

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO AMBIENTE E
SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA - PPGCASA

RICARDO LÍVIO SANTOS MARQUES

IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO ALUVIONAR DE OURO
NA BACIA DO RIO BOIA – AMAZONAS



MANAUS - AM
2022

RICARDO LÍVIO SANTOS MARQUES

**IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO ALUVIONAR DE OURO
NA BACIA DO RIO BOIA – AMAZONAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais e Sustentabilidade na Amazônia.

Orientadora: Maria Teresa Gomes Lopes, Dra.

MANAUS - AM
2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M357i Marques, Ricardo Lívio Santos
Impactos ambientais da mineração aluvionar de ouro na bacia do
rio Boia – Amazonas / Ricardo Lívio Santos Marques . 2022
119 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Maria Teresa Gomes Lopes
Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e
Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do
Amazonas.

1. Mercúrio. 2. Degradação ambiental. 3. Garimpo aluvionar de
ouro. 4. Fluorescência de raios-x. I. Lopes, Maria Teresa Gomes. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

RICARDO LÍVIO SANTOS MARQUES

**IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO ALUVIONAR DE OURO
NA BACIA DO RIO BOIA – AMAZONAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais e Sustentabilidade na Amazônia.

Aprovado em 07 de março de 2022.

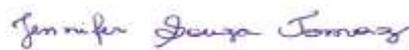
BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Gomes Lopes. Presidente.
Universidade Federal do Amazonas



Prof.^a Dr.^a Therezinha de Jesus Pinto Fraxe. Membro.
Universidade Federal do Amazonas



Prof.^a Dr.^a Jennifer Souza Tomaz, Membro.
Universidade Federal do Amazonas



Prof.^o Dr. Carlos Augusto da Silva. Membro.
Universidade Federal do Amazonas

À Amazônia e seus povos,

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À Superintendência de Polícia Federal no Amazonas – SRAM.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Sustentabilidade na Amazônia – PPGCASA da Universidade Federal do Amazonas.

Agradeço!

RESUMO

O aumento constante do preço do ouro no mercado internacional estimulou no Brasil a retomada e crescimento da mineração artesanal deste metal, aludida na forma de garimpos. O processo de extração do ouro, neste modelo, opera com técnicas e métodos rudimentares que provocam relevantes danos ambientais. A obtenção do minério, nesse contexto de precariedade normativa e tecnológica, fundamenta-se em um processo profundamente dependente do mercúrio que, nas situações incautas de garimpo, torna-se uma preocupante fonte de contaminação ambiental química por metais pesados. Esta pesquisa tem como objetivo apresentar uma metodologia que reúne informações de sensores remotos multifonte, trabalhos em campo e análises químicas por fluorescência de raios-x para qualificar e quantificar os impactos ambientais causados pela mineração aluvionar de ouro na bacia do rio Boia. A avaliação da contaminação ambiental por metais pesados foi estendida para Amazônia Ocidental, utilizando amostras descartadas do processo de amalgamação do ouro e recuperação do mercúrio. Foram mapeados 1466 locais com degradação ambiental profunda na bacia do rio Boia que obtiveram as feições da geomorfologia fluvial e provocam assoreamento. A contaminação por mercúrio nos ambientes amazônicos avança conforme os garimpos disseminam-se pelos rios, chegando mesmo a regiões ermas impulsionados pelo elevado preço do ouro. Foram identificados focos regionais de lançamento de materiais contaminados por mercúrio, especialmente no rio Japurá, com a capacidade de contaminar milhões de litros de água potável diariamente. A ineficiência e inépcia da atuação preventiva e fiscalizadora é resultante principalmente da ausência do Estado em muitas áreas com grande desafio logístico e uma legislação incipiente.

Palavras-chave: Mercúrio, degradação ambiental, garimpo aluvionar de ouro, fluorescência de raios-x.

ABSTRACT

The constant increase in the price of gold in the international market stimulated in Brazil the resumption and growth of artisanal mining of this metal, alluded to in the form of garimpos. The gold extraction process, in this model, operates with rudimentary techniques and methods that cause significant environmental damage. Obtaining ore, in this context of normative and technological precariousness, is based on a process that is deeply dependent on mercury, which, in unsuspecting mining situations, becomes a worrying source of chemical environmental contamination by heavy metals. This research aims to present a methodology that gathers information from multi-source remote sensors, field work and chemical analysis by x-ray fluorescence to qualify and quantify the environmental impacts caused by alluvial gold mining in the Boia River basin. The evaluation of environmental contamination by heavy metals was extended to the Western Amazon, using samples discarded from the gold amalgamation process and mercury recovery. A total of 1466 sites with deep environmental degradation were mapped in the Boia river basin that obliterate the fluvial geomorphology features and cause silting. Mercury contamination in Amazonian environments progresses as mining spreads along the rivers, even reaching remote regions driven by the high price of gold. Regional sources of mercury-contaminated material were identified, especially in the Japurá River, with the capacity to contaminate millions of liters of drinking water daily. The inefficiency and ineptitude of preventive and supervisory action is mainly the result of the absence of the State in many areas with great logistical challenges and incipient legislation.

Key-words: Mercury, environmental degradation, alluvial gold mining, x-ray fluorescence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Amazônia Legal. Sistema de referências de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Fonte de dados vetoriais – IBGE 2021, Exército Brasileiro. Fundo de imagens – Google Setelite. Fonte: Marques (2022).	20
Figura 2. Mapa com a geologia da área de acordo com mapeamento ao milionésimo CPRM 2006. Sistema de referências de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Fonte de dados vetoriais – CPRM 2006. Fundo grid DEM SRTM. Fonte: Marques (2022).	24
Figura 3. Modelo de deposição de minerais pesados em ambiente fluvial meandrante. Fonte: Edwards (1986).	26
Figura 4. Produção de raios-X característicos no interior dos átomos (A) e transferência de elétrons entre subníveis (B). Fonte: Bruker (2017).	36
Figura 5. Energia de Ligação dos elétrons das camadas K, L, M em função do número atômico, Z (A) e exemplo de diagrama de níveis energéticos e intensidades relativas de emissão de raios-x característicos do elemento Ferro (B). Fonte: Nascimento Filho et al. (1998).....	38
Figura 6. Geometria típica do método analítico por EDXRF – tubo de raios-x e detector posicionados com ângulo de 45° em relação a normal da amostra; amostra expeça; detector distante da amostra cerca de 1cm. Fonte: Bruker, 2017.	39
Figura 7. Ângulos de incidência e interações com a superfície lisa – quando o ângulo de incidência for maior que o ângulo crítico ocorre refração, quando menor, reflexão, quando exatamente no ângulo crítico a energia permanece paralela a superfície. Fonte: Nascimento Filho et al. (1998).	40
Figura 8. Geometria típica do método analítico por TXRF – Amostras ultrafinas, feixe de raios-x com baixos ângulos de incidência, detector posicionado muito próximo da amostra e 90° do feixe incidente (aproximadamente). Fonte: Bruker (2017).....	41
Figura 9. Espectro TXRF para elementos com a mesma concentração – 1 ppm. A quantidade de pulso de energia emitidas é maior conforme o número atômico. Fonte: Bruker (2017).	42
Figura 10. Mapa de Localização Sistema de referências de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Fonte de dados vetoriais – IBGE. Fonte: Marques (2022).	43
Figura 11. Reflectância e comprimento de onda dos alvos analisados na banda NIR. Fonte: Crosta, 1993).	47

Figura 12. Áreas estudadas em detalhamento na bacia do rio Boia.	50
Figura 13. Feições interpretadas nas imagens de satélite e sua representação em campo. Água (1); solo exposto/assoreamento (2); área de vegetação.	51
Figura 14. Localização das amostras ambientais (água e sedimentos) do rio Boia.....	53
Figura 15. Localização amostras regionais usadas na análise de mercúrio (Hg).	53
Figura 16. Equipamento recuperador de mercúrio (retorta) (A) e sua representação funcional (B): o recipiente que recebe o amalgama (1), os bicos de chama (2), o tubo que direciona o vapor (3) e o recipiente onde o vapor condensa e retorna ao estado líquido (4).....	57
Figura 17. Ouro obtido no processo de “queima do amálgama”.....	59
Figura 18. Equipamento analíticos usados na pesquisa: (1) - Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) e (2) - Fluorescência de Raios-X por Reflexão Total (TXRF) Fonte: Marques (2020).	61
Figura 19. Esquema básico de pré-tratamento com hidrofobização e preparação de amostras para análise.....	67
Figura 20. Balsas de garimpo em atividade no rio Boia.....	68
Figura 21. Balsa lavrando sedimentos na margem do rio na linha d’água. Assoreamento (A) e derrubada da vegetação para dentro do rio (B). Fonte: Marques (2020).	69
Figura 22. Processo de lavra aluvionar no rio Boia: 1- Dragagem do sedimento; 2 – Descarte do rejeito (assoreamento); 3 – Rampa carpetada; e 4 – Ouro amalgamado. Fonte: Marques (2020).....	70
Figura 23. Bacia do rio Boia e principais características geomorfológicas. Retângulos indicam locais detalhados na figura 24.....	71
Figura 24. Detalhes em pseudocolor evidenciando feições geomorfológicas da bacia do rio Boia: d1) Estrutura linear provocando captura de drenagem, d2) Captura de drenagem, d3) estrutura circular com padrão dendrítico de drenagem radial.	71
Figura 25. Situação da área 1 do estudo em 2001 (área preservada), em 2020 (área com degradação) e interpretações. Fonte: Marques (2020).....	74
Figura 26. Exemplos de degradação ambiental no trecho A da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020). 75	
Figura 27. Exemplos de degradação ambiental no trecho B da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020). 76	
Figura 28. Análises quantitativas para solo exposto da Área 1.	78
Figura 29. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 1.	79

Figura 30. Situação da área 2 do estudo em 2001 (área preservada), em 2020 (área com degradação) e interpretações. Fonte: Marques (2020).....	80
Figura 31. Exemplos de degradação ambiental no trecho C da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).	81
Figura 32. Exemplos de degradação ambiental no trecho D da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).	82
Figura 33. Análises quantitativas para solo exposto da área 2.	84
Figura 34. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 2.	85
Figura 35. Situação da área 3 do estudo em 2001 (área preservada), em 2020 (área com degradação) e interpretações. Fonte: Marques (2020).....	86
Figura 36. Exemplos de degradação ambiental no trecho E da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).	87
Figura 37. Exemplos de degradação ambiental no trecho F da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).	88
Figura 38. Análises quantitativas para solo exposto da área 3.	90
Figura 39. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 3.	91
Figura 40. Situação da área 1 interpretada sobre imagens do sistema PLANET (2020). Fonte: Marques (2020).	92
Figura 41. Exemplos de degradação ambiental no trecho A da bacia do rio Boia, usando Imagens de maior resolução, PLANET (2020). Fonte: Marques (2020).	93
Figura 42. Exemplos de degradação ambiental no trecho B da bacia do rio Boia, usando Imagens de maior resolução, PLANET (2020). Fonte: Marques (2020).	94
Figura 43. Análises quantitativas para solo exposto da área 1, imagens PLANET (2020).	95
Figura 44. Amostra original de água de retorta, mostrando as duas fases presentes: mercúrio e água.	99
Figura 45. Torres de mercúrio para as amostras analisadas.....	102
Figura 46. Correlação positiva entre as concentrações de mercúrio e ouro nas águas de retorta.....	103
Figura 47. Gráficos comparativos entre os resultados analíticos de EDXRF para mercúrio de amostras de água de retorta.....	106
Figura 48. Correlação negativa entre os resultados analíticos de mercúrio e ouro para as amostras de mercúrio metálico.	109

Figura 49. Correlação negativa entre os resultados analíticos de mercúrio e platinóides para as amostras de mercúrio metálico.....	110
Figura 50. Mapa de calor (kernel) para a degradação ambiental no rio Boia e a indicação da contaminação dos locais onde foram identificadas contaminação por mercúrio.....	111
Figura 51. Mapa de calor (kernel) para as amostras regionais de água de retorta. O rio Juruá concentra o maior potencial de contaminação por essa modalidade.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos sistemas LANDSAT e imagens utilizadas.....	45
Tabela 2. Características dos sistemas PLANET.	47
Tabela 3. Identificação e localização das amostras do rio Boia analisadas.....	54
Tabela 4. Propriedades físicas do mercúrio e do ouro.....	58
Tabela 5. Resumo dos resultados quantitativos para a área degradada - área 1.....	77
Tabela 6. Análises quantitativas para solo exposto Área 1.	77
Tabela 7. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 1.....	78
Tabela 8. Resumo da degradação para a área 1.	79
Tabela 9. Resumo dos resultados quantitativos para a área degradada - área 2.....	83
Tabela 10. Análises quantitativas para solo exposto da área 2.....	84
Tabela 11. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 2.....	85
Tabela 12. Resumo da degradação para a área 2.....	85
Tabela 13. Resumo dos resultados quantitativos para a área degradada - área 3.....	89
Tabela 14. Análises quantitativas para solo exposto da área 3.....	90
Tabela 15. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 3.....	91
Tabela 16. Resumo da degradação para a área 3.....	91
Tabela 17. Análises quantitativas para solo exposto da área 1, imagens PLANET (2020).	95
Tabela 18 a e b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água do rio Boia.....	96
Tabela 19 a e b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água do rio Boia.....	98
Tabela 20. A, b e c. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água de retorta.....	101
Tabela 21. Resultados do EDXRF, usando a calibração Oxide 3 phases para amostras água de retorta.	104
Tabela 22. Resultados do EDXRF, usando a calibração Oxide 2 phases para amostras água de retorta.	105
Tabela 23. Resultados do EDXRF, usando a calibração Geoexploration-OX para amostras água de retorta.	106
Tabela 24. Comparação entre todos os resultados analíticos para mercúrio para amostras de água de retorta.....	106

Tabela 25. a e b. Resultados analíticos EDXRF gerais e de médias para as amostras de mercúrio metálico.	108
--	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1. Geral	18
2.2. Específicos.....	18
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1. Amazônia Legal.....	20
3.2. Rios tropicais e caracterização ambiental da área de estudos	21
3.3. Geomorfologia fluvial	22
3.4. Geologia na Bacia do Rio Boia	24
3.5. Mineração aluvionar – <i>Placer</i>	26
3.6. Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto.....	27
3.7. Toxicidade do mercúrio.....	29
3.8. Legislação de contaminação ambiental por mercúrio	31
3.9. Análises químicas em amostras de interesses ambientais.	34
3.10. Técnicas Analíticas por Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) e por Reflexão Total (TXRF).....	35
3.10.1. Excitação dos elementos	36
3.10.2. Fluorescência de raio-x por dispersão de energia (EDXRF).....	38
3.10.3. Fluorescência de raios-x por reflexão total (TXRF)	39
4. MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1. Área de pesquisa.....	43
4.2. Análises e interpretações geomorfológicas	44
4.2.1. Dados – Imagens de Satélite	45
4.2.2. Dados – DEM.....	48
4.2.3. Interpretações em ambiente GIS.	48
4.2.4. Estudos geomorfológicos utilizando ferramentas GIS.....	49
4.3. Amostras de interesse ambiental utilizadas	52
4.3.1. Origem das amostras	53
4.3.2. Amostras ambientais – Rio Boia.....	55
4.3.3. Amostras ambientais – água de retorta	57
4.4. Análises das amostras por FRX.....	60
4.4.1. Instrumentação	61
5. RESULTADOS	68
5.1. Alterações morfológicas e degradação ambiental	72
5.1.1. Área 1	73

5.1.2. Área 2	79
5.1.3. Área 3	85
5.1.4. Área 1 - PLANET	92
5.2. Resultados analíticos por FRX	95
5.2.1. Amostras ambientais rio Boia	95
5.2.2. Amostras regionais – água de retorta	99
5.3. Montante da degradação ambiental	110
6. CONCLUSÕES.....	112
8. REFERÊNCIAS.....	114

1. INTRODUÇÃO

Em março do ano de 2001 o preço do ouro no mercado mundial inicia uma curva de ascensão que dura até agosto de 2011. No dia 11 do mês de fevereiro de 2001, o ouro possuía o valor de 259,90 USD/oz¹, atingiu o seu auge de preço, 1740,20 USD/oz, em 12 de agosto de 2011. A partir de 2011 a curva de crescimento é substituída por um platô no qual o preço do ouro variou em torno de 1500USD/oz. A partir de setembro de 2018, iniciou nova curva ascendente no valor até atingir seu novo máximo histórico de 1928USD/oz, em 27 de agosto de 2020.

O aumento aproximado de 669,57% no preço do ouro estimulou um novo ciclo de prospecção mineral no Brasil. Intensificou as atividades de mineração artesanal, com a reativação de antigas regiões produtoras, a maioria delas nunca totalmente abandonadas, e, posteriormente, com a abertura de novas frentes.

A Amazônia Legal tem sido alvo de ocorrências de mineração artesanal, tradicionalmente encontradas nos estados do Mato Grosso, cercanias de Pontes Lacerda, Alta Floresta e Poconé; Pará com destaque para a Bacia do Tapajós, Serra Pelada, Cumarú do Norte; no Rio Madeira que corta os estados de Rondônia e Amazonas e, mais recentemente, o Amazonas com, pelo menos, 3 regiões distintas: fronteira leste representando a continuidade da Província Tapajós, centro-oeste do estado no Rio Jutuí, e extremo oeste na fronteira com a Colômbia e, mais recentemente, em tributários do Rio Juruá.

A Atividade de extração mineral interage com o meio ambiente de formas proporcionalmente complexas aos números e tipos de nichos ecológicos existentes, suas características ambientais, distâncias e fragilidade. Por outro lado, essa interação opera de maneira inversamente proporcional ao nível tecnológico empregado. Os garimpos, por utilizarem tecnologias artesanais na obtenção dos bens minerais, operando com métodos rudimentares no sentido de maior retorno com o menor investimento, transferem para o meio ambiente o ônus inerente à atividade.

Os garimpos na região Amazônica são fortemente associados às drenagens – ouro de aluvião – progressivamente se desenvolvendo para as planícies aluviais adjacentes ou,

¹ USD/oz – Dólares por Onça Troy – medida de valoração (cotação e negociação) do ouro no mercado internacional para entrega imediata, chamada OURO SPOT. Onça Troy é unidade de massa para comercialização de metais preciosos onde 1oz equivale a 31,10349 gramas

quando em vales encaixados, para o regolito. Os impactos ambientais produzidos pelos garimpos nas drenagens são de natureza física, química e biológica. As consequências físicas são marcadas nas alterações produzidas sobre a geomorfologia fluvial, no assoreamento das drenagens, no desbarrancamento das margens, turbidez da água. As influências químicas são relacionadas a contaminações por metais pesados introduzidos direta e/ou indiretamente, com destaque para o mercúrio, por hidrocarbonetos e lixos industriais e domésticos. Os impactos biológicos são principalmente relacionados redução e extinção de espécies, bem como a poluição e contaminação perene do meio.

A mineração ilegal de ouro, tem acontecido na região Amazônica, a exemplo, na bacia hidrográfica do rio Boia. O monitoramento sobre a evolução dos garimpos no Rio Boia e seu principal afluente Igarapé Preto, teve início no ano de 2016 com a identificação de aproximadamente 250 alterações na paisagem relacionadas a atividade garimpeira. Durante trabalhos em campo, realizados no mês de setembro de 2020, foram checados sítios com impactos ambientais interpretados sobre as imagens de satélite, que necessitam de estudos adicionais para caracterizar e dimensionar com precisão.

Recursos técnicos, bancos de dados digitais, métodos de geoprocessamento e sensoriamento remoto são ferramentas imprescindíveis no mapeamento das áreas garimpadas, especialmente empregando dados multitemporais. Possibilitam a rápida obtenção de informações espaciais em diferentes datas, permitindo acompanhar a evolução da paisagem. Os modelos de imageamento orbital operados pelos sistemas LANDSAT, e PLANET fornecem dados atuais e de anos anteriores, são imprescindíveis para extrair informações geográficas sobre a área com sua configuração morfológica atual e em momentos anteriores, possibilitando mapear as alterações sofridas. Modelos digitais de terreno podem ser empregados para entender o arcabouço morfo-estrutural de uma bacia e elaborar o mapeamento da área anterior ao garimpo. As imagens do sistema PLANET possuem a melhor resolução temporal e espacial dentre as utilizadas, possibilitam a obtenção de imagens viáveis para acompanhar a evolução mensal ou semanal dos alvos de alteração florestal.

Informações sobre alterações químicas do meio ambiente na bacia hidrográfica do rio Boia podem ser obtidas a partir da caracterização de amostras coletadas em campo. Entre as ferramentas de análises químicas, a Fluorescência de Raios-X por Reflexão Total – TXRF *Total Reflectance X-ray fluorescence* – e por Difração de Energia – EDXRF

Energy Dispersion X-ray fluorescence – podem subsidiar informações da forma como a contaminação por mercúrio é realizada durante as atividades de extração do ouro.

A carência de informações geológicas sobre a área de estudo é uma consequência do difícil acesso, das dificuldades de mapeamento impostas pela floresta e pela carência de investimentos em projetos de reconhecimento geológico básico no Amazonas. Para auxiliar na caracterização do arcabouço geológico e acrescentar conhecimento do substrato sobre o qual a ocorrência de ouro se apoia, serão realizadas interpretações Morfoestruturais para a bacia do Rio Boia. Os dados de Modelo Digital de Terreno (DEM) serão obtidos e utilizados nos estudos sobre o tema. Estas interpretações focam em definir zonas de resposta geoestrutural homólogas e segmentá-las conforme os domínios; busca-se também marcar as principais feições estruturais regionais e reativações destas estruturas durante o quaternário.

Os objetivos dessa pesquisa confluem de duas vertentes que buscam identificar e caracterizar os impactos ambientais causados pela mineração no Rio Boia e Igarapé Preto. A primeira versa sobre detectar, classificar e quantificar as principais alterações antrópicas na geomorfologia Fluvial do Rio Boia e Igarapé Preto. A caracterização física do meio ambiente anterior à atividade garimpeira é fundamental para comprovar as alterações antrópicas posteriores causadas pela mineração. A segunda aborda as formas como a contaminação química por metais pesados ocorre.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Qualificar e quantificar por meio de sensores remotos multifonte de fonte aberta, trabalhos em campo e análises químicas por Fluorescência de Raios-X por Reflexão Total os impactos ambientais causados pela mineração aluvionar de ouro na bacia do Rio Boia, afluente da margem esquerda do rio Jutuí.

2.2. Específicos

- Relatar os indícios de impactos ambientais flagrantes causados pela mineração aluvionar de ouro no meio ambiente físico na bacia do rio Boia;

- Constatar, qualificar e quantificar alterações antrópicas relacionadas a mineração aluvionar e os danos que estas causaram na geomorfologia fluvial do Rio Boia e Igarapé Preto;
- Concatenar as informações interpretadas sobre os dados de sensores remotos com as feições da paisagem observadas em campo e registradas por meio de levantamentos fotográficos;
- Verificar a contaminação por Mercúrio no Rio Boia mediante análises de amostras de águas, sedimentos e mercúrio utilizando Fluorescência de Raios-X;
- Analisar amostras do processo de recuperação de mercúrio vinculado à atividade de mineração aluvionar e avaliar o potencial tóxico.
- Testar o potencial do uso das ferramentas sensores remotos de fonte aberta, sistemas de informação geográfica, trabalhos em campo e análises laboratoriais na avaliação de impactos ambientais de rios amazônicos afetados por garimpo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A mineração artesanal de ouro no Brasil recebe o nome de ‘garimpo’. “Garimpo é definido como a localidade onde é desenvolvida a atividade de extração de substâncias minerais garimpáveis, com aproveitamento imediato do jazimento mineral, que, por sua natureza, dimensão, localização e utilização econômica, possam ser lavradas, independentemente de prévios trabalhos de pesquisa, segundo critérios técnicos do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM” (BRASIL, 2008)”.

