



**Ministério da Educação e do Desporto
Fundação Universidade Federal de Rondônia
Núcleo de Ciências Exatas e da Terra
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente**

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE MERCÚRIO EM
SEDIMENTOS NO PERÍODO DA CHEIA DO RIO MUTUM-PARANÁ,
RONDÔNIA.**

FABIANO LUÍS BELEM

PORTO VELHO, ABRIL DE 2013



**Ministério da Educação e do Desporto
Fundação Universidade Federal de Rondônia
Núcleo de Ciências Exatas e da Terra
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente**

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE MERCÚRIO EM
SEDIMENTOS NO PERÍODO DA CHEIA DO RIO MUTUM-PARANÁ,
RONDÔNIA.**

FABIANO LUÍS BELEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente do Núcleo de Ciências Exatas e da Terra da Fundação Universidade Federal de Rondônia, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente.

PORTO VELHO, ABRIL DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA
BIBLIOTECA PROF. ROBERTO DUARTE PIRES

B451e Belém, Fabiano Luís

Estudo da distribuição de mercúrio em sedimentos no período da cheia do Rio Mutum-Paraná, Rondônia / Fabiano Luís Belém. Porto Velho, Rondônia, 2013.

98f.:il.

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente)
Fundação Universidade Federal de Rondônia / UNIR.

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos

1. Geoestatística 2. Krigagem 3. Krigagem Indicativa 4. Krigagem Ordinária
5. Mercúrio I. Bastos, Wanderley Rodrigues II. Título.

CDU: 504.3:519.24

Bibliotecária Responsável: Ozelina Saldanha CRB11/947



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
NÚCLEO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM
DESENVOLVIMENTO REGIONAL E
MEIO AMBIENTE - PGDRA



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FABIANO LUÍS BELÉM

A Banca de Defesa de Mestrado presidida pelo Orientador Prof. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos (Orientador), Prof. Dr. Marcio Rodrigues de Miranda (Membro), Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi (Membro) e Prof. Dr. Ângelo Gilberto Manzatto (Suplente), reuniu-se no dia 22 de Abril de 2013, às 10 horas no Auditório do PGDRA no Campus Universitário "José Ribeiro Filho", para avaliar a Dissertação de Mestrado intitulada: "**Estudo da Distribuição Espacial de Mercúrio no Rio Mutum-Paraná, Rondônia**", do Mestrando **Fabiano Luís Belém**. Após a explanação do candidato e arguição pela Banca Examinadora, a referida Dissertação foi avaliada e de acordo com as normas estabelecidas pelo Regimento do Curso do Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente – PGDRA foi APROVADO.

Porto Velho, 22 de Abril de 2013.

Prof. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos		Orientador
Dr. Marcio Rodrigues de Miranda		Membro
Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi		Membro
Prof. Dr. Ângelo Gilberto Manzatto		Suplente

Dedico este trabalho ao Mestrado Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente e todos seus professores, que abriram oportunidade a este mineiro e que, de todo coração, sempre se reclinará aos ensinamentos dos mestres desta casa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Debora Pereira Linhares, por ter cedido os dados por ela coletados e tabulados que foram utilizados neste trabalho.

A minha família, principalmente, minha mãe, Edna Antônia Silveira Belém, que de forma direta soube ser cúmplice de meus anseios e de minhas angustias, sobretudo, durante esta dura caminhada.

Menciono também a minha esposa Patrícia Helena Turola Takamatsu pessoa marcante nestes últimos cinco anos, sob o ponto de vista da vida pessoal e profissional.

Rendo minhas sinceras congratulações a todos os professores que tive durante este processo de formação, muito embora não tenha sido um dos melhores alunos, procurei aproveitar o melhor que pude durante cada disciplina, cada curso e cada experiência de trabalho. Não poderia deixar de mencionar a pessoa do Prof. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos, que além de aceitar o meu convite para orientação neste trabalho, foi peça fundamental no meu processo de formação enquanto profissional.

Talvez, tenha vivido uma das atividades mais gratificantes enquanto estudante, quando tive a oportunidade pratica de trabalhar no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental Wolfgang C. Pfeiffer, graças a oportunidade que me fora dada pelo senhor. Deste modo, muito obrigado mais uma vez.

Aos amigos que cá fiz, Henrique Bernini, Barbara Karina, Michael Watanabe, Tatiana Almeida, Thiago Bortoleto, Janyelson Lima, Marcelo Carvalho, Clayton de Holanda e Astrea Jordão que compomos a Divisão de Proteção Ambiental do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). Assim como os amigos do Laboratório de Biogeoquímica Igor Barbosa, Roberta, Dario Pereira, Marcio Miranda, Leidiane Laufharte, Ronaldo Almeida.

As meus grandes amigos Matheus Pereira, Altamir Gil, Luana Malaguth e Renato Hilário. Compomos um bom time, aliás, um bom "Bunker" de resistência durante este período de estudo. Resistimos e aqui estamos. Espero que possamos compartilhar nossas boas lembranças e amizade durante o máximo período possível, pois como já disse Shakespeare: "Os amigos são a família que Deus nos permitiu escolher".

Ao professor José Vicente Bernadi pelas críticas construtivas que fizeram desta pesquisa um trabalho melhor. E àqueles que me ensinaram com momentos bons, espero ter ensinado algo também, e os levarei comigo em minha súbita eternidade!

O caminho é longo, as possibilidades são inúmeras, quer sejam dentro da pesquisa ou não. Mas uma certeza fica de tudo o que passou, que muito embora haja momentos em nossas vidas que as perspectivas sejam limitadíssimas. Desistir nunca é a melhor escolha, perseverar na dor forja a alma para o sucesso. E a ponte para a felicidade está na ação de buscá-la insistentemente. Portanto, como Charles de Gaulle um dia disse: "Retirer oui, Abandonner jamais" "Recuar sim, Desistir jamais"

*"Quando você tem uma meta, o que era um obstáculo
passa a ser uma das etapas do seu plano."
Gerhard Erich Boehme*

*"Mesmo desacreditado e ignorado por todos,
não posso desistir,
pois para mim,
vencer é nunca desistir".
Albert Einstein*

*"Louvai ao senhor, porque ele é bom, porque a sua benignidade é para sempre/
Invoquei o senhor na angustia; o senhor me ouviu, e me pôs em um lugar largo/
O senhor está comigo: e não temerei o que me pode fazer o homem/
O senhor está comigo entre aqueles que me ajudam:
pelo o que verei cumprido o meu desejo sobre os que me aborrecem/
Com forma me impeliste para me fazeres cair, mas o senhor me ajudou/
O Senhor castigou-me muito, mas não me entregou a morte/
Tu és o meu Deus e eu te exaltarei; tu és o meu Deus e eu te louvarei"
Salmo 118*

RESUMO

BELÉM, F.L. Estudo da distribuição espacial de mercúrio em sedimentos no período da cheia do Rio Mutum-Paraná, Rondônia. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente). 2012. 110f. Porto Velho. Fundação Universidade Federal de Rondônia. 2012.

O presente trabalho foi realizado no sedimento de fundo do rio Mutum-Paraná que se localiza no município de Porto Velho (RO). O rio Mutum-Paraná faz parte da bacia do rio Madeira, um dos principais afluentes da margem direita do rio Amazonas, localizando-se na região do Alto rio Madeira. Esta região no início na década de setenta até a década de noventa se caracterizou por ser uma região exploradora de ouro aluvionar. Isto fez com que o rio Mutum-Paraná tivesse uma função importante por ser um rio que era utilizado para manutenção de balsas e dragas do garimpo. Esta atividade fez com que os restos das dragas com resíduos de mercúrio fossem lançados no rio Mutum-Paraná. Ainda ocorre nesta região uma mudança da atividade econômica da exploração do minério para as atividades agrícolas e pecuárias, embora o garimpo de ouro numa escala menor ainda continue. O desmate provocado por essas atividades promovem a remobilização do mercúrio presente no solo fazendo com que ele alcance os cursos d'água. A partir disso, necessitou-se saber como este elemento se comporta espacialmente ao longo do rio Mutum-Paraná. Foram realizados vários estudos para analisar qual o melhor método de interpolação que poderia ser utilizado para se compreender o comportamento espacial das seguintes variáveis: pH, matéria orgânica e concentração de mercúrio que são as variáveis mais relevantes no estudo de mercúrio. Então, escolheu-se o método geoestatístico para interpolação de superfícies matemáticas porque se podia detectar a validade do modelo estimado, e o método geoestatístico não somente considera a distância entre os atributos como também considera o valor de cada atributo. Isto faz com que a geoestatística seja um dos métodos de interpolação espacial mais confiável utilizado. Após isto, foi realizado o estudo do comportamento estatístico dos dados e foi analisado qual algoritmo geoestatístico se adequaria melhor aos dados coletados. A partir deste estudo foi utilizado os algoritmos de Krigagem. A Krigagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfície baseada na estrutura de correlação espacial. O método de Krigagem permite a partir de uma análise exploratória dos dados, análise estrutural da modelagem de correlação espacial, a interpolação estatística da superfície. Além disso, a Krigagem interpola em áreas que não apresentam as coletas. Após isto, foram estudados quais algoritmos de krigagem poderiam ser utilizados nos mapas de predição. Foi utilizado o algoritmo de Krigagem Ordinária que consiste em estimadores ótimos que minimizam a variância do erro de estimação e interpola localmente a média. E outro algoritmo utilizado é o algoritmo de Krigagem Indicativa que consiste numa interpolação para estimar valores de incerteza. Após isto, foram realizados estudos sobre o variograma onde foi apresentada a correlação espacial dos dados amostrados. O estudo de semivariograma foi feito através de função matemática para poder ver quais funções apresentam melhor ajuste a correlação dos dados espaciais no variograma. Após as análises destes semivariogramas foram confeccionados mapas de predição com os seguintes parâmetros: matéria orgânica, pH e teor de concentração de mercúrio total. O resultado é uma grande variação espacial destes parâmetros como, por exemplo, o pH de 4,8 até 6,72 e de concentração de mercúrio total $39,7 \mu\text{g.Kg}^{-1}$ até $146,45 \mu\text{g.Kg}^{-1}$, ocasionado pelas atividades econômicas que ocorrem na bacia do rio Mutum-Paraná.

Palavras-chave: Geoestatística, krigagem, krigagem ordinária, krigagem indicativa, mercúrio.

ABSTRACT

The present work was performed on the sediment of the river bottom Mutum-Paraná which is located in the municipality of Porto Velho (RO). The Mutum-Paraná River is part of the Madeira River basin, one of the main tributaries of the right bank of the Amazon River, being located in the Upper Madeira River. This region in the early seventies to the nineties was characterized as an exploratory region of alluvial gold. This caused the Mutum-Paraná River had an important role to be a river that was used for maintenance of the mining barges and dredges. These activities led to the remains of the vessels with mercury were dumped in the Mutum-Paraná River. Still occurs in this region a shift of economic activity from exploitation of mineral to the agricultural and livestock activities, although the gold mining still continues on a smaller scale. The deforestation caused by these activities promotes the remobilization of mercury in the soil causing it reaches waterways. From this it is needed to know how this element behaves spatially along the Mutum-Paraná River. Several studies were performed to analyze the best method of interpolation could be used to understand the spatial behavior of the following variables: pH, organic matter and mercury concentrations that are the most important variables in the study of mercury. So we chose the geostatistical interpolation method for mathematical surfaces because it could detect the validity of the estimated model and the geostatistical method not only considers the distance between attributes but also considers the value of each attribute. This makes geostatistics is one of the most trusted spatial interpolation used. After this, the study of the statistical behavior of the data was performed and analyzed geostatistical algorithm which would fit better to the data collected. From this study the algorithms Kriging was used. The Kriging comprises a set of techniques for the estimation and prediction based on the structure of spatial correlation surface. The Kriging method allows from an exploratory data analysis, structural analysis of the modeling of spatial correlation, statistical interpolation surface. Moreover, Kriging interpolation in area that do not have collections. After that, kriging algorithms which could be used in prediction maps were studied. Ordinary Kriging algorithm consisting of optimal estimators that minimize the variance of the estimation error and locally interpolates the average was used. And another algorithm employed is algorithm which is a Kriging interpolation indicative for estimating uncertainty values. After that, studies on the variogram where the spatial correlation of the sampled data were presented were performed. The study was done through semivariogram mathematical function to see which functions have better fit the correlation of spatial data on the variogram. Organic matter, pH and concentration of mercury total: After analysis of these semivariograms prediction maps with the following parameters were made. The result is a large spatial variation of these parameters such as pH of 4.8 to 6.72 and total mercury concentration of $39.7\mu\text{g.Kg}^{-1}$ to $146.45\mu\text{g.Kg}^{-1}$, caused by economic activities occurring in Mutum-Paraná River basin.

Keywords: Geostatistics, Geosciences, Kriging, Ordinary Kriging, Indicative Kriging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01: DESMATAMENTO DA VEGETAÇÃO NATIVA PARA IMPLANTAÇÃO DA ATIVIDADE AGROPASTORIL. DATA:11/08/2010 (FONTE: WATANABE,2011)	31
FIGURA 02. MAPA DA ÁREA DE ESTUDO EVIDENCIANDO A SUB-BACIA DO RIO MUTUM-PARANÁ E A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUTUM- PARANÁ (FONTE: SEDAM – SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL DE RONDÔNIA). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELEM (2013).....	33
FIGURA 03. MAPA DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUTUM-PARANÁ REVELANDO A PLUVIOSIDADE E MÉDIA ANUAL.....	35
FIGURA 04: MAPA DE DECLIVIDADE DA SUB-BACIA DO MUTUM-PARANÁ. (FONTE: SRTM - MISSÃO TOPOGRÁFICA RADAR SHUTTLE, 2013). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	39
FIGURA 05: MAPA ALTIMÉTRICO DA SUB-BACIA DO RIO MUTUM-PARANÁ (FONTE: SRTM - MISSÃO TOPOGRÁFICA RADAR SHUTTLE, 2013). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	40
FIGURA 06: MAPA DE EXPLORAÇÃO MINÉRIO NA BACIA HIDROGRÁFICA DA BACIA DO MUTUM-PARANÁ. (FONTE: SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL DE RONDÔNIA; SERVIÇO GEOLÓGICO NACIONAL). ORGANIZADO PELO AUTOR (2013). ..	42
FIGURA 07 : MAPA USO E OCUPAÇÃO DO SOLO (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). REALIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	45
FIGURA 08: SEMIVARIOGRAMA (FONTE: LIMA, 2006).....	51
FIGURA 09: DIAGRAMA GRÁFICO DO AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMA (FONTE: LIMA, 2006).....	52
FIGURA 10: PONTOS DE COLETAS E AS PLANILHAS DE VALORES DE PH, CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO ($\mu\text{G/KG}$) E MATÉRIA ORGÂNICA (MG/KG) NO PROGRAMA <i>ARCGIS 9.3®</i> . ..	56
FIGURA 11: PONTOS DE COLETA NO RIO MUTUM-PARANÁ. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013; LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	57
FIGURA 12: SUPERFÍCIE DE RESÍDUO DE PH USOU-SE O ALGORITMO DE MÍNIMA CURVATURA. (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).....	63
FIGURA 13: SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA REGIONAL DE PH USOU O ALGORITMO POLINOMIAL DE PRIMEIRO GRAU. (FONTE LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	64

FIGURA 14: SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DOS RESÍDUOS DE MATÉRIA ORGÂNICA USOU O ALGORITMO DE MÍNIMA CURVATURA (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).....	65
FIGURA 15: SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA REGIONAL DE MATÉRIA ORGÂNICA USOU-SE O ALGORITMO POLINOMIAL DE PRIMEIRO GRAU . (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	65
FIGURA 16: SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA DE RESÍDUOS DE CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO TOTAL USOU-SE O ALGORITMO DE MÍNIMA CURVATURA. (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	66
FIGURA 17: SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA REGIONAL DE CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO TOTAL USOU-SE O ALGORITMO POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU. (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	67
FIGURA 18 : REGRESSÃO LINEAR: A COLUNA 1 (VARIÁVEL DEPENDENTE) É A CONCENTRAÇÃO TOTAL DE MERCÚRIO E A OUTRA COLUNA 2 (VARIÁVEL INDEPENDENTE) É PH. (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).....	68
FIGURA 19: GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR: EIXO Y (VARIÁVEL DEPENDENTE) CONCENTRAÇÃO DO MERCÚRIO TOTAL E A VARIÁVEL X (VARIÁVEL INDEPENDENTE) PH. O COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO É 0,0518 E A EQUAÇÃO $Y = 156,4497 + (-11,2063 X X)$. ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).....	69
FIGURA 20: REGRESSÃO LINEAR COLUNA 1(VARIÁVEL DEPENDENTE) É A CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO TOTAL E A OUTRA COLUNA 3 (VARIÁVEL INDEPENDENTE) É MATÉRIA ORGÂNICA. (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	70
FIGURA 21: GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR: EIXO Y (VARIÁVEL DEPENDENTE) CONCENTRAÇÃO DO MERCÚRIO TOTAL E A VARIÁVEL X (VARIÁVEL INDEPENDENTE) QUE É O DE MATÉRIA ORGÂNICA. O COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO É 0,0299 E A EQUAÇÃO $Y = 91,8343 + (1,4682 X X)$. (FONTE: LINHARES (2007)). ORGANIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).....	70
FIGURA 22: SEMIVARIOGRAMA UTILIZANDO FUNÇÃO ESFÉRICA DE MATÉRIA ORGÂNICA. O NÍVEL CORTE É DE 1.86 MG/KG. REALIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	71
FIGURA 23: MAPA DE PREDIÇÃO A PARTIR DO ALGORITMO DE KRIGAGEM INDICATIVA DE MATÉRIA ORGÂNICA NO BAIXO RIO MUTUM-PARANÁ. VALOR DE CORTE DE 1,86 MG/KG. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	72
FIGURA 24: MAPA DE PREDIÇÃO A PARTIR DO ALGORITMO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA DE MATÉRIA ORGÂNICA NO BAIXO RIO MUTUM-PARANÁ. VALOR DE CORTE DE 1,86	

MG/KG. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	73
FIGURA 25: GRÁFICO DE SEMIVARIOGRAMA GAUSSIANO DE PH NAS ÁGUAS DO RIO MUTUM-PARANÁ. REALIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).....	74
FIGURA 26: MAPA DE PROBABILIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE PH NAS ÁGUAS DO BAIXO RIO MUTUM-PARANÁ UTILIZANDO-SE O ALGORITMO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	75
FIGURA 27: MAPA DE PROBABILIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE PH NAS ÁGUAS DO ALTO RIO MUTUM-PARANÁ UTILIZANDO-SE O ALGORITMO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	76
FIGURA 28: GRÁFICO DE SEMIVARIOGRAMA GAUSSIANO DE CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO NOS SEDIMENTOS DE FUNDO DO RIO MUTUM-PARANÁ. REALIZADO POR FABIANO LUÍS BELÉM (2013).	77
FIGURA 29: MAPA DE PREDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO EM SEDIMENTO NO BAIXO RIO MUTUM-PARANÁ UTILIZANDO-SE O ALGORITMO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	78
FIGURA 30: MAPA DE PREDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO EM SEDIMENTO NO ALTO RIO MUTUM-PARANÁ UTILIZANDO-SE O ALGORITMO DE KRIGAGEM ORDINÁRIA. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	79
FIGURA 31: QUEIMADAS NA REGIÃO DA BACIA DO RIO MUTUM PARANÁ. FONTE: (WATANABE,2011).....	84
FIGURA 32: ÁREA DE INFLUÊNCIA DIRETA (AID) DO RESERVATÓRIO DE JIRAU (FONTE: ESTUDO DE VIABILIDADE DO COMPLEXO HIDRELÉTRICO DO RIO MADEIRA).	86
FIGURA 33: RIO MADEIRA NA CONFLUÊNCIA COM O RIO MUTUM-PARANÁ. CARTOGRAMAS MÉDIOS MENSIS EM CONDIÇÕES ATURAIS E COM CONDIÇÕES RESERVATÓRIOS. (FONTE: ESTUDO DE VIABILIDADE DO COMPLEXO HIDRELÉTRICO DO RIO MADEIRA).	86
FIGURA A-01: CARTA IMAGEM DO RIO MUTUM-PARANÁ. (FONTE: DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL, 2013). ORGANIZADO PELO AUTOR.	96
FIGURA B-01: MAPA HIDROGRÁFICO DA BACIA DO RIO MUTUM-PARANÁ (FONTE: SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL DE RONDÔNIA). ORGANIZADO PELO AUTOR .	97

FIGURA B-02: MAPA DE CURVAS DE NÍVEL DA BACIA DO RIO MUTUM-PARANÁ ((FONTE: SEDAM – SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL DE RONDÔNIA; SRTM - MISSÃO TOPOGRÁFICA RADAR SHUTTLE). ORGANIZADO PELO AUTOR.	98
FIGURA B-03: MAPA ESTRUTURAL DA BACIA DO RIO MUTUM-PARANÁ. (FONTE: SEDAM – SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL DE RONDÔNIA; CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO NACIONAL). ORGANIZADO PELO AUTOR.....	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 01: ANÁLISE DESCRITIVA DE PH	59
TABELA 02: ANÁLISE DESCRITIVA DO PARÂMETRO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM SEDIMENTO	60
TABELA 03: ANÁLISE DESCRITIVA DO PARÂMETRO DE CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO TOTAL EM SEDIMENTO	60
TABELA 04: TABELA DO TESTE DE SHAPIRO-WILK	61
TABELA 05: TABELA DE ÁREA DE CLASSES DE PREDIÇÃO	80
TABELA 06: TABELA DE VALIDAÇÃO CRUZADA	81
TABELA A-01: CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES CBERS	95

LISTA DE FÓRMULAS

FORMULA 01: ERRO RESIDUAL DE ESTIMATIVA GEOSTATISTICA. (FONTE: ORTIZ ET AL, 2002).	47
FORMULA 02: KRIGAGEM (FONTE:ORTIZ,2002).....	48
FÓRMULA 03: KRIGAGEM INDICATIVA (FONTE: CAMARGOS, 2002).....	49
FORMULA 04: TRANSFORMAÇÃO BINÁRIA. (FONTE: CAMARGOS, 2002)	49
FORMULA 05: DEPENDÊNCIA ESPACIAL. (FONTE: CAMBARDELLA E ET AL, 1994)	51
FORMULA 06: FUNÇÃO GAUSSIANA. (FONTE: ANDRIOTTI, 2000)	53
FORMULA 07: FUNÇÃO ESFÉRICA (FONTE: ANDRIOTTI,2000)	53
FORMULA 08: PRINCÍPIO DA VALIDAÇÃO CRUZADA (FONTE: LORENZO; IRIBAS, 2008)	54
FORMULA 09: FÓRMULA DO ERRO PADRONIZADA (FONTE: LORENZO; IRIBAS, 2008).....	54

SIGLAS

CBERS – SATÉLITE SINO-BRASILEIRO DE RECURSOS TERRESTRES

CENPES – CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO LEOPOLDO MIGUEZ DE MELO

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO NACIONAL

DGI-INPE – DIVISÃO GERAÇÃO DE IMAGEM DO INSTITUTO NACIONAL PESQUISA ESPACIAL

EIA – ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA

GPS – SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA

IBM – MÁQUINAS INTERNACIONAIS DE NEGÓCIOS

Hg – MERCÚRIO

kg - QUILOGRAMA

MDB – DADOS BASE MICROSOFT®

MDF – DISCO DE ARQUIVO ESPELHADO

mg – MILIGRAMA

PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

pH - POTENCIAL DE HIDROGÊNIO

RIMA – RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL

SAD-69 – DATUM SUL AMERICANO 69

SPRING® – SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÃO GEORREFERENCIADA

SRTM - MISSÃO TOPOGRÁFICA RADAR SHUTTLE

TECGRAF – TECNOLOGIA DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA

UNIR – FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA DE RONDÔNIA ou UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA.

UTM – UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

WGS-84 – SISTEMA GEODÉSICO MUNDIAL DE 1984

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO:	21
I.1 GEOPROCESSAMENTO COMO SUPORTE PARA TOMADA DE DECISÃO.....	21
I.2 GEOTECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	22
I.3 O USO DE GEOESTATÍSTICA NO MONITORAMENTO DE CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS	23
I.4 DAS CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS QUANTO A PRESENÇA DE MERCÚRIO EM RONDÔNIA..	25
I.5 ESTUDOS DOS SEDIMENTOS E O MERCÚRIO NO MUTUM-PARANÁ.....	27
II. OBJETIVO:	29
II.1 OBJETIVO GERAL	29
II.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	29
III. MATERIAIS E MÉTODOS:	30
III.1 ÁREA DE ESTUDO E SUA SITUAÇÃO ECONÔMICA E SOCIAL.....	30
III.2 DESCRIÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO	32
III.3 CLIMA	34
III.4 VEGETAÇÃO.....	36
III.5 SOLOS	36
III.6 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.	37
III.7 EXPLORAÇÃO MINERAL.....	41
III.8 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO.	43
III.9 MÉTODO GEOESTATÍSTICO	46
III.10 KRIGAGEM	48
III.11. KRIGAGEM ORDINÁRIA.....	48
III.12 KRIGAGEM INDICATIVA	49
III.13 SEMIVARIOGRAMA - ANÁLISE VARIOGRÁFICA	50
III.14 AJUSTES DE SEMIVARIOGRAMA.....	51
III.15 VALIDAÇÃO CRUZADA.....	54
III.16 BANCO DE DADOS.....	55
III.17 SOFTWARES GEOSTATÍSTICOS UTILIZADOS.....	58
IV. RESULTADOS	59
IV.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	59

IV.2 DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS DADOS	61
IV.3 ANÁLISE ESTRUTURAL	61
IV.4 ANÁLISE DE REGRESSÃO E CORRELAÇÃO DOS DADOS.	67
IV.5 MODELO GEOESTATÍSTICOS	71
IV.6 ANÁLISE DAS ÁREAS DAS CLASSES DAS VARIÁVEIS.....	80
IV.7 VALIDAÇÃO DOS MODELOS	81
V. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
VI. CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS	88
ANEXO A - CBERS	95
ANEXO B - MAPAS DA ÁREA.....	97

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho visa à elaboração da dissertação de mestrado para o programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente do Núcleo de Ciências Exatas e da Terra da Fundação Universidade Federal de Rondônia (UNIR), elaborado com base nos conteúdos estudados e discutidos no decorrer do curso de pós-graduação.

O programa insere-se no currículo de analista ambiental verticalmente dado a interdisciplinaridade e a visão holística aplicados, ao qual se necessita para realizar os estudos ambientais. Através da pós-graduação interdisciplinar tem-se a capacitação do aluno para a compreensão do meio ambiente a partir de estudos setoriais e integrados aos principais elementos e condicionantes da paisagem ambiental.

Este trabalho faz parte do ciclo de fundamentação dos estudos ambientais interdisciplinares e foi realizado através de uma metodologia científica de pesquisa quantitativa da espacialização do mercúrio no leito do rio Mutum-Paraná.

Foi elaborado com a colaboração de todos os pesquisadores do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal de Rondônia, principalmente, da Mestra Debora Pereira Linhares que realizou o levantamento de campo na bacia do rio Mutum-Paraná que foi utilizado como ponto inicial desta dissertação. O presente trabalho é resultante de trabalhos já realizados pela equipe de pesquisadores deste laboratório cujos trabalhos seguem como base a contaminação do mercúrio nas áreas mineradoras do estado de Rondônia, de maneira que o trabalho continua individual e coletivo dos pesquisadores tem avançado nos aprofundamentos necessários para entendimento da boa gestão do meio ambiente.

Quanto a efetiva elaboração desse plano, foi elevada por uma revisão bibliográfica, estudos iniciais sobre os modelos geoestatístico e a presença de mercúrio no estado de Rondônia, especificamente na Bacia do rio Mutum-Paraná. Foram aplicados modelos geoestatísticos para gerar superfícies matemáticas das variáveis estudadas seguidas pela análise espacial sobre as variáveis relevantes utilizadas neste trabalho. Na sequência, se deu a discussão dos estudos e análises preliminares consequentes elaboradas, onde se partiu para elaboração da conclusão.

Foram geradas bases cartográficas baseadas em imagem de satélite e dados cartográficos para basear as análises espaciais que foram expostas neste trabalho. Além disso, foram utilizadas referências para respaldar as análises espaciais desta dissertação. Por fim, o anexo que é composto por dados estatísticos, mapas temáticos e conceitos que são importantes para o entendimento do ambiente que está localizado o rio Mutum-Paraná e os dados espaciais que foram utilizados neste trabalho.

No item I é introduzido à referência bibliográfica sobre as geotecnologias e suas contribuições no desenvolvimento sustentável e meio ambiente. Nesta parte é trabalhado a problemática da contaminação de mercúrio no estado de Rondônia, principalmente, na região da Bacia do rio Mutum-Paraná. No item II são apresentados os objetivos geral, objetivos específicos e a hipótese deste trabalho. No item III foram tratados as características ambientais e sociais da área de estudo. No item IV tratou-se os principais conceitos geoestatísticos para embasar os modelos geoestatísticos que foram gerados neste trabalho. No item V mostrou-se o material utilizado neste trabalho que são os softwares geoestatísticos e o banco de dados desta pesquisa. No item VI é apresentado os resultados da análise exploratória, superfície de tendência, análise de regressão que subsidiaram os modelos geoestatísticos deste trabalho.

No anexo A é apresentado a imagem CBERS que foi utilizado como a imagem para a base cartográfica em que se retirou o rio Mutum-Paraná. No Anexo B são apresentados os mapas da área que serviram para o entendimento da dinâmica espacial da área de estudo. Estes mapas nortearam as características físicas da área de estudo que subsidiaram a elaboração dos demais dados contidos no desenvolvimento deste trabalho.

I. INTRODUÇÃO:

I.1 Geoprocessamento como suporte para tomada de decisão

O Geoprocessamento como instrumento de análise é uma importante ferramenta de suporte a tomada de decisão na avaliação de empreendimentos ambientais. O uso da análise espacial é de fundamental importância para o conhecimento holístico das interações de fenômenos ambientais em uma determinada área a ser estudada.

Ao se analisar as condições do meio numa perspectiva sistêmica, portanto interativa, a análise espacial permite estabelecer correlações entre diferentes fatores que possam interferir na evolução de um determinado fenômeno ambiental, permitindo estabelecer cenários mais realistas que ensejem planejar melhores soluções a serem tomadas, visando a minimização de impactos e sustentabilidade ambiental.

Meio ambiente e desenvolvimento sustentável são temas que paulatinamente conquistaram uma importante posição e hoje são objeto de estudo de diversas ciências autônomas (PEREIRA, 2008), fato que fez com que as discussões e os estudos alcançassem uma considerável dimensão de forma de maneira que já se fala em um novo ramo do conhecimento científico que é interdisciplinar.

De acordo com Pereira (2008), essa característica do tratamento científico sobre o meio ambiente é fruto da importância do tema para a espécie humana. Trata-se do ambiente ou espaço onde vivemos e do qual se depende para a sobrevivência. Assim, nada mais natural que seja dado um tratamento holístico as ciências ambientais por meio da análise espacial. Dessa forma, as ciências exatas e as ciências da terra deixam de ser aplicadas isoladamente e passam a atuar de maneira conjunta como é fundamental no caso do subtema da análise ambiental, sob a temática da Geoestatística. A humanidade vem se defrontando com diversos problemas da sociedade pós-industrial, dentre eles a dificuldade em compatibilizar o crescimento econômico com a proteção ao meio ambiente. Para se atingir um desenvolvimento sustentável, é preciso examinar as dimensões sociais, econômicas, ecológicas, espaciais e culturais – numa visão multidisciplinar a fim de analisar as variáveis e todo o espectro de perspectivas que envolvem o desafio de atender as necessidades materiais da sociedade de forma equitativa. Uma destas tentativas é o uso dos sistemas de informações geográficas (SIG's) que buscam por intermédio de variáveis espaciais analisarem os fenômenos ambientais e os impactos ambientais que ocorrem no espaço.

