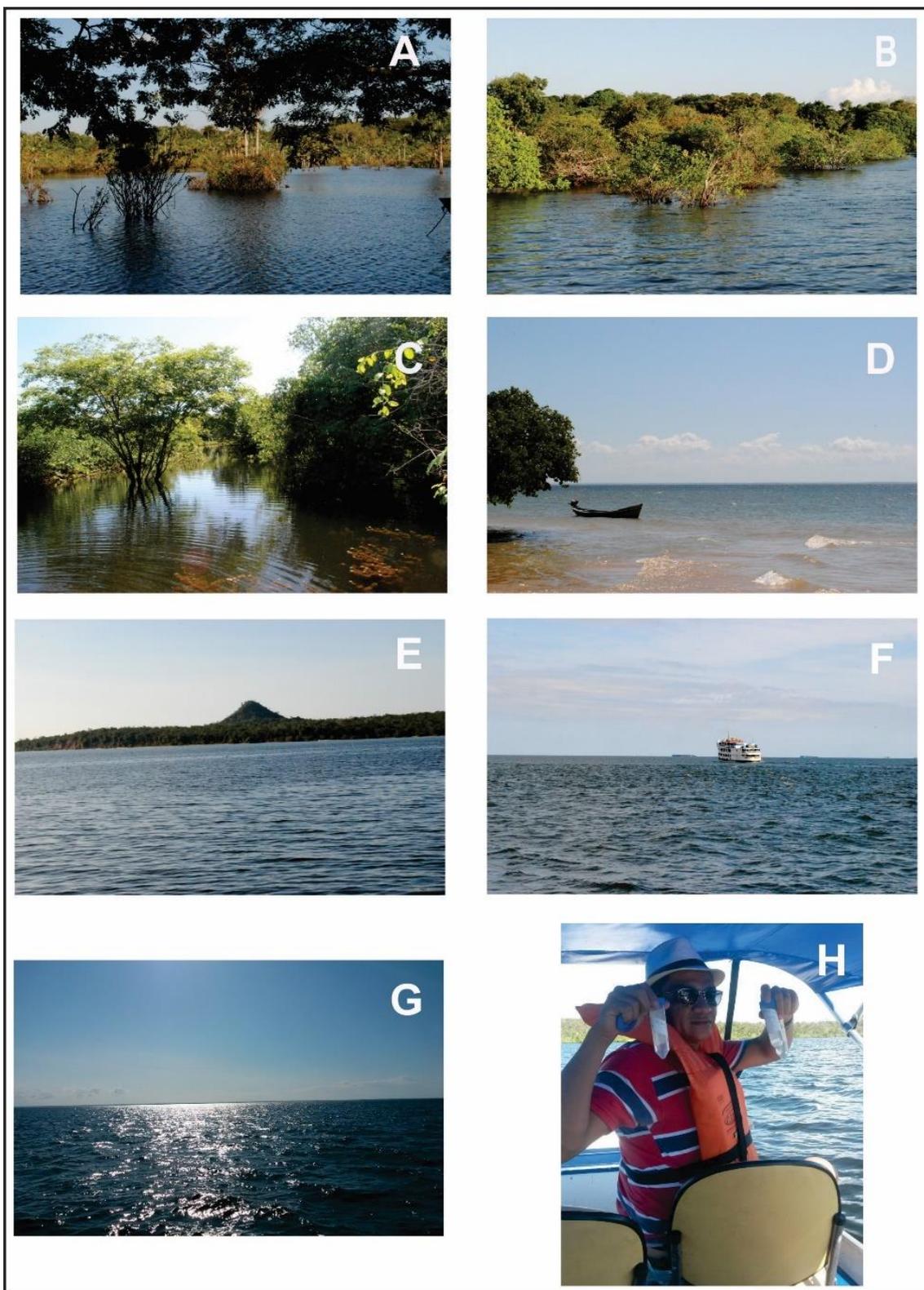


Figura 2 – A, B e C) Panorâmica de ambientes alagados na Comunidade de Itapari (Lago Preto) e Lago Verde em Alter do Chão; D) Panorâmica da praia de Ponta de Pedras, margem direita da foz; E) Panorâmica do Lago Verde em Alter do Chão, ao fundo a Serra do Cruzeiro; F e G) Panorâmica da foz do Tapajós, ao fundo embarcação tipo recreio, subindo o rio (F) e (G) paisagem aberta e livre; H) Tubos Falcons com amostras de água e material particulado, (Segunda Campanha, junho 2014).