Dentre os minerais garimpáveis relacionados pela ANM – Agência Nacional de Mineração, antigo DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral – destacam-se: ouro, diamante, cassiterita, columbita, tantalita e wolframita; a sheelita, gemas (pedras preciosas), rutilo, quartzo, berilo, muscovita, espodumênio, lepidolita, feldspato, mica e outros, nas formas aluvionar, eluvionar e coluvial (BRASIL, 1989).

Garimpo é a localidade onde é possível explorar bem mineral em seu estado natural, pronto para o uso destinado – “emprego imediato”. O processo de localização e dimensionamento da jazida para aproveitamento econômico independem de pesquisa com técnicas científicas. Não é necessário, por suas características autóctones, o emprego de processos físicos ou químicos, sejam estes industriais ou metalúrgicos, para a obtenção do bem mineral. Observa-se que a legislação veda o emprego de artifícios industriais,

tecnológicos e rigor de método. As formas de ocorrência descritas em lei: Aluvionar, eluvionar e coluvial, especificam que o material a ser garimpado deve ter seu jazimento no solo, porção inconsolidada do substrato.

3.1. Amazônia Legal

A Amazônia Legal corresponde à área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (BRASIL, 2007). A região é composta por 772 municípios distribuídos da seguinte forma: 52 municípios de Rondônia, 22 municípios do Acre, 62 do Amazonas, 15 de Roraima, 144 do Pará, 16 do Amapá, 139 do Tocantins, 141 do Mato Grosso, bem como, por 181 Municípios do Estado do Maranhão situados ao oeste do Meridiano 44°, dos quais, 21 deles, estão parcialmente integrados na Amazônia Legal. Possui uma superfície aproximada de 5.015.067,75 km², correspondente a cerca de 58,9% do território brasileiro (IBGE, 2021a) (Figura 1).

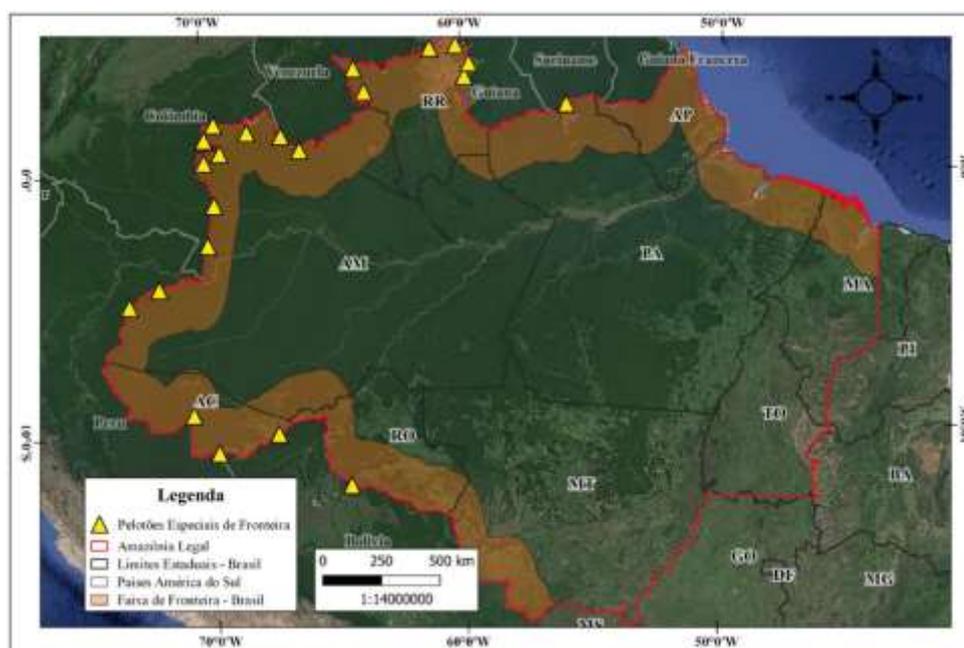


Figura 1. Amazônia Legal. Sistema de referências de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Fonte de dados vetoriais – IBGE 2021, Exército Brasileiro. Fundo de imagens – Google Setelite. Fonte: Marques (2022).

O conceito de Amazônia Legal foi instituído pelo governo brasileiro como forma de planejar e promover o desenvolvimento socioeconômico nos estados que possuem em seu território porções do bioma Amazônia. Circunscreve a totalidade dos estados do Acre,

Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima Mato Grosso e Tocantins, e a porção oeste do estado do Maranhão. Os estados da Região Amazônica compartilham desafios econômicos, políticos e sociais semelhantes ((O)) ECO (2021).

As bases cartográficas digitais obtidas no site do IBGE (2021b), possibilitam o entendimento das características físicas e políticas da região. A Amazônia Legal inclui todo bioma da Amazônia no Brasil, partes do bioma Cerrado e do Pantanal, esta razão, aliada a grande extensão geográfica, características climáticas e os processos ecológicos, faz com que a região possua a maior biodiversidade do planeta. Apresenta a maior bacia hidrográfica do mundo. Em contrapartida a estas características, a Amazônia Legal possui a menor malha viária nacional, e com longas distâncias entre os grandes centros regionais. Aproximadamente 43% da área total da região é composta por Unidade de Conservação e Terra Indígena. É uma região de baixa densidade demográfica - com aproximadamente 4 habitantes por km². Cerca de 56% da população indígena brasileira reside na região que abriga 36% do rebanho bovino e 23% das terras cultivadas com grãos. Amazônia Legal possui o maior número de focos de calor – incêndios florestais – do Brasil, concentrados principalmente nos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia e Amazonas (INPE, 2020a, b).

3.2. Rios tropicais e caracterização ambiental da área de estudos

A bacia hidrográfica do rio Amazonas, cujo rio principal assume os nomes Marañon, Solimões e Amazonas, possui área total de 6.925.674 km², ocupando porções territoriais dos países: Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela (OTCA, 2006). O rio principal – Amazonas - estende-se por aproximadamente 6.000km desde as nascentes situadas nos Andes até a foz no Oceano Atlântico. A precipitação média anual para região é de 2.460 mm, variando entre 200 mm nos andes e 6.000 mm no sopé da cordilheira (MOLINIER et al., 1995); esta pluviometria possibilita classificar o clima de úmido a superúmido. A bacia situa-se entre as latitudes aproximadas 5° N e 20° S, com temperaturas médias anuais entre 25° e 29° C, sendo próximas de 0° na cordilheira andina. O rio Amazonas possui o rio Jutuí como um dos maiores afluentes da margem direita; o rio Boia, objeto desta pesquisa, é o principal afluente da margem esquerda do rio Jutuí.

Regiões tropicais são as áreas do globo localizadas geograficamente entre os Trópicos de Câncer (23° 27'N) e Capricórnio (23° 27'S), consequência do movimento de

precessão do planeta – Zona Tropical ou Intertropical. Esta zona recebe a maior taxa de irradiação solar anual com os raios atingindo a superfície sempre em altos ângulos. A energia solar influencia o ciclo hidrológico mais diretamente nos trópicos que em outras regiões do planeta (LATRUBESSE et al., 2005).

A bacia hidrográfica do Rio Boia situa-se geograficamente na Zona de Convergência Intertropical (POMEROL et al., 2013). A média pluviométrica anual, obtida entre os anos de 1991 e 2007 na estação meteorológica de Fonte Boa/AM – mais próxima da área de estudo – é de 2.468mm (NASCIMENTO, 2008). O MMA/ICMBio (2011) relata que a Folha AS.19 IÇÁ – corte internacional ao milionésimo² – onde a área de estudo está inserida; possui clima classificado genericamente como Af (ALCARDE et al., 2013): constantemente úmido, com temperatura do mês mais frio sempre superior a 18°C e variação térmica entre as médias do mês mais quente e mais frio inferior a 5°C. De acordo com a classificação brasileira (BRASIL, 1991), o MMA/ICMBio (2011) informa que na Reserva Extrativista de Jutaí, extensão estudada dentro do contexto regional da área de pesquisa, apresenta 5 formações florestais: Floresta Ombrófila Aberta Aluvial, Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas, Floresta Ombrófila Densa Aluvial, Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, Formações Pioneiras com Influência Fluvial ou Lacustre. Por estas características o Rio Boia é considerado, para efeitos dessa pesquisa, um rio tropical.

Os rios tropicais são caracterizados com grandes áreas de bacia, curso principal longo, possuem significativa diversidade geomorfológica (variando de acordo com as condições morfoclimáticas). Esses rios drenam áreas tropicais cobertas por florestas equatoriais e podem transportar abundante carga de sedimentos em suspensão (SINHA e LATRUBESSE, 2020).

3.3. Geomorfologia fluvial

A geomorfologia fluvial estuda os processos e as formas relacionadas com o escoamento dos rios (CHRISTOFOLETTI, 1980). Os rios são os agentes responsáveis pelo transporte dos materiais intemperizados nas áreas topograficamente mais altas para as áreas mais baixas. São os canais de escoamento (escoamento fluvial) integrantes do

² representação de toda a superfície terrestre, na projeção cônica conforme de LAMBERT na escala de 1:1.000.000, obtida com a divisão do planeta em 60 fusos com amplitude 6°.

ciclo hidrológico e sua alimentação se dá através das águas superficiais e subterrâneas. O escoamento fluvial compreende a quantidade total de água que flui no canal de drenagem, incluindo o escoamento pluvial imediato e a parcela de água infiltrada que se junta ao lençol freático e, lentamente, alimenta os cursos d'água no decorrer do tempo (CHRISTOFOLETTI, 1980). A proporção de águas superficiais e subterrâneas que alimentam o curso d'água é função do clima, solo, das rochas, estruturas geológicas, cobertura vegetal, forma das encostas e vertentes.

Bacia de drenagem constitui a principal unidade nas análises sobre geomorfologia fluvial (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017). É definida como toda a área de captação pluvial que pode escoar superficialmente (acanalado ou não). As bacias de drenagem são delimitadas geograficamente dentro dos contornos do divisor de águas, também chamado interflúvio, constituindo a área de drenagem. Condições geológicas e geomorfológicas podem, em situações específicas, comunicar águas de bacias adjacentes tanto em superfície como em subsuperfície (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017), característica esta observada na pesquisa em curso.

No que tange ao trabalho dos rios, os processos que exortam a geomorfologia fluvial, incluindo erosão, transporte e deposição de sedimentos; são fortemente ligados ao ciclo da água (MAGALHÃES JÚNIOR e BARROS, 2020; CHRISTOFOLETTI, 1980). Os mesmos autores ressaltam que variáveis climáticas, geológicas, pedológicas, a cobertura ou uso do solo, além do quadro morfológico, exercem significativa importância no regime hidrossedimentológico dos cursos d'água.

Rios Tropicais apresentam grande variedade de formas em seus canais (padrões), frequentemente ocorrendo transição de uma morfologia para outra, especialmente em grandes bacias hidrográficas (LATRUBESSE et al., 2005). As morfologias fornecem informações sobre as características e comportamentos dos sistemas de drenagem. Os padrões de um rio podem ser considerados em diferentes escalas, dependendo simultaneamente do tamanho do rio e da porção do sistema fluvial em análise (SCHUMM, 1985); o uso de terminologias são aplicáveis para segmentos regionais selecionados dos canais: sistemas de drenagem de canais simples e sistemas de multicanais.

A interação dos processos hidrológicos, geológicos, hidráulicos, e geomorfológicos, em todas as escalas, mostram que o sistema fluvial como um todo não

pode ser negligenciado nas análises, mesmo quando apenas um aspecto é objeto de estudo (SCHUMM, 1985). Esta afirmação corrobora com a importância de uma abordagem complexa, por bacia hidrográfica, nos estudos de geomorfologia fluvial. São definidas três categorias principais dos canais de drenagem, dependendo da natureza do material pelo qual o rio flui, cada qual com suas características morfológicas e hidrossedimentológicas: controlados pelo substrato rochoso (embasamento), semi-controlado e aluvial (SCHUMM, 1985). As drenagens controladas pelo substrato rochoso tendem a ser mais estáveis em sua morfologia e geografia, as aluviais são mais susceptíveis a variações nos padrões de drenagem e morfologia, as semicontroladas se referem a rios controlados localmente pelo embasamento e suas estruturas geológicas.

3.4. Geologia na Bacia do Rio Boia

Conforme exposto no Programa Geológico do Brasil – Mapas estaduais na escala 1:1.000.000 (CPRM, 2006), a área onde a pesquisa se desenvolve está sobre rochas das formações Solimões (N12s) e Iça (N3i). Sobre essas a CPRM (2006) também mapeia a Depósitos de planícies aluvionares (N4a2) (Figura 2). Estas formações geológicas fazem parte da Bacia Sedimentar Fanerozoica do Solimões.

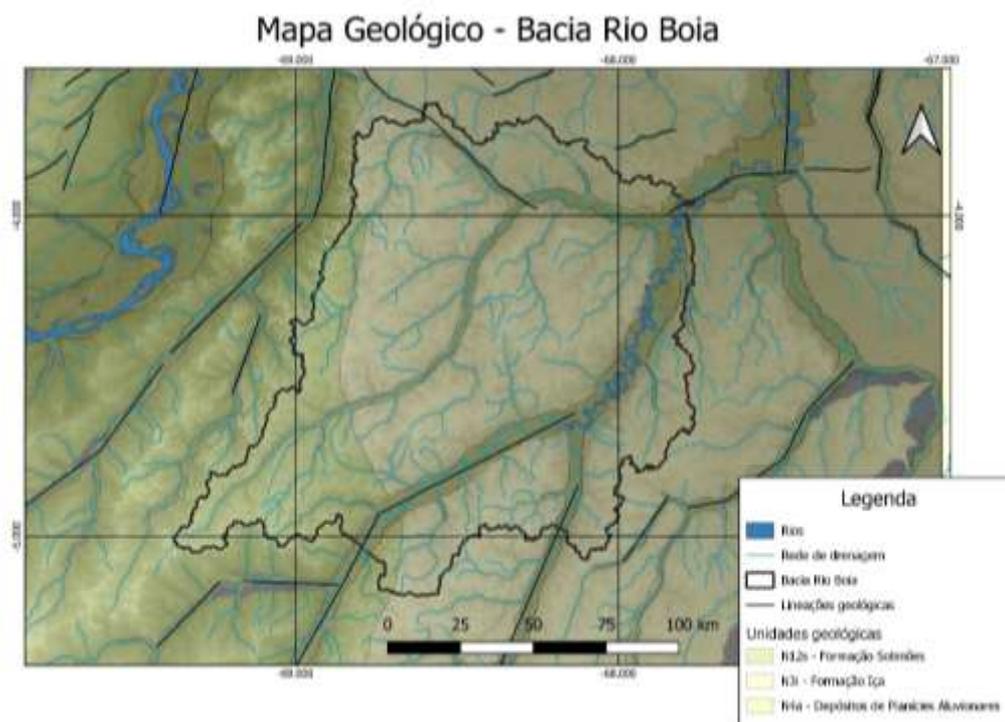


Figura 2. Mapa com a geologia da área de acordo com mapeamento ao milionésimo CPRM 2006. Sistema de referências de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Fonte de dados vetoriais – CPRM 2006. Fundo grid DEM SRTM. Fonte: Marques (2022).

A Bacia Sedimentar do Solimões apresenta orientação aproximada leste-oeste, desenvolve-se sobre rochas cristalinas e sedimentares proterozóicas da Província Amazônica Central, e se encontra compartimentada pelo Arco Carauari e Juruá (SILVEIRA e SOUZA, 2017). É limitada a leste pelo Arco Purus, a oeste pelo Arco de Iquitos, a sul com o Escudo Brasileiro e a norte pelo Escudo das Guianas (SILVEIRA e SOUZA, 2017).

A Formação Solimões foi definida para agrupar argilitos avermelhado a acinzentados com níveis de arenitos conchíferos, linhito e, mais para o topo, arenitos brancos finos a grossos possuindo grãos angulosos a subarredondados (CPRM, 2006). Os sedimentos apresentam estrutura maciça e, subsidiariamente, com laminação planar, estratificação plano-paralela, cruzada planar e acanalada de pequeno a grande porte (CPRM, 2006). Corresponde a uma sedimentação molássica distal com a porção superior evoluindo para fácies fluvial e lacustre (CPRM, 2006). A unidade tem idade variável entre Eomioceno ao Plioceno, de acordo com a área de amostragem. É rica em fósseis com abundância de palinórfos, permitindo importantes estudos paleoambientais e bioestratigráficos (SILVEIRA e SOUZA, 2017).

A Formação Iça (N3i) reúne arenitos amarelo-avermelhados finos a conglomeráticos, friáveis, com siltitos e argilitos subordinados (PEREIRA, 2016). A seção inferior é constituída por siltitos e/ou argilitos maciços a finamente laminados, lenticulares, intercalados com arenitos estratificados; a porção superior é formada por arenitos conglomeráticos (CPRM, 2006). A sedimentação apresenta características continentais sob condições fluviais de alta energia e clima árido (CPRM, 2006). Possui fósseis de fauna e flora pleistocênica e encontra-se em discordância erosiva sobre os sedimentos da Formação Solimões (CPRM, 2006).

Os Depósitos de Planícies Aluvionares (N4a2) são representados por sedimentos arenosos a argilosos inconsolidados a semi-consolidados com níveis de cascalho e matéria orgânica (CPRM, 2006). São constituídos predominantemente por areia quartzofeldspática de granulometria variável e camadas argilosas maciças com níveis arenosos de espessura variável. Exibe quantidades variáveis de matéria orgânica imatura (CPRM, 2006). Revelam morfologia típica de planície sedimentar com padrão de canais fluviais meandrantés, lagos e meandros abandonados que registram as migrações laterais dos rios (CPRM, 2006).

3.5. Mineração aluvionar – *Placer*

Depósitos do tipo *Placer* trata-se de concentrações mecânicas de minerais e/ou minérios resistentes ao intemperismo que foram erodidos das rochas fonte, transportados e depositados em ambientes sedimentares (EDWARDS, 1986); esta pesquisa foca em ambientes de sedimentação fluvial. São constituídos por processos sedimentares ordinários de segregação e concentração de minerais em função da densidade, realizadas por movimentos de águas (Figura 3). Divide-se em dois grandes grupos de acordo com o ambiente: alóctone e autóctone. Os depósitos Autóctones são formados no ambiente nos quais são encontrados. Esta pesquisa estuda aspectos relacionados ao tipo Alóctone. Evans (1988) descreve este tipo como constituído por materiais que foram transportados para o ambiente nos quais se depositam, incluindo material terrígeno (clástico) e/ou piroclástico.

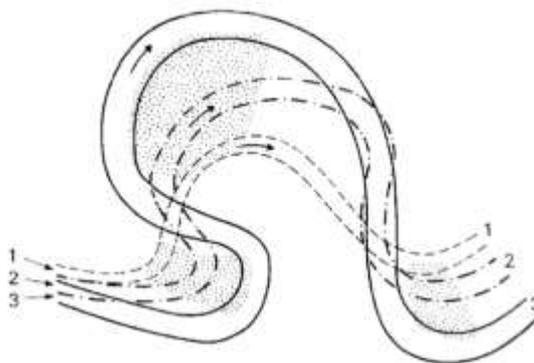


Figura 3. Modelo de deposição de minerais pesados em ambiente fluvial meandrante. Fonte: Edwards (1986).

A área em estudo é, por esta abordagem, classificada como *Placer* de ambiente continental, subambiente fluvial cujos processos são dominados pelas variações de energia encontradas nos fluxos d'água – depósitos aluvionares. Essa classificação é baseada no ambiente sedimentar (MACDONALD, 1983). Os processos de concentração dos minerais pesados (minérios de interesse), são controlados principalmente pela queda da energia do fluxo d'água, este o mais importante mecanismo de segregação de minerais, e subsidiariamente pela densidade e forma dos grãos. Evans (1988), considera este o mais significativo tipo de *Placer* por sua importância histórica como fonte das primeiras minerações, facilidade de extração e fácil prospecção.

3.6. Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto

Sistemas de Informações Geográficas, indicado por seu acrônimo em língua inglesa: GIS - *Geographic Information System*; são sistemas computacionais que envolvem hardware e software para gerenciar informações dos bancos de dados georreferenciados. Trata-se de um banco de dados digital no qual o atributo cogente dos dados são coordenadas de um sistema de referências X, Y, Z projetadas ou geográficas. Estes sistemas são capazes de obter, armazenar, consultar, manipular, analisar, integrar, exportar, gerar informações derivadas e imprimir dados espacializados provenientes de fontes diversas e distintas, e em diferentes datas (FAZAL, 2008). As aplicações em ciências da terra possuem o objetivo gerar modelos e/ou representações digitais da natureza com a finalidade de utilizar as características dos sistemas ambientais para comparar, analisar, interpretar e gerar informações secundárias sobre as feições que constituem a paisagem.

Sensoriamento remoto (SR) é conceituado por NOVO, 1989: “Sensoriamento remoto consiste na utilização conjunta de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas ou espaciais) para carregar tais instrumentos e equipamentos, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta terra em suas mais diversas manifestações”. Em ciências ambientais, nas aplicações mais frequentes, o sensoriamento remoto corresponde à obtenção de informações sobre a superfície terrestre com o uso de sensores acoplados em veículos aéreos. Sensores são dispositivos que captam, medem e registram a radiação eletromagnética (ASHRAF, 2011) nas regiões do espectro do ultravioleta, visível, infravermelho, infravermelho termal e micro-ondas. Podem ser do tipo passivo quando a radiação eletromagnética é proveniente de uma fonte natural; ou ativo que provêm a própria radiação. Estes sensores são comumente acoplados em satélites, aviões, *shuttler* (ônibus espaciais) e, mais recentemente, em drones.

Um dos principais objetivos do SR é a aquisição de informações sobre a superfície da terra para mapeamento e avaliação de recursos naturais, atividades antrópicas, o monitoramento ambiental, bem como a inter-relação entre estes (IBGE, 2000). A seleção das imagens obtidas por sensores remotos leva em consideração a possibilidade de identificar e caracterizar as feições de interesse que constituem a paisagem, chamados –

alvos – em diferentes datas. Estas características específicas estão diretamente relacionadas a estrutura e as resoluções das imagens.

Quanto a sua estrutura, as imagens são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de um grid onde cada célula possui uma localização geográfica específica, determinada em um sistema de coordenadas – tipo ‘x’ e ‘y’ – e um atributo numérico ‘z’ (CROSTA, 1992). O valor Z representa, em SR, a intensidade de energia eletromagnética medida pelo sensor. Os elementos recebem o nome de ‘pixel’ – acrônimo da expressão *picture element*. As imagens de SR são concebidas matematicamente como uma matriz de dimensões x linhas por y colunas e com um atributo z para cada pixel.

Quatro são os tipos de resolução a serem considerados em sensoriamento remoto:

- Resolução espacial – é a capacidade de um sistema sensor identificar um alvo na superfície terrestre, de distinguir objetos que estão espacialmente próximos. A referência mais usada para resolução é o tamanho do *pixel* (SANTOS, 2013).
- Resolução espectral – refere-se à obtenção simultânea de imagens em múltiplas regiões do espectro eletromagnético. As regiões espectrais selecionadas para os sensores são definidas conforme a interação energia-matéria para os alvos de interesse na superfície terrestre (MENESES e ALMEIDA, 2012). Resolução temporal - Refere-se à frequência com a qual o sensor obtém imagens de uma área em determinado período em função da periodicidade com a qual ele a revisita (MENESES e ALMEIDA, 2012). As resoluções espectral e espacial possuem relevância na capacidade de distinguir um material de outro, são fundamentais na definição dos objetos estudados.
- Resolução radiométrica - capacidade do detector para medir as diferenças de intensidades dos níveis de energia eletromagnética, na forma de radiância, que o detector do sensor pode discriminar (CROSTA, 1992).
- A resolução temporal é fundamental para acompanhar ou detectar as evoluções ou as alterações que ocorrem na paisagem, principalmente para alvos mais dinâmicos, exercendo forte impacto no monitoramento ambiental (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Os Modelos Digitais de Terreno – chamados pelo acrônimo DEM do inglês *Digital Elevation Model* – são modelos computacionais que representam a topografia da superfície terrestre (GUTH, 2021). Dados topográficos são basilares para estudos e

aplicação geoespaciais; mapear e monitorar a superfície terrestre é uma atividade caracteristicamente tridimensional (EINEDER, 2002; TADONO, 2014).