"A preocupação com a degradação ambiental provocada pelo crescimento econômico desordenado deu ensejo ao termo 'desenvolvimento sustentável', que surgiu diante da dicotomia entre degradação ambiental e queda na qualidade de vida. A relação entre o meio ambiente e o desenvolvimento econômico tornou-se, então, motivo de preocupação internacional." (PEREIRA, 2008, página 10)

Dentre as atividades inerentes ao desenvolvimento econômico, encontra-se a exploração mineral que, por sua vez, tem um alto grau de impacto no meio ambiente e sobre a economia das áreas mineradas, principalmente aquelas em que atua o garimpo informal que na maioria dos casos nem a

economia local é beneficiada. Isto pode ser evidenciado ao longo de toda a Bacia do Rio Madeira onde a exploração de ouro de garimpo provocou consequências alarmantes como a liberação de mercúrio para a atmosfera e cursos d'água (BASTOS & LACERDA, 2004), além do assoreamento na calha do rio (WATANABE, 2011).

A estruturação social e econômica dos lugares marcados pela mineração é altamente peculiar, pois impacta significativamente na economia local, apesar de ser geradora de empregos para a população. Gerir tamanha complexidade de interesses é algo que exige uma grande visão espacial uma vez que aspectos tanto financeiros quanto ambientais são extremamente importantes para toda a sociedade envolvida no processo. No entanto, este impacto na economia de Rondônia foi negativo devido a falta de fiscalização e controle por parte dos órgãos estatais regulamentadores da atividade mineradora nesta região. Explicita-se, a necessidade de se desenvolver o uso do Geoprocessamento modelos espaciais visando auxiliar o trabalho dos gestores ambientais. (PEREIRA, 2008).

I.2 Geotecnologia e Desenvolvimento Sustentável

As geotecnologias são o conjunto de metodologias e tecnologias para coleta, processamento e análise de informações espaciais. O avanço no desenvolvimento da adoção deste tipo de tecnologia pode ser atribuído principalmente a grande extensão do território brasileiro e ao desconhecimento pleno dos recursos naturais presentes no território nacional, aliados ao alto custo de se obter informações espaciais por métodos convencionais (ROSA, 2005). O estudo das geotecnologias permitiu o desenvolvimento de algumas áreas da análise espacial como: Sistemas de Informação Geográfica, Cartografia Digital, Sensoriamento Remoto, Sistema de Posicionamento Global, Topografia e Geoestatística.

As geotecnologias com seus modelos de previsão espacial são relevantes para o Planejamento Ambiental, visando diminuir a degradação ambiental, cujos modelos de previsão espacial é de extrema importância. O modelo cartográfico tem como base dados numéricos e estatísticos, possui como principal objetivo a previsão de cenários a partir de fatores ambientais; esses tem como base uma correlação de dados numéricos, estatísticos e ambientais, a fim de produzir cenários possíveis de evolução de um dado fenômeno analisado (BITTAR, YIOMASSA, 2000). Como exemplo, podemos citar o trabalho realizado por Soares-Filho (2006), referente a construção de modelos espaciais de desmatamento na Amazônia desenvolvida a partir dos dados do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE).

As Geotecnologias ao mesmo tempo são usadas como suporte de importantes processos como; pesquisa e exploração mineral, otimização do potencial de uso de recursos energéticos, manejo de recursos hídricos, conservação e correção de solos agricultáveis, mitigação de desastres naturais. As mesmas são usadas, também, no sentido de qualificar, compreender e solucionar problemas decorrentes da intensificação das relações contínuas entre o homem e o meio, conforme nos expõem Monteiro & Câmara (2000).

Outro universo de aplicações pode ser visto especialmente no contexto de gerenciamento e descarte de resíduos minerais, fornecendo subsídio a Promotores Públicos para a tomada de decisões na esfera jurídica, no sentido de impetrar medidas corretivas das intervenções realizadas, seus impactos sob condições existentes e as alternativas tecnológicas para a recuperação do meio alterado.

Na medida em que as geotecnologias sofreram uma evolução, com inserção de inovações tecnológicas, criou-se a possibilidade de processamento de quaisquer dados espaciais fazendo com que os estudos tornassem-se mais dinâmicos e realistas aumentando o seu leque de aplicações moldando a área como uma importante ferramenta de análise espacial. Na área de Planejamento e Gestão Ambiental as ferramentas geostáticas ganharam notoriedade como suporte para a tomada de decisão em grandes empreendimentos como usinas hidrelétricas, pois seu uso possibilita traçar quais áreas que estão mais propensas a sofrer maiores impactos ambientais decorrentes de um dado empreendimento hidrelétrico, por exemplo.

De modo simplificado, o algoritmo base com o qual funcionam as ferramentas de Geoprocessamento envolvem pelo menos quatro etapas, estas, a saber: 1) Métodos de coleta de informações espaciais lançando por meio de imagens de satélite através de gps e análises topográficas, por exemplo; 2) Gestões dos dados coletados, através das armazenagens dos mesmos em bancos de dados possam ser consultados em situações futuras; 3) Tratamento e Análise das informações espaciais. Para tanto são usadas ferramentas da geoestatística, modelagem de dados, processamento digital de imagens (PDI), Sensoriamento Remoto, 4) A "mobilidade" da informação espacial. Isto é a integração dos dados coletados e processados com o seu público alvo. Por exemplo, o acesso remoto através de programas que se conectam a internet para acessar bancos de dados, e usam as ferramentas supracitadas, para satisfazer as vicissitudes do usuário. Exemplos dessas aplicações podem ser vistas em ferramentas como Google *Earth*®, Google *Mobile*® e Google *Maps*®.

Ao mesmo tempo em que vivemos a revolução das geotecnologias integradas intensamente ao dia a dia dos cidadãos, através do uso e popularização de equipamentos digitais, como *smartphones*, *gps*, *tablets*, entre outros, vislumbra-se a possibilidade desse fenômeno criar coletas de dados cada vez mais integrados para os mais diversos fins, ao qual a geoestatística será imprescindível para alavancar tais horizontes da realidade virtual. Se futuramente "smartphone" de cada pessoa, possa medir dados térmicos e físicos, atualmente, terá mais conhecimento da realidade ambiental que nos cerca e está a todo o momento em transformação. Criando uma realidade das informações e ações humanas de forma mais precisa de maneira a aperfeiçoar recursos e garantir a sustentabilidade ambiental.

I.3 O uso de Geoestatística no monitoramento de contaminação por metais pesados

A construção de modelos geoestatísticos para a mensuração da contaminação do meio por metais pesados já se provou ser eficiente e viável segundo a literatura como Almeida (2006), Herrmann (2009), Belém et. al (2010), Barbosa (2012). Nos parágrafos abaixo procuraremos encetar uma série de trabalhos que trabalharam com esta perspectiva, bem como os seus respectivos "*Modus*

Operandi".

Belém et.al (2010) realizaram a análise espacial de metais sobre a Bacia do Rio das Velhas em Minas Gerais utilizando métodos geoestatísticos, ao qual se aplicou sobre a análise das concentrações e espacialização dos metais pesados. Foram coletadas amostras empregando matrizes de coleta de dados de sedimentos, água, solo. A partir dessas amostras, levantou-se a concentração de alguns metais como cobre, chumbo, cádmio, mercúrio e arsênio, além da mensuração de alguns parâmetros físico-químicos como condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido, saturação de oxigênio e temperatura.

Com o apoio do Método de Krigagem, que será mais bem detalhado a frente, foi possível dar um caráter mais especializado para a concentração das amostras, segundo a sua distribuição ao longo da Bacia em questão. Neste caso em especial, após o devido tratamento dos dados, perceberam-se níveis acentuados de contaminação fluvial por chumbo na região do Alto Rio das Velhas. Desta análise depreendeu-se que tal contaminação poderia ser devido a intensa atividade industrial e mineradora naquela região, dada o seu grande potencial mineralógico e sua proximidade com o pólo industrial da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

Herrmann (2009) realizou trabalho relevante na região da sub-bacia do rio Corumbiara em Rondônia. Neste estudo considerou o padrão de dispersão do mercúrio nos solos criando modelo com o qual se permitiu identificar que as áreas de nascentes do rio Corumbiara e de seus tributários estavam localizados nas áreas de topografia mais altas e apresentam uma quantidade de concentração de mercúrio maior que nas áreas de altimetria mais baixas..

Já Almeida (2006) modelou geoestatisticamente à região do lago do Puruzinho, afluente do rio Madeira no estado no Amazonas, e para tanto utilizou Krigagem Indicativa ao qual, a partir da análise variográfica, foram identificadas áreas de ampliação e retração de mercúrio em sedimentos. Gerou, por fim uma carta de potencial probabilístico com as áreas de maior potencial de contaminação, tendo em vista aperfeiçoar o monitoramento do potencial de contaminação daquele ambiente lacustre e servindo como modelo da distribuição espacial de mercúrio nos sedimentos.

Barbosa (2012) realizou o levantamento da concentração de mercúrio sobre os solos das áreas ripárias que são áreas que se encontram ao longo do curso do Rio Madeira em Rondônia. O método Geoestatístico foi utilizado para determinar a concentração de mercúrio nas margens do Rio Madeira e, a partir disso, um mapa de predição foi gerado, com a intenção de zonedar as áreas de solos ripários com índices mais elevados de teor de mercúrio. As áreas que apresentaram maior potencial de contaminação, segundo indicaram as análises, estavam nas cercanias do centro urbano de Porto Velho. Isto se deu, em grande medida, pelo fato de haver uma maior incidência de atividade garimpeira na região do Alto Rio Madeira. Assim, sob a ótica da análise ambiental finalística, tem-se a conclusão de como, onde e quanto é gerado um volume maior de resíduos decorrentes da mineração e sua relação com o índice de contaminação.

I.4 Das consequências ambientais quanto a presença de mercúrio em Rondônia.

Os elevados níveis de mercúrio determinados em solos/sistemas aquáticos amazônicos foram por muito tempo atribuído, principalmente, as atividades mineradoras (LACERDA et.al, 2004). Como poluente global, derivado de processos naturais e antrópicos, o mercúrio possui tempo de residência na atmosfera relativamente longo e é transportado via deposição atmosférica seca e/ou úmida. Após o aporte na água ou no solo, a dinâmica do mercúrio pode estar associada a do carbono orgânico e, neste caso, um importante fator a ser considerado é o alto teor de matéria orgânica presente nos sistemas aquáticos e terrestres dessa região. (FADINI et.al, 2001).

A presença do mercúrio de maneira natural advém da deposição de mercúrio durante o período geológico do Holoceno. Segundo Lacerda e Malm (2008), nesta era geológica houve a deposição de mercúrio provindo das áreas vulcânicas. Além disso, durante o último período de glaciação houve um processo de intensa seca no planeta com a diminuição de umidade na atmosfera, que fez com que houvesse queimadas de mata na área tropical e decorrente liberação de mercúrio no ambiente (LACERDA;MALM, 2008).

As principais formas iônicas de mercúrio, Hg^{2+} e metil-mercúrio, são fortemente complexadas por ácidos húmicos, fúlvicos e outras moléculas orgânicas presentes nos ecossistemas naturais segundo estudo elaborado por Miretzky et.al (2005). No solo, esses complexos envolvendo o mercúrio são adsorvidos na superfície das argilas e na matriz sólida, que consiste principalmente de Óxidos de Ferro (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), Alumínio e Manganês e substâncias húmicas (BOURGOIN et.al, 2003)

Solos argilosos têm alta capacidade de reter (complexar, adsorver química e/ou fisicamente) mercúrio, podendo acumulá-lo durante anos sendo que a quantidade acumulada depende da deposição, das características físico-químicas e do tempo de formação de cada solo (LINHARES, 2007). Estudos em solos oxissóis-podzóis na Guiana Francesa e na região dos rios Tapajós e Madeira, nos estados do Pará e de Rondônia, por exemplo, têm apresentado altas concentrações de mercúrio associadas a complexos organo-metálicos na fração mineral do solo, de acordo nos informam Siqueira & Aprile (2012).

Também na região Amazônica de acordo com Rocha (2000), em alguns solos caracterizados por baixas concentrações de matéria orgânica coletados nos estados do Acre e Rondônia (localizados em regiões sem emissões antrópicas de mercúrio, foram determinados teores relativamente elevados desse metal (0,017-0,279 mg/kg) quando comparados com teores considerados por alguns autores como sendo basais em solos (0,140 mg/kg) (GRIGAL, 2003).

Oliveira (2007) estudando a distribuição de mercúrio em diferentes tipos de solos da região de Manaus observou que a localização geográfica, o tipo de solo e a granulometria das amostras influenciam de maneira positiva a distribuição da concentração de mercúrio. As concentrações determinadas foram semelhantes às obtidas por outros autores em áreas com atividades mineradoras.

De acordo com Siqueira & Aprile (2012), os fluxos de mercúrio nessa região são controlados por vários processos, incluindo reações fotoquímicas, oxidação/redução e transformações microbianas. Quanto ao solo, estudos recentes indicam que exerce importante função no ciclo biogeoquímico desse metal, como reservatório receptor/emissor de **Hg** para os compartimentos da atmosfera e hidrosfera.

No estado de Rondônia, entre a década de setenta e início da década de noventa, a forte expansão da atividade garimpeira e mineradora fez com que aumentasse de modo severo a concentração de mercúrio total no ambiente. Isto se deu pelo fato do uso deste metal pesado durante o processo de amalgamação, que consiste no uso de mercúrio para a separação do ouro, dos rejeitos contaminantes (MIRANDA, 2010). A consequência imediata deste processo indiscriminado foi à ampliação da exposição de mercúrio para a biota local e, conseqüentemente, a população ribeirinha.

Deve-se citar, ainda, um forte agravante que torna este processo mais nocivo ao meio ambiente em Rondônia, dado o fato de que, com a maior taxa de retirada desordenada e intensa da cobertura vegetal, devido a fatores como a expansão da fronteira agrícola, principalmente no sul do estado, promovendo a troca de floresta por pasto, a intensificação da silvicultura, a expansão da mineração e aumento da atividade madeireira; acentuaram-se os processos de lixiviação, erosão e desnudação geoquímica¹. Toda esta cadeia de eventos da exploração mineral rondoniense fez com que ocorresse o processo de remobilização do mercúrio, consistindo no transporte do mesmo que estava acumulado no solo, para os corpos d'água (LACERDA & MALM, 2008).

Assim, os modelos geoestatísticos são importantemente aplicados para o monitoramento ambiental do mercúrio e dos fatores que podem ser associados a ele. Através de tais estudos será possível prever as regiões que apresentam áreas com alta concentração de mercúrio, bem como é possível estimar através de análise matemático-estatística as concentrações de mercúrio. Por fim, consegue-se saber quais são as áreas de influência do mercúrio contaminado e dos mercúrios em suas diversas formas químicas presentes na natureza como mercúrio metálico, mercúrio orgânico e mercúrio inorgânico.

A aplicação dos modelos geoestatísticos ensejará além do processo científico de descoberta e conclusões, poderá a ser ferramenta de suporte para as políticas ambientais e para estudos ambientais, pois através deles é possível ter a precisão da extensão do raio de contaminação, auxiliando no planejamento de políticas públicas que visem a elaboração de estratégias baseadas em evidências, para combater todos os processos que potencializem a contaminação do ambiente por metais pesados. (MOURA; 2002).

1 Denudação Geoquímica - O principal agente causador desse processo de retirada do manto de intemperismo será a água, através dos processos erosivos, tal como a lixiviação. Por envolver um escoamento superficial pluvial, tratam-se de processos predominantemente exclusivos em áreas de ocorrência de uma precipitação total no mínimo razoável (IBGE, 2009).

I.5 Estudos dos sedimentos e o mercúrio no Mutum-Paraná

Os sedimentos presentes nos corpos hídricos é um agregador das substâncias presentes no ambiente (LACERDA & MALM, 2008). No caso do mercúrio, a quase totalidade deste elemento presente no ambiente aquático é de origem sedimentar. Segundo Silva (2009), 98% do mercúrio total estão presentes nos sedimentos enquanto que nos peixes, invertebrados e plantas teria em torno de 0,22% do mercúrio total no ambiente.

O mercúrio orgânico apresenta características físico-químicas e biológicas propícias à mineralização, o acúmulo e aos processos de trocas químicas na interface água-sedimento que geram a disponibilização do mercúrio para a cadeia trófica. A agregação de mercúrio ocorre nos menores índices granulométricos aumenta a extensão da contaminação por estabelecer correlações entre o processo de atividade de correlação do mercúrio e o transporte de sedimentos. (SILVA, 2009)

Em estudos realizados na região de Ouro Preto no Estado de Minas Gerais verificou-se que o mercúrio apresenta uma maior afinidade com os sedimentos de silte e argila, que são mais fáceis de serem carreados pelo escoamento superficial e rios (WINDMOLLER, 2007).

De acordo com Malm (1991) a mobilidade do mercúrio no ambiente está associada à presença da forma oxidada com valência positiva. Esta apresenta boa afinidade com compostos inorgânicos e orgânicos, como os carbonos presentes na matéria orgânica sedimentar. Em função disto temos a maior incidência da associação do mercúrio a elementos sedimentares.

O ambiente fluvio-lacustre mais propício para que ocorra associação entre o mercúrio e os sedimentos é o meio ácido, com pH variando entre 4,0 e 5,8 porque neste tipo de pH existe uma intensa atividade microbiana de metilação do mercúrio (MALM, 1991) Além disso, este tipo de ambiente contribui para que o mercúrio oxidado seja adsorvido pela matéria orgânica. Esta associação de matéria orgânica e inorgânica faz com que o mercúrio seja transportado pelo rio através de processos hidrodinâmicos. As águas do rio Mutum-Paraná tem uma tonalidade fortemente escura. Isto se dá em função da grande quantidade de ácidos húmicos e fulvicos presentes nas águas, bem como em uma baixa carga sedimentar. É razoável dizer que, em função da presença marcante dos compostos ácidos mencionados acima, tem um pH mais ácido. Além disso, Bisinoti et.al (2009) mostrou que os rios de águas escuras amazônicos apresentam maior concentração de mercúrio total e mercúrio orgânico que os outros rios que compõem a Bacia Amazônica.

Guimarães (2009) realizou coletas de sedimentos de acordo com a variação do nível dos leitos fluviais, a fim de procurar correlacionar o gradiente de nível com a curva de concentração de mercúrio. As análises indicaram que não houve variação de concentração do teor de mercúrio entre as estações de cheias e secas dos rios.

Dentre os dados mais significativos sobre o mercúrio em Rondônia, tem-se por fim Malm (1991) que realizou estudo sobre a hidrodinâmica do rio Mutum-Paraná e relacionou a hidrodinâmica deste rio com a concentração de mercúrio. Identificou-se que na confluência entre o rio Mutum-Paraná e o Madeira havia maior concentração de mercúrio total nos sedimentos de fundo. Isto é decorrente do

desaguamento do Mutum-Paraná no Madeira, ficando as águas represadas pela velocidade das águas do Madeira, provocando, assim, aumento na concentração de mercúrio na área de confluência (MALM, 1991).

II. OBJETIVO:

II.1 Objetivo Geral

Desenvolver modelos geoestatísticos que subsidiem o monitoramento de mercúrio no Rio Mutum-Paraná

II.2 Objetivo Específicos

- Analisar espacialmente os níveis de pH, a concentração de mercúrio e matéria orgânica nos sedimentos de fundo do rio Mutum-Paraná utilizando o banco de dados georreferenciado;
- Confeccionar modelos geoestatísticos de concentração de mercúrio total e índice de pH e de matéria orgânica presentes no rio Mutum-Paraná.

Hipótese Formulada: Há variabilidade na concentração de mercúrio ao longo do rio Mutum-Paraná e essa ocorrência é em associação a concentração de matéria orgânica e variação de pH. Isto ocorre porque no meio aquático a presença de um pH ótimo e de uma alta concentração de matéria orgânica poderá ter uma grande quantidade de mercúrio acumulada nesta área. A partir disso, este trabalho hipotetiza que as áreas que apresentam uma quantidade alta de concentração de mercúrio apresentarão uma quantidade alta de matéria orgânica e um pH ácido próximo ao neutro.

III. MATERIAIS E MÉTODOS:

III.1 Área de estudo e sua situação econômica e social

O rio Mutum-Paraná caracteriza-se por ser na década de setenta e oitenta um rio utilizado para os consertos de dragas que exploravam garimpagem de ouro no rio Madeira. Assim, a emissão de mercúrio por meio de rejeitos provenientes da atividade mineradora como peças de dragas e sedimentos que continham mercúrio foi intensa no período permeando níveis de contaminação até os dias atuais (BASTOS;LACERDA, 2004). Destaca-se a situação social dos garimpeiros era precária e informal propiciando uma ausência de preocupação com os restos da atividade mineradora (LINHARES, 2009).

Contudo com a decadência da exploração do ouro na região do alto rio Madeira, por volta de 1995, à região deixou de ser marcada pela exploração da mineração e passou a ser caracterizada pela extração madeireira e atividades agropecuárias. Também durante a década de 70 o Governo Federal realizou a expansão das fronteiras agrícolas brasileiras com o objetivo de ocupar grandes vazios demográficos presentes no território brasileiro (BECKER, 2004).

Decorrente disto o Instituto Nacional de Reforma Agrária (INCRA) estabeleceu que na região do antigo território do Guaporé fossem instalados PIC's (Projetos Integrados de Colonização) que ocupavam as beiras da rodovia BR-364, que liga Cuiabá a Porto Velho. Estes projetos se caracterizavam por apresentar uma infraestrutura básica do estado como estradas, isto era realizado através dos órgãos em nível nacional e o município implementava a assistência técnica (WATANABE, 2011). A população que compunha os PIC's era de baixa renda e utilizavam a agricultura extensiva baseada no desmatamento para a produção (WATANABE, 2011) (Figura 1). O primeiro PIC instalado nesta região foi o PIC Sidney Girão no norte do estado de Rondônia. Mesmo com a ação anterior de mineração, é com os PIC's se tem o primeiro projeto de avanço antrópico naquela região baseado no desmatamento da mata e na exploração madeireira (NUNES, 2012)



Figura 01: Desmatamento da vegetação nativa para implantação da atividade agropastoril. Data:11/08/2010
(Fonte: WATANABE,2011)

Atualmente os agentes econômicos que agem na região da área de estudo são os madeireiros e os pecuaristas (WATANABE, 2011). Os madeireiros que se localizam nesta região extraem madeiras em grande parte sem planejamento e manejo florestal e de maneira irregular, o que provoca grande devastamento ao meio ambiente. Esta extração de madeira tem como objetivo o abastecimento do mercado interno e externo. Já os pecuaristas são advindos da região sul do estado de Rondônia, pois, com a implementação da agricultura de grãos, principalmente, de soja no sul do estado houve um realojamento da pecuária do estado de Rondônia para a parte norte do estado (WATANABE, 2011). Este processo de ascensão da pecuária na região norte do estado fez com que houvesse novos projetos de assentamento que se manifestam como sendo de expansão planejada e dita sustentável.

Sobre o processo de ocupação do estado de Rondônia deve se citar dois projetos que são o Programa Integrado de Desenvolvimento do Noroeste do Brasil (POLONOROESTE) e Plano Agropecuário de Florestal de Rondônia (PLANAFLORO). O POLONOROESTE consistiu no desenvolvimento e ocupação na região do entorno da BR-364 (rodovia Cuiabá-Porto Velho) durante as décadas de 70 e 80. Este processo apresentou intenso fluxo migratório para a área de estudo (WATANABE, 2011). O PLANAFLORO consistiu num projeto de desenvolvimento sustentável que foi criado a partir da Rio-92 para a Amazônia. Este projeto não foi eficiente, pois o relatório final mostrou muitos componentes da descrição física da área de estudo e subcomponentes dos compartimentos geomorfológicos e macro-geomorfológicos de forma confusa e incoerentes (WATANABE, 2011). A dinâmica de ocupação do estado de Rondônia foi realizada sem planejamento provocando com isto sérias modificações do meio ambiente.

Nos dias atuais, a instalação das usinas hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio no rio Madeira

promoveram a modificação nas áreas da região do município de Porto Velho. Alguns distritos localizados no alto rio Madeira como Jaci-Paraná, Abunã e Mutum-Paraná tiveram parte de suas áreas alagadas. No caso de Mutum-Paraná, influenciada pela barragem de Jiraú, toda a população já foi realocada para o município de Nova Mutum que fica próximo da cidade de Porto Velho.

III.2 Descrição física da Área de estudo

O rio Mutum-Paraná é formado pelo encontro do córrego Água Azul que se origina na Serra dos *Pacaás*, a cerca de 200 metros da área dos índios *Karipunas* e pelo Igarapé Mutum, que tem suas nascentes nos morros testemunhos dos *Pacaás* a 280 metros de altitude (LINHARES, 2009). Conforme observa-se no mapa da área de estudo evidenciando o recorte da área de estudo no estado (Figura 02), o Mutum-Paraná é um rio totalmente rondoniense e apresenta uma extensão de 25 km desaguando no Rio Madeira.

O clima da região caracteriza-se por ser um clima *Aw* na classificação de *Koppen* tropical chuvoso onde as taxas de temperatura média do mês mais frio são superiores a 18°C e do mês mais frios são inferiores a 38°C e um período de seca bem definido durante a estação de inverno (AYOADE, 1996). A vegetação desta área é de floresta equatorial intercalada por áreas de cerrado sujo. Os solos nesta área são marcados por uma pedogênese avançada causada por um processo intenso de intemperismo que ocorre nesta região, isto pode ser verificado pela presença de latossolos. Geomorfologicamente a área é constituída por apresentar um relevo de altimetria baixo e formas de relevo de suave a ondulado sem a presença de grandes declives (NUNES, 2012).

Localização da Bacia do Rio Mutum-Paraná (RO)

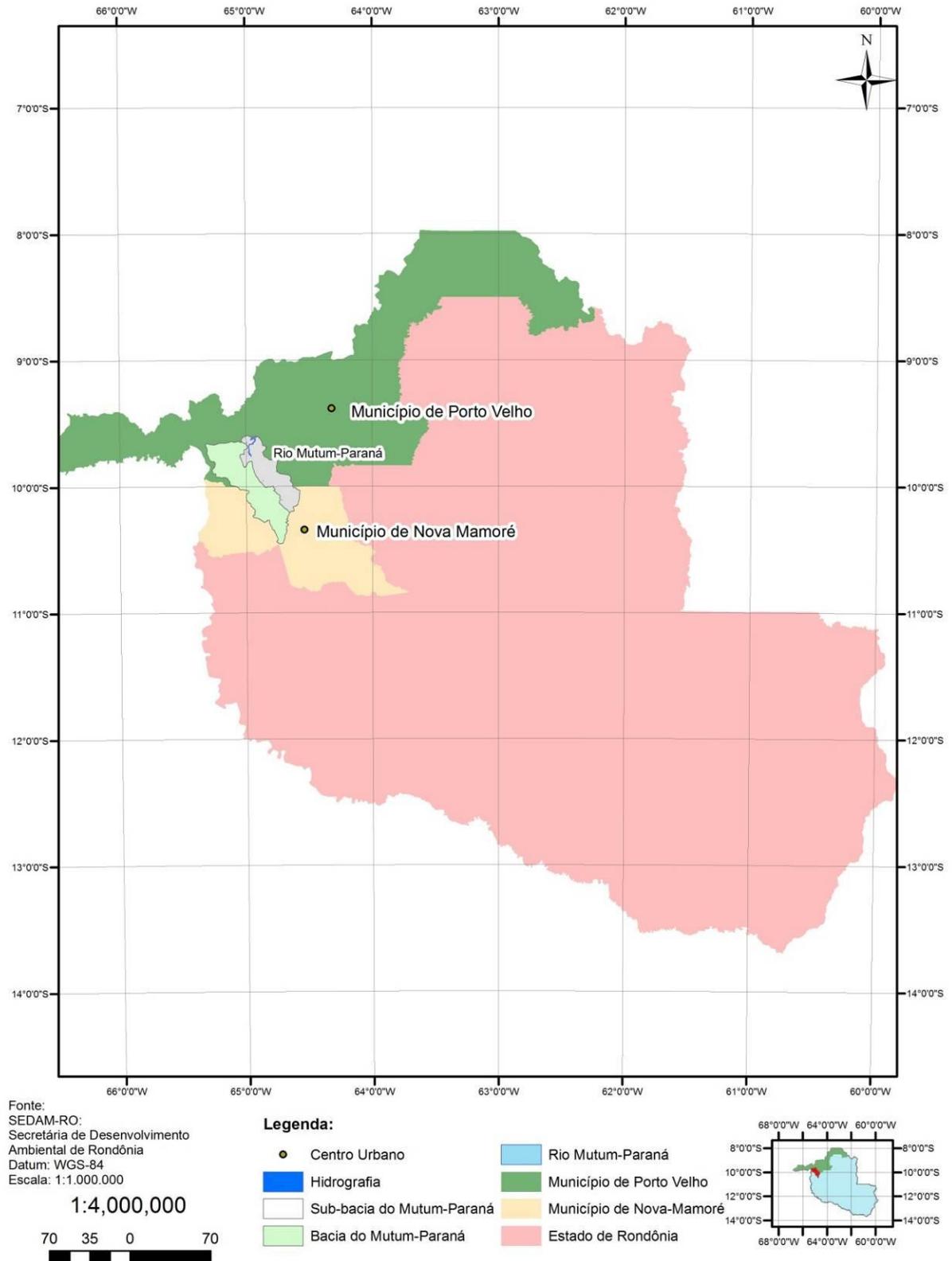


Figura 02. Mapa da área de estudo evidenciando a sub-bacia do Rio Mutum-Paraná e a bacia hidrográfica do rio Mutum-Paraná (Fonte: SEDAM – Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia). Organizado por Fabiano Luís Belem (2013).

III.3 Clima

O clima da Região Amazônica é eminentemente quente e úmido. Este tipo de clima se caracteriza por ser um clima tropical, formado por uma estação seca bem definida em que ocorre um déficit hídrico e uma estação chuvosa com alto índice de precipitação. A precipitação na região do rio Mutum-Paraná varia entre 1.700mm até 1.900mm conforme é apresentado na Figura 03.

A região Amazônica sofre influência da Massa de Ar Equatorial Continental que é um dos principais sistemas circulatórios atmosféricos originados principalmente, pela zona de convergência intertropical ocasionada pelos ventos alísios e pelo anticiclone de Açores (NUNES, 2012).