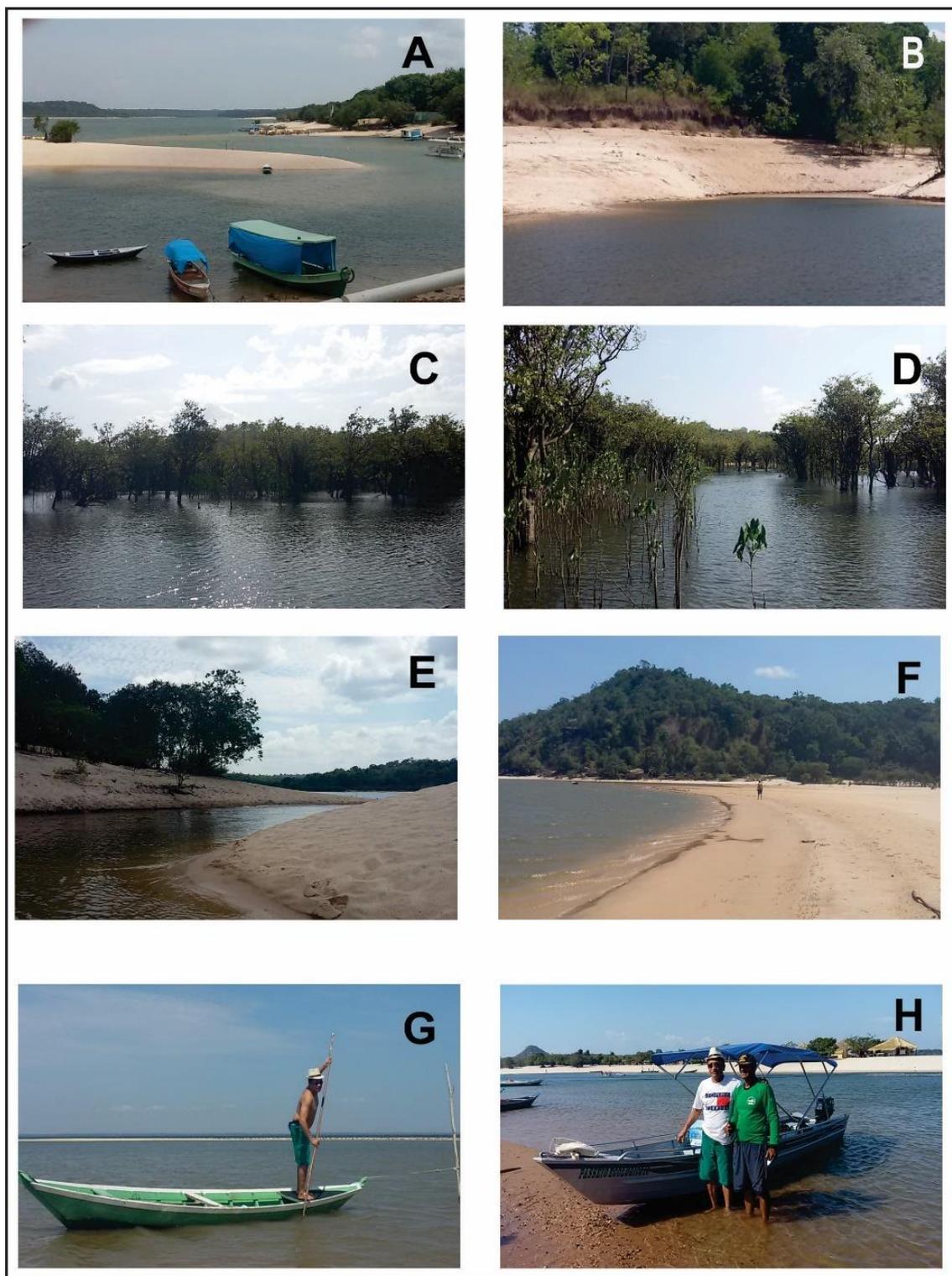


Figura 3 – A) Boca do Lago Verde; B) Lago do Jurucurí; C e D) Igarapé do Miritiapina (Nascente I e II); E) Boca do Jurucurí; F) Panorâmica da Ponta do Cururu; G) Foz do Tapajós e H) Porto de Alter do Chão, (Terceira Campanha, dezembro 2014).



Figura 4 – A) Ecossistema do entorno do Igarapé do Juá, as margens da rodovia Everaldo Martins; B) Coleta de material particulado no Igarapé do Juá, as margens da rodovia Everaldo Martins; C) Ambiente do lago do Juá, onde foram coletadas amostras de solo-sedimento e material particulado; D) Coleta de material particulado no Lago do Juá; E) Coleta de solo no ambiente entorno do Lago do Juá; F) Ambiente do Lago do Preto na comunidade do Itapari, margem direita do rio Tapajós, Santarém-PA.; G) Lago do Preto, comunidade do Itapari, margem direita do rio Tapajós, Santarém-PA.; H) Coleta de solo no ambiente entorno do Lago do Itapari.