Os modelos digitais de terreno utilizados nessa pesquisa são os produtos SRTM³. Trata-se de grids gerados por interferometria de radar (EINEDER et al., 2003; TAKAKU et al., 2014) que, provêm informações de alta qualidade sobre o relevo.

O emprego de modelos digitais de terreno torna as interpretações morfotectônicas, geomorfológicas e a definição dos seus domínios mais simples (SILVA et al., 2007). A fundamentação para se utilizar esses dados em ambiente computacional, característica inerente desses modelos, possibilitam o emprego de técnicas e tecnologias que aproveitam algoritmos matemáticos e estatísticos criados para interação de dados: realce, visualizações em 3d, estatísticas espaciais, fusão e visualização das feições que formam os terrenos (SILVA et al., 2007). Os desafios de logística e acessos, inerentes à região amazônica, representam um desafio para análises morfológicas do terreno em campo: regiões ermas, distâncias continentais, baixa densidade demográfica, distâncias de grandes centros, cobertura vegetal. O advento dos modelos digitais de terreno obtidos por plataformas espaciais possibilita um avanço importante para as pesquisas desenvolvidas na Amazônia.

Sistemas de Informações Geográficas (GIS - Geographic Information System) e métodos em Sensoriamento Remoto (SR), incluindo os Modelos Numéricos de Terreno (DEM), ampliam e moldam as possibilidades de estudar os recursos naturais do planeta (TALOORA et al., 2021). Suas tecnologias e métodos auxiliam continuamente o direcionamento e o provimento de soluções para pesquisas em ciências da terra. Sensores imageadores orbitais possuem a habilidade de prover dados sinópticos e periódicos sobre a superfície, tornando-se uma ferramenta imprescindível de monitoramento e avaliação da paisagem’.

3.7. Toxicidade do mercúrio

O Mercúrio é um metal pesado tóxico e acumulativo na cadeia trófica, sua permanência no ambiente é longa sem cessar sua toxicidade. É um elemento móvel nos nichos ecológicos e que em baixíssimas concentrações tornam o alimento e a água

³ SRTM acrônimo em inglês - Shuttle Radar Topography Mission - Missão Topográfica Radar Shuttle ou Missão Topográfica de Radar Embarcado

impróprios para uso. Provoca anomalias orgânicas na fauna e na flora. Mercúrio é um metal de transição, de símbolo Hg e número atômico 80. Sua densidade é de 13.579 kg/m³ e massa atômica de 200,59u (u – unidades e massa atômica), sendo o ²⁰²Hg o isótopo estável mais frequente. Sob condições ambientais de temperatura e pressão é encontrado no estado líquido da matéria. Possui três estados de oxidação: 0, +1 e +2. É um elemento ordinariamente presente na crosta, na água e na biota terrestre; possui Clarke de 0,086 ppm (FORTESCUE, 1992). A principal fonte natural do mercúrio é o mineral cinábrio, as maiores reservas encontram-se na região de Almadén na Espanha. Outra fonte natural do mercúrio. “O mercúrio é um componente ubíquo do gás natural”; hidrocarbonetos no estado líquido, bem como carvão mineral, são igualmente fontes naturais de mercúrio (LACERDA et al., 2007):

Mercúrio é um elemento altamente tóxico presente em nosso meio ambiente em várias e diferentes formas que exibem uma gama de propriedades toxicológicas (SYVERSEN e KAUR, 2012). É necessário reconhecer e diferenciar pelo menos três ocorrências de mercúrio que diferem entre si no que diz respeito ao seu comportamento no meio ambiente, bem como no que diz respeito ao seu potencial para interagir com o processo biológico: Mercúrio Elemental (Hg⁰) – mercúrio metálico; compostos inorgânicos de mercúrio – mercurioso (Hg⁺) e mercúrico (Hg²⁺); compostos orgânicos de mercúrio – em especial os compostos fenil e alquil-mercúrio (SYVERSEN e KAUR, 2012).

Nos diversos garimpos que operam no Brasil, o mercúrio metálico é lançado para os compartimentos naturais de duas formas: 1) Resíduo líquido ou amalgamado, muito comumente lançado diretamente nas drenagens, e 2) vapor resultante da queima do amalgama nos garimpos, e fusão do ouro nas lojas de compra, nas cidades das áreas de garimpo (SILVA et al., 1996).

Todas as formas de mercúrio são venenosas, os compostos de alquil mercúrio são de preocupação especial devido à sua fácil penetração através das membranas biológicas, bioacumulação eficiente, alta volatilidade e eliminação a longo prazo dos tecidos (BERZAS NEVADO et al., 2010). Estas características tornam os compostos orgânicos de mercúrio mais significativos no que concerne à poluição ambiental. A bioacumulação e a difícil eliminação deste metal dos tecidos celulares trazem como consequência direta a biomagnificação deste através da cadeia trófica.

3.8. Legislação de contaminação ambiental por mercúrio

A contaminação ambiental por mercúrio no ambiente amazônico, em sua maior parte, está direta e indiretamente associada à atividade dos garimpos, de regra, sem outorga da Agência Nacional de Mineração (ANM). A conexão entre garimpo e mercúrio é objetiva e direta a ponto de ser indissociável para qualquer abordagem adotada. A produção do ouro nos garimpos amazônicos possui o mercúrio como insumo fundamental. Por estas razões expressas, a legislação e normatização sobre a atividade garimpeira é condicionante do uso do mercúrio. O processo para a obtenção do metal em garimpos outorgados é exatamente o mesmo utilizado nos garimpos ilegais ou irregulares; por essa razão, os dispositivos legais que regulam as atividades de garimpo devem ser abordadas em conjunto.

As definições legais de garimpo foram mencionadas na Seção - Introdução (BRASIL, 2008; BRASIL, 1989).

Quanto a utilização do mercúrio, “É vedado o uso de mercúrio na atividade de extração de ouro, exceto em atividade licenciada pelo órgão ambiental competente” (BRASIL, 1989).

Um importante marco legal recente é encontrado no Decreto nº 9.470, de 14 de agosto de 2018, que promulga a Convenção de Minamata sobre Mercúrio, firmada pela República Federativa do Brasil, em Kumamoto, em 10 de outubro de 2013. O artigo 1 da referida Convenção assim expressa: “O objetivo desta Convenção é proteger a saúde humana e o meio ambiente das emissões e liberações antropogênicas de mercúrio e de compostos de mercúrio”. Reconhecendo na legislação brasileira que o mercúrio é uma substância com importantes efeitos negativos à saúde humana e ao meio ambiente devido sua característica de bioacumular nos ecossistemas.

A mineração de ouro artesanal e em pequena escala significa a mineração de ouro conduzida por mineradores individuais ou pequenos empreendimentos com investimento de capital e produção limitados; "Melhores técnicas disponíveis" são aquelas mais eficientes para prevenir e, onde isso não seja factível, reduzir as emissões e liberações de mercúrio na atmosfera, água e solos e os impactos de tais emissões e liberações sobre o meio ambiente como um todo, tendo-se em conta considerações econômicas e técnicas

para uma determinada Parte ou uma determinada instalação no território dessa Parte (BRASIL, 2018).

Dessa forma, à primeira vista, a expressão “...onde isso não seja factível, reduzir as emissões e liberações de mercúrio...” parece ser insuficiente pois, como visto na Seção – Mercúrio como contaminante, mesmo concentrações baixíssimas desse elemento na água e nos alimentos já os tornam contaminados e lesivos ao ecossistema e saúde humana. Os valores de segurança reconhecidos pela Resolução CONAMA, n° 396, de 3 de abril de 2008, são, por tal forma, baixos que qualquer inserção externa de mercúrio já provoca grande aumento nas concentrações naturais, contaminando o meio. As características de bioacumulação e a longevidade ativa do elemento no ecossistema potencializam a capacidade de contaminação.

Reforça-se que os garimpos que operam sem outorga, por princípio, o fazem em desacordo com a lei. A inobservância deste decreto amplia o espectro de ilegalidade que, por preceito, já se tem concretizado. O garimpo com outorga deve observar todo aparato legal para assim permanecer. “Cada Parte em cujo território sejam realizadas atividades de mineração e processamento de ouro artesanal e em pequena escala sujeitas a este Artigo deverá adotar medidas para reduzir, e quando viável eliminar, o uso de mercúrio e compostos de mercúrio nessas atividades, bem como as emissões e liberações de mercúrio no meio ambiente resultantes dessas atividades (BRASIL, 2018).

O Artigo 8 da Convenção de Minamata versa sobre: “...controle e, quando viável, da redução de emissões de mercúrio e compostos de mercúrio, frequentemente referidos como "mercúrio total", na atmosfera por meio de medidas de controle de emissões a partir de fontes pontuais que se enquadrem nas categorias listadas no Anexo D.” Entretanto o legislador optou por não enquadrar a mineração artesanal dentre as chamadas emissões pontuais, preocupou-se exclusivamente com as atividades industriais: “usinas elétricas movidas a carvão mineral; caldeiras industriais movidas a carvão mineral; processos de fundição e torrefação utilizados para a produção de metais não ferrosos; instalações para a incineração de resíduos; instalações de produção de cimento clínquer”. As emissões de mercúrio em garimpos, como um todo, e na própria biomassa vegetal superam as emissões industriais (LACERDA et al., 1996).

Os Artigos 10 e 11 da Convenção de Minamata versam sobre o armazenamento provisório ambientalmente saudável do mercúrio e sobre seus resíduos, invocando a

Convenção de Basileia, internalizada na legislação brasileira por meio do Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993, que promulga o texto da Convenção sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito, para defini-los como substância ou objetos: “Que consistam em mercúrio ou compostos de mercúrio; (b) Que contenham mercúrio ou compostos de mercúrio; ou (c) Contaminados com mercúrio ou compostos de mercúrio. em uma quantidade acima dos limites pertinentes definidos pela Conferência das Partes, em colaboração com os órgãos relevantes da Convenção de Basileia de forma harmonizada” (BRASIL, 1993).

A administração ambientalmente saudável é definida como: Por ‘Administração ambientalmente saudável de resíduos perigosos ou outros resíduos’ se entende a tomada de todas as medidas práticas para garantir que os resíduos perigosos e outros resíduos sejam administrados de maneira a proteger a saúde humana e o meio ambiente de efeitos nocivos que possam ser provocados por esses resíduos (BRASIL, 1993).

A Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990, do Ministério da Saúde que aprova, na forma do seu anexo, normas e o padrão de Potabilidade da Água destinada ao Consumo Humano, a serem observadas em todo o território nacional”. Esta Portaria define Padrão de Potabilidade determinando que água potável, destinada ao abastecimento das populações humanas, deve atender às características de qualidade descritas na Tabela 1, IIa, - Valores máximos permissíveis das características físicas, organolépticas e químicas da água potável: – “Mercúrio 0,001mg/L”. Este padrão de potabilidade significa que, legalmente, qualquer volume de água que contenha concentração superior a 0,001 mg/L, equivalente a 1 ppb, é impróprio para consumo, se em um bilhão de moléculas de água, existir mais que 1ppb de mercúrio, essa água é imprópria (BRASIL, 1990).

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, nº 396, de 3 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, apresenta no Anexo 1, os valores máximos de concentração permitidos para os numerosos elementos e para diversas finalidades de uso d’água. O Anexo mostra, no concerne ao mercúrio, fica estabelecido, que quando o “uso preponderante da água’ for o consumo humano ou a recreação, a concentração máxima de mercúrio no corpo d’água deve ser de 1µg.L-1; e o VMP para irrigação é de 2µg.L-1 (CONAMA, 2008).

A Resolução CONAMA nº 344 de 25 de março de 2004, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, e dá outras providências, assim dispõe em seu art 1º: “as diretrizes gerais e procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado visando ao gerenciamento de sua disposição em águas jurisdicionais brasileiras”. Assim sendo, define o valor máximo aceitável de mercúrio nos sedimentos de fundo de rio, em locais a serem utilizados para dragagem, preconizando os limites (em mg/kg) Nível 1 é de 0,170 mg/kg e para Nível 2 é de 0,486 mg/kg (CONAMA, 2004).

A Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas: “Considerando a necessidade de prevenção da contaminação do solo visando à manutenção de sua funcionalidade e a proteção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas;”. Citando o art. 1º: “Esta resolução dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.”; e o art 3º (CONAMA, 2009).

A proteção do solo deve ser realizada de maneira preventiva, a fim de garantir manutenção da sua funcionalidade ou, de maneira corretiva, visando restaurar sua qualidade ou recuperá-la de forma compatível com os usos previstos. As principais funções principais do solo são: I - servir como meio básico para a sustentação da vida e de habitat para pessoas, animais, plantas e outros organismos vivos; III - servir como meio para a produção de alimentos e outros bens primários de consumo; V - proteger as águas superficiais e subterrâneas (CONAMA, 2009).

Observa-se que esta Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009, indica limites aceitáveis de mercúrio no solo com o valor de referência de qualidade é de 0,05 mg/kg.

3.9. Análises químicas em amostras de interesses ambientais.

Existindo a disponibilidade de meios e materiais, mesmo que com interesse prospectivo, exploratório, realizar análises complementares em amostras obtidas diretamente ou indiretamente no meio ambiente, amplia o conhecimento e gera uma nova

forma de entender a área estudada. Análises químicas qualitativas, semiquantitativas e quantitativas despontam informações sobre os elementos químicos que estão presentes nas amostras coletadas num dado momento; estes podem ser acessados por metodologias analíticas como: 1) Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia – FRX; e 2) Fluorescência de Raios X por reflexão Total - TXRF. As duas técnicas fazem uso do mesmo princípio físico – Fluorescência de Raios X; contudo características dos equipamentos, detectores, fontes que produzem os Raios-X, geometria do sistema, preparação de amostras, dentre outros, tornam os dois métodos complementares na obtenção de resultados precisos.

A espectrometria de fluorescência de raios-X é considerada uma técnica não destrutiva que identifica os elementos presentes em vários tipos de amostras (MALTSEV et al., 2021). O processo analítico por FRX e TXRF fundamentam-se na excitação de átomos por irradiação de um feixe de energia eletromagnética no comprimento de ondas de Raios – X (GOMES, 1984).

3.10. Técnicas Analíticas por Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) e por Reflexão Total (TXRF)

A análise elementar/multielementar por fluorescência de raios-x baseia-se na medida da intensidade de raios-x característicos emitidos por cada elemento químico presente na amostra quando este é excitado por uma fonte de energia. É uma metodologia analítica qualitativa e quantitativa. Qualitativa pela detecção dos raios-x característicos e típicos emitidos por cada elemento. Quantitativa pois a intensidade, a contagem de raios-x característicos detectados no sensor por unidade de tempo, é indicativa da concentração do elemento na amostra. A excitação da amostra para que os elementos possam emitir raios-x característicos (fluorescer) pode ser produzida por tubos de raios-x, ou fontes radioativas (FERNANDES et al., 2017).

Os elementos químicos que constituem uma amostra, quando excitados por uma energia radiante, ejetam elétrons do interior dos níveis dos átomos (GOMES, 1984). Estes elétrons precisam ser imediatamente (no sentido quântico) repostos, o que ocorre quando níveis eletrônicos mais distantes cedem os elétrons necessários, mediante um salto quântico, para preencher a vacância e estabilizar o átomo. A transição eletrônica produz uma consequente perda de energia para o elétron que salta dos orbitais externos para os

internos; esta energia é emitida no comprimento de ondas (frequência) – ou em fótons de energia – do raios-x – característico e bem definida para cada transição eletrônica de cada elemento químico da tabela periódica (Figura 4). A análise por fluorescência de raios-x se dá em três passos principais: 1) excitação dos átomos que constituem a amostra, 2) emissão dispersiva dos raios-x característicos emitidos por estes átomos e 3) detecção dos raios-x característicos emitidos e contagem da energia em função do tempo (GUPTA, 2014).

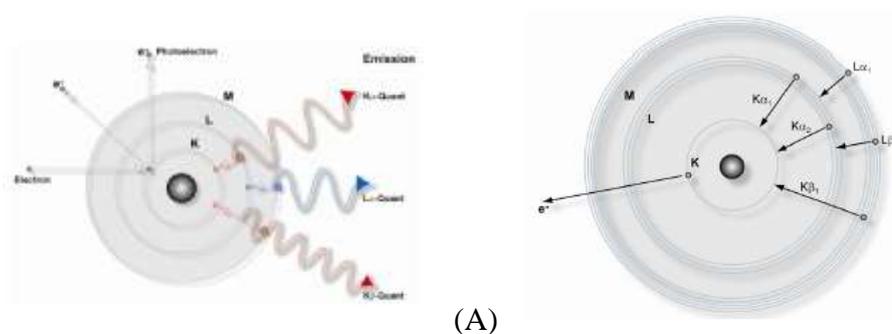


Figura 4. Produção de raios-X característicos no interior dos átomos (A) e transferência de elétrons entre subníveis (B). Fonte: Bruker (2017).

3.10.1. Excitação dos elementos

A emissão de raios-x característicos ocorre em decorrência da excitação do elemento por uma energia produzida por uma fonte externa, principalmente: a) raios-x gerados em tubo – fonte de excitação utilizada neste trabalho, b) partícula aceleradas – especialmente elétrons, c) raios gamma, raios-x ou partículas alfas e beta produzidos em radionuclídeos – requerem blindagem radiológica. A instrumentação analítica utilizando raios-x monoenergéticos produzidos em tubos é o processo de excitação das amostras mais utilizado contemporaneamente (NASCIMENTO FILHO et al., 1998).

A produção dos raios-x característicos ocorre quando a intensidade de energia que excita a amostra é suficiente para provocar a vacância, nas camadas eletrônicas K, L ou M. Para isso a energia mínima de excitação deve ser superior a energia de ligação eletrônica para essa camada (GOMES, 1984). As transições eletrônicas entre os orbitais ocasionam a emissão de um quantum de energia na forma de radiação, com frequência (comprimento de ondas) equivalente à diferença de energia entre as camadas eletrônicas. Considerando os raios-x de excitação produzidos por tubos, o processo se dá conforme a seguir: O feixe com fótons de raios-X incide sobre a amostra e transfere energia aos

elétrons dos átomos que a constituem (FERNÁNDEZ et al., 2017). Quando a transferência de energia for suficiente, elétrons serão deslocados de orbitais interiores gerando uma vacância, essa instantaneamente preenchida por elétrons de orbitais exteriores (GOMES, 1984).

A energia de ligação é calculada aproximadamente para os elétrons das camadas K e L de um dado elemento com a teoria atômica de Bohr (NASCIMENTO FILHO et al., 1998). Os seguintes parâmetros são relacionados conforme a equação 01: E – energia de ligação eletrônica (joules), m – massa do elétron em repouso (9,11E-31kg), e – carga elétrica do elétron (1,6E-19 coulombs), Z – número atômico do elemento emissor do raio-x, b – constante de Moseley (camadas K-1 e L 7,4), ϵ_0 – permissividade elétrica no vácuo (8,8534E-12 coulombs/newton.metro2), h – constante de Plank (6,625E-34 joules), n – nº quântico do nível eletrônico(camadas K=1 L = 2):

$$E = \frac{me^4 (Z-b)^2}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} \quad - \quad (\text{Equação 4.1})$$

As principais variáveis que influenciam a equação são o Z, b e n. A energia de ligação é diretamente proporcional ao número atômico do elemento (Z) e inversamente proporcionalmente ao nível eletrônico (b e n) (Figura 5).

O elétron mais externo que ocupa a vacância, ao perder a energia necessária para o salto quântico, emite energia de raio-x características (E_x). Esta energia depende da diferença de energia de ligação dos elétrons dos dois níveis quânticos, nível inicial (E_{ni}) – relativamente de mais alta energia – e nível final (E_{nf}) – relativamente de menor energia – (Equação 02).

$$E_x = E_{ni} - E_{nf} \quad (\text{Equação 4.2}).$$

Os elétrons, dentro dos níveis eletrônicos a que pertencem, distribuem-se em subníveis com energias diferentes e próximas (Figura 5). Quanto maior o número atômico do elemento, mais complexo o arranjo eletrônico em subníveis. Essa composição eletrônica possui notação especial para identificar cada energia emitida – notação Siegbahn: $K\alpha_1$, $K\alpha_2$, $K\beta$, $K\beta_2$, $L\alpha_1$, $L\alpha_2$, $L\beta_1$, $L\beta_2$, $M\alpha_1$, $M\alpha_2$, $M\beta_1$, $M\beta_2$, e assim sucessivamente. Raios-x $K\alpha$ representam uma transição eletrônica do nível L para o K, $K\beta$ a transição do nível M para o L.

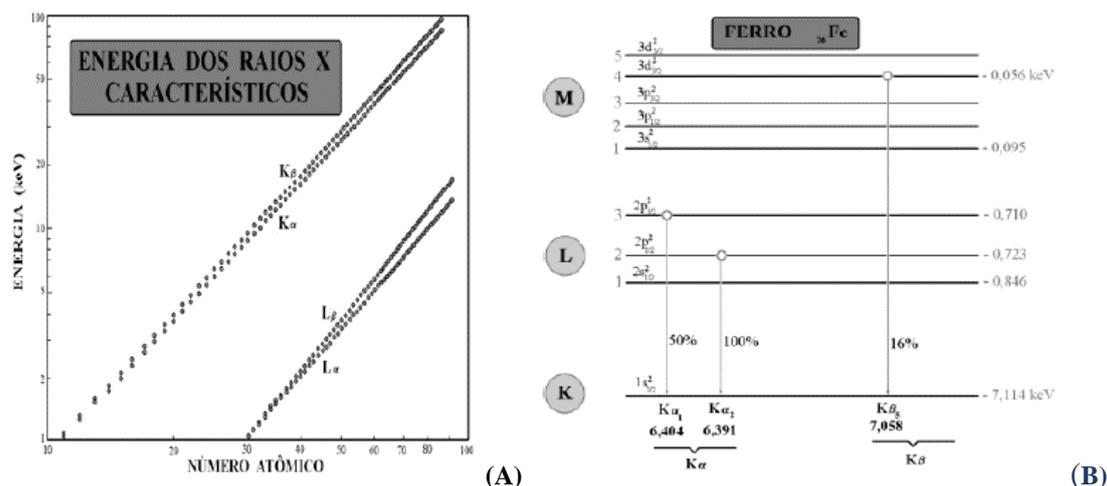


Figura 5. Energia de Ligação dos elétrons das camadas K, L, M em função do número atômico, Z (A) e exemplo de diagrama de níveis energéticos e intensidades relativas de emissão de raios-x característicos do elemento Ferro (B). Fonte: Nascimento Filho et al. (1998).

3.10.2. Fluorescência de raio-x por dispersão de energia (EDXRF)

A energia fluorescente da amostra é medida em sua dispersão de energia. Os raios-x são individualizados em um detector multicanal de pulsos com alta resolução capaz de identificar, registrar a energia dos raios-x específicos e produzir pulsos elétricos proporcionais à incidência desta energia. Os detectores de silício ativado com lítio (SiLi) e o de germânio (Ge) são, contemporaneamente, os mais comumente encontrados nos equipamentos.

Detectores de SiLi possuem sensibilidade para raios-x K_α emitidos pelos elementos de número atômicos entre 13 (Al) e 50 (Sn); e raios-x L dos elementos mais pesados. Apresentando baixa eficiência para números atômicos menores (NASCIMENTO FILHO et al., 1998; GOMES, 1984; BRUKER, 2017). Os autores complementam com a informação de que detectores de GeLi são mais eficientes para elementos de número atômico superior a 50 – $Z > 50$.