Mapa de pluviosidade da sub-bacia do Rio Mutum-Paraná (RO)

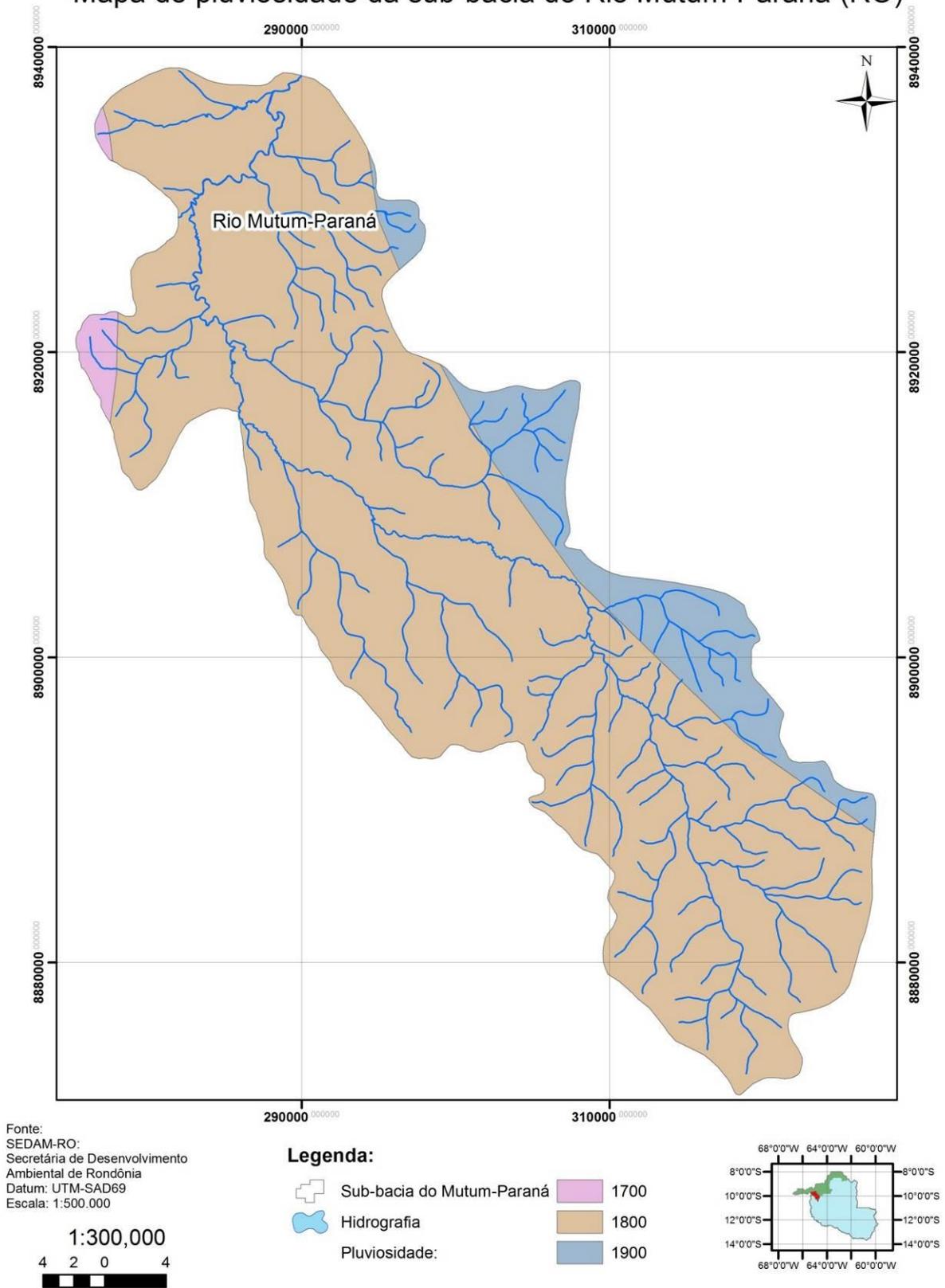


Figura 03. Mapa da sub-bacia hidrográfica do rio Mutum-Paraná revelando a pluviosidade e média anual. (Fonte: Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

III.4 Vegetação

As classes de vegetação presentes nesta região, segundo a classificação da vegetação brasileira pelo sistema fitogeográfico são as florestas ombrófilas e com a presença em algumas regiões de savanas representada por campinaramas e florestas de cipó (IBGE, 2012).

As florestas ombrófilas também são conhecidas como florestas pluviais por se localizar em áreas úmidas mesmo podendo apresentar alguns meses de seca (NUNES, 2012). A vegetação dessa floresta localiza-se sobre terrenos aluviais e independentes do solo eutrófico e distrófico e podem ser classificadas em três tipos de vegetação variando pela sua densidade, quais sejam abertas, densa e mista.

Na área de estudo ocorrem intercalações entre as florestas ombrófilas e as campinaramas isto ocorre de maneira gradual quando esta transição é feita por longas distancias ou de maneiras abruptas quando ocorre em distancias curtas (WATANABE, 2011). Tal fato é condicionado pela declividade que estabelece mudanças no tipo de solo de podzolicos hidromorficos para latossolos.

A vegetação de savana está mais ao norte da bacia do rio Mutum-Paraná (WATANABE, 2011). É representada pelos cipozais que se caracterizaram por ser a maior parte aberta, pois a fitomassa e o fitovolume vão diminuindo gradativamente com a densidade. Além disso, a savana é representada por algumas manchas de floresta semidecidual e gramíneas (PLANAFLORO, 2001).

III.5 Solos

Segundo Nunes (2012), existem quatro tipos de solos presentes na área de estudo que são: os latossolos amarelo distróficos, os latossolos vermelho-amarelo distróficos, os argissolos vermelho-amarelo distróficos e os gleissolos.

Os latossolos amarelo distróficos apresentam solos de textura média e argilosa (EMBRAPA, 2006). O relevo presente nesta área é plano e suavemente ondulado que sofreu um processo elevado de pedogênese. Este tipo de solo caracteriza-se por ser ácido a fortemente ácido. O solo ainda apresenta baixa saturação na maior parte do horizonte B.

Os latossolos vermelhos distróficos são um tipo de solo que apresentam um grau intermediário entre o latossolo vermelho amarelo e o latossolo roxo. Apresentam horizonte A fraco e horizonte B latossólico. São tipos de solos que apresentam baixa saturação (EMBRAPA; 2006).

Os latossolos vermelho-amarelo distróficos que são, em geral, pobres de nutrientes, ácidos, álicos e distróficos ocupam maior parte da área de estudo. São os solos intemperizados, apresentando como principais minerais derivados da argila, caolinita, minerais amorfos e sesquióxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 2006). Segundo o IBGE (2007), a capacidade de troca catiônica deste tipo de solo é baixa, também apresenta baixa quantidade de cálcio, magnésio, potássio e sódio adsorvido, o que faz com que este tipo de solo tenha baixa fertilidade. Além disso, este tipo de solo é poroso e, com isto, apresenta bastante resistência a erosão.

Os argissolos vermelho-amarelos distróficos são solos minerais não hidromórficos com o

horizonte A seguidos pelo horizonte B textural. Segundo Embrapa (2006), a argila presente neste solo tem uma atividade catiônica baixa ou alta, pode ser considerada como saturação de bases baixas e tem um caráter alítico devido à saturação por alumínio. Além disso, o horizonte B textural deste tipo de solo aparece com uma mudança morfológica de cor (IBGE, 2007).

Os gleissolos são solos pouco desenvolvidos por se formarem em ambientes com lençol freático próximo a superfície e com regime de inundação durante parte do ano (WATANABE, 2011). O solo está saturado em umidade, a gleização dos horizontes causada pela redução de ferro livre em ausência de oxigênio (IBGE,2007). São solos minerais pouco desenvolvidos e mal drenados compostos por argila de baixa ou alta atividade com isso, apresentam baixa saturação por base o que acarreta baixa fertilidade natural (PLANAFLORO, 2001).

III.6 Geologia e Geomorfologia.

O estado de Rondônia está localizado no domínio cratônico que faz parte da província do Tapajós, subprovíncia do Madeira que localmente recebe a denominação de Complexo Jamari (GOMES, 2006). A geologia da área do Alto rio Madeira onde se localiza o rio Mutum-Paraná é caracterizado por embasamentos originários dos complexos gnáissicos, granitoides, e supracrustais associados, por sua vez retrabalhados por rochas intrusivas, com destaque para as graníticas e encobertas por sequencias sedimentares com ou sem vulcanismo associados do Proterozóico Médio e Superior (RONDONIA, 2002). Nesta área explica que a quantidade de mercúrio presente no solo é associado ao vulcanismo que ocorreu durante o proterozóico.

Segundo o Serviço Geológico Nacional a área é composta por algumas formações litológicas. No sul da bacia do rio Mutum-Paraná tem as seguintes formações litológicas: depósitos aluvionares que é composto por depósitos arenosos, siltosos e argilosos, com níveis de cascalho de ambiente fluvial; depósitos argilosos que são depósitos argilosos e siltico-argilosos inconsolidados, ricos em matéria orgânica relacionado a planície de inundações (CPRM,2007).

Já no Norte da bacia do Mutum Paraná se caracteriza pela presença da formação rio Madeira são sedimentos conglomeráticos e arenosos de granulometria grossa mal selecionada, estratificados ferruginizados, além de argilas maciças a laminadas com restos de vegetais e fósseis vertebrados (CPRM, 2007). Outra litogia desta área é a Cobertura Sedimentar Indiferenciada são depósitos de areia, silte, argila, ou cascalho com restos de materiais lateríticos (horizontes mosqueados e argilosos, além da crosta laterítica ferruginosa). Nestas áreas também se encontra sedimentos aluvionares, coluvionares e eluvionares indiferenciados recobertos por cobertura de solos indiscriminados (CPRM, 2007).

Já na área central apresenta as seguintes litologias: Formação Complexo Nova Mamoré apresenta biotita, paragnaisse quartzo-feldspático, granada biotita paragnaisse, gnaiss calssiocático, sillimanita-granada-biotita-quartzo xisto. Também tem uma concentração da suíte Intrusiva Alto Candeias é formada por granito porfirítico (CPRM, 2007).

Na região nordeste e a sudeste da bacia Mutum Paraná apresenta uma litologia de Suite Intrusiva da Providência é composta por granito rapakivi que é um tipo de rocha composto pelos minerais anfíbolito-biotita, mongrozenito, biotita sienogranito (CPRM,2007). Apresenta também charnockito, mangerito e rochas máficas associadas, variando de isotrópica a foliada (foliação de fluxo magmático e milanítica).

A geomorfologia desta área se caracteriza por apresentar um modelado de terreno com baixa declividade e uma topografia com altimetria baixa como pode ser visto nos mapas de declividade e topografia, figuras 04 e 05. As formas de relevo que estão presentes na área são superfícies aplainadas em que se diferenciam pela sua estrutura que é formada por rochas do embasamento cristalino, também a presença de colinas, que são pequenas elevações da superfície que tem uma morfometria côncavo-convexo presentes em relevos bastante suavizados em virtude de processos erosivos. Ainda tem a presença de tabuleiros de estrutura sedimentar, que correspondem a áreas de relevo semelhante a 'plataforma' que correspondem ao tipo mais simples de influência estrutural sobre o relevo (SUERTEGARAY, 2003). Os tabuleiros foram erodidos pelos processos erosivos atuantes nesta região (PLANAFLORO, 2001). Segundo Watanabe (2011), esta região se caracteriza por apresentar um sistema fluvial meandrante.

As três unidades geomorfológicas marcantes são: a Depressão do Madeira-Ji-Paraná que tem uma estrutura de depósitos sedimentares com formas tabulares; a Depressão do Madeira-Ji-Paraná de estrutura sedimentar e cristalina com topos convexos esculpido em rochas cristalinas; a Planície Amazônica de acumulação fluvial de forma plana levemente inclinada (PLANAFLORO, 2001).

Mapa de Declividade da Sub-bacia do Rio Mutum-Paraná

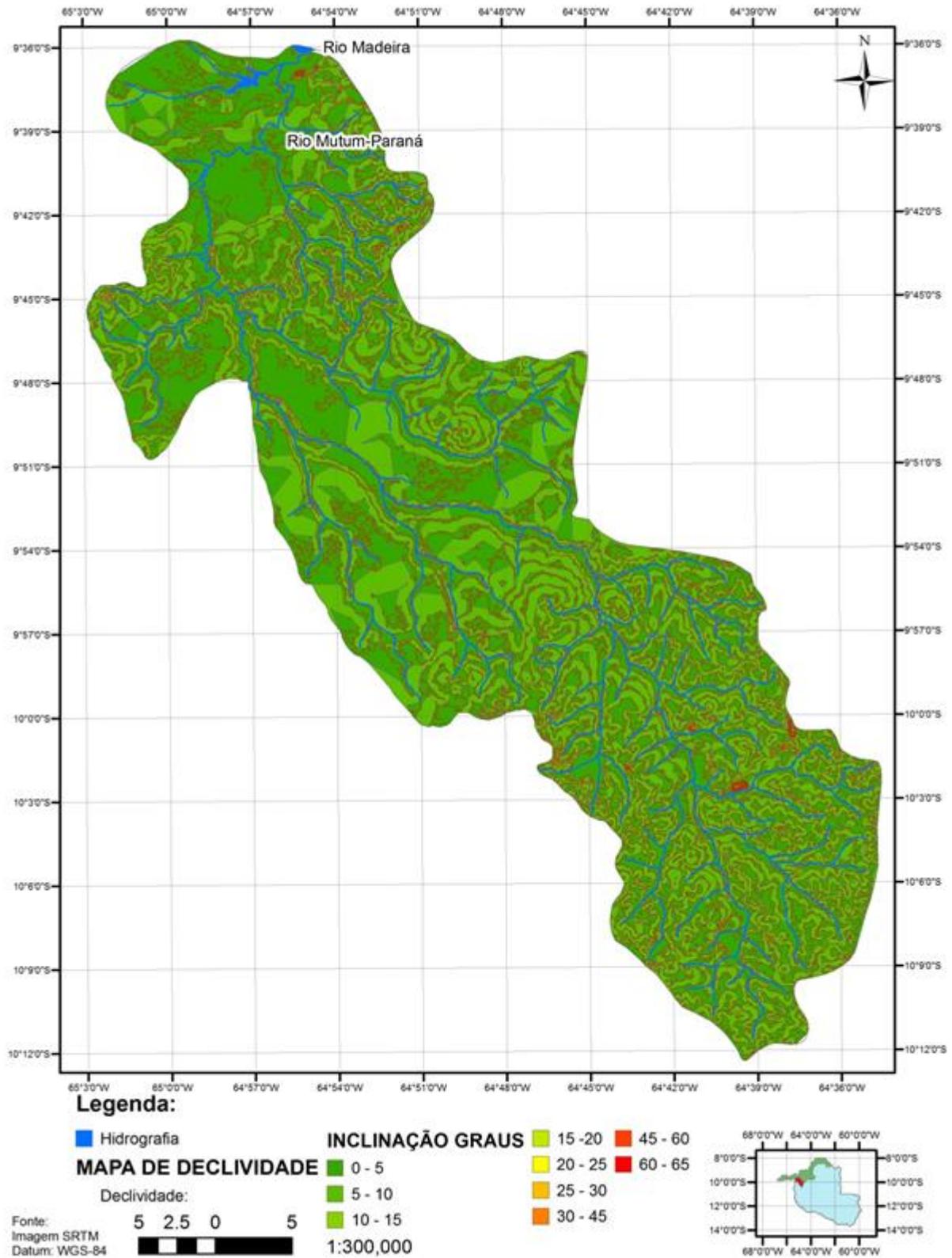


Figura 04: Mapa de declividade da sub-bacia do Mutum-Paraná. (Fonte: SRTM - Missão Topográfica Radar Shuttle, 2013). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Mapa de Topografia da Sub-bacia do Rio Mutum-Paraná

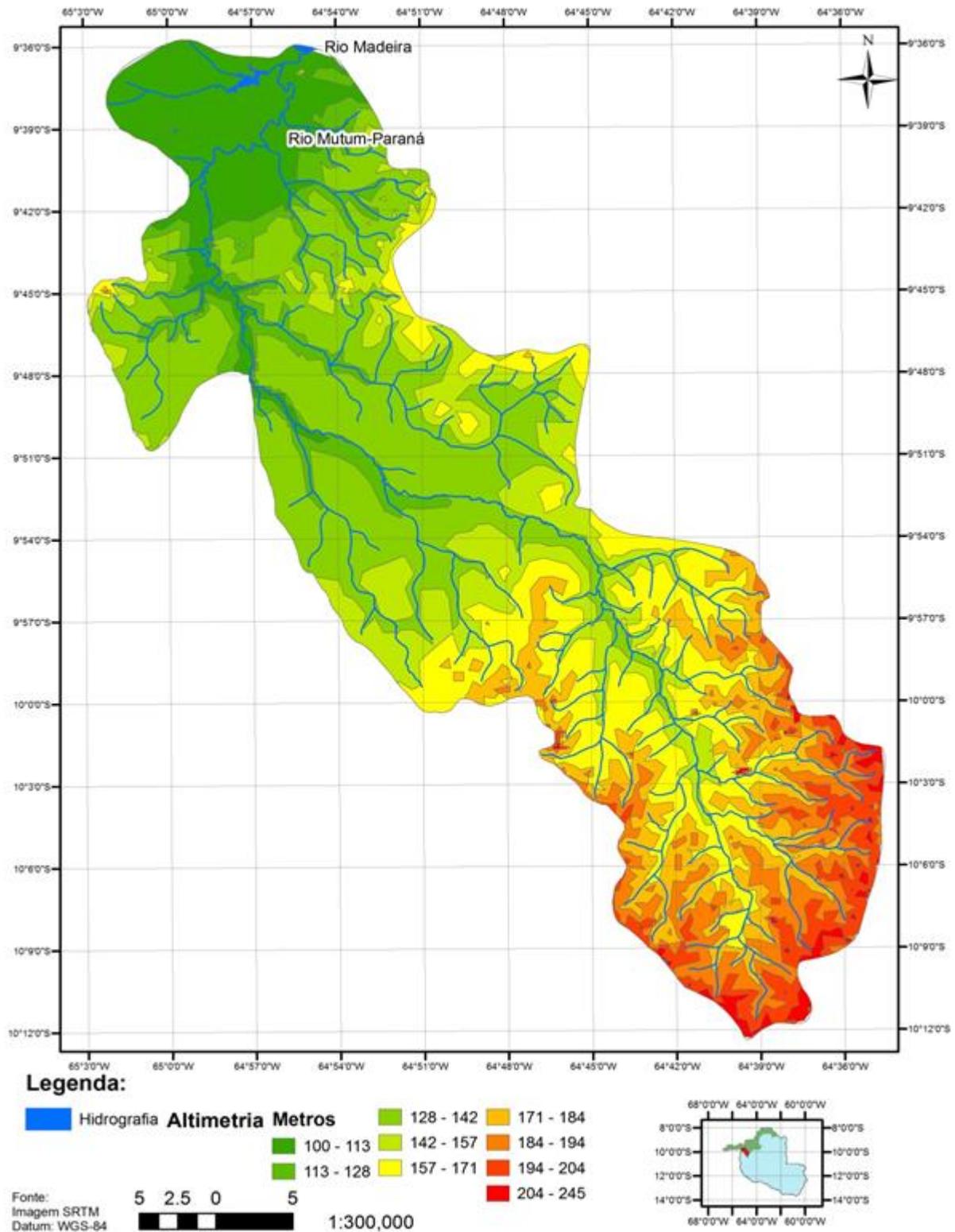


Figura 05: Mapa altimétrico da sub-bacia do rio Mutum-Paraná (Fonte: SRTM - Missão Topográfica Radar Shuttle, 2013). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

III.7 Exploração mineral

O rio Mutum-Paraná é afluente do rio Madeira no estado de Rondônia, que durante cerca de 25 anos (1970-1995), reiterando as informações anteriormente mencionadas, foi utilizado como área de manutenção de balsas e dragas utilizadas e provenientes exploração do ouro aluvionar na calha do rio Madeira (BASTOS & LACERDA, 2004). Esta exploração do ouro provocou grandes lançamentos de mercúrio metálico (Hg^0) para essa bacia hidrográfica, devido às emissões de resíduos para a atmosfera (Hg^0 na fase vapor) e corpos d'água (Hg^0 na fase líquida) provenientes das balsas e dragas na exploração do minério (LINHARES, 2009).

O mercúrio foi utilizado para extração de ouro por gerar amálgama (ouro-mercúrio), uma liga metálica entre o ouro e o mercúrio que serve para capturar o ouro fino misturado ao sedimento de fundo. Posteriormente, para separar o mercúrio do ouro, a ebulição do amálgama era realizada, para que fosse liberado o mercúrio na fase vapor. Esse procedimento foi realizado a céu aberto em grande escala entre as décadas de 70 e 90 liberando cerca de 100 toneladas de Hg no ambiente (LACERDA et al, 2000). Aproximadamente 40% desse total foi lançado na fase líquida do Hg^0 e os demais 60% para a atmosfera na fase vapor de Hg^0 . Nesta fase vapor o Hg^0 foi espalhado por centenas de quilômetros quadrados e se depositando por meio da deposição seca e úmida, posteriormente sendo lixiviado e chegando aos corpos d'água. A partir de então, dependendo das condições físicas e químicas do corpo d'água o mercúrio presente pode sofrer reações químicas dentre estas reações a metilação que ocorre por ação microbiana com a presença de carbono e íons de mercúrio que transforma estes elementos químicos no metil-mercúrio, uma substância de ação neurotóxica que causa diversos problemas a saúde como perda de inteligência, mudança de humor, comprometimento na coordenação motora, problemas de má formação, cegueira, dentre outros. Na Figura 09, estão localizadas as áreas de exploração de minérios na bacia do rio Madeira.

Mapa de exploração mineral Bacia Mutum-Paraná

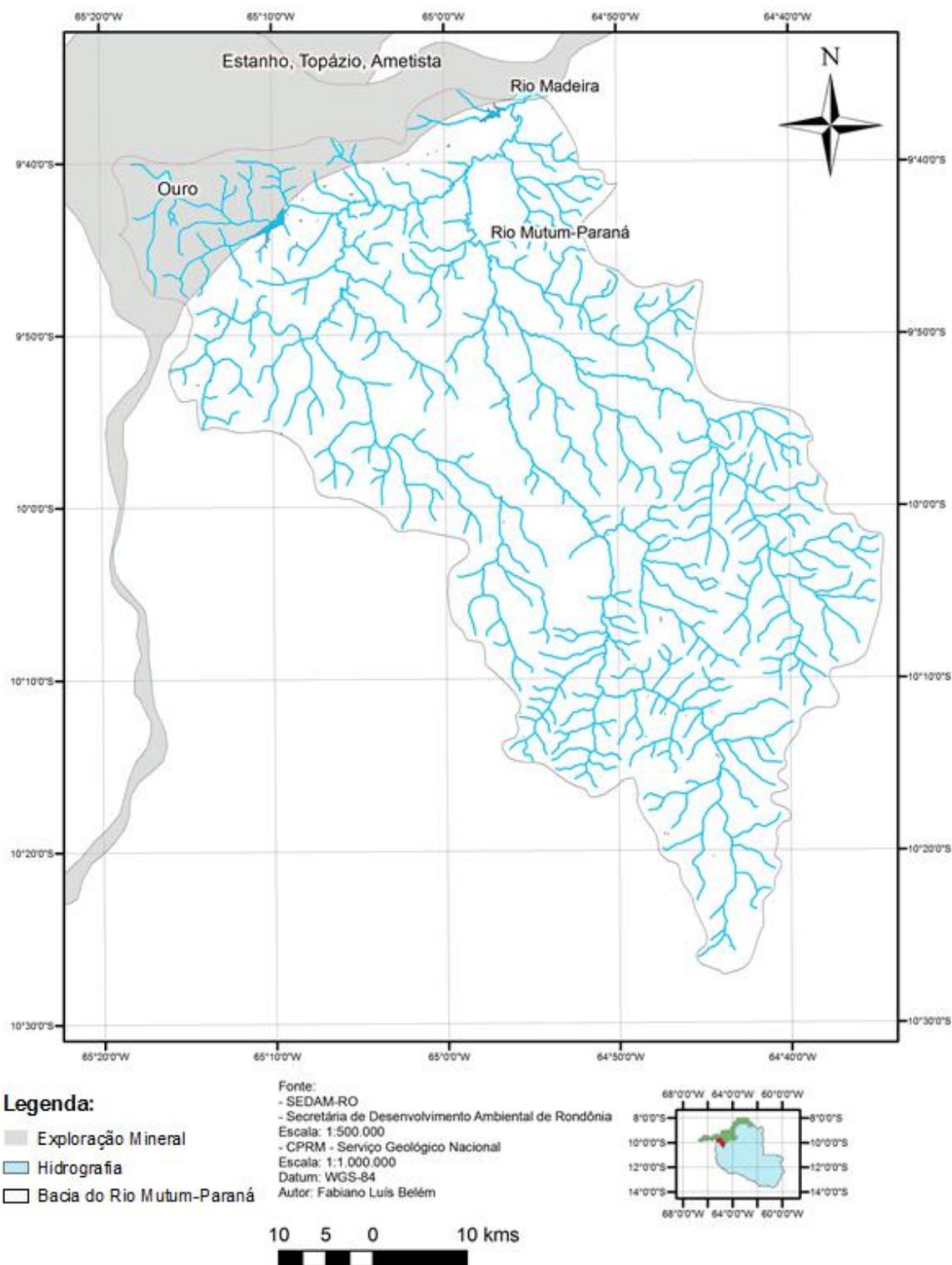


Figura 06: Mapa de exploração minério na bacia hidrográfica da Bacia do Mutum-Paraná. (Fonte: Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia; Serviço Geológico Nacional). Organizado pelo Autor (2013).

III.8 Uso e Ocupação do solo e aplicação de Sensoriamento Remoto.

Quanto ao uso e ocupação do solo na região onde sofreu intensiva ação antrópica, tem-se carência de informações secundárias atualizadas ao qual se pode melhor caracterizar a área de estudo. Diferentemente das demais caracterizações da área de estudo apresentadas, o levantamento do uso e ocupação do solo, é importante para identificar as atividades que compõe a superfície que está sendo estudada e gerar uma base georreferenciada com os dados primários ao qual se pode produzir mapas para a localização das análises espaciais.

Para tanto, inicialmente, fixou-se a composição de uma legenda específica. Neste trabalho foram consideradas as feições geográficas que têm relevância no estudo de mercúrio da área do rio Mutum-Paraná. A legenda deste mapa de uso e ocupação do solo baseia-se nas feições geográficas que influenciam na remobilização do mercúrio presente no solo. Esta legenda consiste nos seguintes itens:

- **Vegetação** - deve conter todos os biomas da área de estudo e cada tipo de vegetação presente;
- **Recursos hidrográficos** – são os itens que consideram os recursos hidrográficos da região como lagos, rios e nascentes;
- **Afloramento rochoso** – são áreas que aparecem os afloramentos rochosos e aonde as rochas aparecem no caso para a exploração do minério
- **Áreas urbanas** – caracterizam-se pela presença de vilas, cidades, povoadas e áreas de periferia (loteamentos);
- **Áreas de cultivos e criação de gado** – áreas de atividade agropecuária.

Dentre as imagens de satélite disponíveis para este trabalho utilizou-se a imagem do programa CBERS ® sensor CCD de 04/07/2009 que se caracteriza por apresentar uma resolução espacial de 20 metros. As características da imagem CBERS são discutidas no ANEXO-A deste trabalho. Quanto melhor a resolução espacial da imagem, melhor é a detecção de feições geográficas de interesse. Essa imagem foi escolhida por ser da estação cheia da área de estudo deste projeto e a decisão de adquirir a imagem nesta estação ocorreu porque fica mais preciso a identificação das feições geográficas relevantes à remobilização do mercúrio. Buscou-se verificar se tal imagem adequava-se neste estudo para se ter acesso as informações espaciais selecionadas na legenda.

O sensoriamento remoto visou fornecer dados espaciais para todas as classes presentes na legenda deste trabalho. Durante o estudo das feições geográficas na imagem, foi de fundamental importância o processamento digital de imagens para que as feições geográficas presentes na área de estudo se tornassem mais nítidas.

O processamento digital de imagens é o trabalho que deve ser estabelecido sobre a imagem para a identificação de algumas feições geográficas. As feições relevantes para este estudo foram estabelecidas na compilação da legenda deste trabalho. O pré-processamento de imagens visa à

identificação das maiores quantidades de feições geográficas relevantes (CROSTA, 1992). A imagem selecionada de base foi possível de ser utilizada neste estudo porque as feições geográficas selecionadas na imagem apresentam extensão maior de 20 metros que é a resolução mínima de um pixel na imagem.

O primeiro procedimento a ser realizado no processamento é o registro de imagem que consiste em um procedimento de correção das distorções geométricas que ocorrem na imagem. Além disso, a correção geométrica é necessária para a análise espacial, pois, as imagens de uma mesma área devem conter as mesmas coordenadas geográficas e o mesmo sistema de projeção. As correções geométricas são baseadas em pontos de controle que são identificados através de feições geográficas que se encontram e devem ser identificados precisamente na imagem e tem suas coordenadas geográficas conhecidas. Os pontos de controle inseridos na imagem são originados do projeto *Geocover*, consiste num projeto da agência espacial americana que é composto por um conjunto de imagens Landsat ortorretificadas de toda superfície terrestre e do *software Google Earth*® com a utilização de vinte e cinco pontos. Com os pontos de controle devidamente identificados, a correção geométrica foi realizada a partir de uma equação polinomial de segundo grau.

Para esta imagem utilizou-se a composição colorida RGB-123 para a identificação das feições geográficas presentes na área de estudo. O próximo passo do processamento de imagens é o contraste. O contraste consiste na mudança radiométrica de cada pixel, que tem como objetivo melhorar a visualização da imagem e identificar as feições geográficas presentes na imagem (CROSTA, 1992). Nesta imagem utilizou-se o contraste linear de mínimo e máximo.

Após isto foi realizado o processo de segmentação da imagem ocorreu antes do processo de classificação, pois seu objetivo é tornar a classificação mais eficiente. O segmentador pode ser entendido como uma classificação estatística, constituindo um processo de análise de *pixels* de forma isolada (CROSTA, 1992). A partir disso, usou-se o segmentador de crescimento de regiões a fim de separar os pixels que apresentavam níveis de cinza diferentes.

Por fim, usou-se o algoritmo de Maxver ou máxima verossimilhança em que as feições geográficas são separadas estatisticamente pelo nível de cinza que é apresentado na imagem (CROSTA, 1992). Estas classes são indicadas pelo analista. A partir disso, foram extraídas as classes que compunham a legenda. Todo o trabalho em que necessita de mapeamento exige que este mapeamento seja verificado em trabalhos de campo. Por problemas de calendário este mapeamento em campo não foi realizado, mas está classificação foi respaldada através de imagens obtidas no *Google Earth*®, *Geocover*, dados espaciais de órgãos ambientais como Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), da Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia (SEDAM), fotos da área de estudo e estudos na literatura sobre as feições geográficas existentes nesta área como em Linhares (2009), Watanabe (2011), Nunes (2012).