Figura 5 – A) Ambiente do Lago Verde, comunidade do Caranazal, as margens da Rodovia Everaldo Martins, próximo a Vila de Alter do Chão; B) Panorama do Lago Verde, comunidade do Caranazal, as margens da Rodovia Everaldo Martins, próximo a Vila de Alter do Chão; C) Coleta de material particulado no Lago Verde; D) Panorama da Ponta do Tauá, na vila de Alter-do-Chão; E) Panorama da Ponta do Tauá, vila de Alter-do-Chão, visual da *Fm.* Alter do Chão; F) *Fm.* Alter do Chão, Ponta do Tauá, Alter-do-Chão; G) Coleta de solo na Ponta do Tauá, vila de Alter-do-Chão; H) Lago próximo a Serra do Cairé, Rodovia Everaldo Martins, Vila de Alter do Chão.



Figura 6 – A) Panorama do Lago próximo a Serra do Cairé, Rodovia Everaldo Martins, Vila de Alter do Chão; B) Coleta de material particulado no lago próximo a Serra do Cairé; C) Panorama do Lago Verde no Caminho das Pedras, Vila de Alter do Chão; D) Amostras de solo do Lago Verde no Caminho das Pedras, Vila de Alter do Chão.

APÊNDICE B - FIGURA COM ASPECTOS IMPORTANTES DO LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MERCÚRIO.



Figura 7 – Etapas do procedimento analítico para a determinação de Hg total por Espectrofotômetro de absorção atômica e metil mercúrio. Após o tratamento e a separação granulométrica das amostras, temos em, A) Ácido Perclórico + Ácido Nítrico (1:1) ($\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3$), Ácido Sulfúrico e Água Deionizada (Digestão), para ocorrer abertura química; B) Chapa aquecedora; C) Vidraria de balões específicos para análise de mercúrio; D) Absorção atômica e leitura dos resultado do mercúrio total no registrador; E) Sala de análise de metilmercúrio; F) e G) Cromatógrafo: Detector de captura de elétron e o registradores que detectam a cromatografia por espectrometria por absorção atômica.

APÊNDICE C - TABELA COM OS DADOS DE LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E ATRIBUTOS DE CADA AMOSTRA DA 1ª CAMPANHA 2014.

TABELA DE PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS 1a. CAMPANHA 2014				
No.	ID	Latitude (X)	Longitude (Y)	Hg/(µg/L)
1	Boca do Arapixunas (Saída para o Amazonas)	-2,16816667	-54,88675	0,91
2	Boca do Arapixunas (Entorno de Macrofitas)	-2,16816667	-54,88675	0,91
3	Boca do Arapixunas (Vasão do Amazonas)	-2,26591667	-54,83333333	5,15
4	Vila de Arapixunas	-2,22952778	-54,84786111	1,25
5	Arapixunas (Saída pra Alter do Chão)	-2,33088889	-54,8735	0,48
6	Arapixunas (Saída do Delta)	-2,35780556	-54,90886111	0,6
7	Ponta do Sururu	-2,26461111	-54,83358333	0,6
8	Ponta do Piriquito	-2,34591667	-54,79066667	0,48
9	Foz do Tapajós (Amostra 01)	-2,29938889	-54,80869444	0,63
10	Foz do Tapajós (Amostra 02)	-2,33058333	-54,79688889	0,71
11	Foz do Tapajós (Amostra 03)	-2,34591667	-54,79066667	1,13
12	Iate Clube	-2,42244444	-54,7445	0,79
13	Trapiche Massabor (Área urbana de Santarém)	-2,41536111	-54,71130556	0,87
14	Foz do Tapajós (UFOPA)	-2,41702778	-54,74241667	0,97
15	Igarapé do Juá	-2,44413889	-54,78875	0,89
16	Praia do Maracanã	-2,42538889	-54,75491667	1,03
17	Lago do Juá	-2,43163889	-54,78111111	1,01
18	Praia do Pajuçara	-2,41902778	-54,81722222	1,02
19	Igarapé do Cucurunã	-2,47213889	-54,78158333	1,14
20	Igarapé de São Brás	-2,48152778	-54,81830556	1,23
21	Praia de Ponta de Pedras	-2,43994444	-54,91694444	1,2
22	Praia de Itaparí	-2,43944444	-54,90055556	4,69
23	Lago Pedro (Itaparí)	-2,44111111	-54,89944444	1,201
24	Igarapé do Jutuarana	-2,535	-54,90916667	1,321
25	Igarapé do Sonrisal	-2,53444444	-54,92305556	1,34
26	Lago Verde (Caranazal)	-2,52194444	-54,93138889	1,35
27	Lago do Cairé	-2,51472222	-54,94027778	1,403
28	Trapiche de Alter do Chão	-2,50222222	-54,95777778	1,35
29	Praia do Pindobal	-2,55833333	-54,96111111	1,53
30	Boca do Lago Verde	-2,50194444	-54,95111111	1,57
31	Boca do Lago Verde (Meio)	-2,49833333	-54,94933333	1,59
32	Boca do Lago Verde (Fim)	-2,48194444	-54,93805556	1,513
33	Ponta do Cururu	-2,49472222	-54,95805556	0,834
34	Ponta do Tauá	-2,49055556	-54,97130556	<LOD
35	Foz do Tapajós (Ponta do Cururu)	-2,49194444	-54,98527778	<LOD