A geometria tradicional desenvolvida para os métodos analíticos EDXRF (Figura 6) posiciona a energia de excitação incidente fazendo um ângulo de 45° com a superfície da amostra. A amostra é espessa e o detector posicionado igualmente a um ângulo de 45° com a mesma superfície. A distância entre o detector e a amostras é na ordem de grandeza de 1 centímetro. O feixe incidente, devido a natureza do arranjo, é refratado e apresentará

espalhamentos como os de Rayleigh e Compton. Essas radiações espalhadas acabam por interagir com o detector.

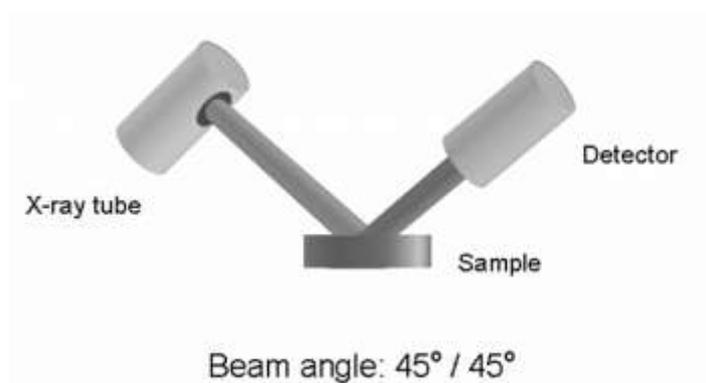


Figura 6. Geometria típica do método analítico por EDXRF – tubo de raios-x e detector posicionados com ângulo de 45° em relação a normal da amostra; amostra expeça; detector distante da amostra cerca de 1cm. Fonte: Bruker, 2017.

3.10.3. Fluorescência de raios-x por reflexão total (TXRF)

A radiação monoenergética produzida nos tubos de raios-x, ao passar de um meio menos denso (ar ou vácuo) e atingir uma superfície densa, plana e lisa, três tipos principais de interação energia-matéria podem ocorrer, absorção, refração e reflexão. A superfície considerada é lisa para o comprimento de ondas da energia incidente, não possuindo rugosidades para essa radiação. Na interação de absorção o feixe de energia interage com os átomos do material sendo utilizado em transições eletrônicas, vibração dos átomos, vibração das ligações químicas, dentre outros processos (PARREIRA e NASCIMENTO, 2016; GUPTA, 2014).

Na refração o feixe de energia entra no material e na reflexão o feixe de radiação incidente emerge da amostra em ângulo igual ao de incidência, tendo o plano da superfície como referência (GUPTA, 2014). A ocorrência da refração ou da reflexão depende da energia da radiação incidente, da densidade eletrônica do material e do ângulo de incidência da radiação. Dessa forma, para um determinado material (com densidade eletrônica característica), há um ângulo denominado crítico (Φ_{crit}), dado pela lei de Snell, acima do qual a energia incidente será refratada e abaixo do qual ocorre a reflexão do feixe. A energia incidente com ângulo igual ao crítico não é refratada ou refletida, permanece paralela ao plano de interface da amostra (Figura 7).

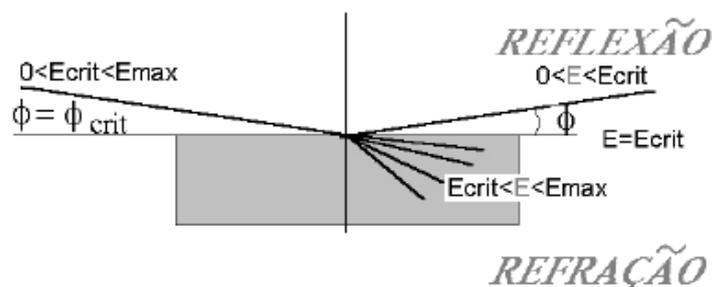


Figura 7. Ângulos de incidência e interações com a superfície lisa – quando o ângulo de incidência for maior que o ângulo crítico ocorre refração, quando menor, reflexão, quando exatamente no ângulo crítico a energia permanece paralela a superfície. Fonte: Nascimento Filho et al. (1998).

Há um ângulo específico no qual a reflexão do feixe de energia é total, não adentrando o suporte com superfície lisa. A razão entre a intensidade do feixe refletido e do incidente é a *refletividade*. Esta pode ser calculada em função do ângulo de incidência de um feixe monoenergético em uma relação inversa de proporcionalidade.

A profundidade de penetração, distância entre a superfície da amostra e o ponto onde a energia do feixe decresce para 36,8% (NASCIMENTO FILHO ET AL, 1998). É função do ângulo de incidência em relação de proporcionalidade direta. Por exemplo: raios-x $K\alpha$ do Mo incidindo com um ângulo de 5,5 min (minutos) sobre superfície lisa de quartzo possui refletividade próxima a 100% e profundidade de 4 nm, aumentando para 1 μm em um ângulo de 8,5 min, com uma refletividade de 2%.

Considerando uma amostra com a espessura na ordem de nanômetros, a radiação de raios-x a atravessa e sofre reflexão total no porta amostras. A reflexão total é, ao mesmo tempo, a ausência de espalhamento da energia incidente pelo suporte, minimizando a ocorrência de picos de espalhamento coerente e incoerente e o registro dos pulsos dessa energia no detector (PARREIRA e NASCIMENTO, 2016; GUPTA, 2014). Essa característica possibilita a posicionar o detector o mais próximo possível da amostra. O feixe de raios-x incidente não interage com o suporte de superfície lisa, ele atravessa a fina espessura da amostra na incidência e na emergência (após a reflexão total). A geometria resultante desse arranjo: com a energia de excitação em ângulo que provoque a reflexão total no porta amostras de superfície lisa, amostra com espessura na grandeza dos nanômetros e posicionamento do detector muito próximo da amostra

(Figura 8) constitui a fundamentação da técnica analítica de fluorescência de raios-x por reflexão total (TXRF) (PARREIRA e NASCIMENTO, 2016; GUPTA, 2014).

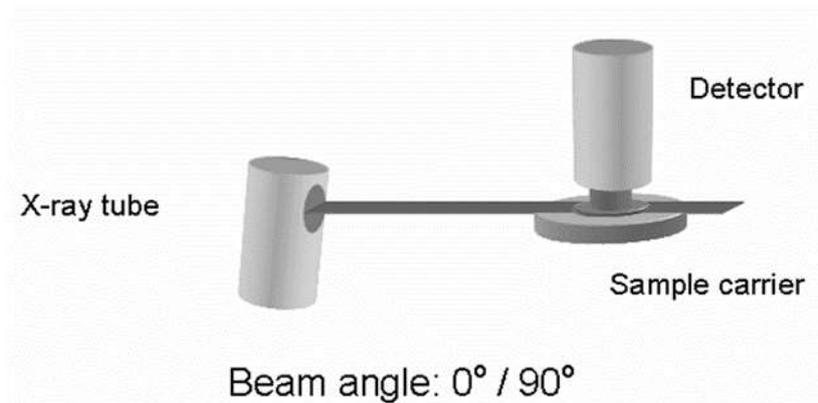


Figura 8. Geometria típica do método analítico por TXRF – Amostras ultrafinas, feixe de raios-x com baixos ângulos de incidência, detector posicionado muito próximo da amostra e 90° do feixe incidente (aproximadamente). Fonte: Bruker (2017).

Deste modo, como consequência da espessura nanométrica das amostras, a geometria de incidência do feixe de energia, a superfície plana do porta amostras e a utilização de raios-x de alta energia (p. ex. $K\alpha$ do Mo = 17,44 keV), não há a ocorrência dos efeitos de absorção e reforço no TXRF (PARREIRA e NASCIMENTO, 2016; BRUCKER, 2017). A equação básica para a análise qualitativa pode ser escrita como uma relação direta entre a intensidade fluorescente da linha $K\alpha$ característica, e a concentração do elemento de interesse.

$$I_i = S_i * C_i \quad \text{equação 4.4}$$

Onde I – intensidade (contagem de raios-x no detector – cps) da linha $K\alpha$ característica do elemento i, C – concentração do elemento i na amostra, S – sensibilidade do sistema.

Ressalta-se que há grande correlação matemática entre a sensibilidade elementar e o número atômico do elemento; quanto maior o número atômico, maior a sensibilidade elementar. Consequentemente, quanto maior o número atômico do elemento, maior a quantidade de energia específica emitida ($K\alpha$, $L\alpha$, $M\alpha$, ...) para uma mesma concentração elementar. A correlação entre o número atômico e a quantidade de energia emitida é aproximadamente linear (PARREIRA e NASCIMENTO, 2016; BRUCKER, 2017). Dessa forma, com a adição na amostra de um elemento com concentração conhecida (padrão interno) é suficiente para determinar a concentração dos demais elementos

presentes. Considerando os efeitos matriz desprezíveis. Isso tem por consequência que para uma mesma quantidade padronizada de determinado elemento, a intensidade de contagem de raios-x medidas no detector é linearmente proporcional ao número atômico do elemento (Figura 9).

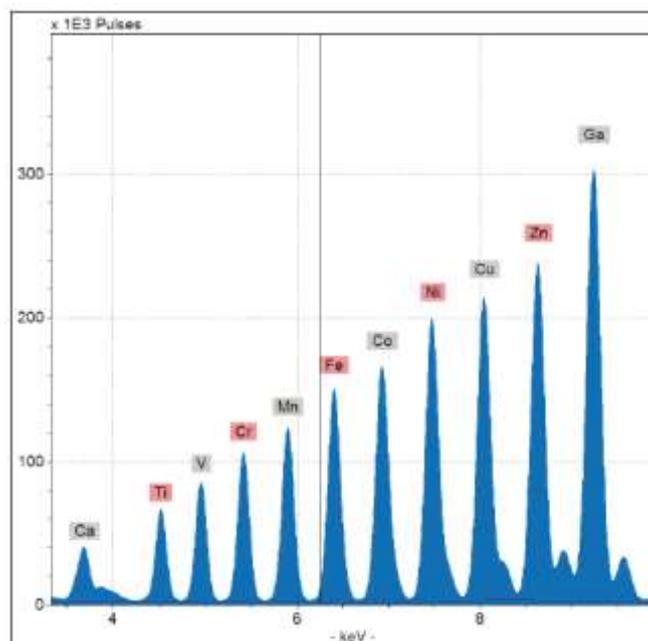


Figura 9. Espectro TXRF para elementos com a mesma concentração – 1 ppm. A quantidade de pulso de energia emitidas é maior conforme o número atômico. Fonte: Bruker (2017).

A concentração mínima que um determinado elemento necessita ter na amostra a ponto de ser identificado é chamado *limite de detecção* (LD). Cada pico detectado e registrado no espectro é constituído em parte pela própria radiação específica que origina o pico e em parte pelo *background* (BG) da radiação de fundo. A relação entre a contagem de radiação no pico (cps pico) e a contagem no background (cps BG) é diretamente proporcional a concentração do elemento na amostra. Dessa forma, o limite de detecção para cada elemento i está diretamente relacionado com a intensidade do pico e do background (NASCIMENTO et al., 1998).

Assim sendo, os limites de detecção atingidos pela técnica TXRF são baixíssimos (na ordem de 0,2 ppb) pelas razões expostas: 1) baixa intensidade de ruído de fundo – background – devido à baixa interação da energia com a superfície das amostras; 2) fonte da radiação primária incidindo em geometria que possibilita a reflexão; 3) amostra de

baixíssima espessura e posicionada muito próxima do detector – aumentando a detecção de raios-x característicos (GOMES, 1984; GUPTA, 2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de pesquisa

A bacia hidrográfica do rio Boia foi selecionada como área de pesquisa para aplicação das metodologias propostas. Este rio é o principal afluente do rio Jutai que, por sua vez é um dos cinco principais afluentes da margem direita do rio Solimões (Figura 10). O rio Boia foi selecionado dentre os principais rios com ocorrências de garimpos, identificados no estado do Amazonas durante monitoramento realizado nos anos de 2016 a 2020. A evolução da degradação ambiental em função da extração mineral observada no Rio Boia foi determinante na escolha desta área para progredir com os estudos. Características naturais do rio corroboram com a seleção: trata-se de um rio meandrante com vasta planície aluvial, com largura próximo a foz superior a cem metros, tributário de um importante rio da margem direita do rio Amazonas.

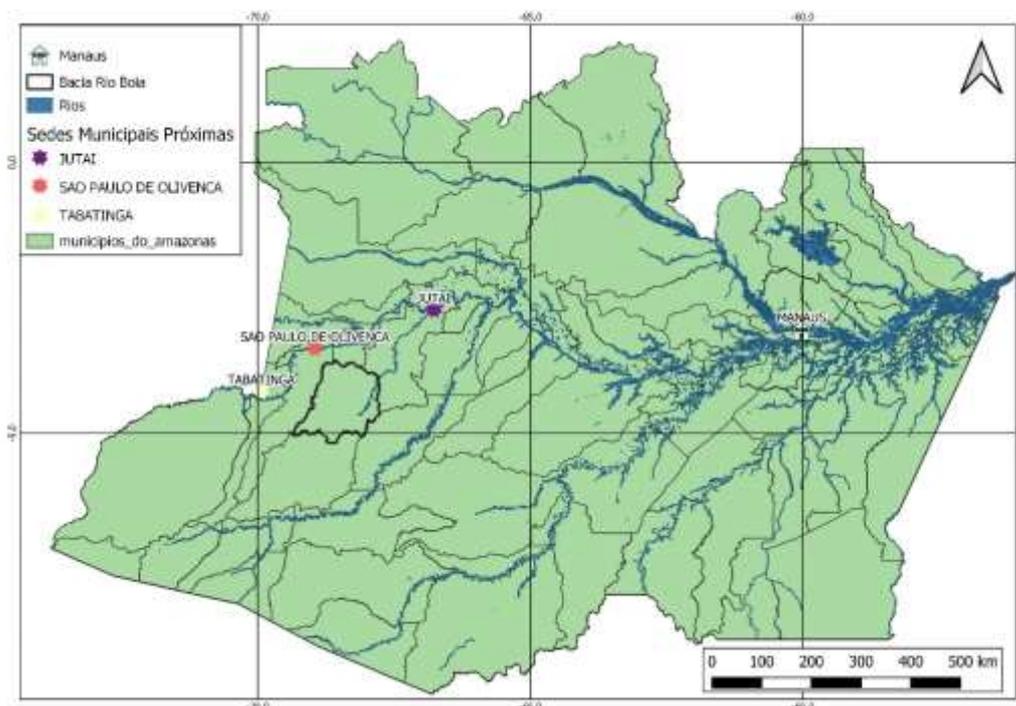


Figura 10. Mapa de Localização Sistema de referências de coordenadas geográficas Datum Sirgas 2000. Fonte de dados vetoriais – IBGE. Fonte: Marques (2022).

4.2. Análises e interpretações geomorfológicas

As análises e interpretações das feições geomorfológicas naturais dos rios bem como das feições antropizadas foram realizadas sobre imagens satelitais e modelos digitais de terreno; todos os provenientes de fonte aberta⁴. Os dados foram trabalhados, integrados e avaliados em ambiente GIS. A abordagem metodológica por imagens de satélite é amplamente difundida na bibliografia para todas as áreas de ciências naturais. As imagens de sensoriamento remoto passaram a representar uma das únicas formas viáveis de monitoramento ambiental em escalas locais e globais, devido à rapidez, eficiência, periodicidade e visão sinóptica que as caracterizam (CROSTA, 1992).

Foram utilizadas imagens capturadas em diferentes datas perfazendo análises multitemporais. Essa metodologia é fundamental para verificar as alterações naturais e antrópicas ao longo do tempo. As finalidades são:

- 1) estudar os rios na sua condição original anterior à antropização,
- 2) comparar as condições naturais com as encontradas posteriormente a antropização caracterizada pela mineração artesanal – garimpos.

O Fluxo metodológico principal – critérios considerados para seleção dos dados para as interpretações da pesquisa são:

- Capacidade de identificação das feições de interesse, em uma escala adequada para pesquisas ambientais exploratórias – resolução espacial – capacidade do sensor em identificar os alvos relacionados à atividade garimpeira. A escolha foi realizada com base nas informações técnicas conhecidas de sensor. A seleção das datas para estudos – resolução temporal / banco de dados histórico – advêm da disponibilidade de cenas imageadas da área; a existência de banco de dados é fundamental para identificar o início das atividades e verificar a evolução. As cenas foram triadas a partir de observação sistemática das imagens de satélite disponíveis no banco de dados da USGS (2021), ano a ano, analisando para reconhecer feições inequivocamente relacionadas à existência de garimpos.

⁴ Disponibilizadas gratuitamente seguindo a filosofia de movimentos e princípios democráticos de Governança de Fonte Aberta.

4.2.1. Dados – Imagens de Satélite

A opção metodológica dessa pesquisa foi desenvolvida preferencialmente sobre imagens do sistema LANDSAT (Tabela 1) por possuírem o mais completo banco de dados multitemporal de fonte aberta. Imagens do Sistema PLANET foram empregadas pontualmente para refinar as análises e interpretações fazendo uso da melhor resolução espacial desse sistema.

Tabela 1. Características dos sistemas LANDSAT e imagens utilizadas.

Satélite	LANDSAT 5	LANDSAT 8
Lançamento	01/03/1984	11/02/2013
Órbita	Polar, heliossíncrona	Circular
Altitude	705 km	705 km
Horário de Passagem	9:45 AM	1:40 PM
Sensor	TM	OLI
Banda utilizada na pesquisa	B4 NIR – 0,76 – 0,90 μm	B5 NIR – 0,845 – 0,885
Resolução Espacial	30	30
Resolução Radiométrica	8	12
Resolução Temporal - Revisita	16 dias	16 dias
Data da Imagem Utilizada	10/09/2001	26/08/2020

As imagens do sistema LANDSAT são utilizadas nessa pesquisa como padrão para relaciona as datas – 2001 e 2020 –, possui extenso banco de dados com imagens adquiridas entre os anos 1972 e os dias atuais, avançado nível de processamento (correções radiométricas e geométricas), disponível gratuitamente (USGS, 2021). São vantagens a serem consideradas ao se utilizar essas imagens para análises ambientais preliminares: boa resposta quando empregadas com escalas entre 1:50.000 e 1:25.000; e a resolução temporal. A metodologia empregada requer caracterizar uma área extensa (disso decorre a necessidade de utilizar escalas próximas a 1:50.000) em dois momentos – o primeiro anterior ao garimpo, o segundo no ano de 2020, contemporâneo ao trabalho de campo e ao garimpo. Estudo piloto verificou-se que a resolução espacial permite individualizar os alvos pretendidos – assoreamento e feições morfológicas do curso do rio Boia que foram alteradas pela atividade de garimpo – com boa definição até a escala de 1:25.000.

Para manter as características de sazonalidade e minimizar a variabilidade/variância ao correlacionar imagens de diferentes anos, usa-se imagens

obtidas na mesma estação do ano. No estudo de drenagem deve-se ter atenção as datas de cheias e vazantes, não necessariamente coincidentes com as chuvas e secas.

São utilizadas imagens do mês de setembro, período este da vazante e com pouca baixa precipitação; representa também do mesmo mês no qual as atividades de campo foram conduzidas. Escolheu-se cenas com a menor a cobertura de nuvens. A análise prospectiva para identificar o início da degradação ambiental relacionada ao garimpo possibilitou estabelecer os momentos iniciais em data aproximada a 2006.

A data de controle para caracterizar o rio Boia no estado natural foi selecionada em 10/09/2001 – cronologicamente distante do início dos garimpos, próxima da data de aquisição dos dados SRTM; imagem de melhor qualidade dentre as disponíveis nos bancos de dados gratuitos para o mês de setembro. A cena datada de 26/08/2020 é a selecionada para mapeamento das atividades antrópicas e caracterização da drenagem após aproximadamente 14 anos de garimpos ativos.

A imagem de 2001 pertence ao sistema LANTSAT 5 (L5) e a do ano de 2020 ao sistema LANDSAT 8 (L8). As características de hardware, sensores, detectores, mecânica, plataforma satelital, e inúmeras outras, são as mais semelhantes possíveis dentre os sistemas sensores disponíveis – metodologia aborda análises comparativas. Foi utilizada para as interpretações das morfologias fluviais a BANDA NIR - *Near infrared* – infravermelho próximo. Chamadas: no sistema L5 de BANDA 4 e no sistema L8 BANDA 5.

As bandas foram processadas para interpretação com a aplicação de algoritmos de correção atmosférica com a aplicação de realce linear de contraste (MENESES e ALMEIDA, 2012; SILVA, 2007), não excedendo a 2%.

As imagens do sistema PLANET possuem as características resumidas na tabela 2. Possuem melhor resolução temporal e espacial se comparadas as imagens LANDSAT. A possibilidade de usar mosaicos mensais é outra vantagem – esse sistema realiza a montagem automatizada de um mosaico com as melhores imagens do mês (menor nebulosidade). Os mosaicos foram amplamente usados nessa pesquisa para auxiliar na interpretação visual. Produzem imagens no sistema óptico com energia das regiões do visível e infravermelho do espectro em bandas posicionadas em regiões do espectro semelhantes às utilizadas pelo sistema LANDSAT; revisitam a área diariamente

resolução temporal de um dia. A desvantagem advém de ser um sistema que entrou em operação em data posterior a instalação da atividade garimpeira no rio pesquisado.

Tabela 2. Características dos sistemas PLANET.

Sistemas Satélite	PLANET
Órbita	Circular, heliossíncrona, descendente
Horário de Passagem	9:30 AM
Sensor	DOVE
Banda utilizada na pesquisa	B - 0,455 – 0,515; G - 0,500 – 0,590; R - 0,590 – 0,670; NIR - 0,780 – 0,860 μm
Resolução Espacial	3m
Resolução Radiométrica	12 bits
Resolução Temporal - Revisita	1 dia
Data da Imagem Utilizada	14, 16, 17, 18/09/2001

A opção metodológica é a de aproveitar o contraste natural existente no NIR entre os principais alvos de interesse – água, sedimento (solo exposto) e vegetação (MENESES e ALMEIDA, 2012). A interação da energia eletromagnética com a matéria, no comprimento de ondas do NIR, condiciona a resposta espectral dos alvos. São naturalmente contratantes nessa região do espectro: a) água – absorve a energia NIR, b) vegetação – alta reflectância, c) Solo exposto – reflectância altíssima (Figura 11).

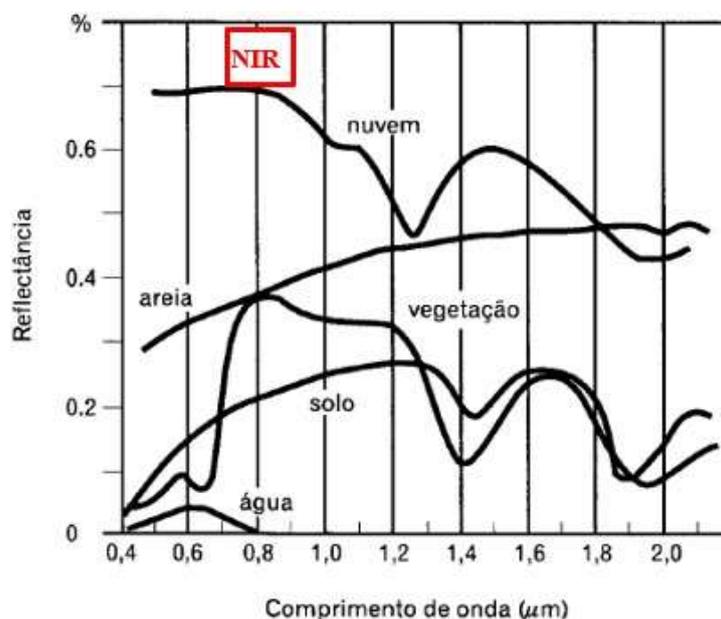


Figura 11. Reflectância e comprimento de onda dos alvos analisados na banda NIR. Fonte: (Crosta, 1993).

4.2.2. Dados – DEM

Os grids DEM empregados são fornecidos pelo programa SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* –, NASA – *National Aeronautics and Space Administration*. São disponibilizados gratuitamente para download na página de internet do USGS 2021.