Mapa de uso e ocupação do solo próximo ao Rio Mutum-Paraná

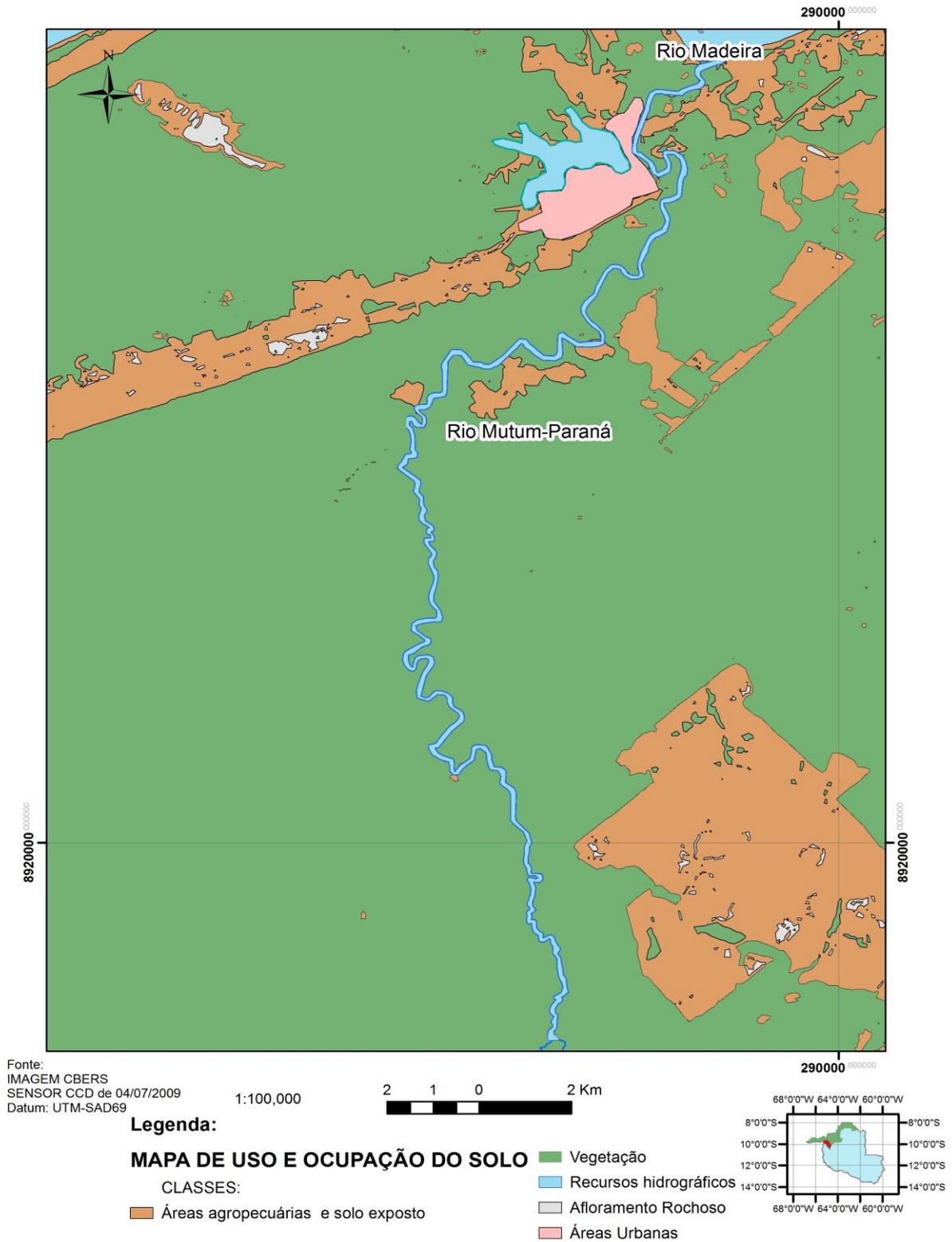


Figura 07 : Mapa Uso e Ocupação do Solo (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Realizado por Fabiano Luís Belém (2013).

III.9 Método Geoestatístico

A análise espacial é uma metodologia de estudo ambiental muito utilizado nas ciências ambientais permitindo a investigação do comportamento dos elementos naturais no meio ambiente. Segundo Camara (2000), a prioridade da análise espacial é interpolar os atributos e os relacionamentos considerando a localização espacial do fenômeno em estudo. Na análise espacial, uma das estimativas mais utilizadas pelos analistas é a superfície contínua, consistindo em uma superfície interpolada a partir de um conjunto de amostras de campo que podem estar regularmente ou irregularmente distribuídas. Esse tipo de inferência estatística possui o objetivo de reconstruir a superfície da qual se retirou as amostras de campo. Tal modelo é a melhor representação espacial do comportamento de elementos químicos no meio ambiente, pois com ele é possível quantificar a dependência espacial que consiste numa propriedade das variáveis aleatórias que faz com as amostras possam assumir valores, em pares de pontos afastados a certa distância, afetaram os valores destes pontos (LEGENDRE et al., 1998). Isto ocorre entre as amostras coletadas em campo (CAMARA, 2000).

Existem várias técnicas de interpolação para superfícies contínuas. Dentre as técnicas de estimação disponíveis, destaca-se a geoestatística, ramo da estatística aplicada que desenvolve e aplica modelos para representar fenômenos naturais cujas propriedades variam em função da localização espacial dos pontos amostrados (CAMARA, 2000). Segundo Matheron (1962), a geoestatística é a aplicação do formalismo das funções aleatórias para reconhecer a estimação de fenômenos naturais. O estudo geoestatístico procura estabelecer uma função de correlação entre amostras que foram coletadas em uma área espacial.

O trabalho geoestatístico fundamenta-se em uma série de conceitos e teorias para análise dos dados. Um conceito importante é o de Variabilidade Aleatória Local que consiste na representatividade da amostra coletada aleatoriamente em campo baseada numa função aleatória (MEIRELLES et. al., 2007). Outro conceito importante para a geoestatística trata-se da estacionaridade dos dados amostrados em campo, supondo-se um comportamento homogêneo da estrutura de correlação espacial² da área de estudo (MEIRELLES et. al., 2007). O processo pode ser considerado estacionário caso os dados apresentem o valor esperado e exista covariância entre as superfícies das imagens estimadas (CAMARA, 2000). Uma teoria importante para o trabalho geoestatístico é a Teoria das Variáveis Regionalizadas que aprecia a alteração de uma variável expressa por três componentes conjuntos, sendo eles: a componente estrutural, associado a um valor médio constante; uma componente aleatória, espacialmente correlacionada e o ruído, aleatório ou erro residual (CAMARGOS; FELGUEIRAS, 2006). Uma aplicação da Teoria de Variáveis Regionalizadas, por exemplo, é a coleta de amostras em diversos pontos que se localizam a uma distância *versus* quanto menor for a distância entre estes pontos maior será a influência de ponto sobre o outro, ou seja, mais

2 Correlação espacial - Este termo estatístico é utilizado para mensurar o relacionamento entre variáveis aleatórias medidas em locais distintos no espaço.

correlacionados estes pontos serão. O grau de relação entre estes pontos coletados é determinado pela covariância dos dados coletados (LANDIM, 2002). Segundo Ortiz et al.(2002) supõe que a variabilidade dos dados é composta por três fatores que são a componente estrutural que está associado a uma média constante, a um valor de tendência dos dados que é constante durante todo o processo e a um erro residual da própria estimativa geoestatística:

$$Y = E + F + R$$

Formula 01: Erro residual de estimativa geoestatística. (Fonte: ORTIZ et al, 2002)

Onde:

E é uma função determinística da componente estrutural de Y.

F é um termo estocástico que apresenta variabilidade local e dependência espacial.

R é ruído aleatório não correlacionado espacialmente

Uma parte importante do estudo geoestatístico é a análise de regressão múltipla espacial utilizada para testar dependência espacial entre as diversas amostras a partir de suas coordenadas geográficas. A partir da análise de regressão múltipla e do semivariograma é possível modelar e estimar a estrutura de dependência espacial, possibilitando o mapeamento da superfície matemática amostrada (LANDIM, 2002).

A escolha por processos geoestatísticos, ao invés de utilizar métodos de interpolação espacial, se deu pela existência de fatores que demonstraram existir uma maior confiabilidade dos métodos geoestatísticos. Como exemplo, pode-se citar que na interpolação geoestatística os pesos são determinados a partir de uma análise de correlação baseada no semivariograma enquanto que, nos outros métodos de interpolação espacial, os pesos são determinados meramente a partir da distância (CAMARGO; FELGUEIRAS, 2006). Outro fator relevante é o fato de que, no método geoestatístico, a área de influência das amostras na interpolação é indicada pelo alcance dos semivariogramas. Já nos métodos de inferência espacial é comum que a extensão de influência das amostras seja colocada de modo arbitrário (CAMARGO; FELGUEIRAS, 2006).

Cabe ressaltar também que há uma diferença do tratamento de modelo anisotrópico. Nos métodos geoestatísticos a anisotropia é detectada nas direções de menor e maior continuidade espacial do fenômeno, mas nos métodos de interpolação convencionais a anisotropia é ignorada (CAMARGO; FELGUEIRAS, 2006). Além disso, os métodos geoestatísticos tratam a redundância (“Clusters”), isto é, atribuem pesos adequados para agrupamento de amostras enquanto que, nos métodos estatísticos convencionais, as redundâncias de dados são ignoradas, o que pode acarretar uma superestimação ou subestimação de dados (CAMARGO; FELGUEIRAS, 2006).

III.10 Krigagem

Existem vários métodos geostatísticos de interpolação que podem ser utilizados com o objetivo de se extrair o máximo das características dos dados analisados para se estimar uma superfície contínua. Dentro destas técnicas destaca-se a estimativa por *Krigagem* consiste numa interpolação de um atributo, em uma região X não amostrada, a partir de um conjunto de amostras vizinhas. A *Krigagem* compreende um conjunto de técnicas de estimação e previsão de superfície baseada na estrutura de correlação espacial. O método de *Krigagem* permite uma análise exploratória dos dados, análise estrutural da modelagem de correlação espacial, a interpolação estática da superfície do fenômeno estudado (MEIRELLES et. al., 2007). A estimativa por *Krigagem* interpola valores para regiões onde não se tem valores coletados em campo e cada estimativa apresenta a média ponderada dos valores coletados na sua vizinhança (ORTIZ, 2002).

Os métodos de *Krigagem* são métodos de estimativa que tem como objetivo diminuir o erro da interpolação dos dados com o ajuste do semivariograma utilizando funções matemáticas. O estimador de *Krigagem* linear sem o ajuste do semivariograma é representado pela seguinte função matemática abaixo sendo que $Z(X_0)$ é o valor estimado e $Z(X_i)$ é o valor coletado em campo.

$$\bar{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

Formula 02: Krigagem (Fonte:ORTIZ,2002).

III.11. Krigagem Ordinária

Nas situações em que se tem estacionaridade local e que se tem a média estacionária constante de toda a área de estudo aplica-se a *Krigagem Ordinária*. A *Krigagem Ordinária* se caracteriza por serem estimadores ótimos que minimizam a variância do erro de estimação e interpola localmente a média. Além disso, a *Krigagem Ordinária* realiza a interpolação através de estimativa linear que consiste que a partir de um ponto amostrado é possível se estimar o resto dos pontos desejados, de tal maneira, que quanto mais distante o ponto menor é o valor do ponto estimado.

“Se a soma dos pesos for igual a um e não ocorrer tendência local dos valores, esse estimador é o melhor não tendencioso, pois a partir dos pesos atribuídos a cada amostra, minimiza a estimativa da variância.” (LANDIM 2006 pág100)

O método de *Krigagem Ordinária* apresenta um erro que é associado a ele que é a diferença entre o valor amostrado e o valor estimado. A melhor estimativa é quando a diferença do valor amostrado e interpolado é zero ou próximo de zero. O algoritmo de *Krigagem Ordinária* simula uma análise de variância para que o valor possa ser estimado semelhante à análise de regressão múltipla que é usada para testar dependências acumulativas de uma única variável dependente em relação a

diversas variáveis independentes (LANDIM, 2012). O algoritmo calcula a variância dos dados a partir do variograma em que apresenta os pontos estimados (LANDIM, 2000). A matriz de covariância dos dados é multiplicada pelo multiplicador de *Langrage*, pois este apresenta como os valores amostrados se relacionam com os valores a serem estimados (LANDIM, 2000).

III.12 Krigagem Indicativa

A *Krigagem* indicativa é uma estimativa não linear que consiste na propriedade da variável em estudo e da amostragem ser aleatória. A *krigagem* indicativa serve para estimar valores de incerteza. Isto ocorre a partir de uma função de distribuição acumulada condicionando os dados amostrados da variável aleatória a um atributo espacial, possibilitando inferência de valores a partir de amostras pontuais de um atributo espacial (CAMARGOS; 1997).

As estimativas consistem em valores a partir de um determinado nível de corte em que os valores amostrados em campo encontram-se acima ou abaixo deste nível. A partir disso, função será ajustada e determina os valores amostrados se tornarão binários assumindo valores de um ou zero. Esta codificação dos valores amostrados em arquivos binários pode ser feita utilizando como valor de referência a médio ou a mesmo a mediana que é um valor mais robusto quando a distribuição é assimétrica. Outra opção consiste na utilização de algum número aleatório dos valores de intervalo da amostragem.

A partir disso, é calculada a função de distribuição de probabilidade acumulada (*fdpac*) que desta função obtêm-se a inferência dos valores da incerteza que são gerados de cada variável aleatória através dos valores de cada amostra. Assim o valor de incerteza pode ser interpolado através de valores estimados da probabilidade (CAMARGOS, 2002).

A função da *Krigagem* Indicativa é representada pela seguinte equação:

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

Fórmula 03: Krigagem Indicativa (Fonte: CAMARGOS, 2002)

A partir disso, o algoritmo transforma os valores coletados em números binários gerando mapas de probabilidades.

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

Formula 04: Transformação Binária. (Fonte: CAMARGOS, 2002)

III.13 Semivariograma - Análise variográfica

O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte as técnicas de *Krigagem* porque o modelo de semivariograma utilizado é a representação da estrutura de dados espaciais que serão utilizados na interpolação (CAMARGOS; FELGUEIRAS, 2006). O estudo no semivariograma permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. Segundo Yamamoto (2001), ele é usado para calcular os valores da dependência espacial para certa distância isto é necessário para a realização da equação de *Krigagem*. O semivariograma caracteriza-se por apresentar as amostras de campo através de um gráfico para, a partir disso, abrir as possibilidades de verificação das relações espaciais entre as amostras.

O semivariograma representa o nível de dependência entre as variáveis regionalizadas e suas respectivas coordenadas geográficas X e Y. Esta dependência espacial é conhecida como esperança matemática de x dado y. A divisão pela metade da esperança matemática gera o semivariograma. O semivariograma é utilizado para o cálculo do melhor ajuste espacial da função de correlação entre as amostras.

O semivariograma inicia-se pelo efeito pepita que representa as medidas que são valores positivos que tendem a ser próximos de zero ao mesmo tempo revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as coletas (CAMARGOS; FELGUEIRAS, 2006). Segundo Camargos (2002), o efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa a componente da variabilidade espacial que não pode ser relacionado com uma causa específica (variabilidade ao acaso). Parte desta descontinuidade pode ser também medida devido a erros de medição sendo impossível quantificar a maior contribuição provém dos erros de medição variabilidade das amostras coletadas (CAMARGOS, 2002).

O efeito pepita corresponde a cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo das coordenadas. Este ponto onde existe o encontro do semivariograma e as coordenadas do eixo Y mostra uma posição do semivariograma que não é possível calcular a dependência espacial e a correlação espacial. Este valor sempre tende a zero e mostra a variabilidade ao acaso. Além disso, este ponto mostra onde as estruturas do fenômeno apresentam erro de amostragem, escala de amostragem e erros de análises laboratoriais (CAMARGO; FELGUEIRAS, 2006). Quando o efeito pepita é aproximadamente igual ao patamar denomina-se efeito pepita puro e consiste que a amostra não apresenta dependência espacial.

Quando o efeito pepita apresenta um valor alto mostra que o fenômeno tem uma alta variabilidade espacial. Mas, quando o efeito pepita tem um valor pequeno a variável estudada tem uma alta dependência espacial. Segundo Cambardella e et al (1994), com o índice de dependência espacial (IDE) é possível avaliar a semivariância do efeito pepita: menor ou igual a vinte e cinco por cento apresenta uma forte dependência espacial; entre vinte e cinco por cento e setenta e cinco por cento a dependência espacial é moderada; acima de setenta e cinco por cento a dependência espacial é nula. A fórmula para este cálculo é a seguinte:

$$\text{IDE} = \frac{C_0}{C+C_0}$$

Formula 05: Dependência espacial. (Fonte: CAMBARDELLA e et al, 1994)

onde o IDE é índice de dependência espacial, o C_0 é o efeito pepita e C é a plataforma.

Outra parte do semivariograma é o alcance onde as amostras estão correlacionadas espacialmente. Nesta região do semivariograma pode ser identificada a quantidade de amostras coletadas que estão correlacionadas entre si.

Por fim, o patamar consiste no semivariograma menos o alcance. Deste valor em diante considera-se que não existe correlação espacial entre as amostras coletadas em campo. Esta área do semivariograma corresponde ao valor através do qual a dependência espacial entre as amostras não existe mais (LANDIM,2002). Na figura 08 mostra as partes fundamentais do semivariograma:

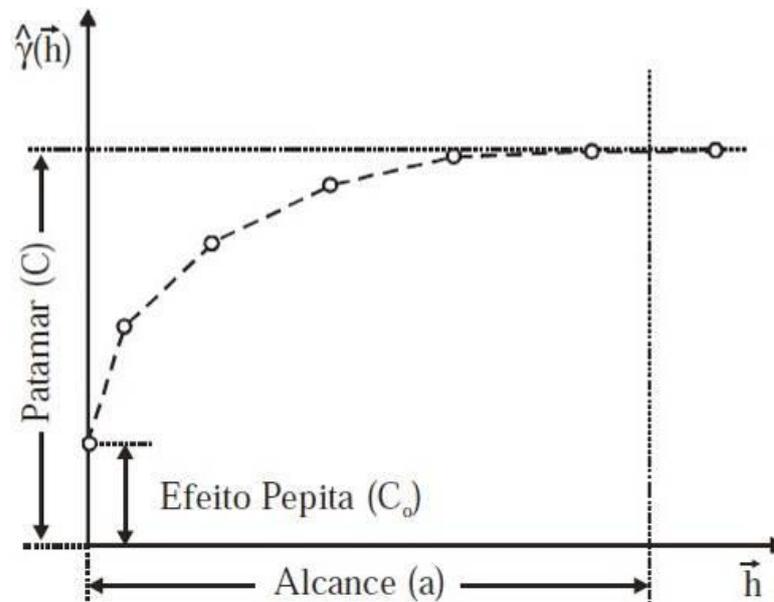


Figura 08: Semivariograma (Fonte: LIMA, 2006)

III.14 Ajustes de semivariograma

A partir das amostras coletadas em campo é possível se determina o semivariograma desde que sejam limitados os limites de tolerância angular, a direção e a distância de cada amostra (CAMARGO;1998). Como na figura 09 abaixo:

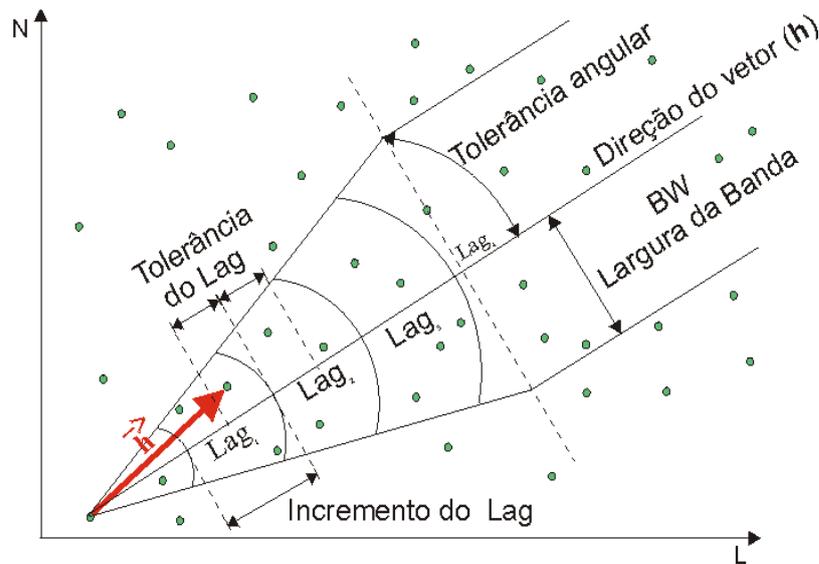


Figura 09: Diagrama gráfico do ajuste de semivariograma (Fonte: LIMA, 2006)

Como mostrado na figura acima é necessário determinar a direção do fenômeno que está sendo espacializado. Também é necessário determinar a tolerância angular que consiste aumentar a área de influência de cada amostra espacializada naquela direção. Além disso, é necessário determinar o *lag* que consiste o campo de abrangência de cada amostra e a tolerância de *lag* corresponde ao intervalo de distância em que todas as amostras serão utilizadas no semivariograma para a estimativa (LIMA, 2006).

A partir disso, é possível realizar os ajustes de semivariograma que consiste em funções matemáticas que são utilizadas no semivariograma experimental para modelagem espacial do fenômeno estudado (LIMA, 2006). A partir destas funções é obtido a melhor representação do fenômeno espacial que está sendo representado.

O ajuste de um semivariograma experimental está relacionado com o comportamento do semivariograma na origem ou existência de um patamar, do valor do efeito pepita e da curva da função sobre o semivariograma. Para que o ajuste do semivariograma seja obtido com êxito é necessário que haja uma correlação espacial entre as coletas da amostra (SOARES, 2006). O semivariograma estabelece a correlação espacial dos dados amostrados em campo.

Para a modelagem geoestatística ser realizada é necessário que ocorra um longo trabalho de acertos e erros de ajuste de semivariograma usando modelos matemáticos baseados em funções matemáticas e probabilidades estatísticas. Estes modelos matemáticos tem a necessidade de descrever continuamente a variabilidade e a correlação espacial existentes nos dados (YAMAMOTO, 2001). Isto faz com que a análise geoestatística seja feita com comparação de modelos e refazendo modelos buscando um melhor ajuste geoestatístico. Esta necessidade de comparação de modelos diferentes gera resultados diferentes, a partir de dados iguais isto depende da interpretação do analista espacial para saber discernir quais os modelos que estão mais próximos dos fenômenos que estão sendo representados espacialmente.

Os modelos geoestatísticos se diferenciam pelo nível de autocorrelação que existe entre os dados amostrais. Quanto maior a autocorrelação entre as amostras coletadas o modelo geoestatístico apresentará de maneira mais confiável os dados estimados. Esta autocorrelação é calculada pelo autocorrelograma, pois é mais sensível que o semivariograma, pois este exige uma matriz maior de dados coletados (LANDIM,2002).

O ajuste dos variogramas experimentais aos modelos teóricos existentes é feito de modo interativo, testando parâmetros de variograma (modelo de variograma, efeito pepita, número de estruturas presentes) até que se considere o ajuste satisfatório, ou seja, até que se considere que o melhor ajuste possível dos pontos do variograma experimental tenha à curva representativa dos parâmetros alcançados tenha sido alcançada dos parâmetros informados. (LANDIM, 2002 Pg23)

Os modelos teóricos de ajuste de variograma se baseiam em funções matemáticas e teorias estatísticas. Os modelos que foram utilizados neste trabalho foram os que mais se adequaram aos dados coletados. Os modelos do semivariograma que está sendo apresentado neste trabalho é a variável de concentração de mercúrio total e o parâmetro de pH. Foi utilizada para este trabalho a função Gaussiana porque estes dados apresentaram no teste de *Shapiro-wilk* uma tendência à normalidade. Isto fez com que o modelo geoestatístico fosse realizado na função Gaussiana. O modelo Gaussiano baseado na teoria estatística Gaussiana que se caracteriza por apresentar um comportamento parabólico nas vizinhanças de origem e apresenta uma grande continuidade dos dados analisados (LANDIM 2002). Este é o modelo de ajuste que mais se aproxima da variável estudada por apresentar os fenômenos naturais com maior linearidade. O semivariograma gaussiano se caracteriza por apresentar uma tangente horizontal na origem. Este modelo apresenta a seguinte formula:

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-|h|^2/a^2}) \text{ para } 0 < |h| \leq a$$

Formula 06: Função Gaussiana. (Fonte: Andriotti, 2000)

onde C_0 é o efeito pepita, C é a variância, A é o alcance, h é o vetor de amostra (ANDRIOTTI, 2000).

O semivariograma para o modelo geoestatístico de matéria orgânica foi ajustado utilizando a função esférica. Usou-se a função esférica que se caracteriza pelo fato de que a tangente na origem da curva atinge o patamar a uma distância correspondente a 2/3 da amplitude (LIMA, 2006). A função esférica é determinada pela seguinte equação:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(\frac{3}{2} |h| \frac{1}{a} - \frac{1}{2} |h|^3 a^3 \right) \text{ para } 0 < |h| \leq a.$$

Formula 07: Função Esférica (Fonte: Andriotti,2000)

onde C_0 é o efeito pepita, C é a variância, A é o alcance h é o vetor de amostra (ANDRIOTTI, 2000).

As duas funções utilizadas neste trabalho gaussiana e esférica, se caracterizam por apresentar semivariogramas parabólicos. Esta característica parabólica caracteriza o fenômeno espacializado como uma variável regionalizada linear no espaço (EMERY, 2007).

III.15 Validação Cruzada

A validação cruzada serve para respaldar o modelo que está sendo estimado. A validação cruzada é utilizada para avaliar a capacidade de interpolação do fenômeno e usada em trabalhos onde o objetivo da modelagem é a predição. Isto faz com que seja possível calcular a precisão do modelo.

A validação cruzada é um método de seleção do modelo semivariográfico, pois permite selecionar o modelo matemático que melhor descreve a dependência espacial das observações das variáveis em função das distâncias. (LANDIM 2006, página 18)

No estudo de validação cruzada é necessária examinar a análise da estrutura do semivariograma e da dependência espacial apresentada nele. Este índice que faz esta análise é o erro padronizado. Este índice de erro padronizado é importante porque desconsidera os fatores geométricos da amostragem. Isto faz com que seja um índice que de variância unitária e não geométrica (LORENZO; IRIBAS, 2008).

O princípio da validação cruzada consiste em calcular a diferença entre o valor estimado e o valor coletado em uma localização. A partir disso, se consegue calcular a variância do erro de estimação que consiste no valor real menos o valor estimado. Como na equação:

$$Er = Vr - Ve$$

Formula 08: Princípio da validação cruzada (Fonte: LORENZO; IRIBAS, 2008)

onde Er é o erro reduzido, Vr é o valor real e Ve é o valor estimado. Quando este erro é dividido pela variância de erro obtêm-se o erro padronizado como na equação abaixo:

$$\text{Erro padronizado.} = \text{Erro reduzido} / \text{Variância do erro,}$$

Formula 09: Fórmula do erro padronizada (Fonte: LORENZO; IRIBAS, 2008)

onde Erro padronizado é a razão entre o Erro Reduzido e a Variância do erro.

Na análise quantitativa o modelo para ser considerado robusto deve apresentar o valor das

médias dos erros próxima a zero e a variância de erros próxima de um. Isto faz com que o índice de erro padronizado seja considerado bom.

III.16 Banco de Dados

A base de dados deste trabalho foi retirada do Banco de Dados do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental Wolfgang C. Pfeiffer da Universidade Federal de Rondônia (UNIR). Esses dados foram levantados em campo por Deborah Pereira Linhares que gerou sua dissertação de mestrado (2007) intitulada “O mercúrio em solos e sedimentos na sub-bacia Mutum-Paraná/Rondônia” no programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente da UNIR. Este trabalho consistiu num levantamento amplo dos parâmetros físico-químicos na água e da presença do elemento mercúrio em solos e sedimentos de fundo da bacia do Rio Mutum Paraná em Rondônia.

Todas as amostras coletadas apresentam dados georreferenciados. Tal fato foi imprescindível para as estimativas, pois se extrai em dados recentes os atributos para a estimativa e as suas localizações espaciais. Os dados foram tabulados no formato *.MDB que é o formato do banco de dados do Arcgis® e *.MDF que é formato do banco de dados do Spring®.

Para este trabalho, utilizaram-se como matriz as concentrações de mercúrio nos sedimentos de fundo para que fossem realizadas as estimativas. Isto ocorreu porque as coletas abrangiam toda a área de estudo e para poder manter somente uma matriz de dados a serem estimados. A partir dos dados de sedimento de fundo conseguiu gerar uma estimativa segura sobre as concentrações de mercúrio e de matéria orgânica em todo referido rio. Isto é observado na espacialização das coletas de sedimentos de fundo. Os pontos das amostras estão espacializadas no mapa (Figura 11)

amostras coletadas	coordenadas E	coordenadas N	pH	Concentração de mercúrio ($\mu\text{g/Kg}$)	Matéria Orgânica (mg/Kg)
1	288326.119	8929167.627	6.72	70.5	2.35
2	291429.852	8925368.599	6.23	72.25	2.29
3	292698.063	8916648.803	5.37	39.7	1.73
4	287332.153	8911117.706	5	131.9	2.55
5	287187.22	8936437.206	5.3	132.65	1.84
6	286553.537	8935788.917	5.91	101.34	1.58
7	289469.699	8937821.165	5.12	79.29	2.1
8	283883.854	8921791.614	6.33	110.32	1.63
9	283101.924	8923618.559	4.8	89.19	3.82
10	283258.742	8925113.85	6.39	107.19	3.1
11	283190.088	8927325.106	6.21	128.79	10.62
12	283188.301	8927632.395	5.88	89.41	2.28
13	282957.764	8929527.092	6.3	90.81	3.84
14	281066.539	8927580.053	5.47	61.5	1.5
15	281065.853	8927579.767	5.37	53.05	3.29
16	282868.522	8929667.931	5.42	94.72	2.28
17	283680.774	8931043.19	5.97	96.09	1.83
18	286166.843	8931395.812	6.03	90.31	1.12
19	286950.192	8931455.279	5.93	54.09	1.05
20	287713.111	8932959.192	5.96	102.22	1.55
21	288828.671	8935211.773	5.92	102.89	0.84
22	253076.925	8907175.119	4.76	109.15	1.28
23	255465.122	8906908.391	4.86	141.28	1.93
24	267295.049	8905620.997	5.25	77.76	1.64
25	277828.008	8900382.34	5	107.13	1.24
26	277774.147	8909232.61	6.29	50.71	1.88
27	283725.672	8896936.151	5.15	146.45	1.05
28	275623.224	8899711.143	5.01	79.87	2.04

Figura 10: Pontos de coletas e as planilhas de valores de pH, concentração de mercúrio ($\mu\text{g/kg}$) e Matéria Orgânica (mg/kg) no programa *Arcgis 9.3*®.