36	Foz do Tapajós (Amostra 04)	-2,49333333	-54,98583333	<LOD
37	Foz do Tapajós (Amostra 05)	-2,49833333	-54,97333333	<LOD

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D - TABELA COM OS DADOS DE LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E TRIBUTOS DE CADA AMOSTRA DA 2ª CAMPANHA 2014.

TABELA DE PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS 2a. CAMPANHA 2014

No.	ID	Latitude (X)	Longitude (Y)	Hg/(µg/L)
1	Boca do Lago Verde	-2,50225	-54,95094444	<LOD
2	Lago Verde	-2,4975	-54,94833333	<LOD
3	Boca do Igarapé do Camarão	-2,50263889	-54,93219444	0,13
4	Boca do Igarapé do Camarão (Amostra Direta)	-2,50377778	-54,93077778	0,91
5	Igarapé do Miritiapina (Nascente II)	-2,48244444	-54,95019444	0,853
6	Igarapé Miritiapina (Amostra Direta)	-2,48244444	-54,95019444	17,6
7	Igarapé Miritiapina (Nascente I)	-2,48336111	-54,95141667	<LOD
8	Ponta do Cajueiro	-2,49602778	-54,95786111	<LOD
9	Ponta do Tauá	-2,48558333	-54,97275	<LOD
10	Ponta do Cururu (Amostra Direta)	-2,47361111	-54,98141667	<LOD
11	Ponta do Cururu	-2,47038889	-54,98408333	<LOD
12	Ponta do Cururu (Repouso de Pássaros)	-2,46947222	-54,98158333	<LOD
13	Boca do Jurucurí	-2,54597222	-54,97480556	<LOD
14	Nascente do Jurucurí (Lago do Jurucurí)	-2,54830556	-54,96991667	<LOD
15	Praia do Pindobal	-2,55677778	-54,98011111	<LOD
16	Trapiche de Alter do Chão	-2,41536111	-54,71130556	<LOD
17	Iate Clube	-2,42236111	-54,74461111	<LOD
18	Praia do Maracanã	-2,42447222	-54,75380556	<LOD
19	Praia do Juá	-2,42911111	-54,77055556	<LOD
20	Praia do Pajuçara	-2,41708333	-54,81475	<LOD
21	Foz do Tapajós (Amostra 01)	-2,39566667	-54,83688889	<LOD
22	Foz do Tapajós (Amostra 02)	-2,37408333	-54,84775	<LOD
23	Foz do Tapajós (Amostra 03)	-2,34580556	-54,80755556	<LOD
24	Boca do Arapixunas (Foz do Tapajós)	-2,27127778	-54,83205556	<LOD
25	Boca do Arapixunas (Foz do Tapajós/A. Direta)	-2,26988889	-54,83147222	<LOD
26	Foz do Tapajós (Amostra 04)	-2,32047222	-54,80519444	<LOD
27	Foz do Tapajós (Amostra 05)	-2,40619444	-54,75963889	<LOD
28	Igarapé Jutuarana	-2,535	-54,90919444	<LOD
29	Igarapé Sonrisal	-2,53436111	-54,92311111	<LOD