Os dados SRTM são utilizados nesse trabalho para uma análise preliminar das principais propriedades e características da bacia hidrográfica do rio Boia: área drenada da bacia, limites, feições geomorfológicas que indiquem estabilidade ou instabilidade natural.

Os grids SRTM foram processados em ambiente digital – GIS – no software QGIS com o objetivo de gerar informações relacionadas ao estudo geral prévio das bacias e para realçar as principais morfologias no vale do rio Boia. Os algoritmos utilizados foram:

- Programa SAGA (CONRAD, 2015), Modulo – Channel Network and Drainage Basins (CONRAD, 2003). Este algoritmo recebe parâmetros do usuário e processa dos dados DEM, retorna informações derivadas do relevo como as divisões das bacias e sub-bacias hidrográficas pelos interflúvios, vales – linhas de talvegue, drenagens e suas ordens, curvas de nível.
- Complemento qgis *Profile tool - Plots terrain profile* (JURGIEL, 2020) – utiliza as informações de relevo para gerar perfis topográficos.
- Classificação não-supervisionada K-MEANS e ISODATA (MENESES e ALMEIDA, 2012), algoritmo presente no Programa SAGA. Segmentar os patamares de relevo e caracterizar o vale do rio Boia – planície de inundação, terraços fluviais, meandros abandonados, feições retilíneas.
- Análise visual do relevo e da rede de drenagem buscando feições geomorfológicas singulares.

4.2.3. Interpretações em ambiente GIS.

As análises e interpretações para todos os produtos seguiram os conceitos e métodos genéricos de interpretação de imagens de satélite apresentados por LIMA (1995), SILVA (2007). Estes serão comparados e complementados com as metodologias aplicadas especificamente em ambiente amazônico utilizadas por SILVA et al. (2007),

LATRUBESSE e FRANZINELLI (2002), IBGE (2009), LOBO et al. (2015), MENESES e ALMEIDA (2012).

Todas as informações foram processadas, trabalhadas, comparadas, analisadas e interpretadas nos softwares de fonte aberta QGis (QGis, 2021), GRASS (GRASS, 2017) e SAGA (CONRAD et al., 2015). Os dados derivados: interpretações, vetorizações, mapas, dentre outros, foram criados nesse ambiente.

Definiu-se para o trabalho a escala de 1:50.000 com interpretações sendo realizadas até a escala 1:25.000. Essa escala atende a abordagem inicial de caráter regional.

4.2.4. Estudos geomorfológicos utilizando ferramentas GIS

A primeira etapa da pesquisa consiste em um estudo prévio sobre as imagens de satélite focado em identificar nas imagens de satélite as feições tipicamente relacionadas à garimpos. Estas são caracterizadas principalmente por assoreamento e escavação nas margens dos rios. As informações mapeadas foram checadas durante os trabalhos em campo realizados entre 14 e 19 de setembro de 2020. Constatou-se que as ocorrências de garimpos, até a data dessa pesquisa, são restritas às drenagens principais da bacia: leito do rio Boia e do igarapé Preto. Drenagens de ordem inferior não foram significativamente afetadas nessa bacia. Os estudos geomorfológicos foram direcionados especificamente para estas ocorrências de garimpo mapeadas.

De acordo com o mapeamento preliminar, foram estabelecidas três áreas para as interpretações: Área 1, Área 2 e Área 3 (Figura 12). Todas as análises e interpretações com as imagens LANDSAT foram realizadas com a mesma metodologia para as três áreas. Interpretações sobre imagens PLANET foram realizadas apenas para a ÁREA 1.

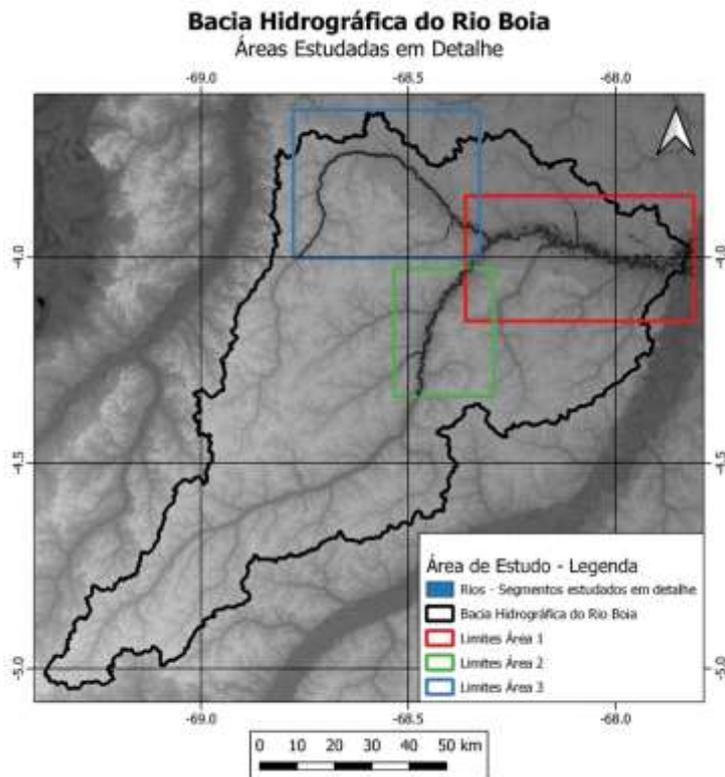


Figura 12. Áreas estudadas em detalhamento na bacia do rio Boia.

A abordagem metodológica para a interpretação das feições seguiu uma linha de vetorização semiautomatizada sobre os alvos identificados nas imagens. O uso de informações na forma vetorial é fundamento de GIS. É uma ferramenta essencial para individualizar, mapear, referenciar e realizar operações sobre as feições (SILVA et al. 2007). São basilares para as análises morfológicas, geométricas e numéricas. As informações vetoriais representam matematicamente, em ambiente, digital a feição natural – objetos de estudos.

As etapas do estudo foram:

- Observações para identificar nas imagens de satélite as diferentes feições/ alvos com base na resposta espectral, textural e em sua geometria.
- Agregar e aprimorar as identificações utilizando fotografias georreferenciadas e obtidas durante os trabalhos de em campo (Figura 13).
- Interpretação (vetorização) das áreas 1, 2 e 3 na imagem L5 de 09/2001.
- Interpretação (vetorização) das três áreas nas imagens L8 de 09/2020;

4.1 (Interpretação das imagens PLANET, 09/2020) – apenas para a área 1.

- Matemática vetorial – Intersecção de vetores entre as interpretações LANDSAT de 2020 e 2001 – identificar as áreas que permaneceram inalteradas e as alterações.
- Matemática vetorial – Subtrair nos vetores interpretados e a partir das intersecções, as áreas inalteradas; dessa forma obtém-se o dado derivado contendo apenas as diferenças morfológicas existentes entre os anos.
- Processamento dos vetores utilizando ferramentas específicas presentes no QGIS; necessários para refinar os dados e prepará-los para análises numéricas – dissolução de polígonos e separação em múltiplas entidades – *dissolve* e *multiparts*.
- Gerar informações tabulares numéricas sobre as interpretações e resultados das operações matemáticas em ambiente QGIS – áreas dos polígonos, perímetros, distâncias. Exportar dados numéricos para EXCEL.
- Polígonos com área inferior a 1 pixel do sistema, 900m^2 para o LANDSAT, foram imediatamente descartadas. Polígonos com áreas entre 1 e 4 pixels foram mantidas apenas para observações.
- Adotou-se para esse trabalho a opção de considerar nas análises numéricas apenas os polígonos com áreas superiores a 4 pixel do sistema sensor utilizado para classificar as feições.
- Análise visual das três áreas utilizando imagens PLANET mosaicadas para setembro 2020 com o objetivo de usar imagens de melhor resolução espacial para auxiliar o entendimento das feições geomorfológica.



Figura 13. Feições interpretadas nas imagens de satélite e sua representação em campo. Água (1); solo exposto/assorimento (2); área de vegetação.

As vetorizações foram realizadas utilizando a ferramenta – plugin – existente no QGIS: *Gimp Selection Feature* (MOTTA, 2020). Essa abordagem tem dupla utilidade: 1) a função de criar uma memória visual da área, observar os detalhes do objeto de estudos (respeitando as limitações dos dados) – geomorfologia fluvial; 2) realizar uma classificação interativa, semiautomatizada.

A criação de uma memória visual da área, levada a efeito a partir de uma observação sistemática das imagens de satélite, das notas e fotografias de campo, é necessária para entender os objetos de estudo e os processos que influenciam o sistema. Possibilitam correlacionar as feições observadas com o conhecimento bibliográfico sobre o comportamento dos alvos.

4.3. Amostras de interesse ambiental utilizadas

Amostra é uma porção reduzida de determinada característica, feição ou grupo de feições ambientais, manifestadas em diferentes escalas do submicroscópico ao regional, que pode representar em si a propriedade a ser estudada. É um procedimento através do qual parte de um material é retirado do todo para realização de estudos controlados.

Os objetivos da amostragem passam pela identificação, determinação (quantitativa e/ou qualitativa), interpretação dos dados e avaliação científica, de um parâmetro e/ou atributo que provêm o objeto de estudos. A representatividade da amostra, conceito fundamental que fundamenta o seu uso, é uma resultante dos critérios, objetivos da pesquisa, limitações e disponibilidades que se condicionam o método de estudo. A clareza sobre quais propriedades ambientais serão estudadas e qual o objetivo dos estudos estabelecerão as subsequentes definições para a amostragem. Deve-se considerar a respeito da abordagem da pesquisa: tipo de amostras, propriedade a ser medida, população alvo, meio amostral (líquido, sólido), dentre outros –, a escala da pesquisa – regional, local, detalhe –, a densidade da amostragem – prospectiva, exploratória, avaliação, mapeamento, as dimensões amostrais – densidade amostral –, controle de qualidade – erros intrínsecos acumulativos, viés amostral, regularidade/irregularidade amostral, coeficientes de variação.

4.3.1. Origem das amostras

A origem geográfica das amostras as segmenta em dois grupos: 1) amostras ambientais específicas provenientes do rio Boia (Figura 14, Tabela 3) – dois pontos amostrados; 2) amostras selecionadas por sua importância ambiental e relacionadas a outras bacias hidrográficas no Amazonas – nove amostras de cinco localidades (Figura 15, Tabela 3).

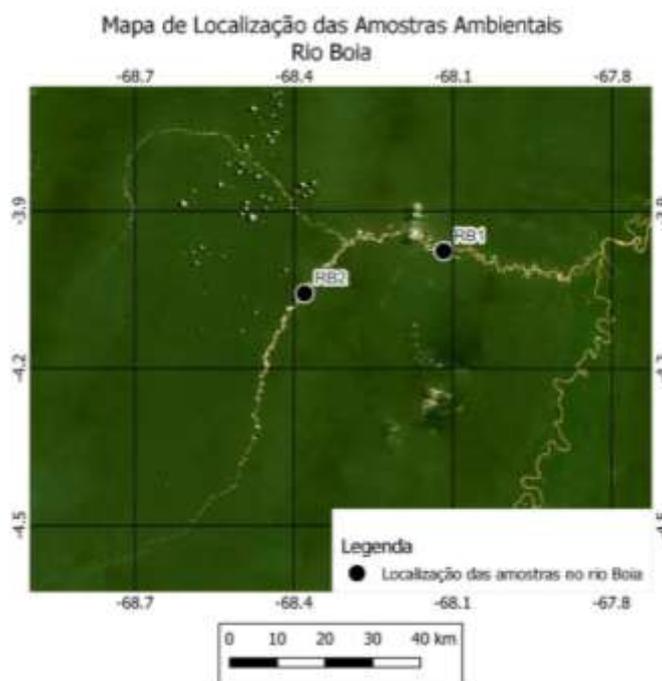


Figura 14. Localização das amostras ambientais (água e sedimentos) do rio Boia.



Figura 15. Localização amostras regionais usadas na análise de mercúrio (Hg).

Tabela 3. Identificação e localização das amostras do rio Boia analisadas.

Amostras	Local	Latitude	Longitude	Tipo de Amostra
1826/21A	Rio Puruês	-1,6822	-68,1798	água de retorta
1826/21B	Rio Puruês	-1,6822	-68,1798	água de retorta
1827/21	Rio Juami	-1,8053	-67,6440	água de retorta
2462/21	Paraná Anaxo	-1,6929	-68,0520	água de retorta
1035/19	Rio Puretê	-3,3192	-69,5967	água de retorta
3076/21A	Paraná Anarapu	-2,4001	-65,3233	água de retorta
3076/21B	Paraná Anarapu	-2,4001	-65,3233	água de retorta
RB1A	Rio Boia	-3,9566	-68,2398	água de retorta
RB1B	Rio Boia	-3,9566	-68,2398	água de retorta
ARB1	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - água leito do rio
ARB2	Rio Boia	-4,0598	-68,3734	amostras ambientais - água leito do rio
ARB1.2	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - água de tambor
ARB1.3	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - água de tambor
SRB1	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - sedimento banco de areia
SRB1.1	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - sedimento banco de areia
SRB1.2	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - sedimento em tambor
SRB1.3	Rio Boia	-4,0208	-67,9641	amostras ambientais - sedimento banco de areia
SRB2	Rio Boia	-4,0598	-68,3734	amostras ambientais - sedimento banco de areia
SRB2.1	Rio Boia	-4,0598	-68,3734	amostras ambientais - sedimento banco de areia

A utilização das amostras provenientes de outras bacias é a consequência de que, durante a execução da pesquisa, especialmente os trabalhos de campo, observou-se a ocorrência de um tipo de amostra específica derivada da metodologia de recuperação de mercúrio durante o procedimento de purificação do ouro. Análises preliminares sobre estas evidenciaram forte contaminação por mercúrio. Uma característica intrínseca das amostras é a dificuldade em obtê-las. São amostras presentes em locais de difícil acesso logístico, a natureza da amostra a torna descartável para a atividade e a imediata absorção ao meio. Somada a essa dificuldade, o elevado potencial poluidor desse material devido sua imediata assimilação ao meio ambiente e a carga de metais pesados que carrega, justificam o interesse no estudo. Estas razões direcionaram essa sessão da pesquisa em aproveitar todas as amostras possíveis da água de retorta. Mesmo que a maior parte dessas

não se encontrem diretamente relacionadas com a bacia do Rio Boia, a importância ambiental justifica a caracterização dessa amostra coletada inicialmente durante os trabalhos de campo no Rio Boia.

A coleta adequada de amostras é fundamental para garantir a representatividade e confiabilidade nos resultados. A extensão da zona garimpada ao longo do rio e as limitações logísticas não possibilitaram a coleta de amostras de controle a montante da zona garimpada. Mesmo a heterogeneidade presente no garimpo dificulta a obtenção de amostras prospectivas. A própria natureza artesanal da atividade, sem padrões definidos, realizada por mão de obra não especializada, a sazonalidade das operações em função do nível d'água, os insumos utilizados, dentre outros fatores, ampliam o número de variáveis que influenciam esse sistema aberto e ampliam sua heterogeneidade. As amostras prospectivas, condicionadas pela disponibilidade, possuem a importância de serem as primeiras a verificar a existência e/ou identificar características a serem estudadas em campanhas de campo posteriores.

4.3.2. Amostras ambientais – Rio Boia

Os trabalhos de campo foram realizados apenas em período concomitante com a atividade de extração mineral. Não há na bibliografia trabalho especificamente com o objetivo de caracterizar a geoquímica ambiental da região pesquisada em período anterior ao garimpo. Dessa forma as apreciações realizadas no interesse desta pesquisa dizem respeito a distinção dos lançamentos realizados pela atividade garimpeira contemporâneos ao trabalho de campo e a situação atual do rio.

Foram coletadas e analisadas amostras com interesse prospectivo, inicial. O objetivo foi buscar por indícios de contaminação visto a impossibilidade de obtenção sistemática de amostras. A reduzida capacidade logística para coleta de amostras não permitiu um mapeamento geoquímico.

As amostras foram coletadas em dois ambientes: imediatamente próximo a uma das balsas de garimpo visitada (Figura 14), ponto em porção do rio abandonada pelo garimpo.

A tabela 3 apresenta as amostras ambientais do Rio Boia. Foram coletadas amostras de água do rio - ARB1 e ARB2 -, amostras obtidas em etapas do processo de obtenção do ouro - ARB1.2, ARB1.3. As amostras de sedimentos abrangem os bancos de

areia formados pelo rejeito - SRB1, SRB1.3 e SRB2 - e amostras coletadas do processo de beneficiamento artesanal do ouro - SRB1.1, SRB1.2, e SRB2.1. Os locais de coleta foram em dois pontos distintos da drenagem.

As amostras de águas foram coletadas em recipiente de polietileno âmbar, estéril, quimicamente inerte, limpo, de abertura larga, auto-lacrável e com vedação completa. Visto a natureza prospectiva da amostragem, parâmetros de pH, Eh, temperatura, condutividade elétrica, turbidez, dentre outros, não foram possíveis de se determinar.

A coleta deu-se com a submersão do frasco destampado e de cabeça para baixo a uma profundidade aproximada de 15cm, nesse ponto o frasco foi inclinado para permitir a saída do ar e entrada da água, a abertura foi posicionada no sentido contrário ao da corrente. Após a coleta de aproximadamente um litro de água o frasco foi retirado da água, tampado, lacrado, vedado e acondicionado em uma caixa de isopor. Foram conservadas em sala fria e escura até a realização dos procedimentos laboratoriais.

As amostras de sedimentos coletados diretamente no meio ambiente seguiram as recomendações de ARIOLI e ANDRIOTTI, 2007 sobre prospecção geoquímica. Foram coletados aproximadamente dois quilogramas de sedimentos com pá plástica e postos em sacos de tecido. Os sacos foram postos para secar a sombra por um período de 5 dias em local ventilado e fresco. Após seco, o material foi transferido para recipientes plásticos inertes, limpos, estéreis; foram lacrados e acondicionados em caixa de isopor, conservado em sala fria e escura até a realização dos procedimentos laboratoriais. Estes sedimentos são o rejeito da operação do garimpo (Figura 15), passaram pelo processo artesanal da lavra do material e descartado na drenagem gerando áreas de completo assoreamento.

Procedimento análogo foi empregado para as amostras de sedimentos coletadas diretamente dos processos da garimpagem. São amostras que passaram pelo processo de concentração de minerais pesados realizado pelos carpetes. Uma das amostras foi coletada no processo posterior, após o uso do mercúrio, obtida imediatamente antes do rejeito ser devolvido ao meio ambiente.

As coordenadas das amostras foram adquiridas em campo utilizando aparelhos receptores de sinais de GPS – *Global Positioning System*⁵. Sistema de coordenadas geográficas, projeção SIRGAS 2000.

⁵ Tradução livre – Sistema de Posicionamento Global.

4.3.3. Amostras ambientais – água de retorta

Retorta ou *recuperadora de mercúrio* é o equipamento utilizado (Figura 16) para reaver mercúrio durante o processo artesanal de metalurgia empregado nos garimpos para a obtenção do ouro aluvionar – chamado de ‘queima do amalgama’ ou ‘queima do ouro’ pelos garimpeiros. O mercúrio é utilizado para separar os grãos submilimétricos de ouro dos grãos detríticos do sedimento aluvionar (hospedeiro da mineralização) no processo chamado amalgamação. Na amalgamação os metais ouro e mercúrio formam uma liga entre si cuja densidade é muito superior à dos materiais detríticos. O amalgama Au-Hg precisa ser primeiramente separado dos demais materiais por densidade para em seguida ser submetido ao processo metalúrgico, no caso de garimpos, artesanal, que separa os dois metais. Ouro é o produto desejado e o mercúrio é um insumo para obtenção do material.

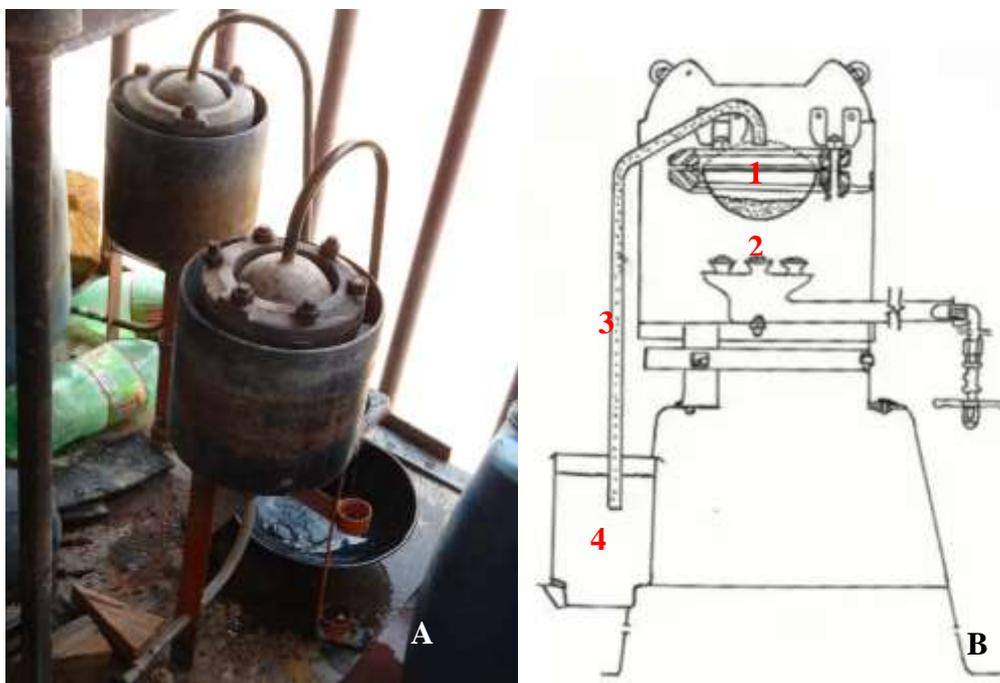


Figura 16. Equipamento recuperador de mercúrio (retorta) (A) e sua representação funcional (B): o recipiente que recebe o amalgama (1), os bicos de chama (2), o tubo que direciona o vapor (3) e o recipiente onde o vapor condensa e retorna ao estado líquido (4).

Os pontos de fusão e evaporação dos dois metais são muito distantes na escala de temperaturas (Tabela 4), o uso do calor é o método utilizado – separação por evaporação do mercúrio. Essa etapa é o início do processo que desperta o interesse ambiental dessa

pesquisa. A temperatura de evaporação do mercúrio, relativamente baixa (Tabela 4) é facilmente atingida com chama de gás natural e oxigênio.

Tabela 4. Propriedades físicas do mercúrio e do ouro.

	Mercúrio (Hg)	Ouro (Au)
Ponto de Fusão	234,32 K	1.337,33 K
Ponto de Ebulição	629,88 K	3.129 K
Entalpia de vaporização	59,23 kJ/mol	334,4 kJ/mol

A retorta é projetada para condensar o vapor de mercúrio para a sua forma líquida original, anterior a formação do amalgama Au-Hg sólido. É um mecanismo de simples constituição e operação exigindo apenas o gás natural como insumo. A Figura 16.B apresenta uma secção lateral da retorta e explica o processo de recuperação: mostra o recipiente que recebe o amalgama (1), os bicos de chama (2), o tubo que direciona o vapor (3) e o recipiente onde o vapor condensa e retorna ao estado líquido (4). A temperatura do vapor de mercúrio decresce abruptamente ao ser borbulhado no recipiente contendo água.

Parte desse mercúrio é imediatamente condensado devido a abrupta perda de energia térmica (calor de vaporização). Esse mercúrio é a porção recuperada do mercúrio original⁶. Parte do mercúrio, não estudada nessa pesquisa, vai para a atmosfera durante o borbulhar do vapor de mercúrio – com porção da água que, ao receber o vapor de mercúrio, absorve uma porção da energia térmica desse e as moléculas imediatamente em contato tendem a ebulir no formato de vapor de água. Parte do mercúrio fica diluído na água utilizada para 58 esfriá-lo. Essa premissa foi testada e constitui objeto de estudos desse capítulo.