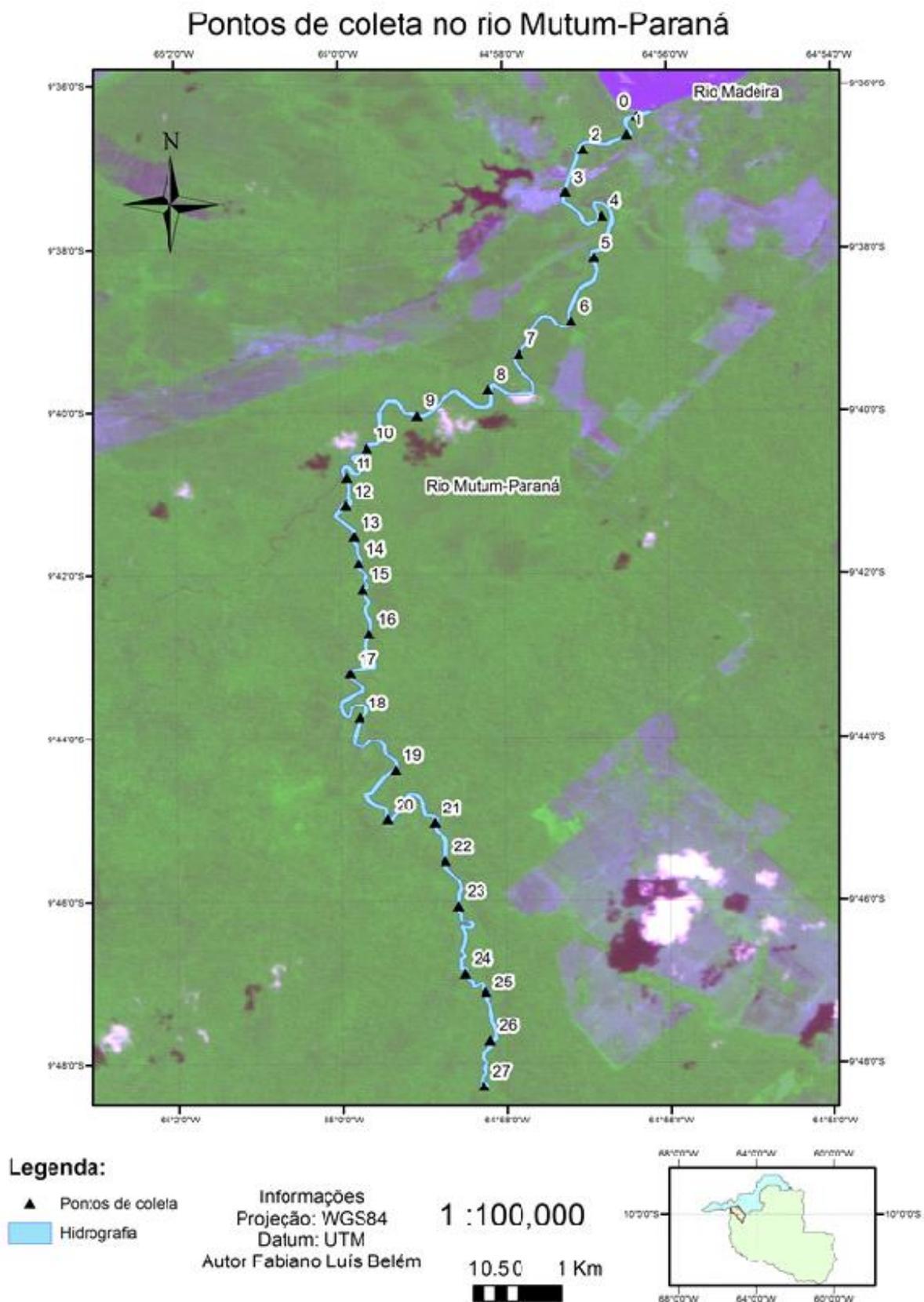


Figura 11: Pontos de coleta no rio Mutum-Paraná. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013; Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

III.17 Softwares geostatísticos utilizados.

Os programas utilizados neste trabalho são Sistema de Informação Geográfica (SIG) que apresentam algoritmo geostatístico de *Krigagem*. Além disso, são programas que já foram utilizados em outras teses de geostatística. Como por exemplo, Tao (1996) utilizou o *software Arcgis®* através do *Geoestatistical Analyst* para fazer a estimativas geostatística de elementos químicos de solo na área de *Shezen* na China.

O Spring é um programa desenvolvido pelo Departamento de Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em parceria com a EMBRAPA, IBM Brasil, TECGRAF e PETROBRÁS/CENPES, com o objetivo de auxiliar em tarefas que utilizem processamento de dados geográficos. O programa é gratuito (*freeware*) e foi desenvolvido em linguagem C++. Possui uma ampla gama de funções em geostatística como análise exploratória, análise de semivariograma, ajuste de semivariograma, validação do modelo de ajuste, *krigagem* e a *krigagem* por indicação. Como por exemplo, Camargo (2007) utilizou o Spring® para poder gerar mapas de riscos de saúde e violência através da geostatística utilizando a *co-krigagem*.

Outro programa de geostatística utilizado neste trabalho é o *Arcgis®* desenvolvido pela ESRI®. Este programa apresenta um pacote com funcionalidades geostatísticas como geração de semivariograma, análise exploratória, ajuste de semivariograma. Além disso, é possível programar alguma funcionalidade geostatística utilizando a linguagem de programação *pHyton*. Este programa foi utilizado por Almeida (2007), Herrman (2008) Barbosa (2012) que realizaram a modelagem de elementos traço no lago do Puruzinho (AM), na sub-bacia do rio Corumbiara (RO) e nos solos de áreas ripárias do rio Madeira.

IV. RESULTADOS

IV.1 Análise Exploratória

A análise exploratória consiste na organização dos dados coletados por meio de classificação, contagem ou mensuração. A análise exploratória é realizada sobre os dados com o fim de descrever dados estatísticos das coletas amostradas. Estes dados como média, mediana, desvio padrão, quartis, coeficientes de assimetria e curtose que são parâmetros estatísticos considerados para aplicação do semivariograma. Essa etapa é imprescindível nos estudos geoestatísticos, pois a partir dessa análise, pode se determinar o padrão do comportamento geral e a variância contida nos dados. O estudo destes dados estatísticos apresenta-se como ferramentas adicionais na compreensão da variabilidade dos dados.

A análise exploratória tem como objetivo identificar as propriedades com os fins de detectar padrões e a partir disso formularem hipóteses sobre os dados coletados. Segundo Andriotti (2000), as medias de dispersão da análise exploratória determinam o entendimento sobre a distribuição dos dados no conjunto amostral, respaldando as hipóteses sobre os dados.

IV.1.1 Análise do parâmetro físico-químico de pH

Na tabela 01 apresenta-se a estatística descritiva do parâmetro pH , valor logaritmizado. Nesta análise descritiva detectou-se que os dados não apresentam uma distribuição gaussiana, mas o histograma não é simétrico, pois os valores de média e mediana são diferentes. Mas, os valores de média e mediana dos dados são muito próximas mostrando que estes dados tendem a uma normalidade.

Tabela 01: Análise descritiva de pH

Parâmetro	pH
Número de pontos	28
Número de pontos válidos	28
Média	5,64
Variância	0,31
Desvio Padrão	0,56
Coefficiente de variação	0,10
Coefficiente de assimetria	0,04
Coefficiente de curtose	1,74
Valor mínimo	4,76
Quartil inferior	5,14
Mediana	5,68
Quartil superior	6,12
Valor máximo	6,72

IV.1.2 Análise do parâmetro de Matéria Orgânica

Na tabela 02 destaca-se a análise exploratória do parâmetro matéria orgânica. Nesta tabela tem-se o coeficiente de curtose que apresentando um valor elevado apresenta o achatamento do histograma.

Tabela 02: Análise descritiva do parâmetro de Matéria Orgânica em sedimento

Parâmetro	Matéria Orgânica em Sedimento (mg/kg)
Número de pontos	28
Número de pontos válidos	28
Média	2,29 mg/kg
Variância	3,14
Desvio Padrão	1,77
Coeficiente de variação	0,77 mg/kg
Coeficiente de assimetria	3,65
Coeficiente de curtose	17,39
Valor mínimo	0,83 mg/kg
Quartil inferior	1,52
Mediana	1,86 mg/kg
Quartil superior	2,31
Valor máximo	10,61 mg/kg

IV.1.3 Análise dos parâmetros de concentração de mercúrio total

Na análise descritiva de concentração de mercúrio destaca-se o grande valor dos dados de dispersão tais como variância e desvio padrão (Tabela 03).

Tabela 03: Análise descritiva do parâmetro de concentração de mercúrio total em sedimento

Parâmetro	Mercúrio total em sedimento (µg/kg)
Número de pontos	28
Número de pontos válidos	28
Média	90,04 µg/kg
Variância	1052,58
Desvio Padrão	32,44
Coeficiente de variação	0,36 µg/kg
Coeficiente de assimetria	-0,53
Coeficiente de curtose	3,39
Valor mínimo	3,85 µg/kg
Quartil inferior	71,38
Mediana	92,76 µg/kg
Quartil superior	108,17
Valor máximo	146,45 µg/kg

IV.2 Distribuição normal dos dados

A distribuição normal ou distribuição Gaussiana dos dados é usada para descrever o comportamento de uma variável aleatória que apresenta uma forma simétrica (isto é coeficiente de assimetria igual à zero) no histograma e em torno de um valor central além de apresentar uma distribuição *mesocúrtica* (coeficiente curtose igual a três). A distribuição Normal é base para o cálculo de intervalos de confiança, e da realização de testes estatísticos nas análises de correlação e regressão. O teste de normalidade é realizado sobre o conjunto dos dados. Esta metodologia tem como objetivo verificar se os dados apresentam uma distribuição gaussiana. Além disso, no estudo geoestatístico diferentes técnicas de *krigagem* partem do pressuposto de que os dados apresentam uma distribuição gaussiana ou não gaussiana. O procedimento para se fazer a verificação dos dados é feita através do teste de *Shapiro-Wilk*. O teste de *Shapiro-Wilk* calcula uma estatística W que testa uma amostra. Este tipo de teste é indicado para dados até 28 pontos de coleta. (Cecon et.al,2012). A tabela 04 de Shapiro-Wilk foi feita utilizando o software *Bioestat 5.0*®.

Tabela 04: Tabela do Teste de Shapiro-Wilk

Fator	Índice de significância (p)	Coefficiente W	Teste de Normalidade
pH	0,0984	0.9356	Apresenta normalidade
Mercurio Total	0.7077	0.9697	Apresenta normalidade
Matéria Orgânica	0.0065	0.6713	Não apresenta normalidade

No teste de *Shapiro-wilk* detectou-se que os estudos do pH e de mercúrio não apresenta uma tendência de normalidade dos dados. Já a matéria orgânica apresenta uma tendência à normalidade de dados. A partir disso, foi feito o estudo variográfico para a estimativa de modelos geoestatísticos.

IV.3 Análise Estrutural

A tendência dos dados é rastreada pela superfície matemática que é gerada a partir dos dados coletados. Estas estimativas matemáticas estão ligadas a dois tipos de interferência que é uma interferência regional de tendência regional do fenômeno que está sendo estudado e o outro condicionante é a interferência local que consiste nos desvios de pequenas áreas que são os desvios locais. No estudo geoestatístico se deseja analisar o padrão de comportamento espacial de uma determinada variável que ocorre continuamente sobre o espaço. Nesta análise é possível detectar se existe uma tendência espacial sobre um conjunto de dados da amostra. Nas superfícies em que as tendências são removidas faz com que o conjunto de dados possa ser melhor entendido e as estimativas mais confiáveis. No entanto, a superfície de tendência revela em qual direção tende o fenômeno que esta sendo representado espacialmente. Segundo Landim (2001), a superfície de tendência apresenta algumas vantagens como as tendências regionais e as anomalias locais e interpola

valores acima e abaixo dos valores amostrados, mas apresenta alguns problemas como estima valores para além das áreas amostradas isto, faz com que se devem fazer as considerações somente nas áreas de coleta.

As superfícies de tendência se dividem duas componentes que são as flutuações locais que são representadas pelos valores residuais dos dados coletados em campo e de natureza regional representada pela superfície do fenômeno que está sendo estudado (LANDIM, 2010). As superfícies de tendência servem para identificar algumas situações do fenômeno estudado que não estão claras por causa das flutuações locais ou valores anômalos presentes nos dados (LANDIM, 2010). Além disso, as superfícies de tendência podem ser usadas para mostrar as anomalias que estão presentes nos dados, pois elas mascaram as tendências regionais do fenômeno estudado (LANDIM,2010). A aplicação da superfície de tendência é usada geralmente para situações em que se procura estudar o comportamento de uma variável espacial, ou um fenômeno sobre uma determinada região. Para a geração das superfícies de tendências utilizou-se o software *surfer 9.0*®.

A primeira superfície de tendência que se calculou é a de pH na água onde se analisou os resíduos presentes nos dados não apresentou uma como pode ser visto na superfície de tendência de resíduos conforme é apresentado na Figura 12. Também se analisou a tendência regional do fenômeno estudado através de uma superfície de tendência dos dados coletados. A partir disso, detectou na superfície de tendência que os dados analisados geram um fenômeno anisotrópico que tende a sudoeste como pode ser analisado na figura 16 que mostra a superfície de tendência regional dos dados de pH. Isto mostra que nas região mais a noroeste tendem a ter um pH mais ácido.

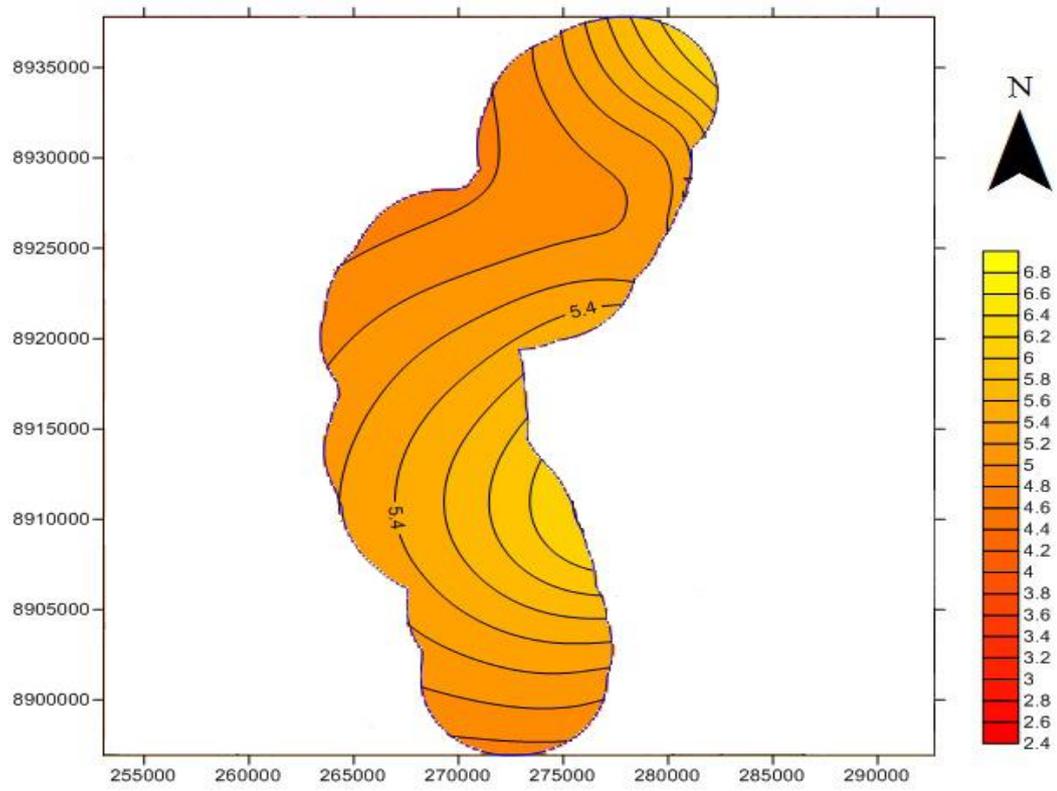


Figura 12: Superfície de resíduo de pH usou-se o algoritmo de mínima curvatura. (Fonte: Linhares (2007)).

Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

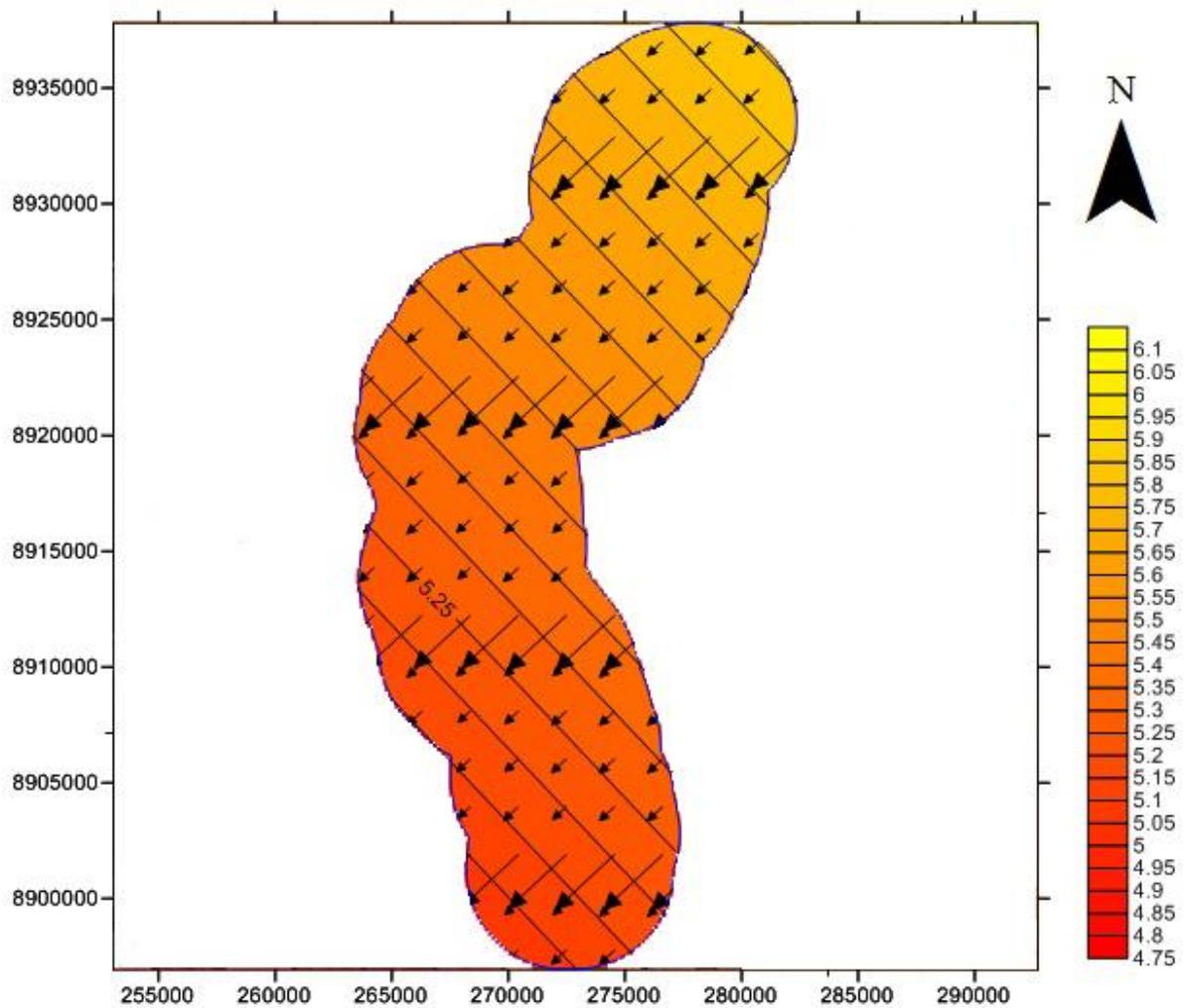


Figura 13: Superfície de tendência regional de pH usou o algoritmo polinomial de primeiro grau. (Fonte Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Outras superfícies de tendência que foram geradas é a da variável de matéria orgânica com o objetivo de se detectar alguma anomalia neste fenômeno e para em que direção esta variável apresenta tendências. A partir da superfície de tendência dos resíduos não se detectou que havia anomalia local neste fenômeno como pode ser visto na superfície de tendência que é apresentada na Figura 14. A superfície de tendência regional de matéria orgânica que esta representada na Figura 13 detectou um fenômeno anisotrópico que apresentava um fenômeno tendência na direção sudeste.

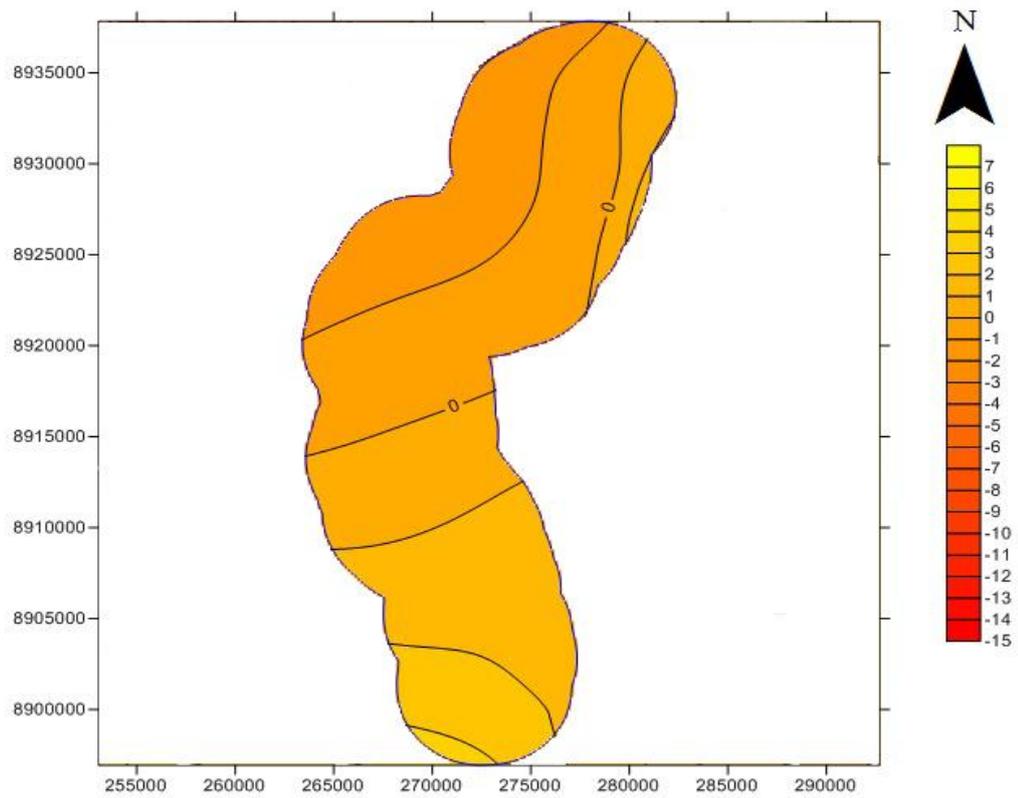


Figura 14: Superfície de tendência dos resíduos de Matéria Orgânica usou o algoritmo de mínima curvatura (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

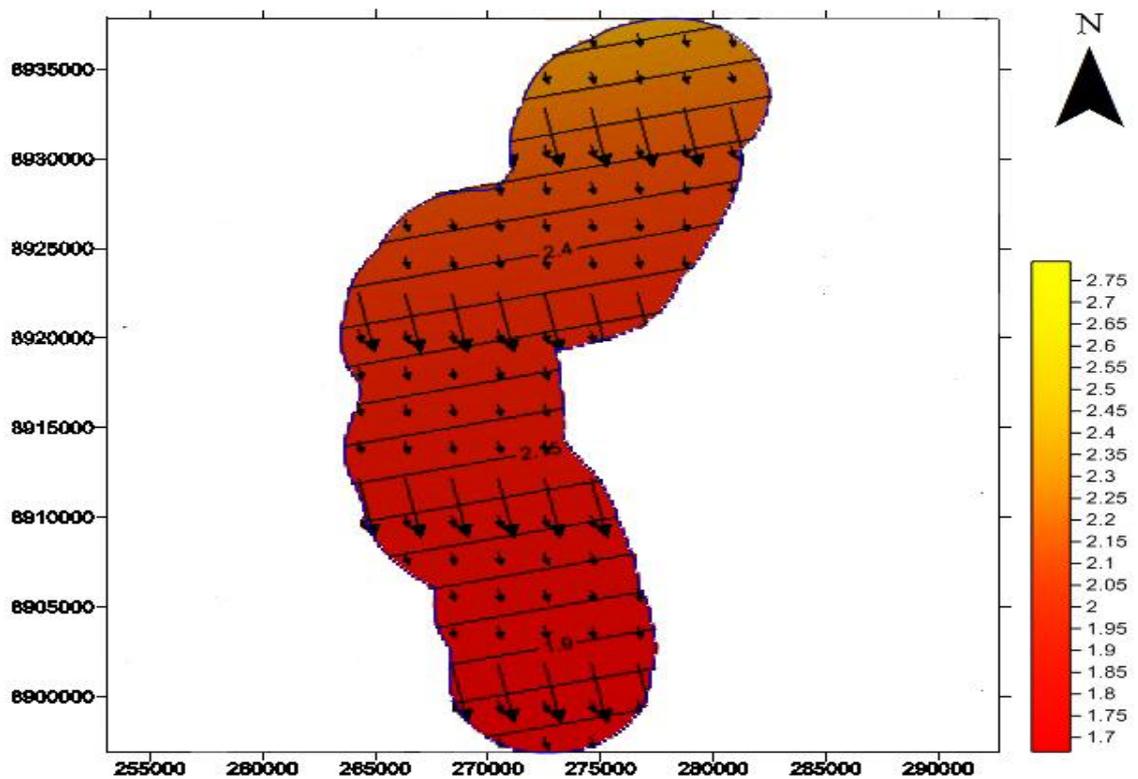


Figura 15: Superfície de tendência regional de Matéria Orgânica usou-se o algoritmo polinomial de primeiro grau . (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Por fim as últimas superfícies de tendência que foram geradas são a de concentração de mercúrio total. Nesta superfície de tendência utilizou o algoritmo de mínima curvatura para poder gerar a superfície de tendência de resíduos que esta representada na Figura 16. Na superfície de tendência regional utilizou o polinômio de primeiro grau na direção es-nordeste como pode ser analisado na Figura 17. Na superfície de tendência de resíduos não se detectou nenhuma anomalia.

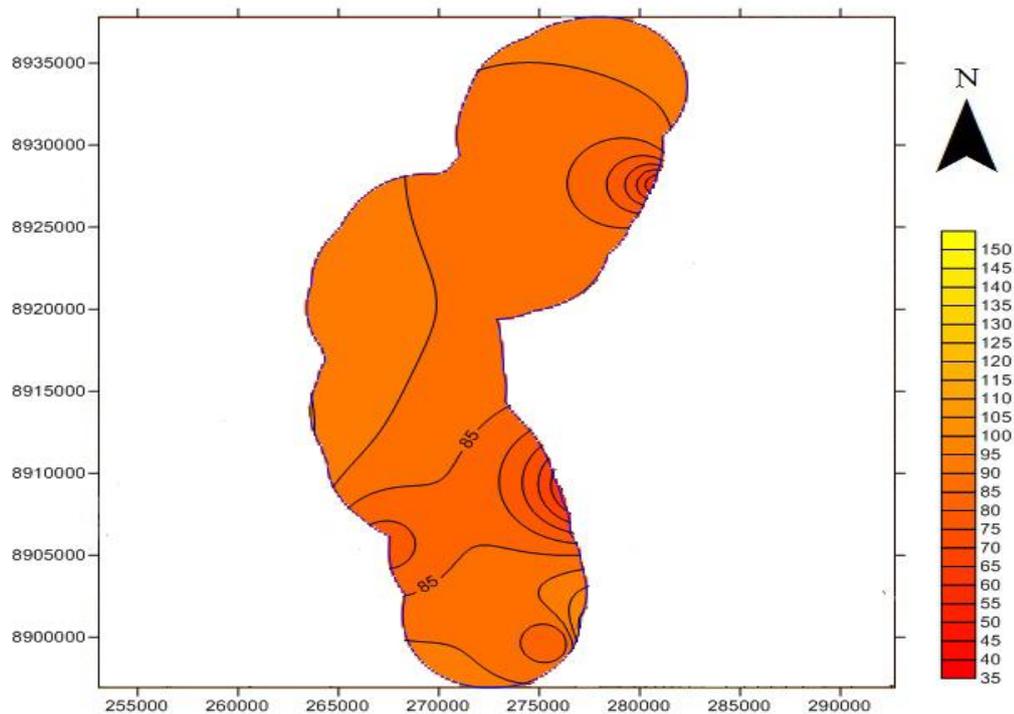


Figura 16: Superfície de tendência de resíduos de concentração de mercúrio total usou-se o algoritmo de mínima curvatura. (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

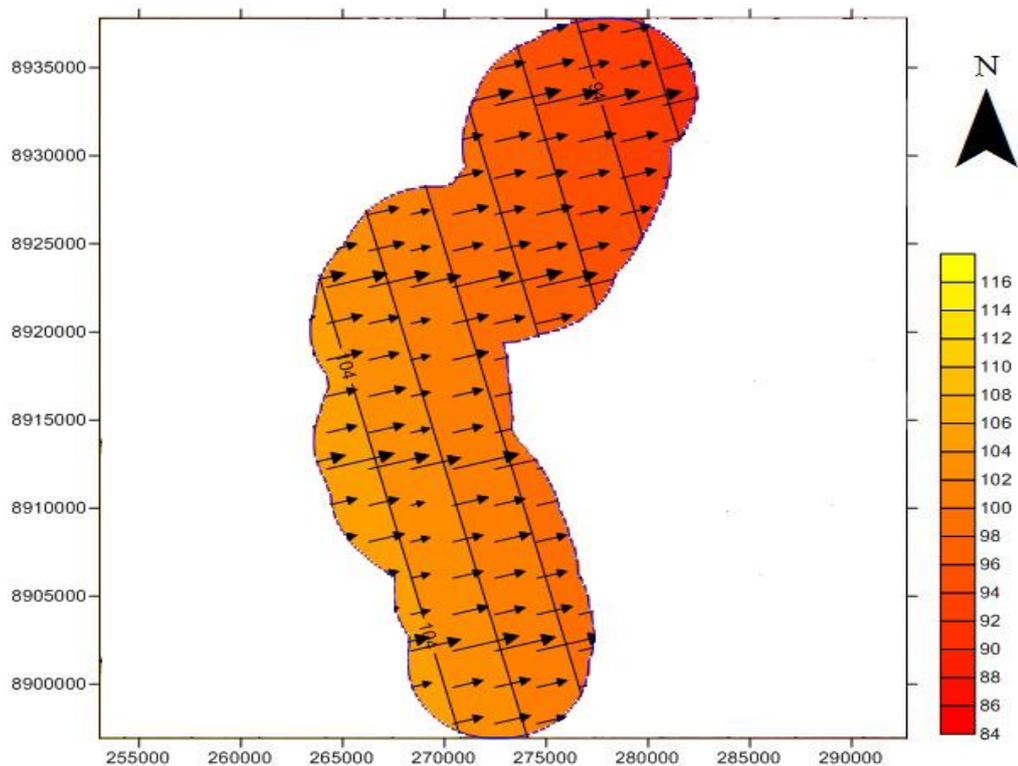


Figura 17: Superfície de tendência regional de concentração de mercúrio total usou-se o algoritmo polinômio de primeiro grau. (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Na análise das três superfícies de tendência detectou-se que os fenômenos estudados apresentam uma tendência espacial. Isto mostra que os fenômenos que estão sendo analisados neste trabalho são fenômenos anisotrópicos. Nos estudos geoestatísticos sobre o mercúrio na Bacia do rio Madeira como Gomes (2005), Almeida (2006), Hermann (2009), Barbosa (2012) o mercúrio apresentava fenômeno anisotrópico que consiste numa variável que apresenta um comportamento espacial em diferentes direções considera este fator uma estrutura anisotrópica. Os fenômenos anisotrópicos considera que a variabilidade ou continuidade depende das direções do espaço (SOARES,2006). Os modelos de estrutura anisotrópica têm como objetivo serem modelados somente em um semivariograma que represente estas diferentes direções (SOARES, 2006). Para que isto ocorra é necessário que haja uma transformação geométrica dos sistemas de coordenadas para que os diversos semivariogramas de diferentes direções sejam igual a um modelo de semivariograma transformando em estrutura isotrópica

IV.4 Análise de regressão e correlação dos dados.

Na análise estrutural dos dados buscam-se as relações existentes entre os dados com objetivo de se determinar qual o melhor método de krigagem que pode ser utilizado na interpolação dos dados espaciais. A partir disso, se fez com o modelo de regressão linear dos dados com o objetivo de buscar as relações entre os fenômenos estudados. A partir disso, utilizou-se o mercúrio como variável

dependente e matéria orgânica e pH como variáveis independentes. Os modelos de regressão deste trabalho foram gerados pelo software *Bioestat 5.0@*.

O primeiro modelo de regressão que foi utilizado foi o de concentração de teor de mercúrio total como variável dependente e pH como variável independente (figura 18). A hipótese para a geração deste modelo regressivo é que existe uma maior concentração de mercúrio total no ambiente ácido dos rios (MALM 1991; GUIMARÃES,2009; MIRANDA 2010).