30	Lago Verde (Caranazal)	-2,522	-54,93138889	<LOD
31	Lago do Cairé	-2,51458333	-54,94022222	<LOD
32	Igarapé do Cucurunã (Ramal do Coelhos)	-2,47213889	-54,78158333	<LOD
33	Lago do Jurucurí	-2,54830556	-54,96991667	<LOD
34	Boca do Arapixunas (Amostra B1)	-2,26988889	-54,83147222	<LOD
35	Trapiche Massabor (Área urbana de Santarém)	-2,41536111	-54,71130556	<LOD
36	Foz do Tapajós (UFOPA)	-2,41702778	-54,74241667	<LOD
37	Igarapé do Juá (Estrada do Aeroporto)	-2,44413889	-54,78875	<LOD
38	Igarapé de São Brás	-2,48152778	-54,81830556	<LOD
39	Igarapé do Camarão	-2,50263889	-54,93219444	<LOD
40	Ponto 04	-2,40619444	-54,75963889	<LOD
41	Nascente do Igarapé do Miritiapina	-2,48333333	-54,95166667	<LOD
42	Ponta do Cajueiro	-2,49611111	-54,95777778	<LOD
43	Ponta do Cururu (Talude Continental)	-2,47361111	-54,97472222	<LOD
44	Bora do Lago do Jurucurí	-2,54591667	-54,97472222	<LOD
45	Nascente do Lago Jurucurí (Ponto B1)	-2,54833333	-54,97	<LOD

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXOS

ANEXO A - ANÁLISE EXPLORATÓRIA NO “R”

```

#DEFINIR A ÁREA DE TRABALHO
>setwd("D:/Agenda2015/Enilson/R")
#SELECIONAR PACOTES
>library(geoR)
>library(gstat)
>library(lattice)
>library(sp)
>library(graphics)

# PRINCIPAIS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA VARIÁVEL MERCÚRIO

# MERCURIO HG
>geoa<- as.geodata(Geo,coords.col = 1:2, data.col = 3)
>summary(geoa$data)

#HISTOGRAMA
>hist(geoa$data, breaks = 20, main = "", xlab = "Mercúrio", ylab = "Frequência", col = 3)
#BOX PLOT
>boxplot(geoa$data, col = "gray")
#QQ PLOT
>qqnorm(geoa$data, main = NULL, ylab = "Resistividade", xlab = "ResVal")

#MAPA DE PONTOS

#VERIFICAÇÃO DA ESTACIONARIDADE (AUSÊNCIA DE TENDÊNCIA)
#PERFIL1: "W-E" PARA HG
>plot(hg1$coords[, 1], hg1$data, xlab = "W-E",
+ ylab = "Mercurio", pch = 20, cex = 1.5, main = "Perfil1")
>lines(lowess(hg1$data ~ hg1$coords[, 1]))

>plot(hg1$coords[, 2], hg1$data, xlab = "N-S",
+ ylab = "Mercurio", pch = 20, cex = 1.5, main = "Perfil1")
>lines(lowess(hg1$data ~ hg1$coords[, 2]))

###SEMIVARIOGRAMA DE SUPERFICIE
#VARIÁVEL PERFIL1

>coordinates(Geo) = ~ x + y;
>trellis.par.set(sp.theme())
>vgp1 = gstat(NULL, "Perfil1", I(Hg)~1, Geo)
>plot(variogram(vgp1, cutoff=15000, width=1500, map=TRUE),cex=1.5,main = "Perfil 1")

# ANÁLISE SEMIVARIOGRÁFICA: PERFIL 1
# ANÁLISE DE TENDÊNCIA: ELIMINAR A TENDÊNCIA DOS DADOS
# TRABALHAR COM OS RESÍDUOS?

>vario<-bvariogram(Hg~x+y, Geo)
>vario #print it out
>names(vario)
>plot(vario,type="b", lty=2, col="black",main="Hg")
>plot(vario,type="b", lty=2, col="black",main="Perfil 1")
>Hg1 <- gstat(id = "Hg", formula = Hg ~ 1, data = Geo)
>vHg1 <- variogram(Hg1)
>plot(vHg1,type="b", lty=2, col="black",main="Hg")
>mHg<-vgm(0.5, "Sph", 5000, add.to =
+ vgm(1.5, "Sph", 12000, nugget = 0))