Ao final do processo, o garimpeiro que utiliza o método com a recuperadora de mercúrio possuirá parte do insumo recuperado. Este será posteriormente reutilizado em processo análogo – com potencial para diluição e retenção de outros elementos. E, concomitantemente, concluirá a atividade fim da mineração artesanal: a obtenção do ouro (Figura 17).

⁶ Não foram realizados estudos quantitativos no interesse de mensurar a eficiência do processo de recuperação, há fortes indícios práticos e estudos teóricos (dinâmica de reações) que demonstram não ser 100% eficiente.



Figura 17. Ouro obtido no processo de “queima do amálgama”.

O interesse ambiental sobre as amostras da água de retorta é basicamente que a água utilizada para liquefazer o mercúrio é descartada no meio-ambiente tão logo sua utilidade cessa. Esse um dos motivos que dificultam a obtenção das amostras. Considerar a possibilidade de que essa água contenha mercúrio diluído, na forma iônica, pronto para assimilação imediata no meio ambiente, é considerado de interesse para a pesquisa desse trabalho.

As amostras utilizadas nas análises foram cedidas pela Superintendência de Polícia Federal do Amazonas. São amostras provenientes dos materiais apreendidos durante as operações policiais em campo ou encaminhadas para a PF pela Marinha do Brasil que apreende durante as atividades de vigilância ostensiva nos rios do Amazonas.

As amostras foram recebidas acondicionadas nos frascos utilizados pelos garimpeiros para armazenar o mercúrio recuperado. Dentre todos os recipientes apreendidos contendo mercúrio, cerca de 20% possuem uma pequena porção da água utilizada no resfriamento do vapor de mercúrio (água de retorta). Essa água não possui utilidade para o garimpeiro após o processo de resfriamento do vapor, constituindo um rejeito a ser lançado no ambiente.

Para realização das análises os potes contendo a água de retorta, nove no total, foram separados. Os garimpeiros utilizam potes de plástico comum que originalmente continham o mercúrio ou reutilizado (originalmente continham outras substâncias) –

potes de garimpo. As embalagens foram abertas e verificada a presença das duas fases – mercúrio metálico e fase aquosa. As fases aquosas foram retiradas dos potes de garimpo que as continham empregando de pipeta plástica descartável própria para o uso laboratorial (inerte, limpa). Foram dispostas em *eppendorfs* de polypropileno transparentes de 1,5ml. A partir desse recipiente foram separadas as alíquotas para análises.

Uma alíquota do mercúrio metálico associado a cada amostra de água também foi separada do pote de garimpo original utilizando seringas plásticas descartáveis comuns. As amostras de mercúrio foram igualmente acondicionadas em *eppendorfs* de polypropileno transparentes de 1,5ml. Dessa forma cada pote de garimpo originou duas amostras: 1) a primeira sendo a fase aquosa presente no pote de garimpo – água da retorta, 2) a fase metálica – mercúrio metálico. Cada amostra retirada de forma a não ter qualquer participação da outra fase presente no pote original – amostras da água retiradas da superfície, amostras do mercúrio retiradas do fundo do pote.

As coordenadas dessas amostras foram fornecidas pelos órgãos que as apreenderam adquiridas em sistema de coordenadas geográficas, projeção WGS84. Convertem-se as coordenadas para a projeção SIRGAS 2000 para adequarem-se ao sistema da pesquisa.

4.4. Análises das amostras por FRX

As amostras coletadas, separadas e dispostas nos recipientes de armazenamento foram direcionadas para o laboratório. Todas as amostras foram analisadas com o emprego de técnicas de Fluorescência de Raios-X – FRX. Foram empregadas duas metodologias analíticas - Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) e Fluorescência de Raios-X por Reflexão Total (TXRF) (Figura 18). Para essa pesquisa as amostras ambientais foram analisadas apenas pela metodologia TXRF; as amostras de mercúrio metálico foram analisadas apenas pela metodologia de EDXRF; as amostras de água de retorta foram analisadas pelas duas metodologias analíticas.

O processo analítico por FRX é direto, sendo realizado sobre a amostra sólida ou líquida sem a necessidade de preparação química. O método analítico EDXRF produz resultado qualitativos e semiquantitativos das amostras com precisão variando de porcentagem a partes por milhão (ppm). É um processo rápido e não exige preparação

física ou química complementar das amostras. Análises por TXRF demandam manipulação e preparação simplificada das amostras com adição de padrão interno análogo aos utilizados nas análises por ICP. Produzem resultados precisos em concentrações de parte por milhão e parte por bilhão. São equipamentos que analisam faixas de concentrações complementares.

4.4.1. Instrumentação

Foram utilizados dois equipamentos analíticos na realização das análises. O analisador portátil BRUKER TITAN S1 (Figura 18 - 1) para as análises de EDXRF. As análises pela metodologia TXRF foram realizadas no Espectrômetro BRUKER S4 TSTAR (Figura 18 - 2). As análises foram realizadas no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Setor Técnico-Científico da Superintendência de Polícia Federal no Amazonas. A instituição cedeu os equipamentos e os insumos para a pesquisa.

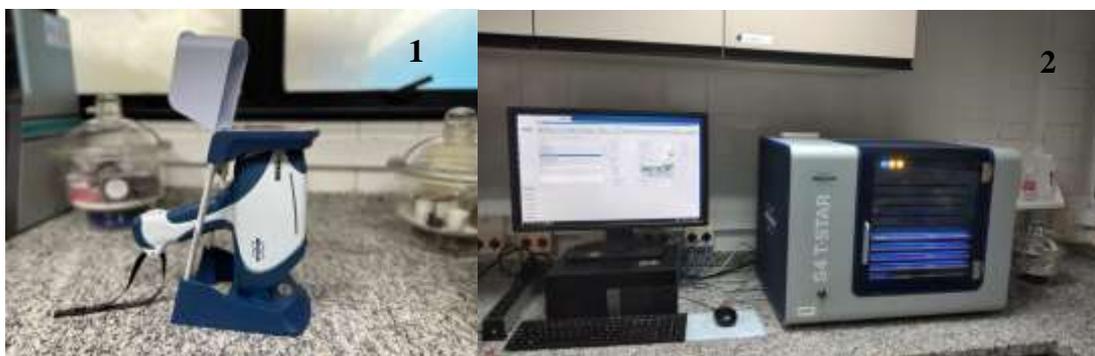


Figura 18. Equipamento analíticos usados na pesquisa: (1) - Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) e (2) - Fluorescência de Raios-X por Reflexão Total (TXRF) Fonte: Marques (2020).

O espectrômetro BRUKER TITAN S1 (S1) é portátil do tipo pistola, modelo S1 600. Possui tubo de raios-x com anodo de Ródio (Rh) com potência de 4W, tensão elétrica de 15 a 50kV, e corrente de 5 a 100 μ A. Integrado com detector FAST SDD (*Silicon Drift Detector*) refrigerado a ar com a baseada no “Efeito Peltier”. Apresenta trocador automático de filtro de feixe primário com cinco posições BRUKER, 2017. Foi utilizado com o auxílio de uma plataforma analisadora – porta amostras – desenvolvida pela BRUKER para estabilização das amostras e do analisador.

O espectrômetro BRUKER modelo S4 T-STAR, versão 400 de bancada possui sistema de excitação com dois tubos de raios-x :1) fonte com anodo de Molibdênio (Mo)

de 50 kv / 50 w, microfoco, monocromador multicamada curvo de 17,5 keV, e feixe de 50 μm x 50 μm ; 2) fonte, anodo de Tungstênio (W) de 50 kv / 50 w, foco fino monocromador multicamada plano 35 keV, feixe linear de 0,1 mm x 1,0 mm. Detector XFLASH® SSD (*Silicon Drift Detector*), 149 eV, com área de 60 mm². Dispõe de *software* esprit 2.1 com pacote para TXRF, Controle de funções de hardware: gerador HV, detector, motor de troca de amostras, Medição, visualização, armazenamento de espectro, deconvolução de pico, cálculo de área de pico, análise quantitativa por TXRF para líquidos, sólidos, aerossóis, funções de relatório estatístico e exportação de dados espectrais; *software* Spectra para medições e quantificações, rotina de quantificação e calibração com perfis de referência para elementos (BRUKER, 2017). Realiza troca automática de amostras para até 90 discos com 30mm de diâmetro.

4.4.1.1. Fluorescência de raios-X por dispersão de energia – EDXRF

Foram utilizados os filtros analíticos com as seguintes calibrações:

1) Calibração Metais Preciosos II – indicada para análises de ligas metálicas contendo especialmente os elementos Au, Ag, Pt, Pd. Os filtros dessa calibração permitem a identificação dos elementos – Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, W, Re, Ir, Pt, Au, Hg, Pb. O algoritmo do programa, de acordo com o espectro de energia obtido nas amostras, produz resultados semi-quantitativos normalizados conforme calibração interna para 100%; apresentando resultados com concentração variando de ppm alto (função do algoritmo que determina o LD) a 100%.

2) Calibração ‘GeoExploration’ (para exploração geoquímica) e ‘GeoMining’ indicada pelo fabricante para uso em mineração e processamento de minerais brutos. Possui calibrações automatizadas e selecionáveis pelo usuário para matrizes de óxidos e sulfetos. Os filtros elaborados para essa calibração permitem a identificação dos elementos - Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Ba, La, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Ce, Th, U. Da mesma forma, os algoritmos programados para esta calibração, produz resultados semi-quantitativos normalizados conforme calibração interna para 100%; de acordo com o espectro de energia obtido nas amostras, apresentando resultados com concentração variando de ppm alto (função do algoritmo que determina o LD) a 100%.

O processo analítico por EDXRF foi utilizado para investigar as amostras de mercúrio metálico e de água de retorta. Os resultados dessa última foram comparados com os obtidos por TXRF para verificar as possibilidades de utilização do EDXRF nos estudos de amostras com essas características - aquosas e provenientes de meios altamente contaminados por metais pesados.

O mercúrio metálico foi analisado com a calibração 'Metais Preciosos II'. São amostras de matriz metálica - ligações metálicas entre os átomos, alta densidade, constituídas predominantemente por elementos do grupo dos metais. Possui as características químicas compatíveis com as especificações do fabricante para o uso dessa calibração. As características morfológicas não são as ideais pois trata-se de uma amostra líquida.

As amostras de mercúrio metálico, dispostas nos *ependorfs*, foram postas no porta amostras da S1 e analisadas dentro desta embalagem. As análises sob a calibração utilizada possuem a duração de 30 segundos. Foram realizadas entre 3 e 5 análises para cada amostra com o objetivo de descartar, caso necessário, resultados *outliers*.

As amostras de água de retorta foram analisadas com as calibrações *GeoExploration* e *GeoMining* para óxidos; esta última calibração usando as possibilidades de 2 filtros e de 3 filtros. As amostras foram analisadas diretamente dentro do recipiente que as contém - *ependorfs* - (semelhante às amostras de mercúrio metálico) posicionadas conforme a geometria do método e especificações do equipamento. As análises por esses métodos possuem a duração programada de fábrica de 90 segundo (devido o uso de diferentes filtros). Foram realizadas entre 3 e 5 análises para cada amostras na calibração *GeoMining*, óxidos, com o modo de 2 e 3 filtros. Análises que mais contribuíssem com a variância não foram utilizadas na interpretação dos resultados, restando sempre de 2 a 3 resultados utilizáveis de cada amostra. Para a calibração *GeoExploration*, óxido, foram realizadas de 1 a 2 análises.

4.4.1.2. Fluorescência de raios-X por reflexão total - TXRF

Dentre as vantagens atribuídas para a metodologia analítica TXRF pela bibliografia é frequente encontrar: a capacidade para análise simultânea de múltiplos elementos químicos, análise de microamostras (μL or mg) - com o conseqüente baixo consumo de material amostrado, calibração simples com o uso de padrões internos, baixíssimos limites de detecção (μl - μg), range de sensibilidade alto (de ppb a $\%$),

operação fácil, baixo consumo de insumos (não necessita refrigeração nem gases especiais), baixo tempo de análises e fácil preparação de amostras (DE LA CALLE et al., 2013; BRUKER, 2017).

Dentre essas características, a preparação das amostras é que possui maior interação do pesquisador e exerce influência nas demais. Dessa forma, mesmo em uma metodologia com baixa necessidade de interferência no material para deixar a amostra apta para análise (preparação da amostra), é a etapa do processo analítico com a maior influência direta do pesquisador, por essa razão, demanda atenção e foco para obtenção de resultados de qualidade. É um processo dependente do conhecimento prévio sobre o material e sobre os objetivos analíticos: elementos químicos esperados/possíveis, concentração, matriz, propriedades físico-químicas, homogeneidade, heterogeneidades presentes, granulometria (quando sólidas), dentre outras.

As preparações dependem do tipo e das condições da amostra. Para a metodologia TXRF é necessário, no interesse de satisfazer as condições ideais para análise, atingir os objetivos que se seguem: a) ser possível formar com a amostra um fino filme de material sobre o porta amostras - anular efeito matriz -, b) distribuição homogênea do padrão interno na amostra - evitar enriquecimento, separação de elementos interferentes, c) evitar disseminação da amostra em solventes orgânicos (DE LA CALLE et al., 2013; BRUKER, 2017).

Duas estratégias de preparação foram utilizadas para as amostras de matriz líquida - água do Rio Boia e água de retorta - e uma para as amostras de matriz sólida - sedimentos.

Para as amostras líquidas há duas possibilidades principais: a) amostras que podem ser depositadas diretamente no porta amostras sem tratamento, b) amostras que necessitam um ou mais dos processos diluição, liquefação, filtração, centrifugação (DE LA CALLE et al., 2013). No caso de amostras sólidas podem igualmente segmentar em duas opções principais: c) utilizar amostras pulverizadas suspensas em um meio; d) digestão química das amostras.

Amostras sólidas apresentam uma dificuldade maior para obtenção de finos filmes, prejudicando a redução do efeito matriz e a distribuição homogênea do padrão interno adicionado. Observa-se que quanto menor a granulometria das amostras, melhor será a película formada. Outra solução possível é a de utilizar amostras digeridas.

A preparação das amostras ambientais de água do Rio Boia seguiu as etapas apresentadas abaixo, em ordem:

1. Em ambiente laboratorial, cada amostras de campo foi homogeneizada e separada uma alíquota de 2ml em um *ependorf*.
2. A esta alíquota foi inserido 10 μ l do padrão interno de Ga com concentração de 100 ml/l e realizada nova homogeneização.
3. Foi gerada uma camada hidrofóbica na superfície do porta amostras – **disco** – com a adição de 10 μ l de uma solução de silicone em isopropanol no local de depósito da amostra.
4. Retirou-se 10 μ l da amostra homogeneizada com uma micropipeta e depositou sobre a superfície hidrofóbica criada no disco. Repetiu-se esse passo para gerar uma duplicata.
5. As amostras foram postas para secar à temperatura de 24°C dentro de caixa plástica de proteção dos suportes de amostras, desenvolvidos com a finalidade de proteger as amostras contra contaminações ambientais.
6. Cada disco foi posto no suporte para ser inserido no equipamento TXRF.

A Preparação das amostras de água de retorta seguiu as etapas:

1. Em ambiente laboratorial, de cada uma das amostras originais cuja fase aquosa foi completamente separada do mercúrio metálico, já contidas em um *ependorf* de 2ml e homogeneizadas, foi separada duas alíquotas – A e B – para gerar amostras derivadas com diferentes concentrações.
2. Com a alíquota ‘A’ e água milli-q produziu-se uma amostra derivada diluída 50 vezes. Com a alíquota ‘B’ e água milli-q produziu-se amostra diluída 20 vezes.
3. A cada amostra derivada foi inserido 10 μ l do padrão interno de Ga com concentração de 100ml/l e realizada nova homogeneização.
4. Foi gerada uma camada hidrofóbica na superfície do porta amostras (disco) com a adição de 10 μ l de uma solução de silicone em isopropanol no local de depósito da amostra.

5. Retirou-se 10 μ l de cada amostra diluída a ser depositado sobre a superfície hidrofóbica criada no disco; gerou-se um disco de amostra com a diluição de 50x (A) e um com a diluição de 20x (B).
6. As amostras foram postas para secar à temperatura de 24°C dentro de caixa plástica de proteção dos suportes de amostras, desenvolvidos com a finalidade de proteger as amostras contra contaminações ambientais.
7. Cada disco foi posto no suporte e inserido no equipamento.

A Preparação das amostras de sedimentos foi realizada seguindo as etapas:

1. Foi utilizada a modalidade de preparação de amostra por suspensão em Triton-X (BRUKER, 2017; DE LA CALLE et al., 2013)
2. Em ambiente laboratorial, as amostras de sedimento, já secas foram quarteadas e separada uma alíquota menor. Dessa retirou-se uma porção de aproximadamente 5g para pulverização em moinho vibratório.
3. A amostra pulverizada foi homogeneizada e desta retirou-se uma fração com massa entre 40 e 60mg.
4. Essa fração foi depositada em tubo de ensaio de plástico contendo 1,5ml de solução de Triton-X a 1% e 10 μ l da solução de padrão interno de Ga com concentração de 100ml/l. procedeu-se com agitação e homogeneização gerando, ao final desse processo a ‘amostra em suspensão’.
5. Foi criada uma camada hidrofóbica na superfície do porta amostras (disco) com a adição de 10 μ l de uma solução de silicone em isopropanol no local de depósito da amostra.
6. Retirou-se 10 μ l de cada amostra em suspensão e depositou-se sobre a superfície hidrofóbica criada no disco, repetindo o processo para obtenção de amostras duplicatas
7. As amostras foram postas para secar à temperatura de 24°C dentro de caixa plástica de proteção dos suportes de amostras, desenvolvidos com a finalidade de proteger as amostras contra contaminações ambientais.
8. Cada disco foi posto no suporte e inserido no equipamento.

A Figura 19 ilustra as etapas de preparar os discos – porta amostras – com a superfície hidrofóbica para receber as amostras e o processo de pipetar a amostra no disco.

Os discos selecionados para receber as amostras são descartáveis, moldados em acrílico e completamente limpos, protegidos por embalagem.

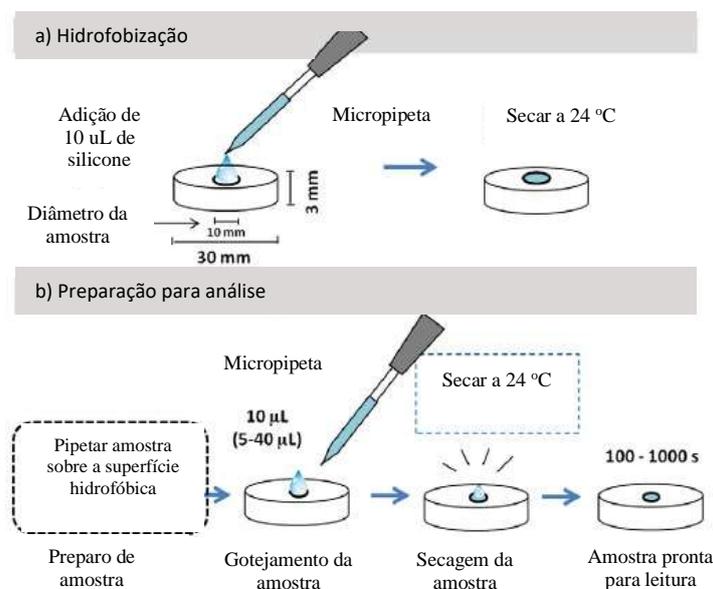


Figura 19. Esquema básico de pré-tratamento com hidrofobização e preparação de amostras para análise.

Com o objetivo principal de prospectar a existência de contaminantes inorgânicos metais pesados, especialmente o mercúrio, buscou-se preservar as amostras de exposição a temperaturas acima de 40°C. Durante a etapa de campo, as amostras foram mantidas em caixa de isopor. Foram armazenadas em sala isolada climatizada com ar-condicionado a 20°C. A preparação das amostras realizada em laboratório climatizado com ar-condicionado, não foram utilizados equipamentos que produzam calor – estufa, placa de aquecimento, tampouco realizadas quaisquer reações químicas ou físicas.

As leituras analíticas foram executadas com a radiação produzida em tubos de raios-X de Mo $K\alpha$ e de W $beam$ (radiação de *background*). Cada amostra foi medida por 1000s (segundos) por cada um dos tubos de raio-x. A matriz original da amostra deve ser informada ao algoritmo do *software* que calcula os resultados – sólida ou líquida. Da mesma forma as massas de cada amostra e a concentração dos padrões internos na amostra foram inseridos no algoritmo.

Os resultados para as amostras líquidas são obtidos em $\mu\text{L/l}$, para as amostras de sedimento em mg/kg .

5. RESULTADOS

O primeiro resultado alvo dessa pesquisa foi a constatação nas imagens de satélite e em campo da atividade garimpeira e suas especificidades (Figura 20). O extenso levantamento fotográfico realizado por terra, água e ar flagraram a mineração artesanal no local e em atividade.



Figura 20. Balsas de garimpo em atividade no rio Boia.

Realizam a lavra a partir de balsas que, com uma lança mecânica, dragam as margens abarrancadas dos rios, imediatamente abaixo da lâmina d'água. Utilizam uma técnica de lavra híbrida entre a tradicionalmente realizada por balsas – que dragam os sedimentos ativos de corrente no fundo dos leitos dos rios – e os tradicionais garimpos de barranco – que utilizam jato d'água pressurizada para desmontar o solo (material inconsolidado) e processar o barro – solo argilo-arenoso desestruturado pelo jato d'água (Figura 21). A ocorrência da mineralização de ouro concentrada nos terraços aluviais, meandros abandonados, barras, planície de inundação e outras feições geomorfologicamente mais perenes que os sedimentos de leito é um dos fatores que condicionam a modalidade de extração. Outros fatores relacionados são a disponibilidade de água, o gradiente de declividade e o retrabalho natural dos sedimentos durante enchentes.



Figura 21. Balsa lavrando sedimentos na margem do rio na linha d'água. Assoreamento (A) e derrubada da vegetação para dentro do rio (B). Fonte: Marques (2020).

O sedimento mineralizado é dragado a partir da base do talude do rio com o uso de uma lança tubular, é distribuído sobre rampas contendo carpete apropriado que retém o ouro e permite a passagem dos minerais menos densos. A água é o meio que transporta o material. Após percorrer as rampas, o material passante é por gravidade despejado de volta para o meio ambiente pela parte posterior da balsa. As rampas carpetadas concentram o ouro retirando-o do sedimento processado. Em seguida os carpetes são retirados da rampa e batidos em uma superfície coletora do material concentrado em ouro. O material batido passa por um controle de qualidade rudimentar – bater o material e contar as ‘pintas’ de ouro (os pequenos grãos de ouro). Se forem reprovados no controle, todo o material é descartado. Se forem contadas pintas de ouro suficientes para aprovar o material, este segue com o processo. O sedimento contendo ouro é misturado com mercúrio, sem proporções cientificamente estabelecidas, condições de segurança ou controle (Figura 22). O mercúrio retira o ouro do sedimento formando o amalgama (liga ouro-mercúrio) e segue para a metalurgia artesanal, o sedimento é rejeitado de volta para a natureza.



Figura 22. Processo de lavra aluvionar no rio Boia: 1- Dragagem do sedimento; 2 – Descarte do rejeito (assoreamento); 3 – Rampa carpetada; e 4 – Ouro amalgamado. Fonte: Marques (2020).

O rio Boia e o igarapé Negro são rios classificados como meandrastes. Os trechos de rio possuem os índices de sinuosidades seguintes: área 1 de aproximadamente 2,5; área 2 de 2,3 e a área 3 de 2,25. Todos estes valores acima do limite mínimo de 1,5 para classificação como meandrante (CHRISTOFOLETTI, 1980). Os processamentos

realizados com o módulo Drainage Basins (CONRAD, 2003) forneceram os dados analisados sobre a bacia.

A área total da bacia é de aproximadamente 1.000.000 ha (Figura 23). O padrão de drenagem predominante na bacia é o dendrídico, localmente observa-se os padrões radial/anular, marcando estruturas circulares, e o retangular desenvolvido sobre rochas com maior frequência de estruturas geológicas (Figura 24).