Regressão Linear			
Fontes de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio
Regressão	1	0.4507	0.4507
Erro	26	8.2475	0.3172
Total	27	8.6983	
F (regressão)	1.4209	p=0.2426	
Variável dependente	Concentração mercúrio total		
Variável Independente	pH		
Média(X)	5.6411		
Média(Y)	93.2343		
Coefficiente de determinação (r)	0.0518		
(R ²) ajustado	0.0154		
Coefficiente de Correlação	0.2276		
Intercepto (a)	156.4497	t=2.9358	p=0.0068
Coefficiente de regressão	-11.2063	t= -1.1920	p=0.2440
IC 95% (a)	46.885 a 266.014		
IC 95% (b)	-30.535 a 8.122		
Equação	Y' = a + bx		

Figura 18 : Regressão Linear: A coluna 1 (variável dependente) é a concentração total de mercúrio e a outra coluna 2 (variável independente) é pH. (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

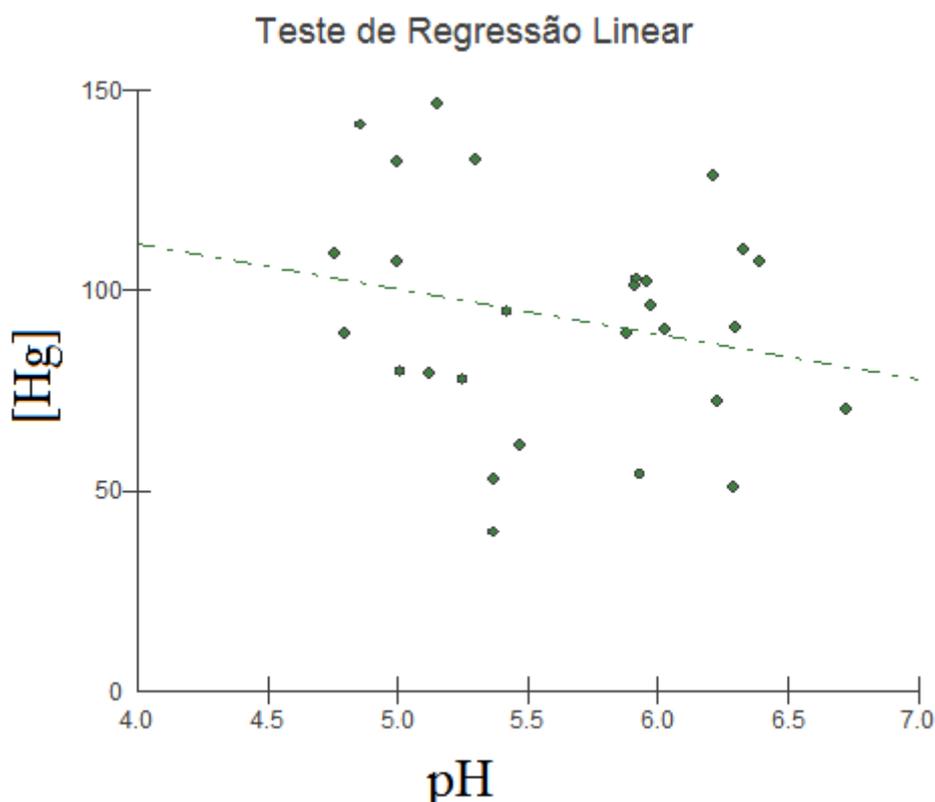


Figura 19: Gráfico de Regressão Linear: eixo Y (variável dependente) concentração do mercúrio total e a variável X (variável independente) pH. O coeficiente de determinação é 0,0518 e a equação $Y = 156,4497 + (-11,2063 \times X)$. Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

O que pode ser analisado nas figuras 21 e 22 é que os dados apresenta uma grande dispersão mostrando também que o coeficiente de regressão não apresenta um valor significativo. Na análise do modelo de regressão ocorre um coeficiente de regressão negativa, no entanto o coeficiente de determinação é pouco significativo, pois apresenta um valor de 0,05 o que não comprova a hipótese de que haja uma alta disponibilidade de concentração de mercúrio total em pH ligeiramente ácidos, como pode ser verificado na literatura (MALM,1991; BASTOS et al, 2006; GUIMARÃES, 2009; MIRANDA, 2010).

A partir disso, se analisou a regressão entre as variáveis de concentração de mercúrio total e a matéria orgânica. No modelo de regressão a concentração total de mercúrio é a variável dependente enquanto que a matéria orgânica é a variável independente que pode ser analisado pelas figuras 20 e 21. A hipótese para o modelo de regressão era que quanto maior a quantidade de matéria orgânica maior é a concentração de mercúrio nos recursos hídricos como se apresenta na literatura (BISNOTI; JARDIM, 2005). No entanto, a hipótese não se verifica porque o coeficiente de determinação apresenta um valor pouco significativo com o valor de 0,0299. Além disso, o gráfico de regressão mostra uma dispersão muito grande dos dados mostrando que o coeficiente de determinação não é significativo.

Regressão Linear			
Fontes de variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio
Regressão	1	630.9163	630.9163
Erro	26	20448.807	786.4926
Total	27	21079.7233	
F (regressão)	0.8022	p=0.6178	
Variável dependente	Concentração mercúrio total		
Variável Independente	Concentração matéria orgânica		
Média(X)	2.2946		
Média(Y)	93.2343		
Coefficiente de determinação (r ²)	0.0299		
(R ²) ajustado	-0.0074		
Coefficiente de Correlação	0.173		
Intercepto (a)	87.0967	t=10.0538	p<0.0001
Coefficiente de regressão	2.6748	t= 0.8957	p=0.3786
IC 95% (a)	69.285 a 104.908		
IC 95% (b)	3.465 a 8.815		
Equação	Y' = a + bx		

Figura 20: Regressão Linear coluna 1 (variável dependente) é a concentração de mercúrio total e a outra coluna 3 (variável independente) é matéria orgânica. (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

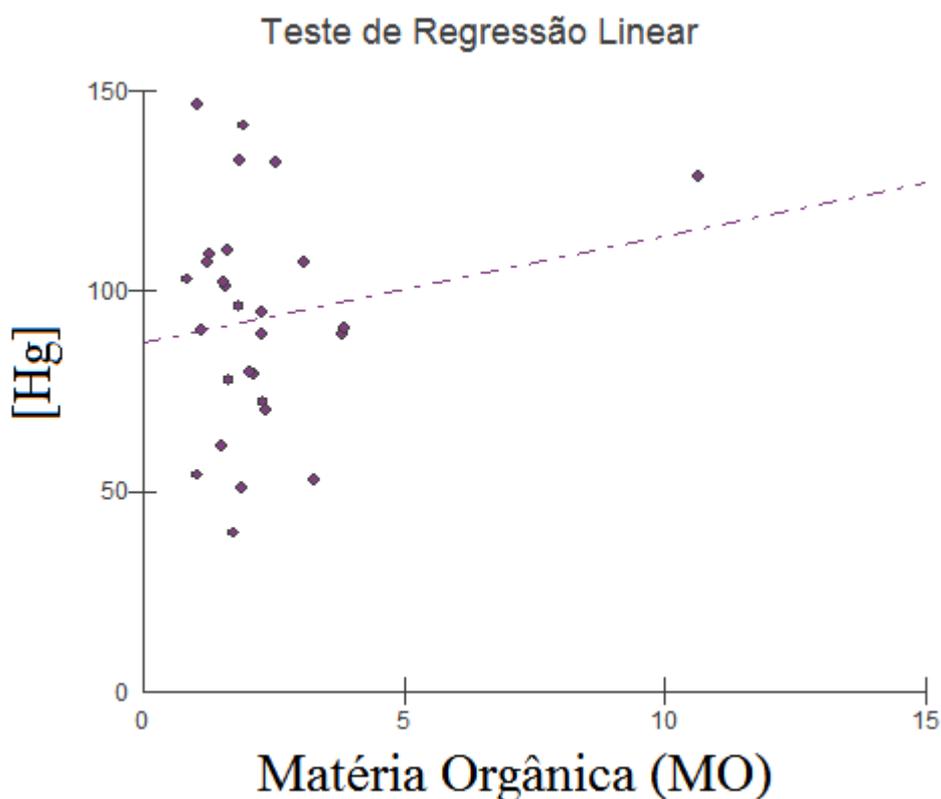


Figura 21: Gráfico de Regressão Linear: eixo Y (variável dependente) concentração do mercúrio total e a variável X (variável independente) que é o de matéria orgânica. O coeficiente de determinação é 0,0299 e a equação $Y = 91,8343 + (1,4682 \times X)$. (Fonte: Linhares (2007)). Organizado por Fabiano Luís Belém (2013).

IV.5 Modelo Geoestatísticos

IV.5.1 Variável: Matéria Orgânica.

O algoritmo utilizado para este modelo geoestatístico foi o de *Krigagem* Indicativa. Utilizou-se este algoritmo de Krigagem porque os dados coletados não apresentaram uma distribuição normal. O semivariograma de matéria orgânica foi modelado pela função esférica. O valor utilizado de corte é de 1.86 mg/kg que é a mediana que faz com que o modelo seja consistente e robusto (SOARES, 2006). Para ajustar este modelo se utilizou a função esférica que se caracteriza por apresenta como característica maior alcance e menor plataforma isto faz com tenha um grande alcance.

O semivariograma ajustado tem um alcance de 7800 metros e o efeito pepita de 1,59 como esta representada na figura 22. Os mapas de probabilidade de matéria orgânica estão nas figuras 23 e 24.

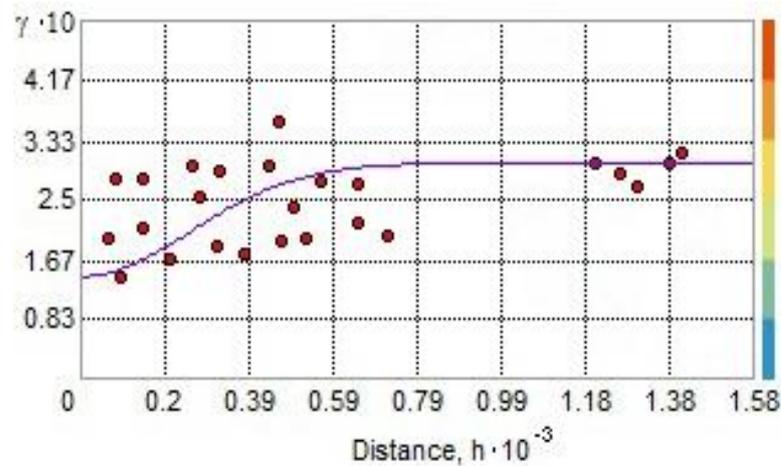


Figura 22: Semivariograma utilizando função esférica de matéria orgânica. O nível corte é de 1.86 mg/kg.

Realizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Os modelos para melhor visualização foram divididos em Baixo Mutum-Paraná e Alto Mutum-Paraná. Esta divisão foi realizado a partir da cota altimétrica do rio Mutum-Paraná a cota utilizada foi a de cem metros para a realização da divisão dos rios. Como pode ser visto nas figuras 23 e 24.

Mapa de probabilidade de Matéria Orgânica do Baixo rio Mutum-Paraná

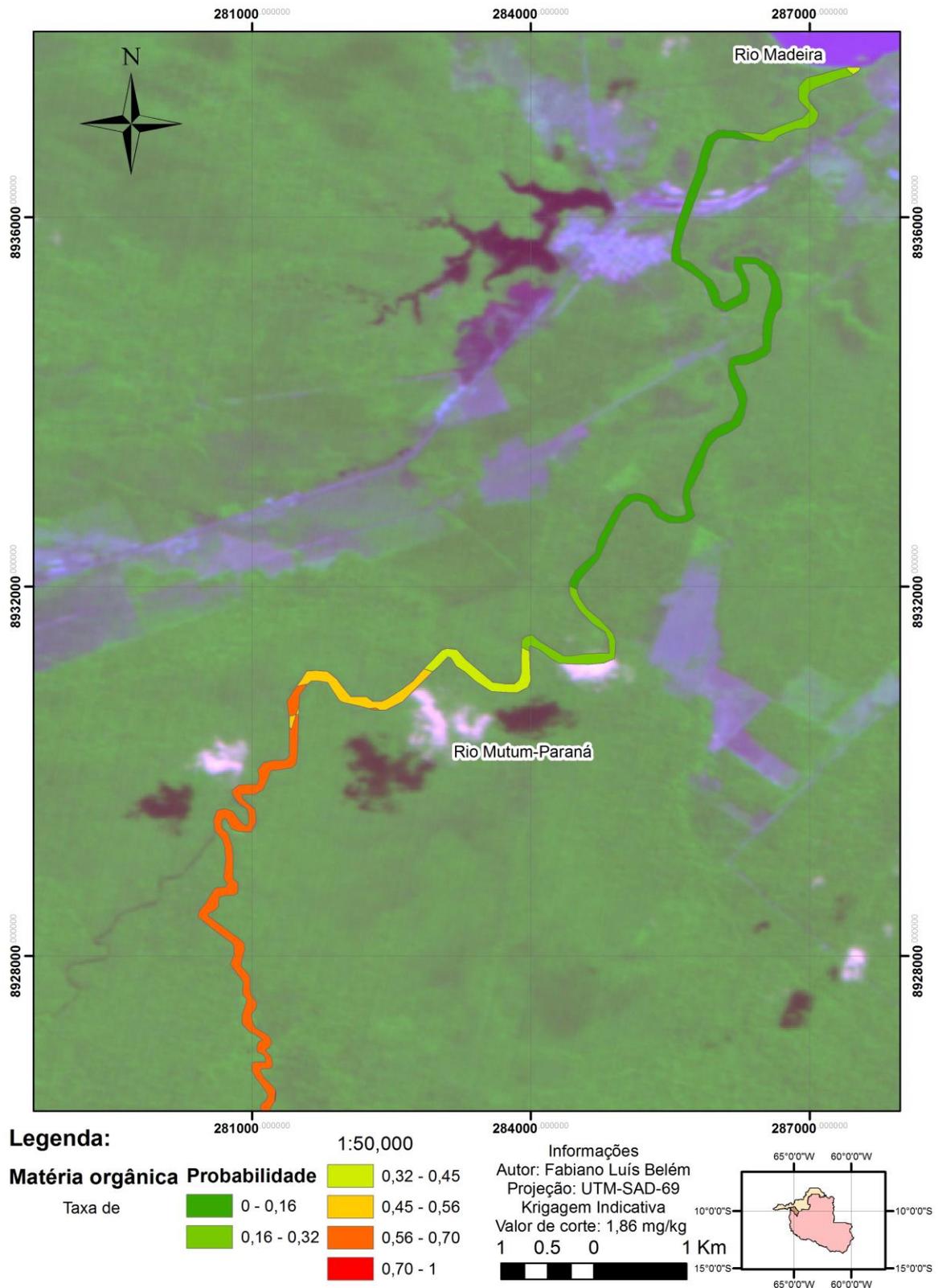


Figura 23: Mapa de predição a partir do algoritmo de Krigagem Indicativa de matéria orgânica no baixo rio Mutum-Paraná. Valor de corte de 1,86 mg/kg. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor..

Mapa de probabilidade de Matéria Orgânica do Alto rio Mutum-Paraná

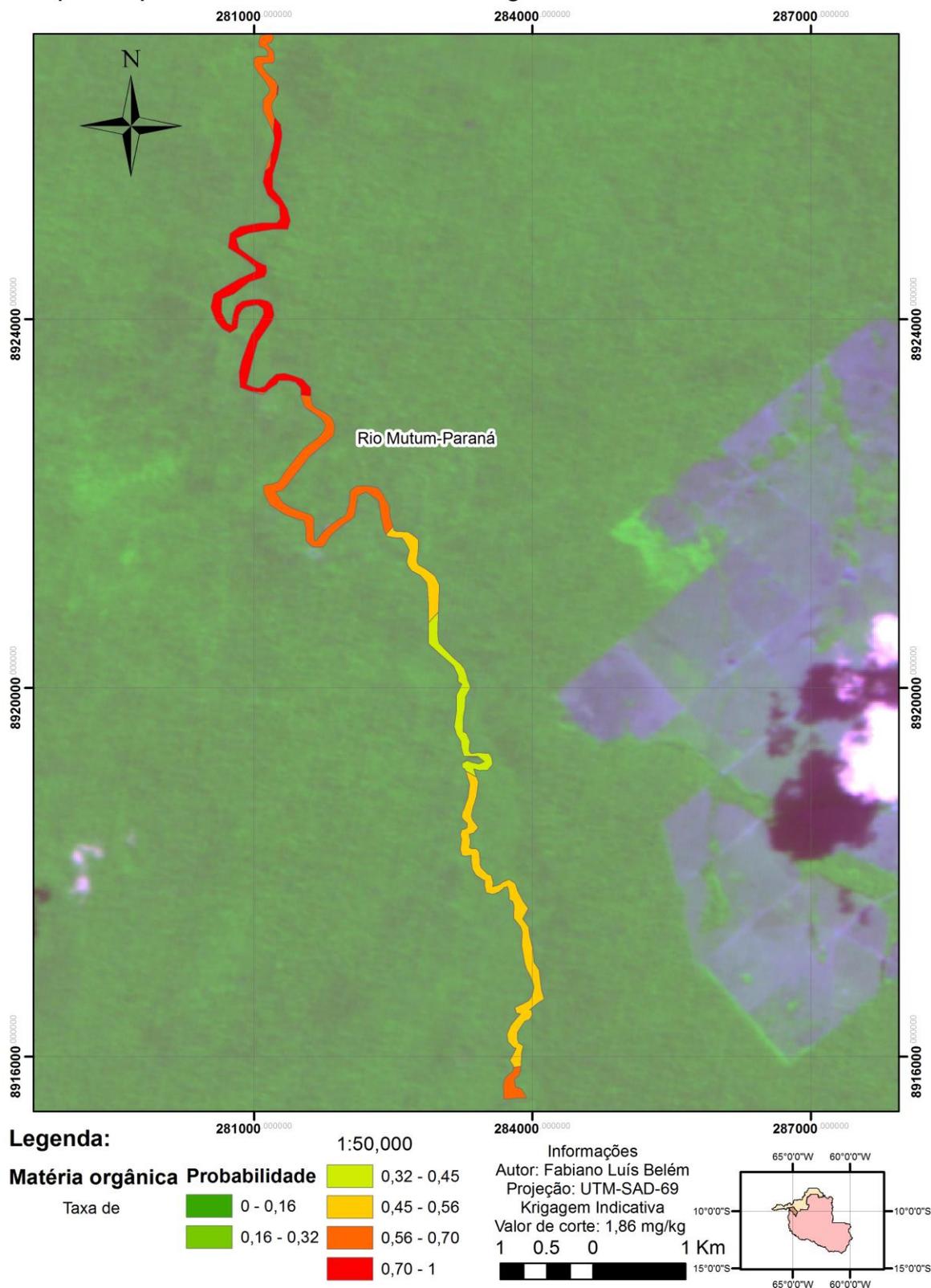


Figura 24: Mapa de predição a partir do algoritmo de Krigagem Ordinária de matéria orgânica no baixo rio Mutum-Paraná. Valor de corte de 1,86 mg/kg. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor.

O rio Mutum-Paraná caracteriza-se por apresentar uma maior probabilidade de se encontrar uma maior quantidade de matéria orgânica na região do alto rio Mutum-Paraná. Já nas regiões no baixo rio Mutum-Paraná a probabilidade de se encontra matéria orgânica é menor. A partir disso, existe uma diminuição da matéria orgânica da nascente para a foz do rio Mutum-Paraná.

IV.5.2 Variável de pH nas águas

Utilizou-se o algoritmo de Krigagem Ordinária porque na análise de normalidade estes dados foram considerados como tendo distribuição normal. A função Gaussiana foi utilizada para realizar o ajuste do semivariograma. A função gaussiana se ajustou as amostras coletadas porque no alcance apresenta uma grande parte das amostras que estão no semivariograma. Este tipo de função matemática se caracteriza por apresentar uma larga amplitude variográfica (LIMA,2006)

O semivariograma ajustado tem um alcance de 3580 metros e o efeito pepita de 1,30 como esta representado na figura 25. Os mapas de probabilidade de pH seguem nas figuras 26 e 27.

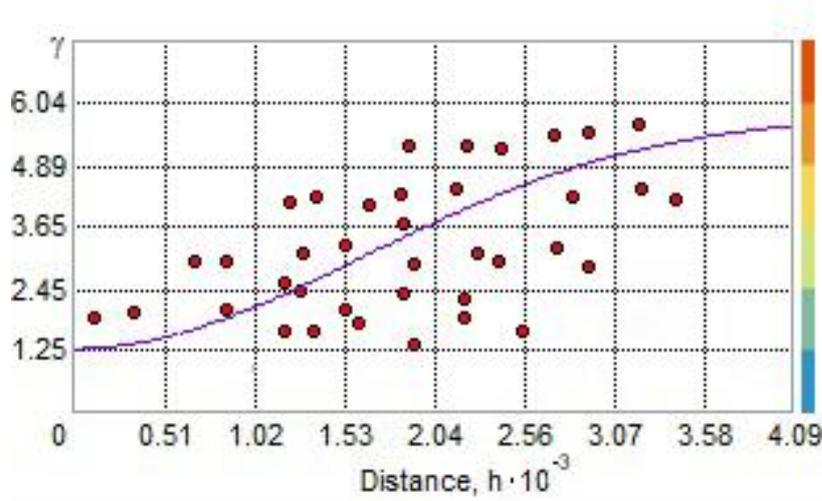


Figura 25: Gráfico de semivariograma gaussiano de pH nas águas do rio Mutum-Paraná. Realizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Mapa de estimativa de pH nas águas do Baixo rio Mutum-Paraná

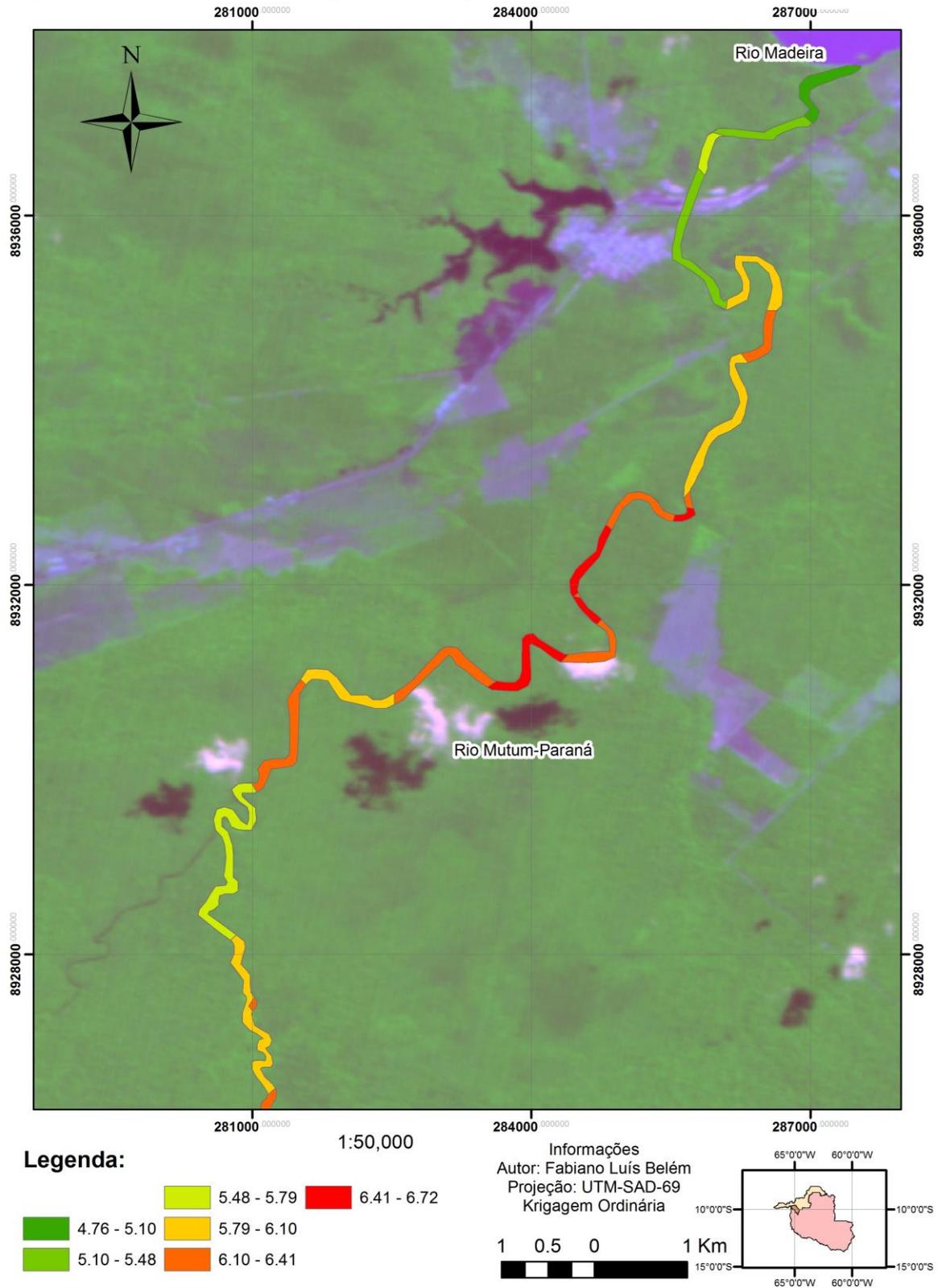


Figura 26: Mapa de probabilidade de distribuição de pH nas águas do baixo rio Mutum-Paraná utilizando-se o algoritmo de Krigagem Ordinária. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor.

Mapa de estimativa de pH nas águas do Alto rio Mutum-Paraná

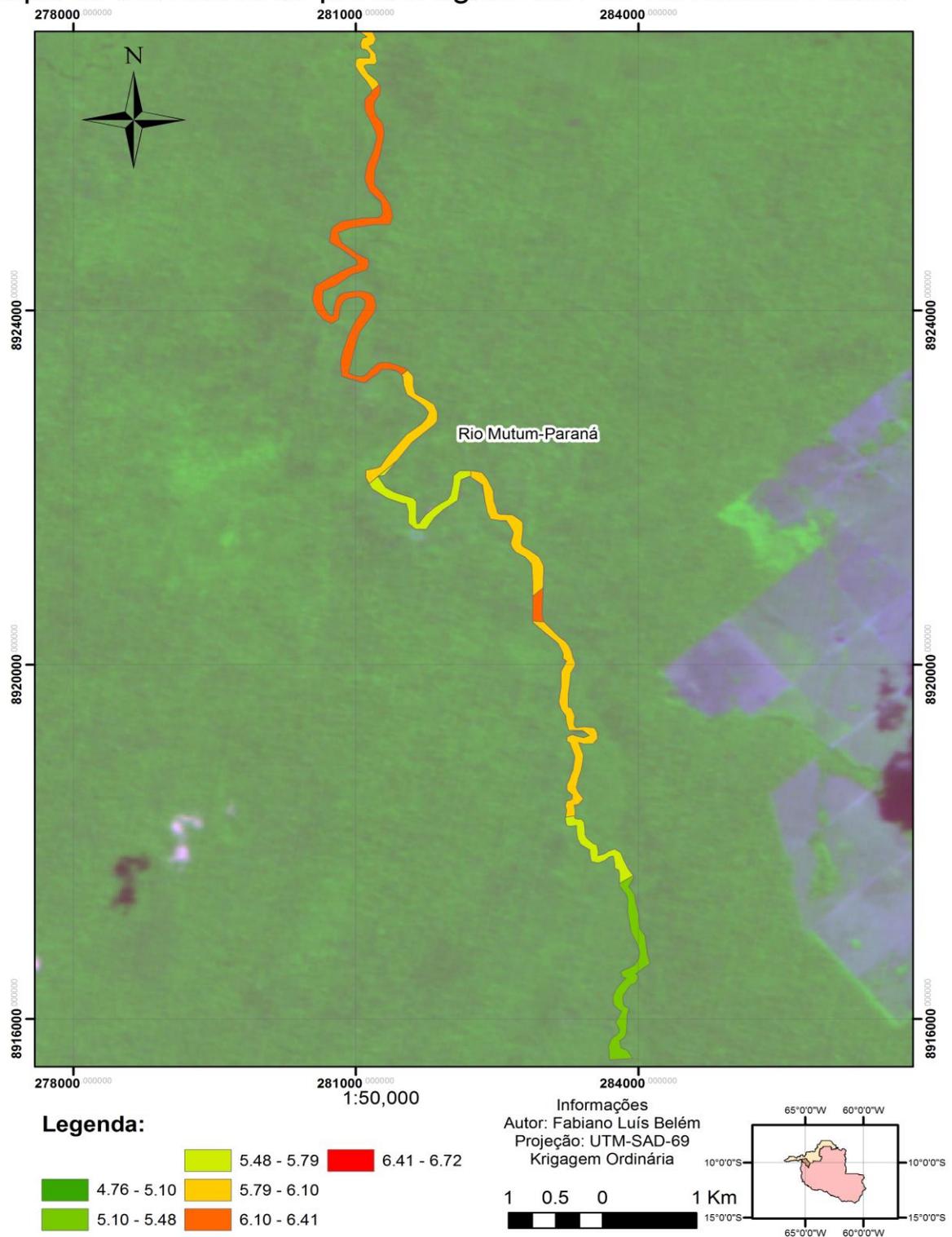


Figura 27: Mapa de probabilidade de distribuição de pH nas águas do alto rio Mutum-Paraná utilizando-se o algoritmo de Krigagem Ordinária. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor.

O rio Mutum-Paraná apresenta uma variação levemente ácida ao longo do leito do rio Mutum-Paraná. As áreas de valores baixos de pH estão no trecho do Alto rio Mutum-Paraná e mais próximo da confluência do rio Madeira. Isto mostra que os valores mais ácidos estão mais próximos a foz do rio Mutum-Paraná.

IV.5.3 Variável de concentração de mercúrio

Utilizou-se para esta estimativa o algoritmo de *Krigagem Ordinária* porque estes dados apresentavam distribuição normal no teste de *Shapiro-Wilk*. O semivariograma da concentração de mercúrio foi ajustado utilizando-se a função gaussiana, este semivariograma apresenta um alcance de 5410 metros e efeito de pepita de 1,25 que pode ser analisado na figura 28. As figuras 29 e 30 apresentam a distribuição das concentrações de mercúrio nos sedimentos de fundo do Baixo e Alto rio Mutum-Paraná, respectivamente.

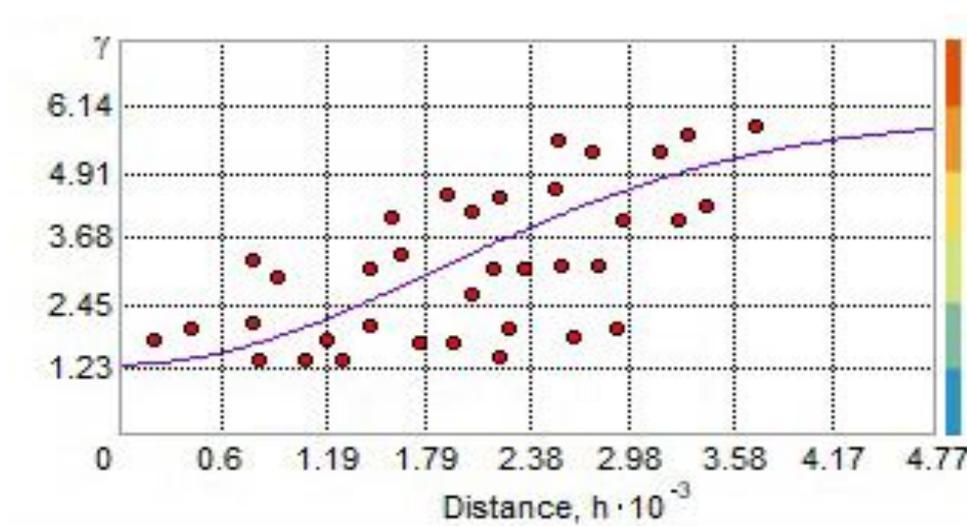


Figura 28: Gráfico de semivariograma gaussiano de concentração de mercúrio nos sedimentos de fundo do Rio Mutum-Paraná. Realizado por Fabiano Luís Belém (2013).