```

```

#MODELO AJUSTADO 1
>plot(vHg1, mHg,type="b",main = "Modelo ajustado: Hg")

#Calculo da area contaminada
#Mapas de riscos

#Carregar pacotes
library(geoR)
library(gstat)
library(lattice)
library(sp)
library(scatterplot3d)

#Definir a area de trabalho

#carregar arquivo de dados
Geo <- read.table("grau.txt", head=T)
Geo[1:5,] #mostrar os dados (vari?veis) na area de trabalho

#Resumo do arquivo Geo
summary(Geo)

jbor <- read.table("borda5.txt", head=T)
jbor[1:5,]
plot(jbor, type="o")

summary(jbor)

##### 3.2 Mapas de riscos
##### Variável Hg
##### Valor máximo permitido (Zc = 0.002 ppm)

hg<-as.geodata(Geo,coords.col = 1:2, data.col = 3)

##Krigagem indicativa
#Definir grid (malha)
x <- seq(-55.2,-54.6,l=100)
y <- seq(-2.68,-2.15,l=105)
#x <- seq(-55.2,-54.6,l=30)
#y <- seq(-2.68,-2.15,l=35)
locHg <- expand.grid(x=x,y=y)
summary(locHg)

# Mapa de classificacao Z80
rgb.class <- colorRampPalette(c("green","red"), space = "rgb")
brks <- c(0,0.5,1.0)
cols <-rgb.class(length(brks) - 1)
leg.txt <- c("Nao Contaminado","Contaminado")
image(Hg.kc, border=jbor, loc=locHg, val=Z80,col=rgb.class(2))
legend(-55.2,-2.15, fill = cols, legend = leglabs(brks," ", " "),
      bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.class(2),text.width = NULL, text.col = 0)
legend(-55.2,-2.145, leg.txt, col = c(1, 3),cex = 0.85,bty = "n")

```

```

##Krigagem indicativa
#Definir grid (malha)
x <- seq(-55.2,-54.6,l=100)
y <- seq(-2.68,-2.15,l=105)
#x <- seq(-55.2,-54.6,l=30)
#y <- seq(-2.68,-2.15,l=35)
locHg <- expand.grid(x=x,y=y)
summary(locHg)

## Krigagem Indicativa: predição de probabilidades e quantis
## Probabilidade de Hg ser maior que 0.8 ppm em cada ponto
OC <- output.control(thres=0.2, quan=c(0.15,0.25,0.50,0.65,0.75,0.90))
Hg.kc <- krige.conv(hg, loc=locHg,krige=krige.control(obj=hg.ols),output=OC)

# examinando o objeto retornado pela função
names(Hg.kc)
Zp<-Hg.kc$pred # valores preditos
Zv<-Hg.kc$krige.var # variancia
Zprob=Hg.kc$prob # probabilidades estimados do valor ser menor que 0.002 nos pontos selecionados
Zc=1-Hg.kc$prob # probabilidades estimados do valor ser maior que 0.002 nos pontos selecionados
Ztype=Hg.kc$mean # E-type (médias)
Zq=Hg.kc$quant # quantis
Z80<- ifelse(Zc>=0.80,1,0)
Z85<- ifelse(Zc>=0.85,1,0)
Z90<- ifelse(Zc>=0.90,1,0)

#Salvando os resultados em uma tabela
ki <- cbind(Zp,Zv,Zc,Zprob,Ztype,Hg.kc$quant)

kind<-cbind(locHg,ki)
names(kind)
write.table(kind,"hg_ind.dat")

# Ler da tabela gravada
Hg.ki<-read.table("hg_ind.dat", header = TRUE)
names(Hg.ki)

Hg.ki[1:5,]

summary(Hg.ki)
###Mapas
#Mapa de probabilidades Zc>0.2 ppb
require(maptools)
rgb.palette <- colorRampPalette(c("blue","green",
"yellow","yellow","orange","orange","red","red"), space = "rgb")
#bluepal<-colorRampPalette(c=terrain.colors(20))
brks <- c(0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0)
cols <-rgb.palette(length(brks) - 1)
image(Hg.kc, border=jbor, loc=locHg, val=Zc,col=rgb.palette(30))
legend(-55.2,-2.15, fill = cols, legend = leglabs(brks,"<", ">="),
      bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.palette(60))
title("Hg: Prob Zc>0.2 ppb")