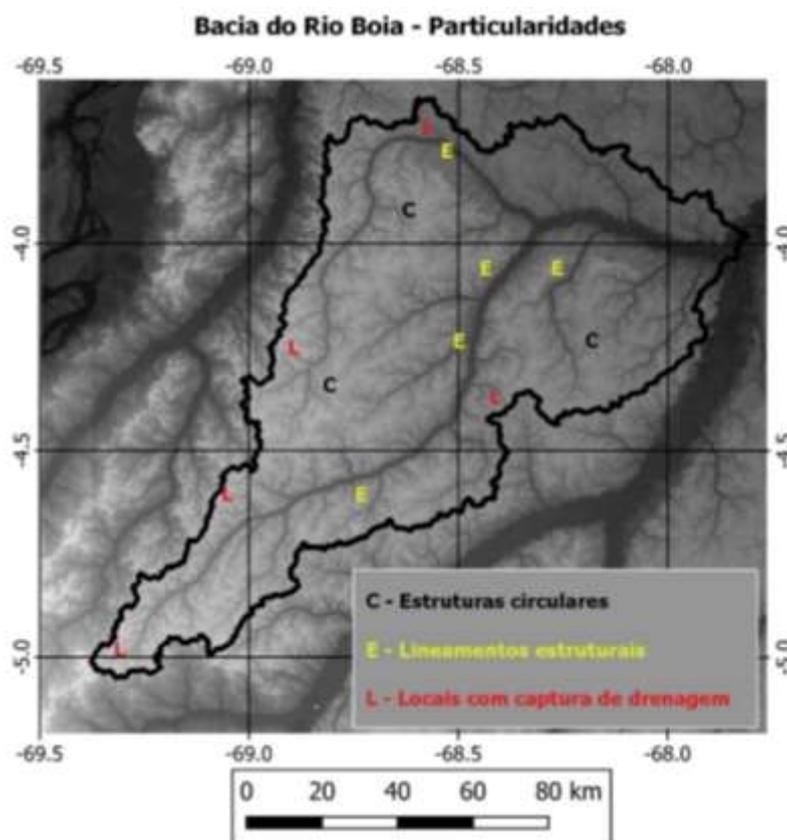


Figura 23. Bacia do rio Boia e principais características geomorfológicas. Retângulos indicam locais detalhados na figura 24.

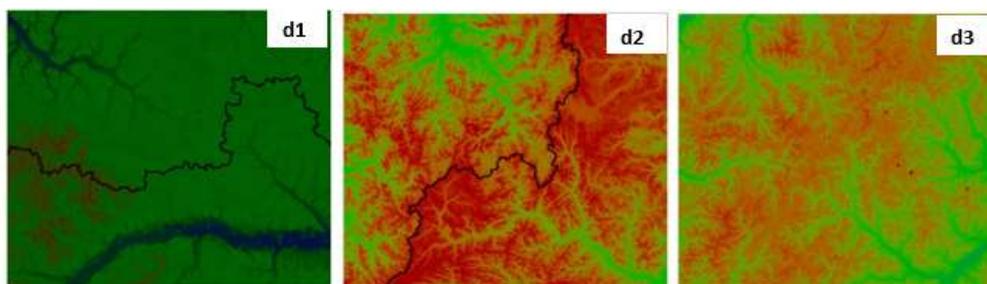


Figura 24. Detalhes em pseudocolor evidenciando feições geomorfológicas da bacia do rio Boia: d1) Estrutura linear provocando captura de drenagem, d2) Captura de drenagem, d3) estrutura circular com padrão dendrítico de drenagem radial.

Estruturas geológicas ativas no quaternário – neotectônica – são marcadas em lineamentos de drenagem e relevo (Figura 24), por vezes até controlando a geomorfologia fluvial. As bordas da bacia sofrem capturas e, aparentemente, é uma bacia que está perdendo área. As bacias dos rios Jutaí, Jandiatuba e Solimões invadem áreas da bacia do rio Boia pelo processo de captura de drenagens (Figura 24).

5.1. Alterações morfológicas e degradação ambiental

Estudou-se as imagens de satélite L8 e, dos sistemas PLANET mosaico e L8 obtidas em data próxima aos trabalhos em campo. Associadas as observações em campo com levantamento fotográfico, criou-se critérios para identificar e reconhecer as feições típicas da degradação ambiental – especialmente o assoreamento e as alterações na geomorfologia fluvial – e os métodos e maquinários utilizados para produção dos resultados. Dessa forma as feições foram interpretadas nas imagens de satélite e comparadas com as interpretações realizadas em data anterior ao garimpo.

As análises utilizando a metodologia (descrita no item 4.3.3) e a classificação interativa implementada por MOTTA, 2020 possibilitaram, simultaneamente, a análise visual para reconhecimento da morfologia, identificação e a delimitação vetorial dos alvos de interesse. Foi realizada de forma independente para as três áreas, sobre as imagens L5 B4 e L8 B5.

Os alvos após a interpretação passam a constituir polígonos no ambiente GIS: 1) polígonos dos alvos identificados como solo exposto, associados às áreas com assoreamento – excetuando todas as praias conhecidamente naturais; 2) polígonos definindo os corpos d'água: rios e lagos, marcados pelas diferenças morfológicas, texturais e radiométrica entre a água e a floresta.

O assoreamento é constituído por sedimentos arenosos. Nas imagens de satélite LANDSAT possui comportamento espectral análogo ao de solo exposto (alta reflectância para NIR), salvo peculiaridades específicas sobre resposta espectral de alvos como o teor de humidade, os minerais presentes, dentre outras. Possui pouca ou nenhuma cobertura vegetal; essa, quando presente, é de porte rasteiro ou arbustiva (Figura 13).

A floresta possui resposta espectral, nas imagens LANDSAT, com a reflectância assumindo valores intermediários entre o solo exposto e a água. A textura rugosa nas

imagens (variância), formada pela irregularidade do dossel, é outra característica que tipifica este alvo (Figura 13).

A água possui baixíssimo sinal nas L5 B4 e L8 B5. A forma e a textura lisa são as principais características diagnósticas (Figura 13).

As áreas de cada polígono obtido foram calculadas e utilizadas para interpretações quantitativas preliminares sobre a degradação ambiental.

5.1.1. Área 1

A Área 1 (Figura 25) estuda 67,5 km lineares do rio Boia, equivalente a 168,3 km de extensão. A Figura 25 mostra mapas com a vista geral da área 1. São imagens LANDSAT de 2001, 2020; o terceiro mapa foi montado com a imagem SRTM por fundo e os vetores interpretados sobre L8 postos em cima. Com essa tem-se uma ideia geral das alterações ocorridas na paisagem.

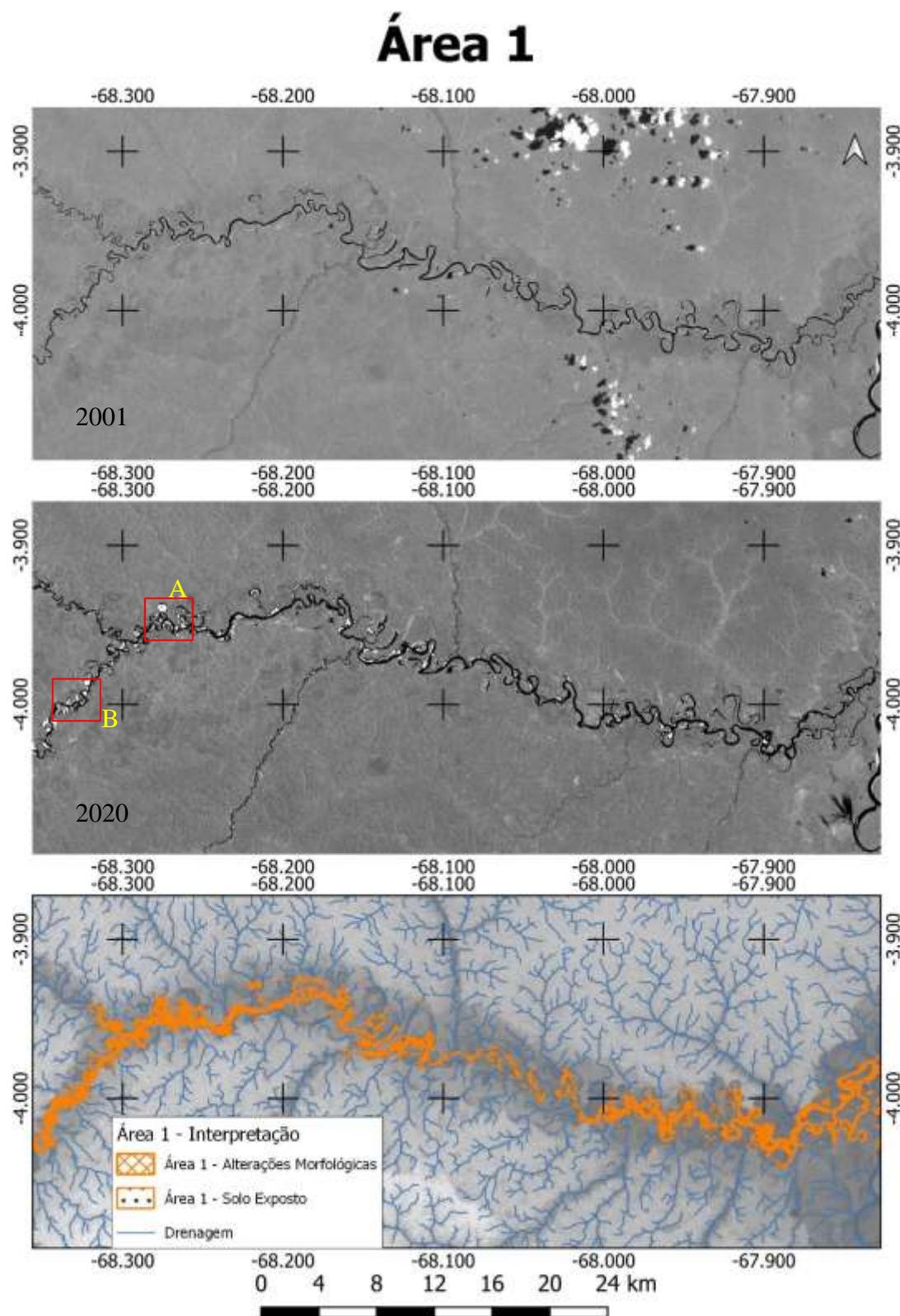


Figura 25. Situação da área 1 do estudo em 2001 (área preservada), em 2020 (área com degradação) e interpretações. Fonte: Marques (2020).

As Figuras 26 e 27 exemplificam dois trechos extraídos da área 1 (Figura 25), trechos A e B respectivamente, para observações em detalhe. São apresentados próximo a escala do trabalho (1:50.000) e associam as informações interpretadas sobre as imagens de satélite com fotografias mostrando as feições em campo. Algumas das alterações geomorfológicas observadas para a Figura 26 são citadas:

- Rompimento de colo de meandro – seta vermelha
- Alargamento do canal – seta azul
- Reativação de meandro abandonado e lavra na planície aluvial com desbarrancamento e assoreamento – seta amarela.

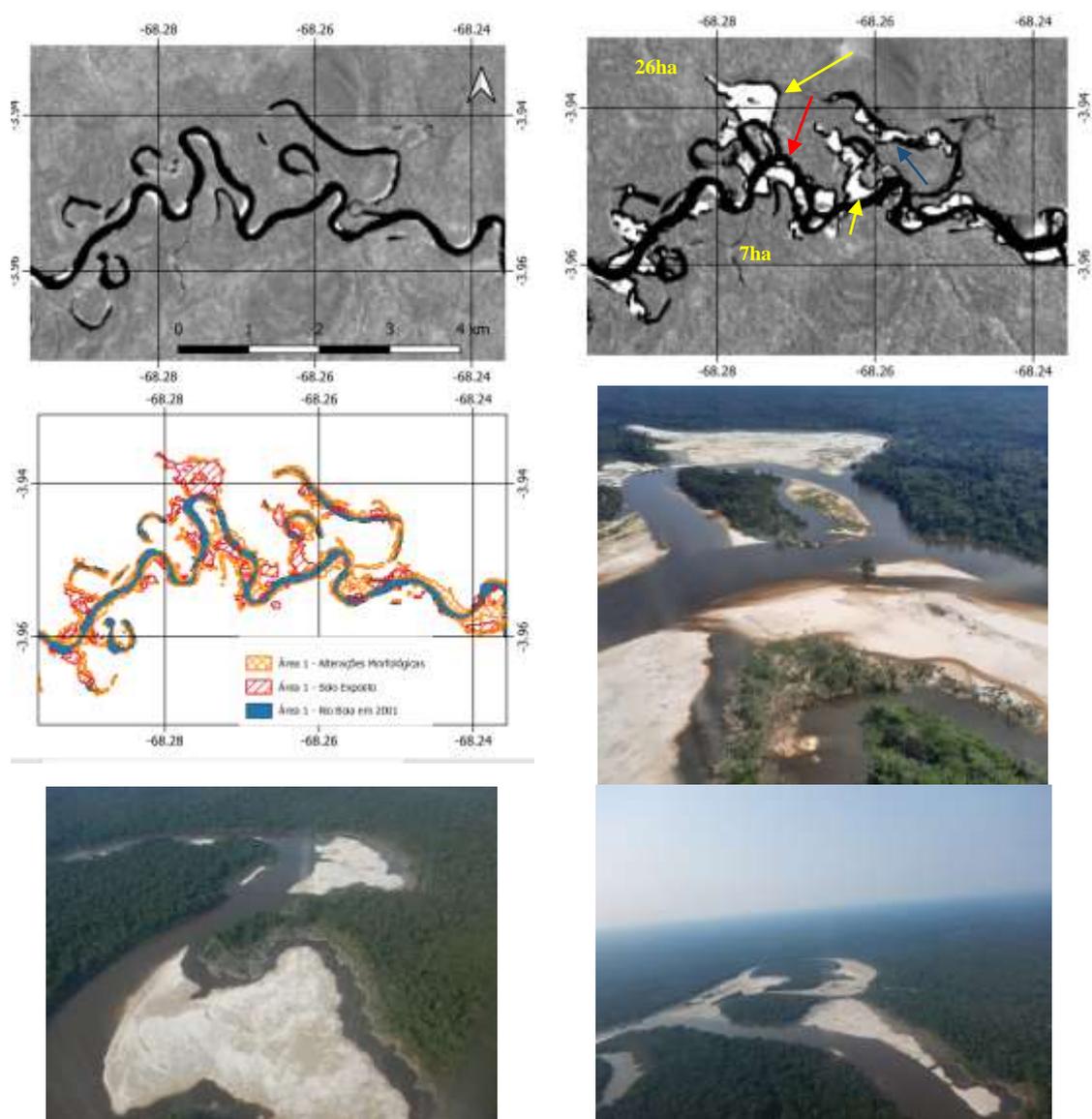


Figura 26. Exemplos de degradação ambiental no trecho A da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).

Alterações geomorfológicas observadas na Figura (27) e citadas, dentre outras presentes:

- Corte de calha – seta laranja;
- Rompimento de colo de meandro – seta vermelha;
- Criação de mossa na drenagem – seta azul;
- Reativação de meandro abandonado – seta azul clara.

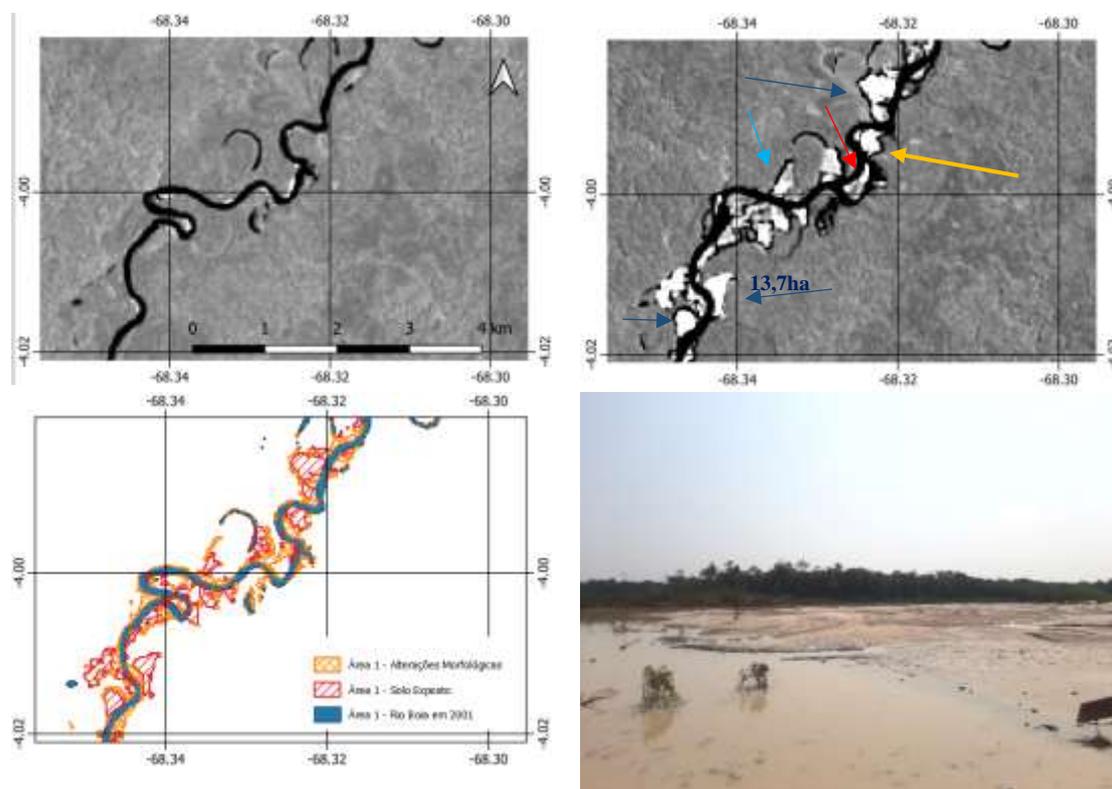


Figura 27. Exemplos de degradação ambiental no trecho B da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).

A metodologia utilizada mapeou 581 locais de interesse com alteração no uso do solo superior a 4 *pixel* do sistema (>0,36ha) (Tabela 5). As áreas entre 1px e 4px foram mantidas para observações. A tabela 5 resume a totalidade dos dados obtidos:

- Polígonos com áreas inferiores a 4px representam aproximadamente 53,11% do total de ocorrências e 9,5% em área;
- 90,5% das alterações ambientais foram explicadas, nessa escala de trabalho, por polígonos com áreas superiores a 4px, representando 46,89% das ocorrências;
- 74,66% das alterações são diretamente na morfologia fluvial e 25,34% geraram assoreamento com solo exposto.

Tabela 5. Resumo dos resultados quantitativos para a área degradada - área 1.

	1 - 4 px	> 4 px	Total	< 4 px	> 4 px	Total	> 4 px	
Solo Exposto	147	167	314	22,34%	28,74%	25,34%	167	28,74%
Morfologia Fluvial	511	414	925	77,66%	71,26%	74,66%	414	71,26%
Total	658	581	1239	53,11%	46,89%		581	

Para a área 1 pôde-se constatar durante as interpretações e trabalhos de campo que o assoreamento é uma consequência direta das alterações na geomorfologia fluvial causada pelo garimpo. Dessa forma é frequente a associação dos dois alvos.

A Tabela 6 com o histograma e gráfico associados resumem as características de degradação ambiental observadas para o alvo 'solo exposto', associado ao assoreamento e à formação de bancos de areia artificiais (Figura 28):

- A maior parte, cerca de 63% dos locais de degradação são de pequeno porte, menores que 2ha, e representam 25% da área – classes 1 e 2;
- Os locais com maiores extensões contínuas degradadas representam 4% das ocorrências e 22,4% do total de áreas;
- 84,4% dos alvos mapeados são menores que 4ha e representam 50% de toda área;
- 15,6% dos polígonos são maiores que 4ha e representam 50% da área.

Tabela 6 .Análises quantitativas para solo exposto Área 1.

Classe	Polígonos (ha)		Frequência		Área		Solo Exposto	
1	<=1		62	37,13%	39,06	9,73%	Média	2,40
2	>1	<2	44	26,35%	62,26	15,51%	Erro padrão	0,23
3	>2	<3	20	11,98%	48,01	11,96%	Mediana	1,37
4	>3	<4	15	8,98%	52,09	12,98%	Desvio padrão	2,99
5	>4	<5	4	2,40%	18,01	4,49%	Variância da amostra	8,92
6	>5	<6	7	4,19%	38,12	9,50%	Curtose	24,58
7	>6	<7	5	2,99%	31,85	7,94%	Assimetria	4,01
8	>7	<8	3	1,80%	22,04	5,49%	Intervalo	25,68
9	>8		7	4,19%	89,94	22,41%	Mínimo	0,37
							Máximo	26,05
							Soma	401,39
							Contagem	167
Total			167		401,39			

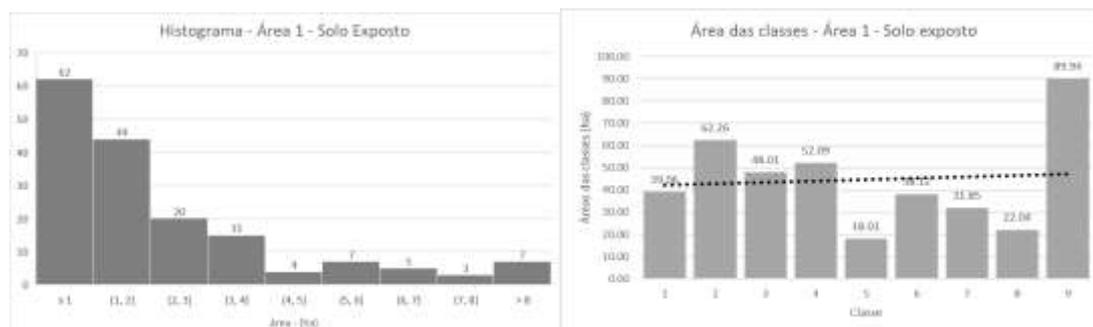


Figura 28. Análises quantitativas para solo exposto da Área 1.

A Tabela 7 abaixo e o histograma e o gráfico resumem as características de área de degradação ambiental observadas para o rio, associado as mudanças na sua morfologia (Figura 29):

- A maior parte, cerca de 81,9% dos locais de degradação são de pequeno porte, menores que 2ha, e representam 41,2% da área – classes 1 e 2;
- Os locais com maiores extensões contínuas degradadas representam 4,8% das ocorrências e 32,89% do total de áreas;
- 51% da área total está distribuída nas 3 primeiras classes (<3ha) com 88,6% das ocorrências;
- 49% da área é formada por polígonos maiores que 3ha, somando 11,4% dos locais mapeados.

Tabela 7. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 1.

Classe	Polígonos		Frequência		Área		Morfologia Fluvial	
	(ha)							
1	<=1		244	58,94%	140,98	21,32%	Média	1,60
2	>1	<2	95	22,95%	132,02	19,96%	Erro padrão	0,12
3	>2	<3	28	6,76%	67,63	10,23%	Mediana	0,78
4	>3	<4	20	4,83%	67,24	10,17%	Desvio padrão	2,53
5	>4	<5	3	0,72%	13,48	2,04%	Variância da amostra	6,39
6	>5	<6	4	0,97%	22,45	3,39%	Curtose	34,80
7	>6		20	4,83%	217,52	32,89%	Assimetria	5,06
							Intervalo	26,76
							Mínimo	0,36
							Máximo	27,12
							Soma	661,31
							Contagem	414
Total			414		661,31			

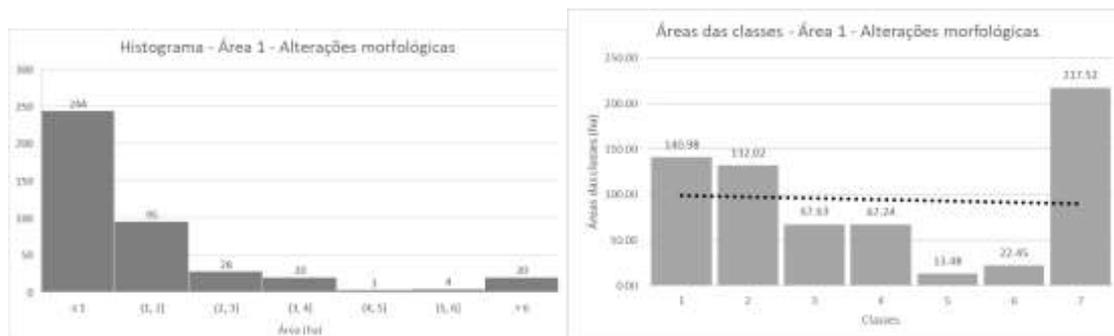


Figura 29. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 1.