Concentração de Mercúrio Total do Baixo rio Mutum-Paraná

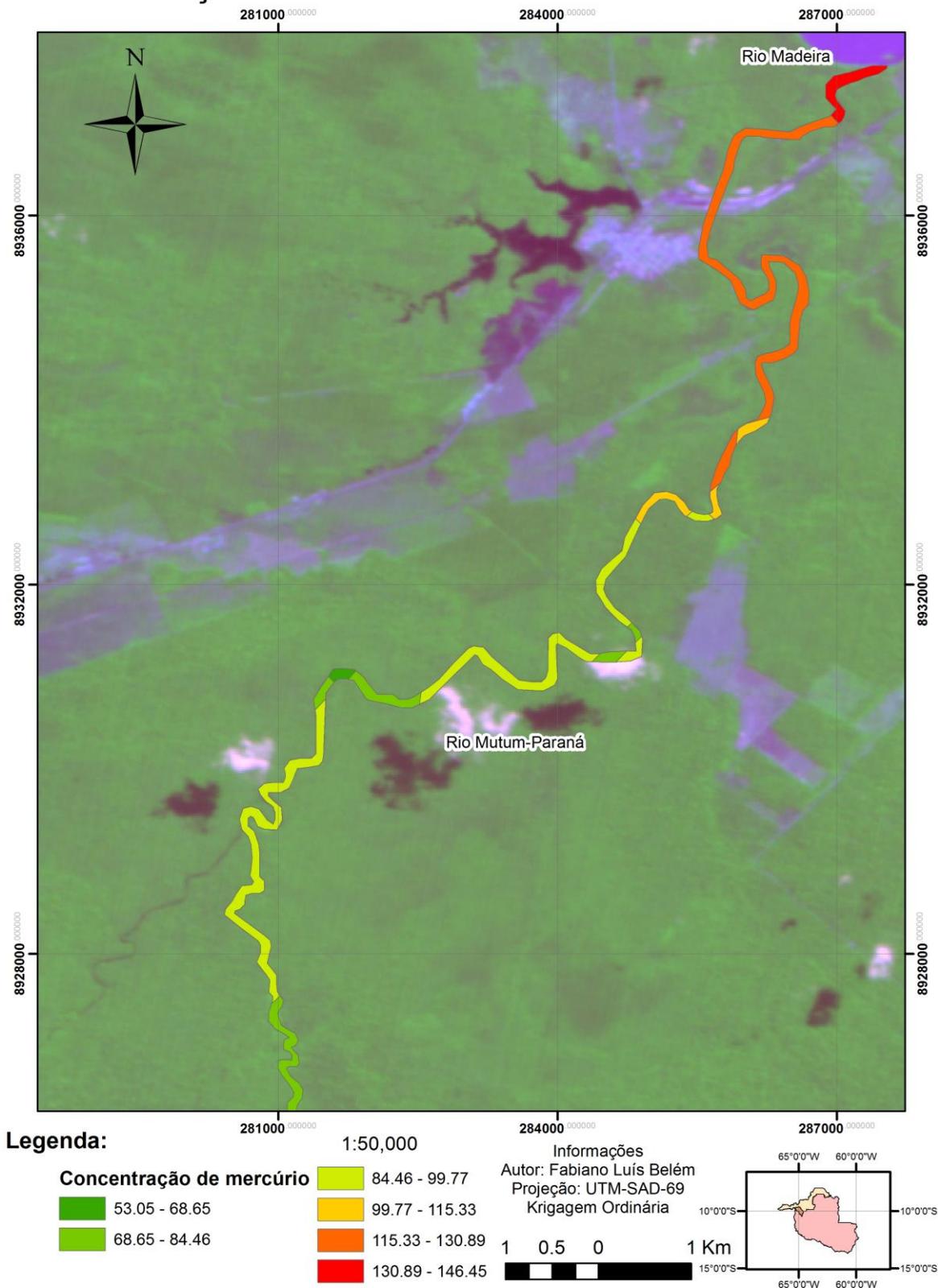


Figura 29: Mapa de predição de concentração de mercúrio em sedimento no baixo rio Mutum-Paraná utilizando-se o algoritmo de Krigagem Ordinária. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor.

Concentração de Mercúrio Total do Alto rio Mutum-Paraná

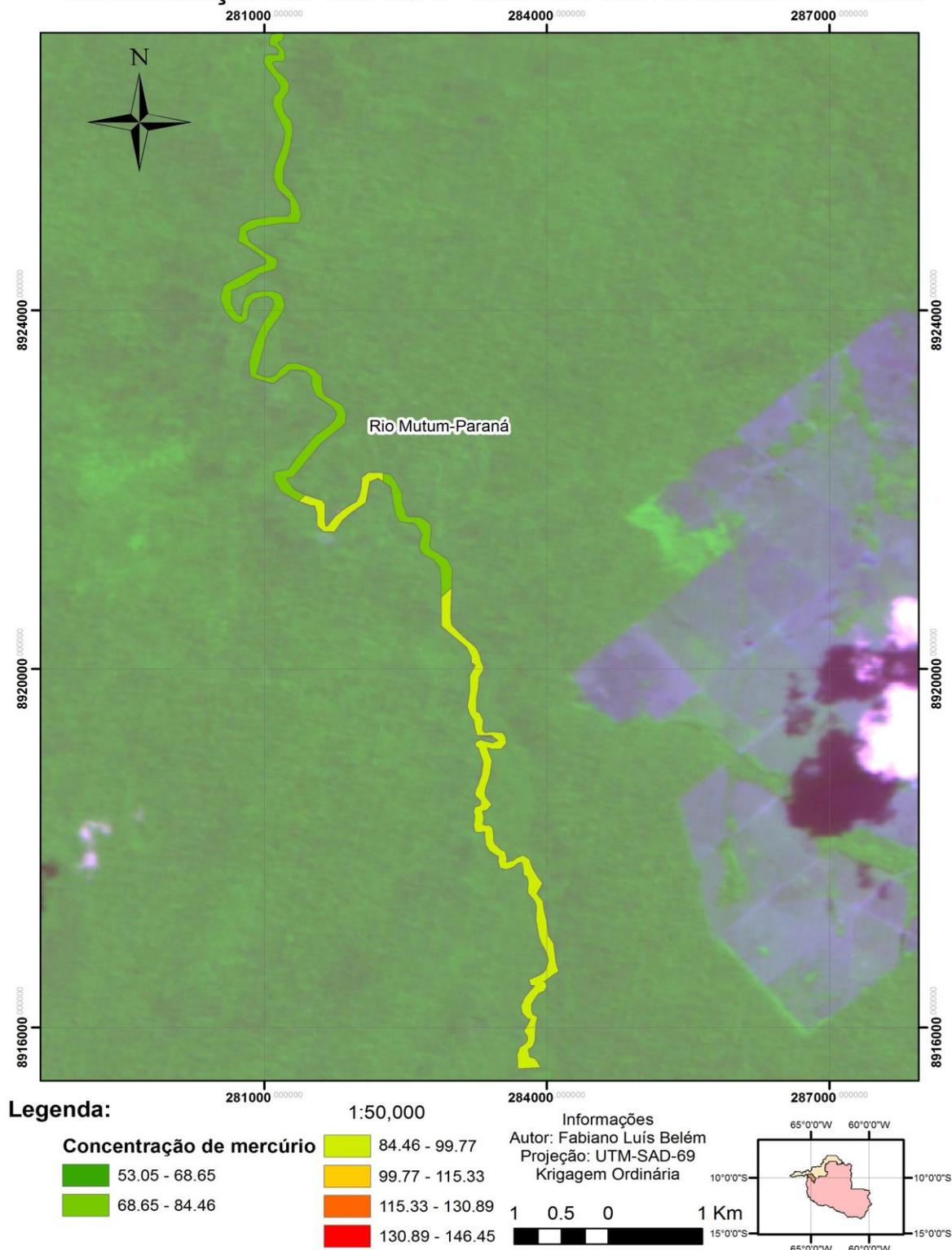


Figura 30: Mapa de predição de concentração de mercúrio em sedimento no alto rio Mutum-Paraná utilizando-se o algoritmo de Krigagem Ordinária. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor.

Analisou-se que no baixo rio Mutum-Paraná próximo a desaguar no rio Madeira ocorre uma maior concentração de mercúrio. Este resultado sobre a concentração de mercúrio corrobora com a literatura (MALM, 1991) em que a maior concentração de mercúrio no rio Mutum-Paraná é próximo ao rio Madeira.

IV.6 Análise das áreas das classes das variáveis

A partir dos modelos geoestatísticos calculou-se as áreas de cada classe que foi predita nas variáveis (Tabela 05).

Tabela 05: Tabela de área de classes de predição

Matéria Orgânica		pH		Concentração de mercúrio total	
Classe	Área (m ²)	Classe	Área (m ²)	Classe	Área (m ²)
0 - 0.16	780400	4.76 - 5.10	110800	53.05 – 68.65	27200
0.16 - 0.32	339200	5.10 - 5.48	485200	68.65 – 84.46	1148800
0.32 - 0.45	368000	5.48 - 5.79	558400	84.46 – 99.77	1617200
0.45 - 0.56	674800	5.79 - 6.10	1174400	99.77 – 115.33	124400
0.56 - 0.70	1009000	6.10 – 6.41	1086000	115.33 – 130.89	631600
0.70 - 1	487200	6.41 – 6.72	244400	130.89 – 146.45	110000

Na variável matéria orgânica a classe que apresenta uma maior área é a classe 0.56 – 0.70 de a probabilidade ser maior que o nível de corte de 1,86 mg/kg com uma extensão 1009000 m². Após isto, gerou-se a correlação entre as classes da variável da matéria orgânica com as classes da variável pH e as classes de mercúrio total. A variável matéria orgânica apresentou uma correlação positiva de 0,4 com a variável pH e uma correlação negativa de – 0,5 com a variável de mercúrio total.

Na variável pH a classe que apresentou uma maior extensão é a classe que apresenta um pH entre 5.79 – 6.10 com uma extensão de 1174400m². E a menor classe em extensão é aquela que apresenta o pH mais ácido entre 4.76 – 5.10 com uma área de 110800 m². As classes da variável pH e da variável mercúrio não apresentaram correlação, pois o coeficiente de correlação é 0,06.

Na variável de concentração de mercúrio total a classe de 84.46 – 99.77 mg/kg que apresenta maior extensão com uma área 1617200 m². E a menor classe em extensão é a classe de 53,05 – 68,65 mg/kg que tem uma área de 27200 m².

IV.7 Validação dos Modelos

Os modelos geoestatísticos foram realizados no software *Arcgis*®. Para validar o modelo geoestatístico neste programa foram usados alguns índices estatísticos como a média de erros, raiz média quadrada, erro médio padrão, média padronizada, raiz média quadrada. Estes dados estatísticos servem para medir a incerteza das estimativas dos dados estão apresentados na tabela 06 (ALMEIDA, 2006)

Tabela 06: Tabela de validação cruzada

Validação Cruzada	Matéria orgânica	pH	Concentração de Hg Total
Média	0.01786	0.00795	0.01691
Raiz Média Quadrada	0.5759	0.4845	0.3119
Erro Médio Padrão	0.5505	0.5042	0.4055
Média Padronizada	0.03271	0.00612	0.00959
Raiz Média Quadrada Padronizada	1.091	0.986	0.974

Segundo Jonhston e Krikovoruch (1999), o modelo geoestatístico que apresentara uma boa acurácia³ deve seguir alguns parâmetros estatísticos. Esta estatística serve para respaldar e avaliar os desempenhos dos mapas estimados. Alguns parâmetros estatísticos são: a média da estimativa de erro que deve ser próxima de zero; a raiz média quadrada e o erro médio padrão devem ser os menores valores possíveis mais próximos de zero; a média padronizada deve ser um valor próximo de zero; a raiz média quadrada padronizada deve apresentar um valor próximo a um (JOHNSTON & KRIKOVORUCH, 1999). Segundo Almeida (2006), o valor médio da predição do erro próximo de zero indica que os valores não são enviesados. Se o erro médio padronizado é maior ou menor que a raiz média quadrada, isto demonstra que a variabilidade é ligeiramente superestimada ou subestimada (ALMEIDA, 2006). Esta análise serve de avaliação que indicam se um modelo pode ser ou não considerado.

Na validação cruzada da variável matéria orgânica mostra que o modelo foi bem ajustado porque, a raiz média quadrada padronizada que é 1,091 é próximo de um. Os dados não se mostraram enviesados porque a média dos erros é 0,01786 é próximo de zero. Mas, o erro médio padrão de 0,5505 é menor que a raiz média quadrada de 0,5759 mostrando que a estimação está pouco subestimada.

Na validação cruzada da variável pH apresenta um modelo bem estimado porque a raiz média quadrada padronizada de 0,986 é próximo de um. Os dados deste modelo não são enviesados porque a média de erros é 0,00795 é próxima de zero. O modelo está ligeiramente superestimado porque a raiz quadrada 0,4845 é ligeiramente menor que o erro médio padrão de 0,5042.

³ Acurácia - Descreve a proximidade do valor estimado com o valor verdadeiro, ou seja, é a diferença entre o valor interpolado e o valor verdadeiro.

Na validação cruzada da variável de concentração de mercúrio total o modelo pode ser considerado bem ajustado, pois a raiz média quadrada padronizada é 0,974 é próximo de um. Os dados do modelo não estão enviesados, pois a média de erros é 0.01691 é próximo de zero. A raiz quadrada média de 0,3119 é pouco menor que o erro médio padrão de 0,4055 isto faz com que o modelo seja ligeiramente superestimado.

V. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nos corpos hídricos, o ciclo biogeoquímico do mercúrio é extremamente complexo pela sua presença na forma oxidada Hg^{+2} que se pode associar ao silte e argila e sofrer o processo de metilação formando o composto químico do metil-mercúrio. Além disso, os íons oxidados do mercúrio apresentam uma correlação positiva com os sedimentos de granulometria silte e argila e uma correlação negativa com a areia (OLIVEIRA, 2007). Na região do baixo Mutum-Paraná apresenta-se a maior concentração de mercúrio próximo a confluência do rio Madeira que é área de remanso do rio Mutum-Paraná (MALM, 1991).

Outra influência na distribuição do mercúrio no leito do rio Mutum-Paraná é o transporte atmosférico. Segundo Bisnoti & Jardim (2004), uma das características principais do mercúrio elementar (Hg^0) é a alta volatilidade o que faz com que este elemento tenha um tempo de residência muito grande na atmosfera. Isto faz com que possa sofrer interações de natureza química, física e biológica fazendo com que o mercúrio possa ser transferido para ambientes aquáticos e terrestres. Segundo Linhares (2007), o rio Mutum-Paraná fica próximo de quatorze regiões mineradoras no Alto rio Madeira e detectou-se que as dragas liberavam mercúrio na atmosfera com a queima do amálgama sem uso da retorta⁴. Estes gases de mercúrio sofrem influência na direção dos ventos predominantes na direção norte e sudoeste (LINHARES, 2007). Segundo Lacerda et al (1999), os gases de mercúrio tem um raio de abrangência de 20 quilômetros, conseqüentemente, uma grande abrangência espacial. No entanto, segundo Bisnoti & Jardim (2004), uma pequena porção de Hg^0 que esta presente na atmosfera é convertido em espécies solúveis em água como o Hg^{+2} , conseqüentemente, o mercúrio atmosférico não é a principal causa das grandes quantidades de concentração de mercúrio no alto rio Mutum-Paraná.

A sub-bacia hidrográfica Mutum-Paraná está sob a influência dos sistemas de circulação atmosférica predominantes na região Norte. Sistemas de ventos de nordeste e leste dos anticiclones subtropicais do Atlântico Sul e dos Açores, sistema de ventos de oeste da Massa Equatorial continental e linhas de sistemas de ventos de norte de anticiclones ou frentes Polares. Estes sistemas têm diferentes trajetórias que influenciam a dispersão de contaminantes. (LINHARES, 2007, p. 78)

A contaminação ambiental por mercúrio na Bacia do rio Mutum-Paraná não está somente relacionado à mineração, mas também ao uso e ocupação do solo. Nesta bacia, predomina-se as atividades agropecuárias extensivas e a extração de madeira. Na agricultura extensiva o problema das

⁴ Retorta – É um objeto que serve como destilador da mistura ouro-mercúrio chamada pelos garimpeiros de “cadinho”.

queimadas para o plantio da agricultura e dos pastos é devastador. Segundo Bisnoti & Jardim (2004), as queimadas que ocorrem na área da Amazônia alteram a bioquímica e aumenta a temperatura do solo fazendo com que o mercúrio presente/armazenado no solo seja liberado na atmosfera (Figura 34). Consequentemente, este mercúrio pode ser relocado e acumulado nos leitos dos rios das regiões amazônicas. Além disso, a liberação de mercúrio em áreas de pastagens é maior do que nas áreas de florestas (MARGARELLI & FOSTIER, 2005). Estas mudanças da vegetação nativa fazem com que a região sofra um extenso processo erosivo.



Figura 31: Queimadas na região da Bacia do Rio Mutum Paraná. Fonte: (WATANABE, 2011).

A erosão na região da bacia do rio Mutum-Paraná é alta, apesar de ser uma região em que os fatores topográficos são pouco influentes pela baixa declividade encontrada (WATANABE, 2011). Isto faz com que a área tenha índices baixos de escoamento superficial. Apenas ocorre de maneira mais vigorosa nas partes da região central do rio Mutum-Paraná quando este passa por um vale encaixado, mas, a característica plana geral não impede que o processo erosivo na região seja baixo, pois toda a área está localizada sobre uma grande bacia sedimentar composta por um solo de material arenoso e inconsolidado de fácil carreamento (WATANABE, 2011). Segundo Watanabe (2011), a perda anual de sedimentos na bacia do rio Mutum-Paraná pelo processo erosivo é de 10.479 ton/ha/ano, resultado da prática da agropecuária intensiva e extensiva na área. Segundo os dados de coleta de solo de Linhares (2009), a presença de mercúrio total no horizonte A do solo da bacia do rio Mutum-Paraná apresenta uma alta concentração de mercúrio total. Estes resultados reiteram que o uso do solo é um dos responsáveis pela grande quantidade de mercúrio presente no rio Mutum-Paraná. Pode-se, inferir que as atividades antrópicas contribuem significativamente para a remobilização do mercúrio no solo para o rio Mutum-Paraná.

Outra variável que está sendo utilizada neste processo é a de matéria orgânica e observa-se que

as maiores quantidades estão disponíveis no rio Mutum Paraná estão próximas às áreas de florestas, pois o rio Mutum Paraná passa por áreas de preservação (sobre as áreas de florestas). Isto faz com que a grande quantidade de matéria orgânica disponível e o complexo orgânico dissolvido disponível no ambiente associado ao ambiente ácido dos rios amazônicos de águas escuras (BISINOTI & JARDIM, 2004). No entanto, neste estudo a matéria orgânica não apresentou correlação significativa com mercúrio total. A matéria orgânica apresentou uma correlação negativa com o pH.

O pH nos corpos d'água é fundamental para a biodiversidade presente nestes ambientes. Para o ciclo biogeoquímico do mercúrio o ambiente ácido é importante para as reações químicas do mercúrio no meio ambiente (Bisnoti; Jardim; 2005). As áreas de pH que são mais propícias formação de mercúrio orgânico estão ao longo do leito do rio, pois são nesses locais onde há maior probabilidade de haver reação do mercúrio. Ocorre uma variação no pH ao longo do rio principalmente, próximo as atividades antrópicas. Segundo Malm (1991), Gomes(2005) e Linhares (2007) o rio Mutum-Paraná apresenta um pH que está em torno de 4,5 à 6 isto ocorre por ser um rio de floresta estes rios apresentam ácidos húmicos e fulvicos.

A partir disso, segundo Switkens (2008), com o reservatório das usina hidrelétrica de Jirau haverá o represamento dos afluentes da rio Madeira como o rio Mutum-Paraná como pode ser visto na figura 32. Esta alteração do ambiente lenticó irá gerar uma acumulação do mercúrio na região de deságua do rio Mutum-Paraná no rio Madeira. Além disso, isto causará o aumento da matéria orgânica porque as áreas de alagamento serão em áreas de floresta como pode ser visto no mapa (Figura 32). E um aumento do pH com a presença nesta região de ácidos húmicos e fúlvicos por causa do alagamento de novas áreas estes ácidos serão dissolvidos no rio Mutum-Paraná. No entanto, este trabalho mostrou que as variáveis matéria orgânica, pH e mercúrio total não apresentam correlação.

A partir disso, existe a necessidade de se realizar na bacia do rio Mutum-Paraná o monitoramento espacial das variáveis químicas no meio ambiente ao longo dos anos. Para se verificar os impactos que existem por causa do represamento do rio no meio ambiente e a variação que pode ocorrer espacialmente destas variáveis no corpo hídrico do rio.

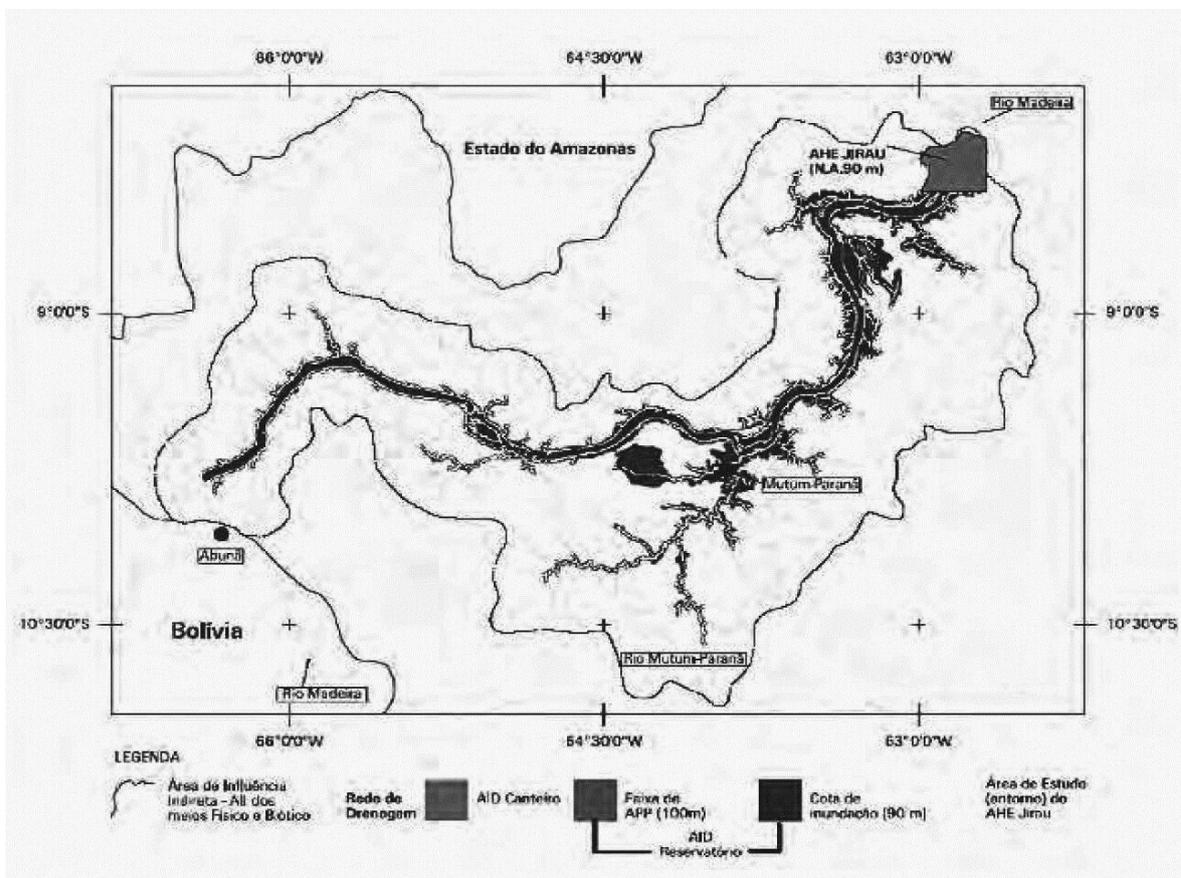


Figura 32: Área de influência direta (AID) do reservatório de Jirau (Fonte: Estudo de viabilidade do complexo hidrelétrico do Rio Madeira).

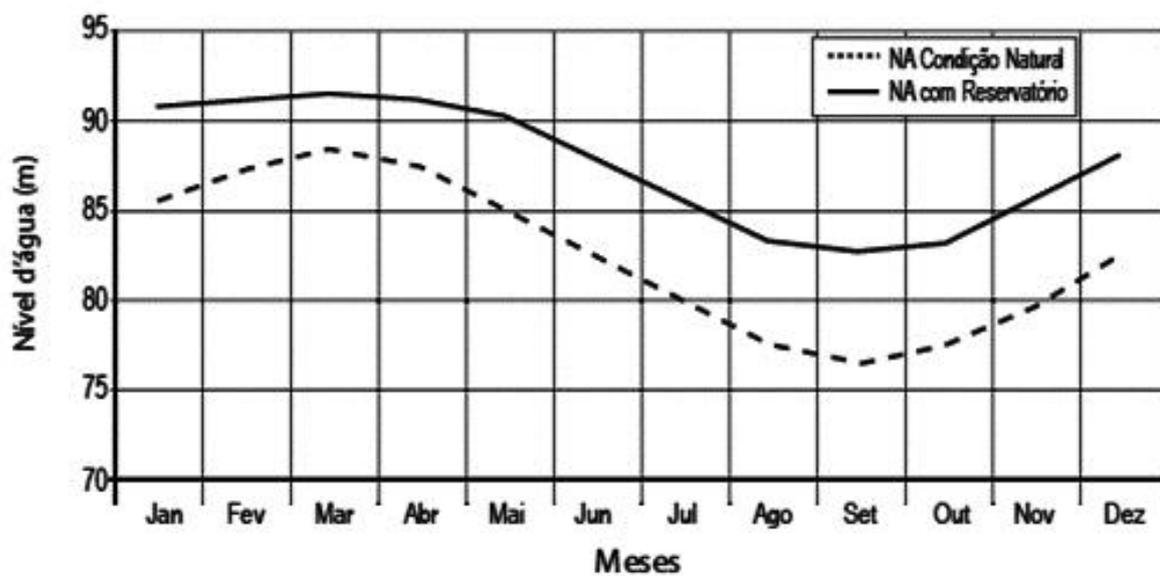


Figura 33: Rio Madeira na confluência com o Rio Mutum-Paraná. Cartogramas médios mensais em condições naturais e com condições reservatórios. (Fonte: Estudo de viabilidade do complexo hidrelétrico do Rio Madeira).

VI. CONCLUSÕES

- Este estudo corroborou com o trabalho de Linhares (2009) e Malm (1991) que no baixo rio Mutum-Paraná existe uma concentração de mercúrio mais elevada. Identificou-se que este mercúrio pode ser decorrente da presença das atividades antrópicas naquela região como as atividades agropecuárias e de mineração.

- Também corroborou com Linhares (2009) e Malm (1991), o modelo geoestatístico do rio Mutum-Paraná de características levemente ácidas, marcado por suas águas de cor negras originadas pelos processos de decomposição da matéria orgânica proveniente das áreas de vegetação.

- Os modelos geoestatísticos aqui utilizados demonstraram ser uma excelente metodologia de monitoramento ambiental, pois obtiveram um alcance bom o que respaldam tanto o modelo aplicado quanto os dados químicos pesquisados.

- A Krigagem Indicativa revelou as variações de concentração de matéria orgânica. A krigagem ordinária mostrou de maneira linear as estimativas de concentração de mercúrio total e pH. Mostrando que o estimador de Krigagem é sensível à variação espacial dos parâmetros que foram estudados.

- Evidenciou-se que os dados de matéria orgânica, pH e concentração de mercúrio total não apresentaram nenhum coeficiente de regressão com valor significativo, nem apresentaram correlação.

- É necessário que se continue realizando o monitoramento espacial e geoestatístico do mercúrio na bacia do rio Mutum Paraná, principalmente, pelas mudanças de cenários causadas pela instalação da usina hidrelétrica de Jirau. Esta mudança do ambiente poderá alterar o ciclo biogeoquímico do mercúrio na região do rio Mutum-Paraná.

- A partir deste trabalho comprovou-se que os modelos espaciais contribuem para o monitoramento espacial na análise de correlação entre as três variáveis estudadas que são pH, matéria orgânica e a concentração de mercúrio total. No rio Mutum-Paraná estas três áreas apresentam não apresentaram nenhuma correlação significativa.

- Existe a necessidade de se realizar na bacia do rio Mutum-Paraná a análise espacial do mercúrio por causa da alteração do meio ambiente principalmente, nas áreas alagadas da represa da usina hidrelétrica de Jirau. A análise espacial por modelos geoestatísticos é o método mais eficaz para se realizar a espacialização das variáveis químicas. Além disso, a necessidade de se correlacionar as áreas para tentar se obter em algum momento do processo de inundação correlação ou regressão.

REFERÊNCIAS

- AYOADE J.O; **Introdução a climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro; Livro; editora Bertrand do Brasil; volume 4; 1996.
- ALMEIDA R; BERNARDI J.V.E; BASTOS W.R; Nascimento E.L; Oliveira R.C; Carvalho D.P; **Método geoestatístico para modelagem ambiental de poluentes em sistemas lacustre – Amazônia Ocidental**; Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; página 2247-2253; 2007.
- ALMEIDA R; **Análise geoestatística das concentrações de mercúrio no lago do puruzinho em Rondônia** – Amazônia Ocidental; Dissertação de mestrado; 2006.
- ANDRIOTTI. J.L.S; **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**; Editora Unisinos; São Leopoldo; 2000.
- BARBOSA, I.B.H; **Análise Espacial do mercúrio em solos de áreas ripárias da Bacia Hidrográfica do Rio Madeira – Amazônia Ocidental**; dissertação; UNIR; Porto Velho; Rondônia; 2012.
- BASTOS, W.R; LACERDA, L.D; **A contaminação por mercúrio na Bacia do Rio Madeira: uma breve revisão**. Revista Geochimica Brasiliensis; número 18; página 99 -114; 2004.
- BECKER, B. K. **Dilemas e desafios do desenvolvimento sustentável no Brasil**; Rio de Janeiro; editora Garamond; 2007; 146 p.
- BELEM ,F.L; TEMBA, P.C; DONICCI, C; RODRIGUES, A.A.D: **Modelo geoestatístico para monitoramento de metais pesados na Bacia do Rio das Velhas em MG**; Anais do VI congresso brasileiro de cartografia; Maceió; 2010 volume 1, número 1, pagina 240-246, 2010.
- BISNOTI, M.C; JARDIM, W.F; JUNIOR, J.L.B; MALM, O; GUIMARÃES J.R: **Um novo método para quantificar mercúrio orgânico (Hgorgânico) empregando a espectrometria de fluorescência atômica a vapor frio**. Revista Química Nova; Volume 29; número 06; página 1169-1174; 2009.
- BISNOTI, M.C; JARDIM, W.F; **O comportamento do Metilmercúrio (MetilHg) no ambiente**. Revista Química Nova; volume 27; número 4; páginas 593-600; 2004.
- BITAR, O.Y; YOMASSA, W.S; CABRAL J.M: **Geotecnologia tendência e desafios**. São Paulo e Perspectiva -. volume 14, número 3, p.79-87, 2000.