```

```

# Mapa de classificacao Z80
rgb.class <- colorRampPalette(c("green","red"), space = "rgb")
brks <- c(0,0.5,1.0)
cols <-rgb.class(length(brks) - 1)
leg.txt <- c("Nao Contaminado","Contaminado")
image(Hg.kc, border=jbor, loc=locHg, val=Z80,col=rgb.class(2))
legend(-55.2,-2.15, fill = cols, legend = leglabs(brks," ", " "),
      bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.class(2),text.width = NULL, text.col = 0)
legend(-55.2,-2.145, leg.txt, col = c(1, 3),cex = 0.85,bty = "n")

#Calculo da area contaminada
# para acima de 80% de risco contaminacao
area80<- ifelse(Zc>=0.80,1,2)
summary(area80)

area80 <- factor(area80, levels=1:2)
area.80 <- cbind(quantidade=table(area80),
  proporcao=round(prop.table(table(area80))*100,4))
area.80

# prob de contaminacao acima de 85%
image(Hg.kc, border=jbor, loc=locHg, val=Z85,col=rgb.class(2))
legend(-55.2,-2.15, fill = cols, legend = leglabs(brks," ", " "),
      bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.class(2),text.width = NULL, text.col = 0)
legend(-55.2,-2.145, leg.txt, col = c(1, 3),cex = 0.85,bty = "n")

area85<- ifelse(Zc>=0.85,1,2)
area85 <- factor(area85, levels=1:2)
area.85 <- cbind(quantidade=table(area85),
  proporcao=round(prop.table(table(area85))*100,4))
area.85

# prob de contaminacao acima de 90%
image(Hg.kc, border=jbor, loc=locHg, val=Z90,col=rgb.class(2))
legend(-55.2,-2.15, fill = cols, legend = leglabs(brks," ", " "),
      bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.class(2),text.width = NULL, text.col = 0)
legend(-55.2,-2.145, leg.txt, col = c(1, 3),cex = 0.85,bty = "n")

area90<- ifelse(Zc>=0.90,1,2)
area90 <- factor(area90, levels=1:2)
area.90 <- cbind(quantidade=table(area90),
  proporcao=round(prop.table(table(area90))*100,4))
area.90

```

ANEXO B - ANÁLISE EXPLORATÓRIA NO “R” – CAPÍTULO IV

```

#Carregar pacotes
library(geoR)
library(gstat)
library(lattice)
library(sp)
library(scatterplot3d)

#Definir a area de trabalho
setwd("C:/Users/PROF. ENILSON 2013/Desktop/defesa_2016/defesa_2016/ R_15fev")

#carregar arquivo de dados
Geo <- read.table("grau.txt", head=T)
Geo[1:5,] #mostrar os dados (variáveis) na area de trabalho
attach(Geo)
#Resumo do arquivo Geo
summary(Geo)

jbor <- read.table("borda5.txt", head=T)
hg1 <- as.geodata(Geo, coords.col = 1:2, data.col = 3)
hg1      #mostrar a variavel Niquel area de trabalho

###Verificação da estacionaridade (ausencia de tendencia)
plot(hg1$coords[, 1], hg1$data, xlab = "W-E",
     ylab = "Mercurio", pch = 20, cex = 1.5, main = "Mercurio")
lines(lowess(hg1$data ~ hg1$coords[, 1]))

plot(hg1$coords[, 2], hg1$data, xlab = "N-S",
     ylab = "Mercurio", pch = 20, cex = 1.5, main = "Mercurio")
lines(lowess(hg1$data ~ hg1$coords[, 2]))

###!!! Presenca de estacionaridade

###Semivariograma de superficie
#Variavel perfil
#rm(list=ls())
coordinates(Geo) = ~ x + y;
trellis.par.set(sp.theme())
vgp1 = gstat(NULL, "Perfil", I(hg)~1, Geo)
plot(variogram(vgp1, cutoff=0.15, width=0.015, map=TRUE),cex=1.5,main = "Mercurio")

plot(variogram(vgp1, cutoff=0.15, width=0.020, map=TRUE),cex=1.5,main = "Mercurio")

### Analise semivariografica: Mercurio

Geo[1:5,]

# No Trend:
coordinates(Geo) = ~ x + y;
vario<-variogram(hg~1, Geo)

vario # print it out
names(vario)
plot(vario,type="b", lty=2, col="black",main="Perfil 1")

Hg1 <- gstat(id = "hg", formula = hg ~ 1, data = Geo)
vHg1 <- variogram(Hg1)
edit(vHg1)
plot(vHg1,type="b", lty=2, col="black",main="Hg")