- BOURGOIN, L. M.; QUEMERAIS, B.; TURCQ, P. M.; SEYLER, P.; **Sur les traces du mercure au fil de l'eau, des Andes à l'Amazone**. Précis de Hydrologie, Ecole des Mines de Paris, 273p, 2003
- CAMARA, G.; **Análise Espacial de Dados Geográficos**. SP. Primeira edição. Editora Embrapa. São Paulo. 2000. 241 páginas.
- CAMARGOS, E.C.G; **Distribuição espacial do risco associado a eventos raros por geoestatística binomial e simulação condicionada**. Tese de doutorado; INPE; São José dos Campos, (2007).
- CAMARGOS, E.C.G; FUKS, D.S.; FREITAS C.C.F; **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (SPRING)**, tese de mestrado, INPE, São Jose dos Campos, 1998.
- CAMARGOS, 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. (SBSR), Foz do Iguaçu, 2002.
- CAMARGOS, E. C. G.; FELGUEIRAS, C. A.;. **Curso de fundamentos de geoestatística**. INPE, São José dos Campos, 2006.
- CAMBARDELLA, C.A; MOORMAN, T.B; NOVAK, J.M; PARKIN T.B; KARLEN, D.L; TURCO, R.F; KONOPKA, A.E **Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils**. Soil Science Society of America Journal. Número 58, páginas 1501-1511.
- CAMPOS.I.M; VALADARES.E.C; **Inovação tecnológica e desenvolvimento**. Seminários de ciências sociais; Belo Horizonte; 2000.
- CASSIOLATO.J.E; LASTRES H.M.M; **Inovação, Globalização e as Novas Políticas de Desenvolvimento Tecnológico**. Revista de Experiências de Sistemas Locais no Âmbito do Mercosul; volume 2, número 1, p. 76-95; Rio de Janeiro; 1998.
- CARVALHO D.P; **Quantificação dos elementos-traço em diferentes solos na área de influência do futuro reservatório da usina hidrelétrica de Santo Antônio, Porto Velho RO**. Tese de mestrado, 2011, Porto Velho, Rondonia
- CECON R.C; SILVA R.S; NASCIMENTO M; FERREIRA A; **Métodos Estatísticos**. Série Didática; Editora UFV; 2012.
- CYSNE,F.P; **Transferência de tecnologia e desenvolvimento**. Ciência da Informação – volume 25, número 1, p. 1-14,1996.
- Centro De Pesquisas E Recursos Minerais (CPRM). **Mapa Geológico de 1:250.000 - Estado de Rondônia**; Ano 2007.

CENTRO DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa Geodiversidade de 1:4.000.000 – Estado de Rondônia**; ano 2011.

CROSTA, A.P; **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1992. 170 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro; ano 2006.

EMERY, X; **Apuntes de Geoestadística**. Apostila, Santiago, Chile; Ano 2007.

FADINI, P. S.; JARDIM, W. F.; **Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury?** Science of the Total Environment, volume 275, número 1–3, página. 71-82, 2001.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica**: o paradigma geoestatístico por indicação. 1999. 212 p. (INPE-8180-TDI/760). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.

FELGUEIRAS, C. A.; FUKS, S. D.; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARGO, E. C. G. **Uso de simulação estocástica não linear para inferências de atributos espaciais numéricos**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10. (SBSR), 2001, Foz do Iguaçu.

GOMES, J.P.O; **Aplicação da análise de componentes e geoestatística no estudo hidrogeoquímico de elementos-traço nos sólidos em suspensão do alto rio Madeira**. Porto Velho, Monografia, 2005.

GOMES, J.P.O; **Elementos-traço em solos do alto rio Madeira, Rondônia**. Porto Velho, Dissertação, 2006.

GRIGAL, D.F, **Mercury Sequestration in Forests and Peatlands**, Journal of Environmental Quality, volume 32, número 2, página 392-405.

GUERRA J.T; SILVA A.S; BOTELHO R.G.M.BOTELHO; **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Livro; editora Bertrand do Brasil; 2005.

GUIMARÃES, E. C. **Avaliação dos níveis basais de mercúrio na área de influência da UHE Jirau - Rio Madeira/Amazônia**. 2009. 73 p.; Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2009.

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

HERRMANN J.C; BERNARDI J.V.E; BASTOS W.R; LACERDA L.D: **Dispersão espacial X amostragem Pontual: A geoestatística como ferramenta de análise de mercúrio em solos de Rondônia, Amazônia Ocidental.** Geochimica Brasilienses; página 131-138; número 23; 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – DIRETORIA DE GEOCIÊNCIAS – COORDENADORIA DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS; **Manual técnico de geomorfologia.** Série Manuais técnicos de geociências; Rio de Janeiro; 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – DIRETORIA DE GEOCIÊNCIAS – COORDENADORIA DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS; **Manual técnico de pedologia.** Série Manuais técnicos de geociências; Rio de Janeiro; 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – DIRETORIA DE GEOCIÊNCIAS – COORDENADORIA DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS; **Manual técnico de vegetação: Sistema fitogeográfico; Inventário das formações florestais e campestres; Técnicas e manejos de coleções botânicas; Procedimentos para mapeamentos.** Série Manuais técnicos de geociências; Rio de Janeiro; 2012.

JONHSTON K. H; KRIKOVORUCH N. L; **Arcgis 9 – Using Arcgis Geoestatical Analyst; Esri;** San Francisco (EUA); 2001.

LACERDA L.D; MALM O; **Contaminação por mercúrio em ecossistemas aquáticos: Uma análise das áreas críticas.** Revista Estudos Avançados; volume 22, número 63, São Paulo, 2008.

LACERDA, L. D.; SOUZA, M.; RIBEIRO, M. G. **The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon.** Environmental Pollution, v. 129, n. 2, p. 247-255, 2004.

LANDIM P.M.B; STURARO J.R.; **Krigagem indicativa à elaboração de mapas probabilísticos de riscos.** Departamento de geologia aplicada; Texto didático; 2002.

LANDIM P.M.B; LOURENÇO R.W.; **Análise de Regressão Múltipla Espacial.** Departamento de geologia aplicada; Texto didático; 2002.

LANDIM P.M.B.; **Análise estatística e espacial de dados geológicos multivariados.** Departamento de geologia aplicada; Texto didático; 2006.

LANDIM P.M.B.; **Análise estatística e espacial de dados geológicos multivariados.** Departamento de geologia aplicada; Texto didático; 2010.

LANDIM P.M.B.; **Análise estatística e espacial de dados geológicos multivariados.** Departamento de geologia aplicada; Editora; 2012.

- LEGENDRE, P., LEGENDRE, L., **Numerical Ecology**. 2ª edição. Editora Elsevier. Amsterdam. 1998.
- LIMA, E.R.V; **Geoestatística aplicada ao estudo de solo**. Mini-curso; UFPB; João Pessoa; 2006..
- LINHARES D.P; **Mercúrio em solos e sedimentos na sub-bacia do Mutum-Paraná em Rondônia**. Dissertação; UNIR; Porto Velho; 2009.
- LINHARES D.P.; SILVA, J.M.; LIMA, T.R de; GOMES, J.P.O; R.ALMEIDA; W.R. Bastos; **Mercúrio em diferentes tipos de solos marginais do baixo Rio Madeira – Amazônia Central**; Geochimia Brasilienses, volume 23, páginas 117-130; 2009.
- LORENZO J.M.M; IRIBAS L.B; **Introduccion a la Geoestadística Lineal**, editora Netbiblo; Madrid; 2008.
- MAGARELLI G; FOSTIER A.H; **Quantificação de fluxos de mercúrio gasoso na interface solo/atmosfera utilizando câmara de fluxo dinâmica: aplicação na Bacia do Rio Negro**; Revista Química Nova; Volume 28; página 968-974; número 6; 2005.
- MALM.O; **Contaminação Ambiental e Humana na região Garimpeira de Ouro do Rio Madeira, Amazônia**. Instituto de Biofísica “Carlos Chagas Filho”. UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.
- MATHERON, G; **Traité Géostatistique appliquée**, Paris, Editora techinp, Paris.
- MIRACONI R,C,C,M; BUENO M,IM,S; JARDIM W,S; **Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte**. Revista Química Nova número 23; volume 4; 2000.
- MIRANDA M.R; **Formação do metil-mercúrio na bacia do Rio Madeira, Rondônia**. Tese de doutorado; Rio de Janeiro, UFRJ/IBCCF, 2010.
- MEIRELLES, M. P. S.; CAMARA.G; ALMEIDA.M.C; **Geomática Modelos e Aplicações Ambientais**, Primeira edição, Editora Embrapa. São Paulo, 2007. 591 páginas.
- MONTEIRO.M.A; CAMÂRA.G; **Geotecnologia em um novo paradigma de desenvolvimento**. Seminários de Indicadores de Sustentabilidade; Campinas; 2000.
- MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. 1. ed. Belo Horizonte: Ed. do Autor, 2002. 294 p.
- MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. **Uso da Krigagem Indicativa na avaliação de indicadores de fertilidade do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 30, n. 3, p.485-496, 2006.

NOGUEIRA F.M.B.N; BERNADI C.J; COUTO E.G; **Aplicação da geoestatística para amostragens de solo em planície de inundação**; Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental; volume 1; p. 1-10; 2000.

NUNES. D; Relatório final de pesquisa – **Vulnerabilidade natural à erosão da Bacia do Rio Mutum-Paraná – Porto Velho-RO (2009-2011)**. MCT - UNIR – Laboratório de Geografia e Planejamento Ambiental. Março, 2012.

OLIVEIRA, L. C. D., SERUDO, R. L., Botero, W. G., MENDONÇA, A. G. R., SANTOS, A. D., ROCHA, J. C., & DA SILVA, F. (2007). **Distribution of mercury in different soils of Amazonia's mid-Negro River Basin: influence of organic matter on mercury's biogeochemical cycle**. Química Nova, número 30 volume 2, páginas 274-280, 2007.

OLIVEIRA J.B; JACOMINE P.K.T; CAMARGO M.N; **Classe gerais dos solos do Brasil – Guia auxiliar para seu reconhecimento**; 2 edição; Jaboticabal; São Paulo (2007).

ORTIZ G.C; **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. Dissertação; ESALQ-UNESP; Piracicaba; 2002.

PEREIRA M.D.C.A; **Mineração, meio ambiente e desenvolvimento sustentável; aspectos jurídicos e sócios espaciais: O caso de Nova Lima**; Monografia; UFMG/IGC; Belo Horizonte; 2008.

PLANAFLORO, **Plano Agropecuário e Florestal de Rondônia**. Porto Velho. Tecnossolos. Relatório técnico 2001.

RESENDE, M.A, **Estruturação do Núcleo Interdisciplinar de Estudos Ambientais Avançados**, Projeto de Pesquisa apresentado à FAPEMIG em 2006, aprovado (EDT 479/07) em 2007 dentro do Edital PRONEX.

ROCHA, J. C.; SARGENTINI, E.; ZARA, L. F.; ROSA, A. H.; SANTOS, A.; Burba, P.; **Reduction of mercury(II) by tropical river Humic substances (Rio Negro) — A possible process of the mercury cycle in Brazil**. Talanta, volume 53, número 3, página 551-559, 2000

ROSA.R.; **Geotecnologias na geografia aplicada da UFU**. Revista do departamento de geografia - volume 16, número 1, p. 85-90, 2005.

SEDAM, Secretaria Estadual de Desenvolvimento Ambiental. **Atlas Geoambiental de Rondônia**, Porto Velho-RO, 2002.

SILVA C.A.; **Especiação do mercúrio na cadeia trófica pelágica de uma costa sujeita a Ressurgência. Cabo Frio (RJ)**. Tese. Universidade Federal Fluminense. 2006 Rio de Janeiro (RJ).

SIQUEIRA, W.; APRILE, M. **Distribution of total mercury in sediments from Amazon continental shelf: Brazil.** Acta Amazônica, volume 42, número 2, p. 259-268, 2012.

SOARES.A.; **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente**, Lisboa-Portugal, 2006.

SOARES-FILHO B; NEPSTEAD D; CURRAN, L; Voll E; CERQUEIRA G; GARCIA R.A; MCDONALD A; LEFEBVRE P; SCHLESDINGER P; **Modeling conservation in the Amazon basin.** Nature Newspaper; Londres volume 440, página 520-523, 2006.

SWITKES, G.; BONILHA, P.; **Águas Turvas: Alertas sobre as consequências de barrar o maior afluente do Amazonas;** editora Internacional Rivers. people. water. life; São Paulo; 2008.

SUERTEGARAY, C.R; ROSSATO, M.S; BELLANCA, E.T; CÂNDIDO, L.C; SILVA, C.R; **Terra feições ilustradas;** editora UFRGS; Porto Alegre; 2003.

STRALHER, A.N; **Geografia Física.** Editora Omega. Barcelona,1986

Tao S; **Factor score mapping of soil trace element contents.** 1996

VELOSO H.P; FILHO A.L.R.R; LIMA J.C.A; **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal;** Rio de Janeiro; IBGE; Sistema Nacional de Recursos Naturais; 1991.

VALLADARES, G. S.; CAMARGO, O. A.; AZEVEDO, E. C.; SILVA, A. M. C. **Variabilidade espacial e disponibilidade de zinco em solos de vinhedos e adjacências da região vinícola de Jundiá, SP.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), Florianópolis, 2007.

VERDOY, P.J; Mateu J. **Geoestadística Espacial Técnicas Espectrales com Aplicaciones**, editora VDM, Madrid, 2010.

VELOSO H.P; FILHO A.L.R.R; LIMA J.C.A; **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal;** Rio de Janeiro; IBGE; Sistema Nacional de Recursos Naturais; 1991.

WATANABE. M; **Análise integrada da paisagem da bacia do rio Mutum-Paraná (RO).**Dissertação Porto Velho; Rondônia,2011

WINDMOLLER C.C; SANTOS R.C.; ATHAYDE M.; PALMIERI H.E.L; **Distribuição e especiação de mercúrio em sedimentos de áreas de garimpo de ouro do quadrilátero ferrífero (MG).** Revista Química Nova, Volume 30, Número 05; páginas1088-1094; 2007.

YAMAMOTO J.K; **Avaliação e classificação de reservas minerais.** Livro editora FAPESP; 2001; São Paulo

ANEXO A - CBERS

O programa CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) é um trabalho conjunto entre Brasil e China iniciado em 1998 para a construção de um conjunto de satélites de sensoriamento remoto. Encontra-se em operação o satélite CBERS-2 lançado em 2003. As imagens coletadas pelo CBERS-2 estão disponíveis no site do INPE (INPE, 2007). Este tipo de imagem pode ser obtido por três tipos de sensores: o CCD (Câmera imageadora de alta resolução), o IR-MSS (Imageador por varredura de média resolução) e o WFI (Câmera imageadora de amplo campo de visada). A Tabela abaixo descreve as características principais desses sensores.

Tabela A-01: Características dos sensores CBERS

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral ¹	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa Imageada
CCD	Azul	0,45 - 0,52 μm	20 m	26 dias (visada vertical)	113 km
	Verde	0,52 - 0,59 μm			
	Vermelho	0,63 - 0,69 μm			
	infra-vermelho próximo	0,77 - 0,89 μm			
	Pancromática	0,77 - 0,89 μm			
IRMSS	infravermelho médio	1,55 - 1,75 μm	80 m	26 dias	120 km
	infravermelho médio	2,08 - 2,35 μm			
	infravermelho termal	10,40 - 12,50 μm			
	pancromática	0,50 - 1,10 μm			
WFI	vermelho	0,63 - 0,69 μm	260 m	5 dias	890 km
	infra-vermelho	0,77 - 0,89 μm			

IMAGEM CBERS DO RIO MUTUM-PARANÁ

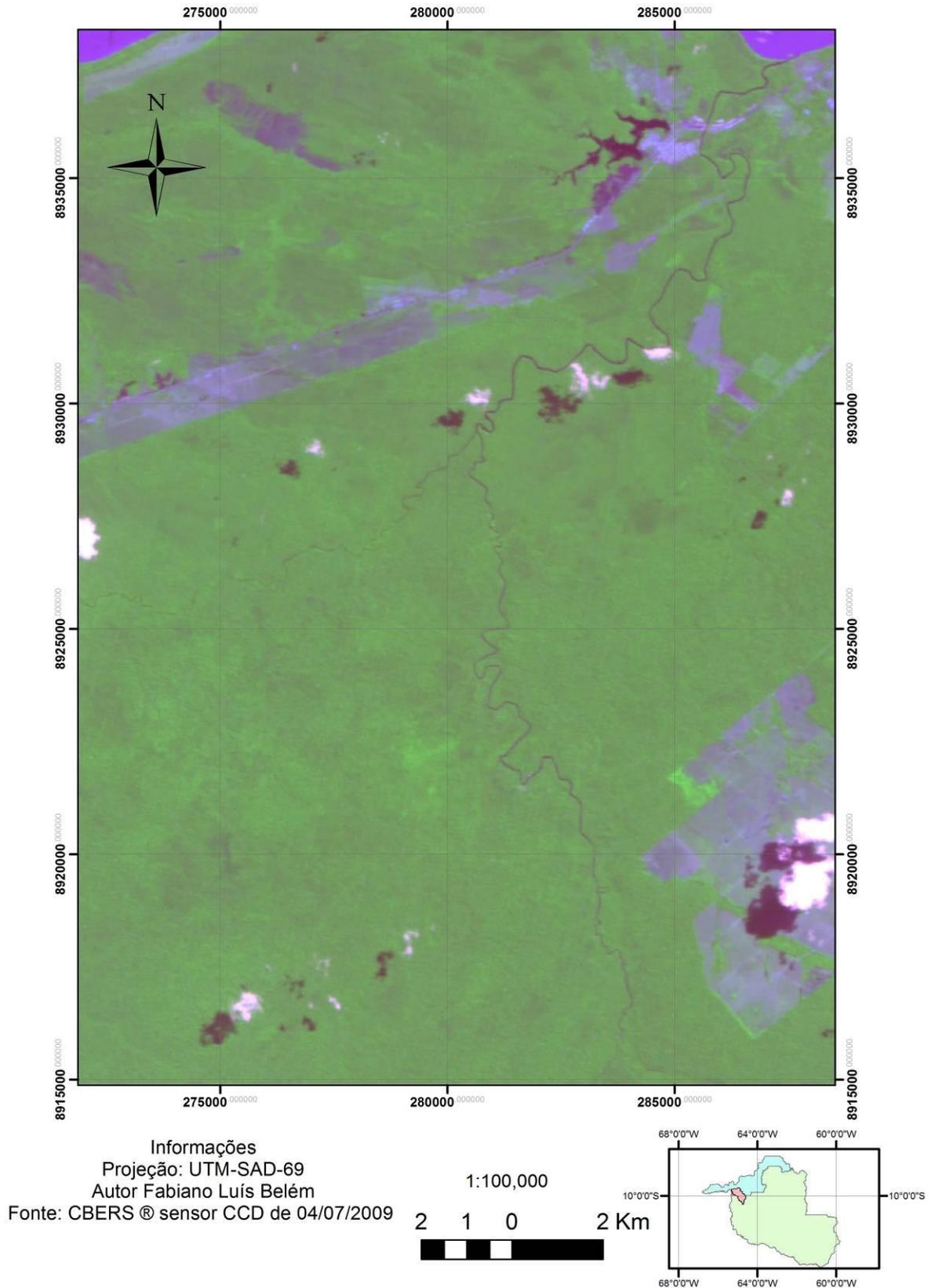


Figura A-01: Carta Imagem do rio Mutum-Paraná. (Fonte: Divisão de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2013). Organizado pelo autor.

ANEXO B - MAPAS DA ÁREA

Hidrografia da Bacia Mutum-Paraná

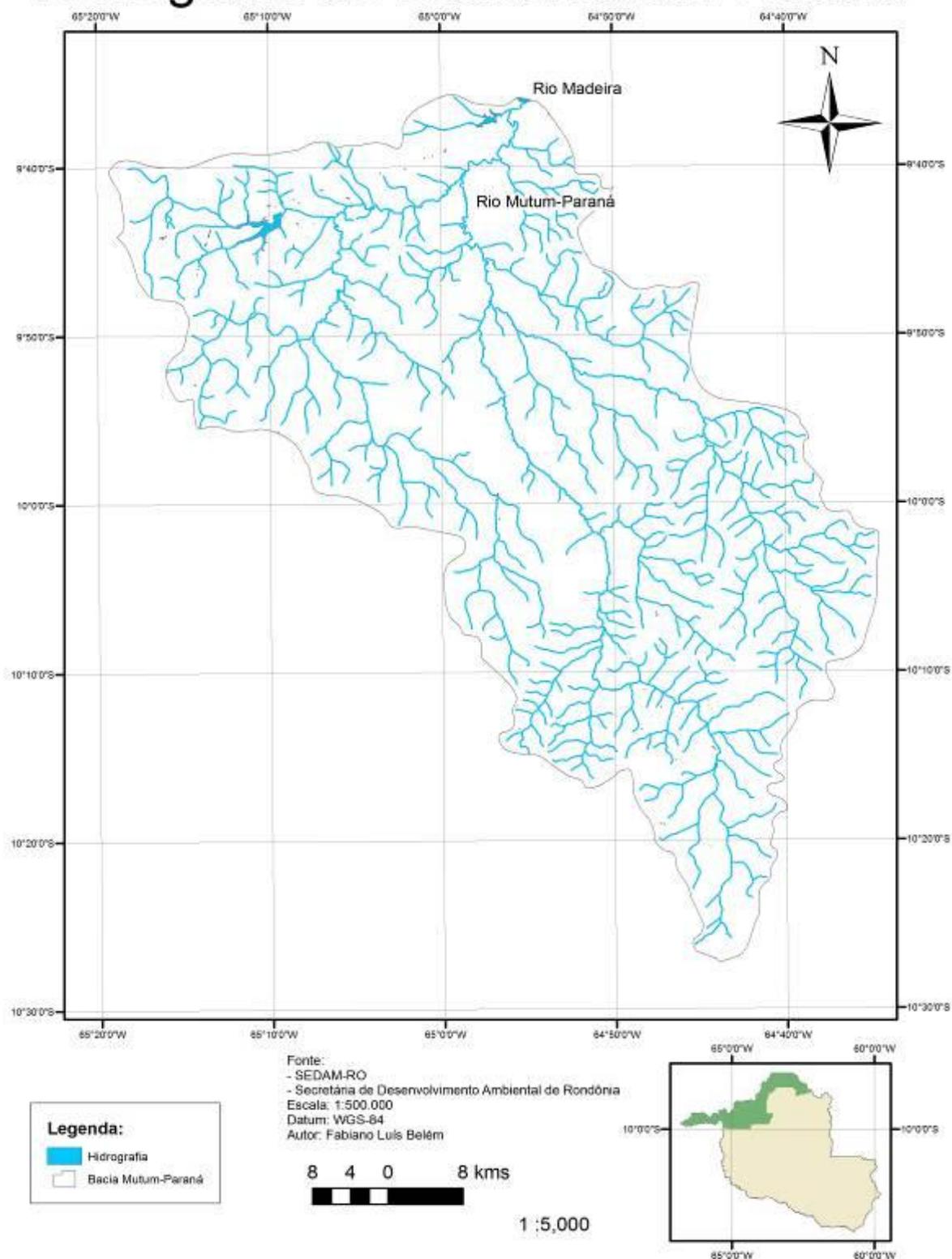


Figura B-01: Mapa hidrográfico da bacia do rio Mutum-Paraná (Fonte: Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia). Organizado pelo autor .

Curvas de nível Bacia Mutum-Paraná

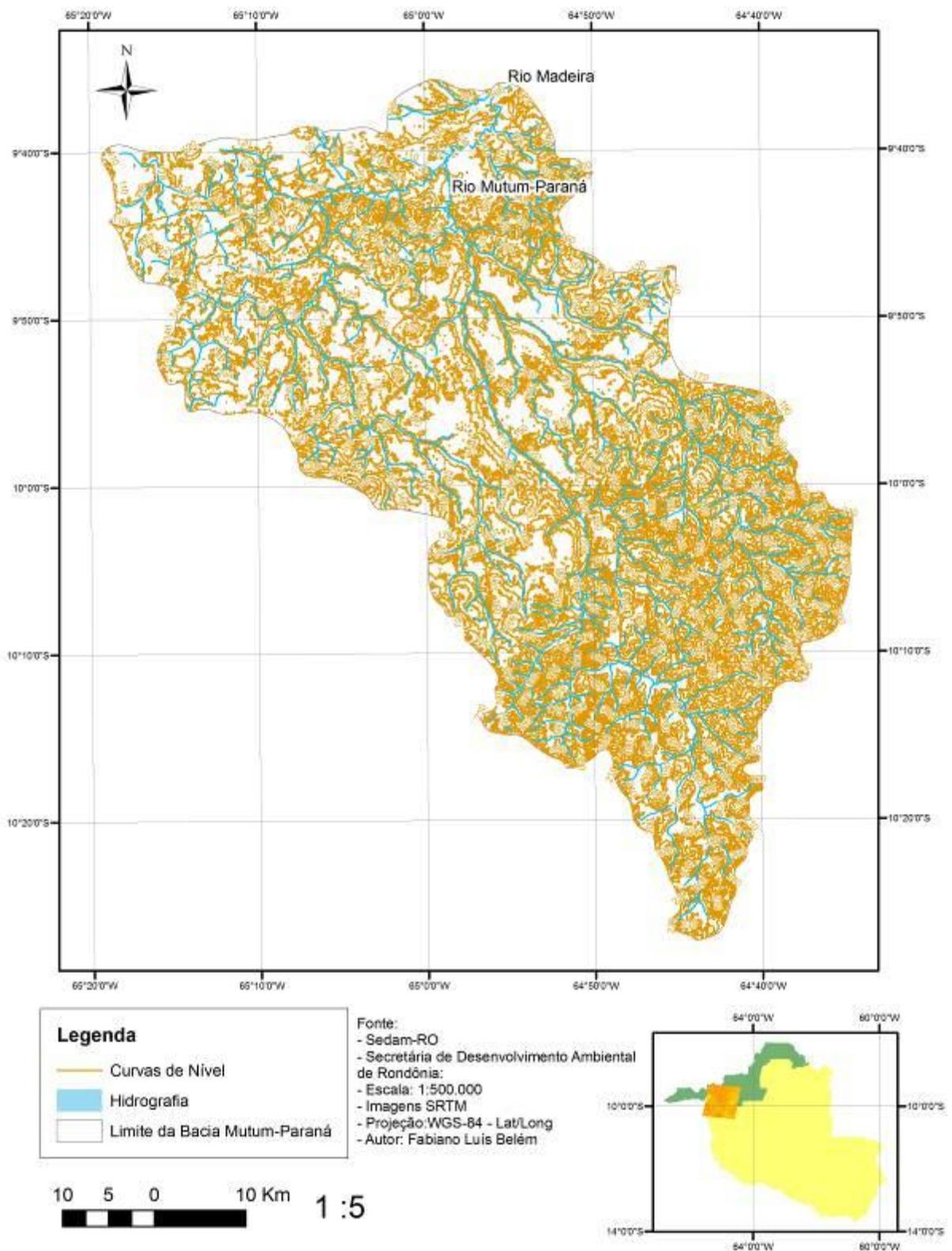


Figura B-02: Mapa de curvas de nível da bacia do rio Mutum-Paraná ((Fonte: Sedam – Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia; SRTM - Missão Topográfica Radar Shuttle). Organizado pelo autor.

Estrutural Bacia Mutum-Paraná

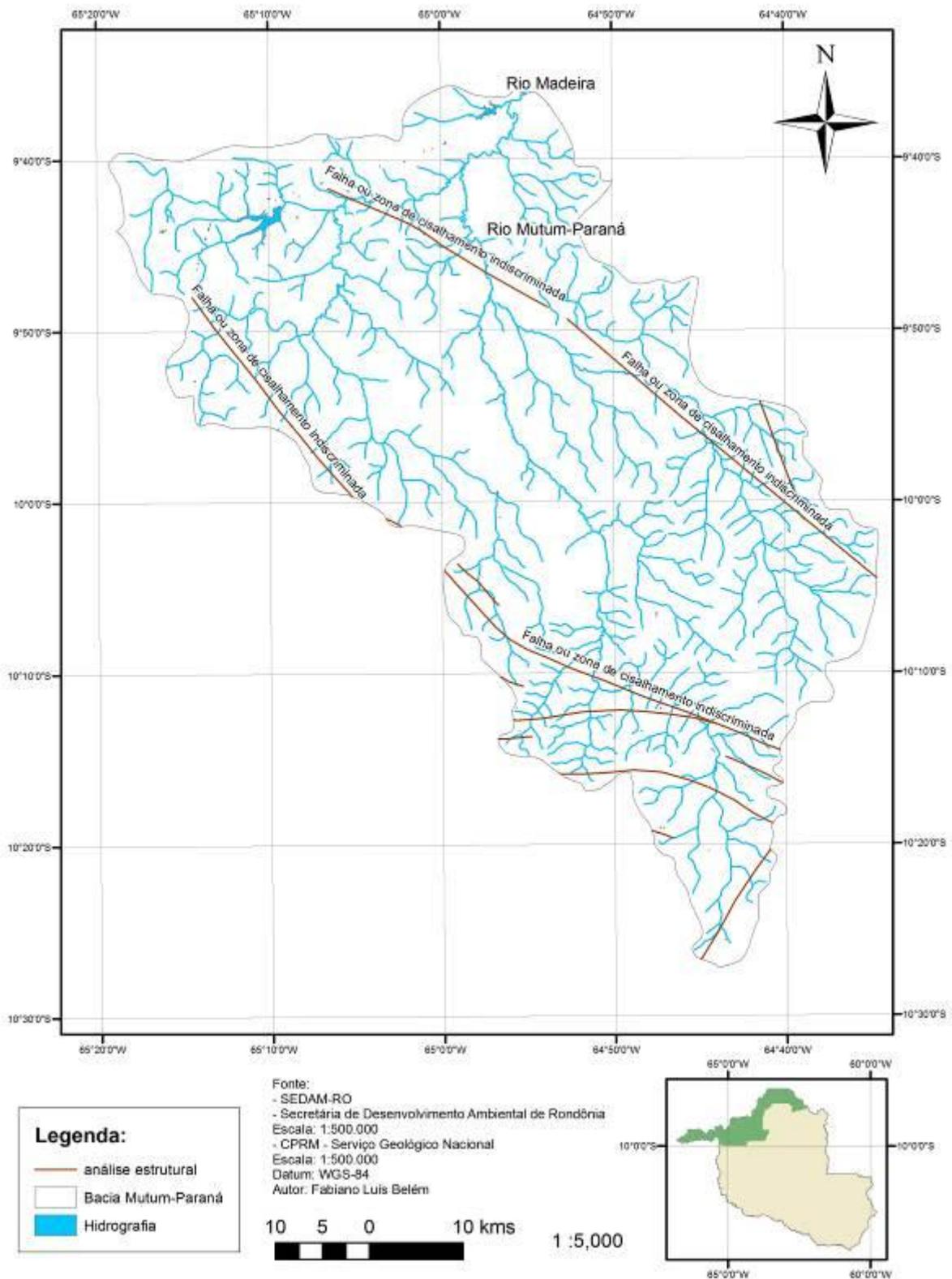


Figura B-03: Mapa estrutural da bacia do rio Mutum-Paraná. (Fonte: Sedam – Secretária de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia; CPRM – Serviço Geológico Nacional). Organizado pelo autor.