```

```

class(vHg1)
vHg1[1,3]<-0.15

mHg <-vgm(0.5, "Sph", 0.04, add.to =
  vgm(1.5, "Sph", 0.12, nugget = 0)) #Modelo ajustado 1

mHg1 <-vgm(0.2, "Sph", 0.02, add.to =
  vgm(1.5, "Sph", 0.14, nugget = 0)) #Modelo ajustado 2 ok

plot(vHg1, mHg1,type="b",main = "Modelo ajustado: Hg")

# Grau decimal/km: 0.02*111
0.02*111 # 2.22 km
0.14*111 # 15.54 km

#modelo ajustado pelo gstat
fHg <- fit.variogram(vHg1, mHg1, fit.sills = F, fit.ranges = F)

#fHg <- fit.variogram(vHg1, mHg1)

plot(vHg1,fHg,type="b",main = "Modelo ajustado gstat: Mercurio")
fHg

## -----
## Trend Hg
## -----
o <- order(Geo$y) #ordenando y
Geo <- as.data.frame(Geo)
class(Geo)
attach(Geo)
trendHg <- seq(0,0,l=length(hg))
for (i in 1:length(hg)){
  trendHg[i] <- hg[i]+mean(hg[i:(i+7)], na.rm = TRUE)}
trendHg
data <- as.data.frame(cbind(x,y,trendHg))
detach(Geo)
summary(data)
## -----
## Variograma e Krigagem
## -----
require(gstat)
geo.grid <- expand.grid(seq(-55.2,-54.6,l=100),seq(-2.68,-2.15,l=105))

names(geo.grid) <- c("x","y")
gridded(geo.grid) = ~x+y
gHg <- gstat(id = "trendHg", formula = trendHg ~ 1, locations = ~x+y, data = data)
#vHg <- variogram(gHg, cutoff = 2, width = 2/20)

vHg <- variogram(gHg)

edit(vHg)
vHg[1,3]<-0.15

plot(vHg,type="o",col="black",main = "Variograma experimental:TrendHg")

#Escala local
Hg.fit1 = fit.variogram(vHg, model = vgm(0.2, "Sph", 0.02, 0), fit.ranges = FALSE)
Hg.fit1
plot(vHg,Hg.fit1,type="p",col="black",main = "Modelo local ajustado:TrendHg")

```

```

#Krigagem escala local
koHg1 <- krige(formula = trendHg ~ 1, locations = ~x+y,
  data = data, newdata = geo.grid, model = Hg.fit1)
summary(koHg1)
names(koHg1)
koHg1$var1.pred

#Escala Regional
Hg.fit2 = fit.variogram(vHg, model = vgm(1.5, "Sph", 0.14, 0), fit.ranges = FALSE)
Hg.fit2
plot(vHg,Hg.fit2,type="p",col="black",main = "Modelo regional ajustado:TrendHg")

#Krigagem escala regional
koHg2 <- krige(formula = trendHg ~ 1, locations = ~x+y,
  data = data, newdata = geo.grid, model = Hg.fit2)
summary(koHg2)
names(koHg2)

#Mapas krigagem fatorial
require(geoR)
#geo.grid <- expand.grid(seq(-55.2,-54.6,l=100),seq(-2.68,-2.15,l=1050))
#loc <- expand.grid(seq(0,5.5,l=105), seq(0,6,l=120))
#bor <- read.table("borda.dat")

loc <- expand.grid(seq(-55.2,-54.6,l=100),seq(-2.68,-2.15,l=105))

Hg1 <- as.data.frame(koHg1[1])
class(Hg1) <- "kriging"
Hg1$predict <- Hg1$var1.pred
Hg1$scoords <- cbind(Hg1$x,Hg1$y)

summary(Hg1$predict)

#Definição da escala de cores
require(maptools)
rgb.palette <- colorRampPalette(c("blue","green",
  "yellow","yellow","orange","orange","red","red"), space = "rgb")
brks <- c(0,1,2,3,4,5)
cols <-rgb.palette(length(brks) - 1)

#Mapa da KF do Ni na escala local
contour(Hg1, locations = loc, borders = jbor, filled = TRUE,
  col = rgb.palette(26), plot.title = TRUE)
#title("KF escala local Hg")

image(Hg1, border=jbor, loc=geo.grid, val=Hg1$predict, col = rgb.palette(26))
legend(-55.33,-2.13, fill = cols, legend = leglabs(brks,"<", ">="),
  bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.palette(26))
title("Krigagem Fatorial Escala Local Hg")

#Mapa da KF do Ni na escala Regional
Hg2 <- as.data.frame(koHg2[1])
class(Hg2) <- "kriging"
Hg2$predict <- Hg2$var1.pred
Hg2$scoords <- cbind(Hg2$x,Hg2$y)

contour(Hg2, locations = loc, borders = jbor, filled = TRUE,
  col = rgb.palette(26), plot.title = TRUE)
#title("KF escala Regional Hg")

```

```
image(Hg2, border=jbor, loc=geo.grid, val=Hg2$predict,col = rgb.palette(26))  
legend(-55.33,-2.13, fill = cols, legend = leglabs(brks,"<", ">="),  
bty = "n", cex = 0.8,col=rgb.palette(26))  
title("Krigagem Fatorial Escala Regional Hg")
```