Na escala definida para o trabalho, e com a metodologia adotada, mapeou-se para a área 1: 516 locais com interferência humana somando 1063ha de área. A tabela 8 resume os dados de solo exposto e morfologia fluvial.

Tabela 8. Resumo da degradação para a área 1.

	Solo Exposto	Morfologia Fluvial	Total
Locais > 4px	167	414	581
Área (ha)	401,39	661,31	1063

5.1.2. Área 2

A Área 2 (Figura 30) estuda 39,96 km lineares do rio Boia, equivalente a 93,78 km de extensão. A Figura 30 mostra mapas com a vista geral da área 1. São imagens LANDSAT de 2001, 2020; o terceiro mapa foi montado com a imagem SRTM por fundo e os vetores interpretados sobre L8 postos em cima. Com essa tem-se uma ideia geral das alterações ocorridas na paisagem.

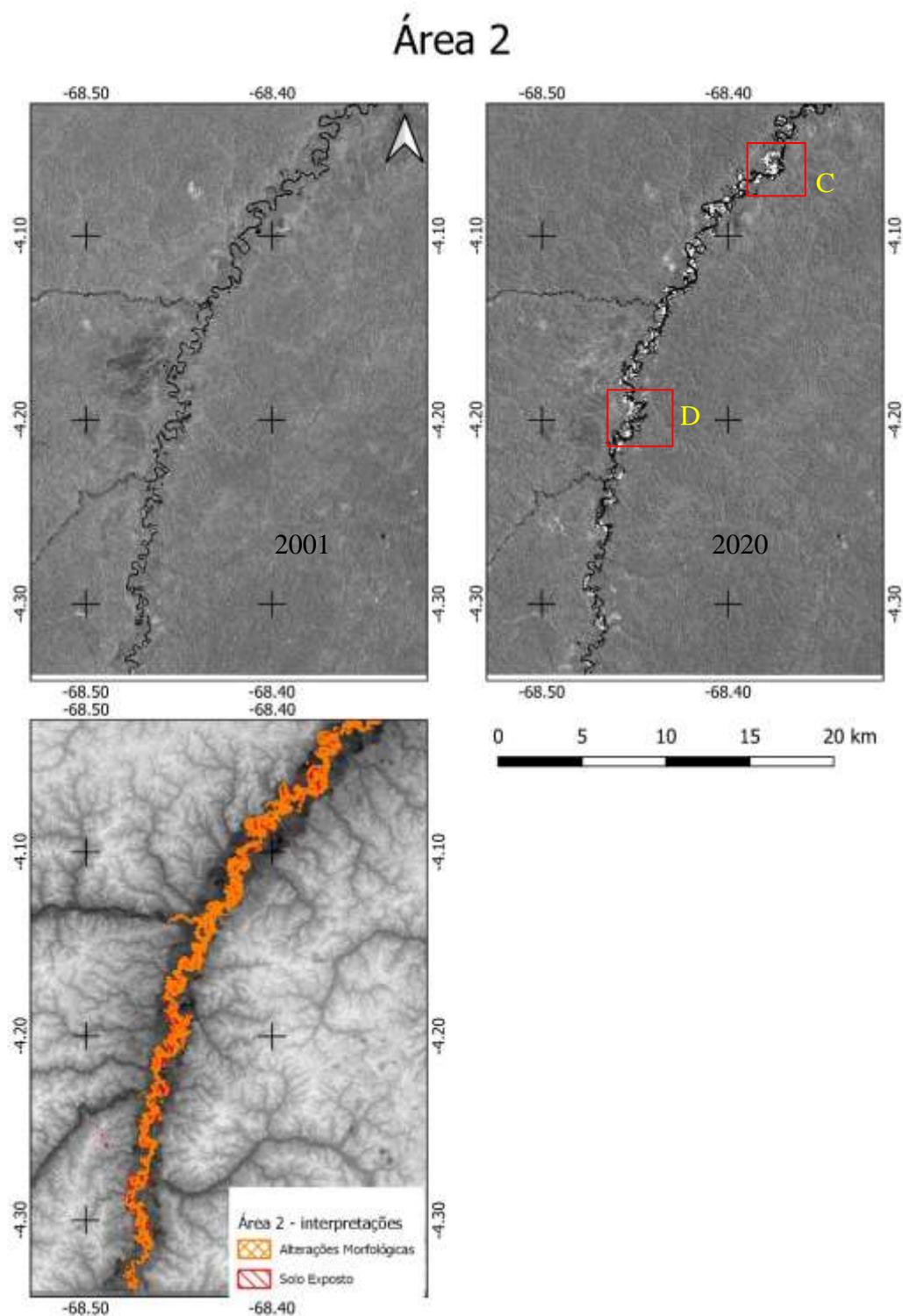


Figura 30. Situação da área 2 do estudo em 2001 (área preservada), em 2020 (área com degradação) e interpretações. Fonte: Marques (2020).

As Figuras 31 e 32 exemplificam dois trechos extraídos da área 2 (Figura 30), C e D respectivamente, para observações em detalhe. Associam as informações

interpretadas sobre as imagens de satélite com fotografias mostrando as feições em campo. Algumas das alterações geomorfológicas observadas para a Figura (31) são citadas:

- Corte do canal com assoreamento e desconfiguração de planície aluvial - seta laranja;
- Reativação de meandro abandonado e lavra na planície aluvial com desbarrancamento e assoreamento - seta amarela;
- Corte do colo de meandro - seta vermelha.

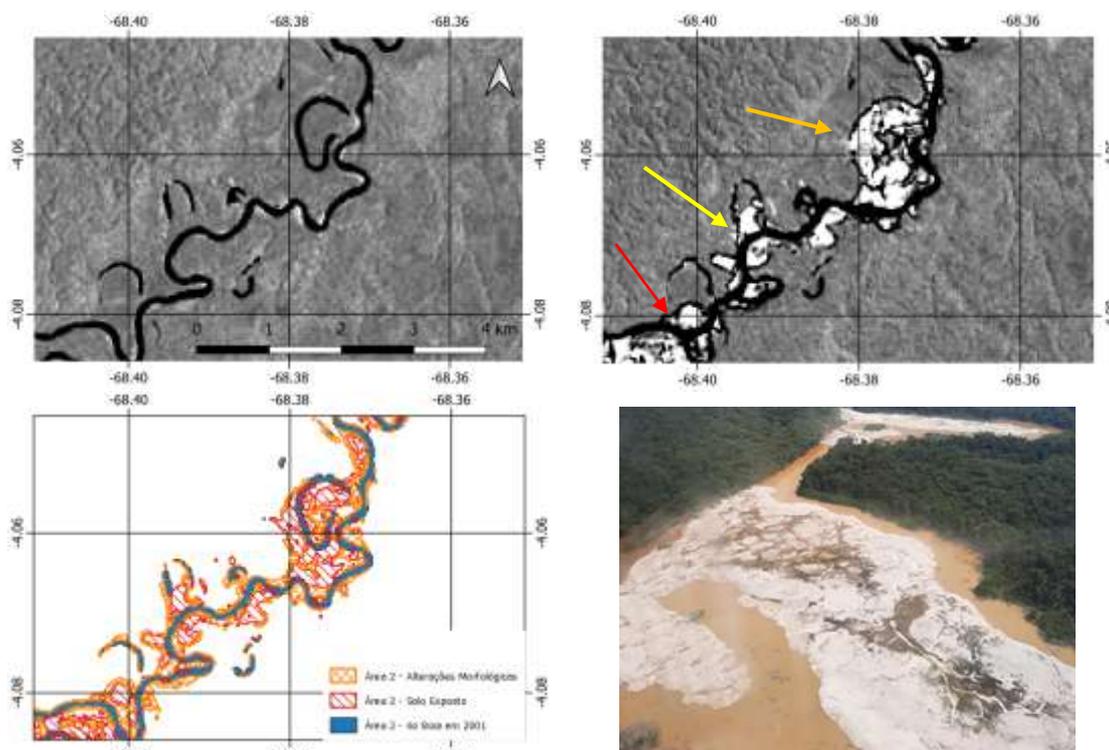


Figura 31. Exemplos de degradação ambiental no trecho C da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).

Alterações geomorfológicas observadas na Figura 32 e citadas:

- Modificação completa do curso, criação de ilhas e alargamento do canal – seta laranja;
- Criação de barras de areia levando ao assoreamento, destruição da planície de inundação – seta vermelha.

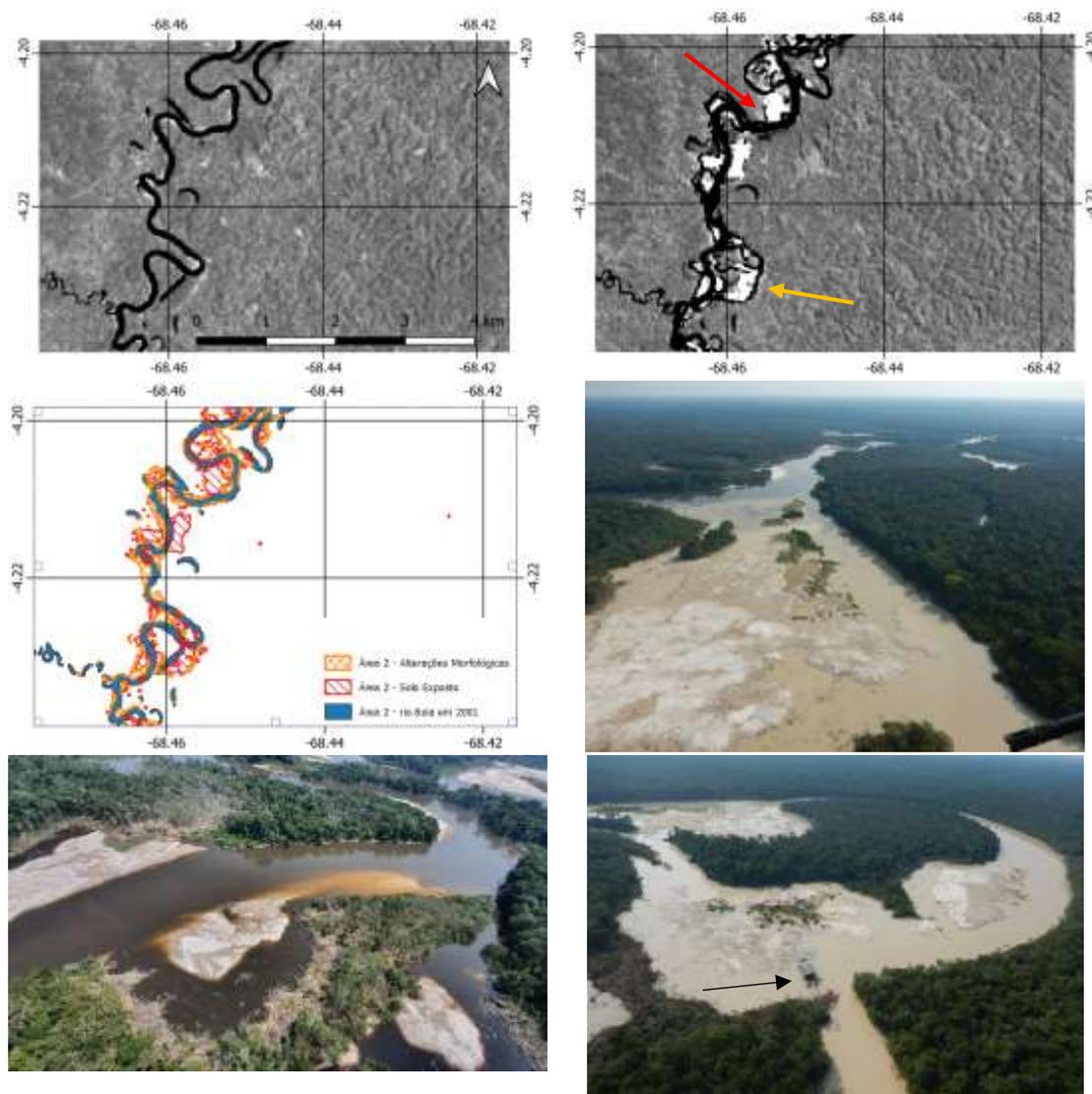


Figura 32. Exemplos de degradação ambiental no trecho D da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).

A metodologia mapeou 481 locais de interesse com alteração superior a 4 *pixel* LANDSAT (>0,36ha). As áreas entre 1px e 4px foram mantidas para observações qualitativas. A tabela 9 resume a totalidade dos dados obtidos:

- Polígonos com áreas inferiores a 4px representam 50,67% do total de ocorrências e 8,83% em área;
- 91,17% das alterações ambientais foram explicadas, por áreas superiores a 4px, com 49,33% das ocorrências;
- 62,67% das alterações são diretamente na morfologia fluvial e 37,33% são relacionadas ao assoreamento.

Tabela 9. Resumo dos resultados quantitativos para a área degradada - área 2.

	1 - 4 px	> 4 px	Total	< 4 px	> 4 px	Total
Solo Exposto	169	195	364	34,21%	40,54%	37,33%
Morfologia Fluvial	325	286	611	65,79%	59,46%	62,67%
Total	494	481	975	50,67%	49,33%	

Para a área 2, semelhante a área 1, constatou-se que o assoreamento é uma consequência direta das alterações causadas na geomorfologia fluvial provocadas pelo garimpo.

A Tabela 10 contém o histograma e o gráfico de áreas com os dados quantificados utilizando técnicas de geoprocessamento para a área 2 quanto as interpretações dos assoreamentos (Figura 33):

- A maior parte, cerca de 70% dos locais de degradação são de pequeno porte, menores que 2ha, representam 25,4% da área – classes 1 e 2;
- Os locais com maiores extensões contínuas degradadas representam 7,68% das ocorrências e 40,2% do total de áreas;
- 53,8% da área total está distribuída nas 6 primeiras classes (<6ha) com 90% das ocorrências.

Tabela 10. Análises quantitativas para solo exposto da área 2.

Polígonos						Solo Exposto		
Classe	(ha)		Frequência		Área			
1	<=1		87	44,62%	53,81	10,95%	Média	2,52
2	>1	<2	50	25,64%	71,12	14,47%	Erro padrão	0,32
3	>2	<3	15	7,69%	38,28	7,79%	Mediana	1,23
4	>3	<4	12	6,15%	43,56	8,87%	Desvio padrão	4,49
5	>4	<5	7	3,59%	31,02	6,31%	Variância da amostra	20,17
6	>5	<6	5	2,56%	26,41	5,38%	Curtose	69,54
7	>6	<7	1	0,51%	6,54	1,33%	Assimetria	7,10
8	>7	<8	3	1,54%	23,04	4,69%	Intervalo	50,33
9	>8		15	7,69%	197,52	40,20%	Mínimo	0,36
Total			195		491,32		Máximo	50,69
							Soma	491,32
							Contagem	195

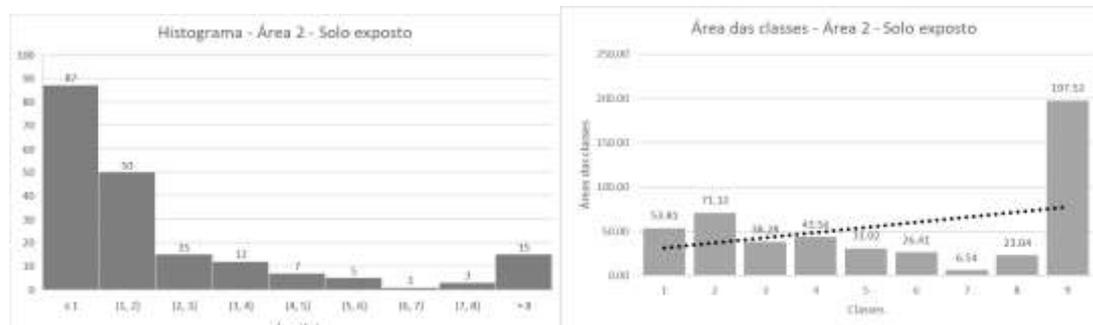


Figura 33. Análises quantitativas para solo exposto da área 2.

A Tabela 11 contém o histograma e o gráfico de áreas, estes resumem os dados obtidos com as técnicas de geoprocessamento para a área 2 quanto as mudanças na geomorfologia fluvial (Figura 34):

- A maior parte, cerca de 52,45% dos locais de degradação são de pequeno porte, menores que 1ha, e representam 19,17% da área – classe 1;
- Os locais com maiores extensões contínuas degradadas representam 4,2% das ocorrências e 25,3% do total de áreas;
- 50% da área total está distribuída nas 3 primeiras classes (<3ha) com 85% das ocorrências;
- 50% da área é representada pelas 4 últimas classes, somando 15% dos locais mapeados.

Tabela 11. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 2.

Classe	Polígonos (ha)		Frequência		Área		Morfologia Fluvial	
1	<=1		150	52,45%	92,57	19,17%	Média	1,69
2	>1	<2	72	25,17%	98,49	20,39%	Erro padrão	0,13
3	>2	<3	22	7,69%	52,46	10,86%	Mediana	0,96
4	>3	<4	17	5,94%	57,36	11,88%	Desvio padrão	2,27
5	>4	<5	10	3,50%	43,39	8,98%	Variância da amostra	5,16
6	>5	<6	3	1,05%	16,40	3,40%	Curtose	31,31
7	>6		12	4,20%	122,26	25,32%	Assimetria	4,68
							Intervalo	22,38
							Mínimo	0,36
							Máximo	22,74
							Soma	482,93
							Contagem	286
Total			286		482,93			

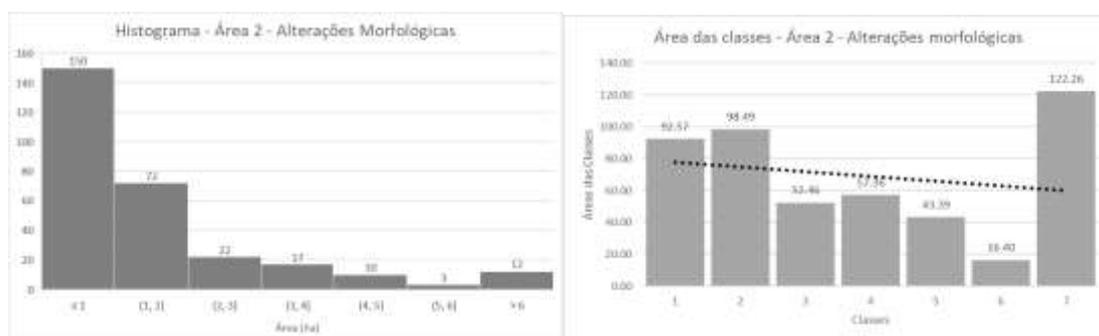


Figura 34. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 2.

Na escala definida para o trabalho, e com a metodologia adotada, mapeou-se para a área 2: 481 locais com interferência humana somando 974ha de área (Tabela 12).

Tabela 12. Resumo da degradação para a área 2.

	Solo Exposto	Morfologia Fluvial	Total
Locais > 4px	195	286	481
Área (ha)	491,32	482,93	974

5.1.3. Área 3

A Área 3 (Figura 35) estuda 77,4 km lineares do igarapé Negro, equivalente a 174,2 km de extensão.

Área 3

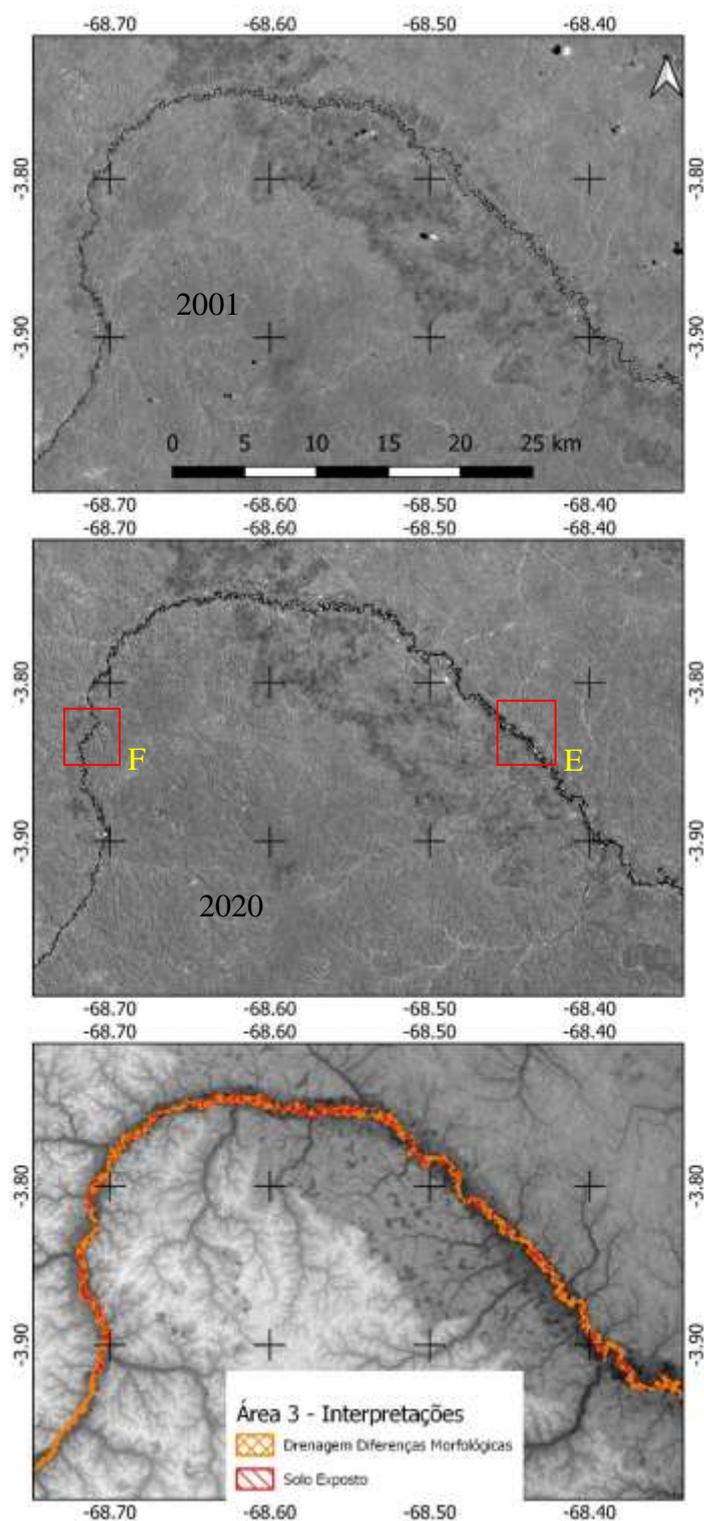


Figura 35. Situação da área 3 do estudo em 2001 (área preservada), em 2020 (área com degradação) e interpretações. Fonte: Marques (2020).

As Figuras 36 e 37 exemplificam dois trechos extraídos da área 3, trechos E e F (Figura 35), respectivamente, para observações em detalhe. Algumas alterações geomorfológicas observadas para a Figura 36 são citadas:

- Corte de canal / mudança de leito– laranja;
- tornar drenagem retilínea / mudança de leito– seta amarela.

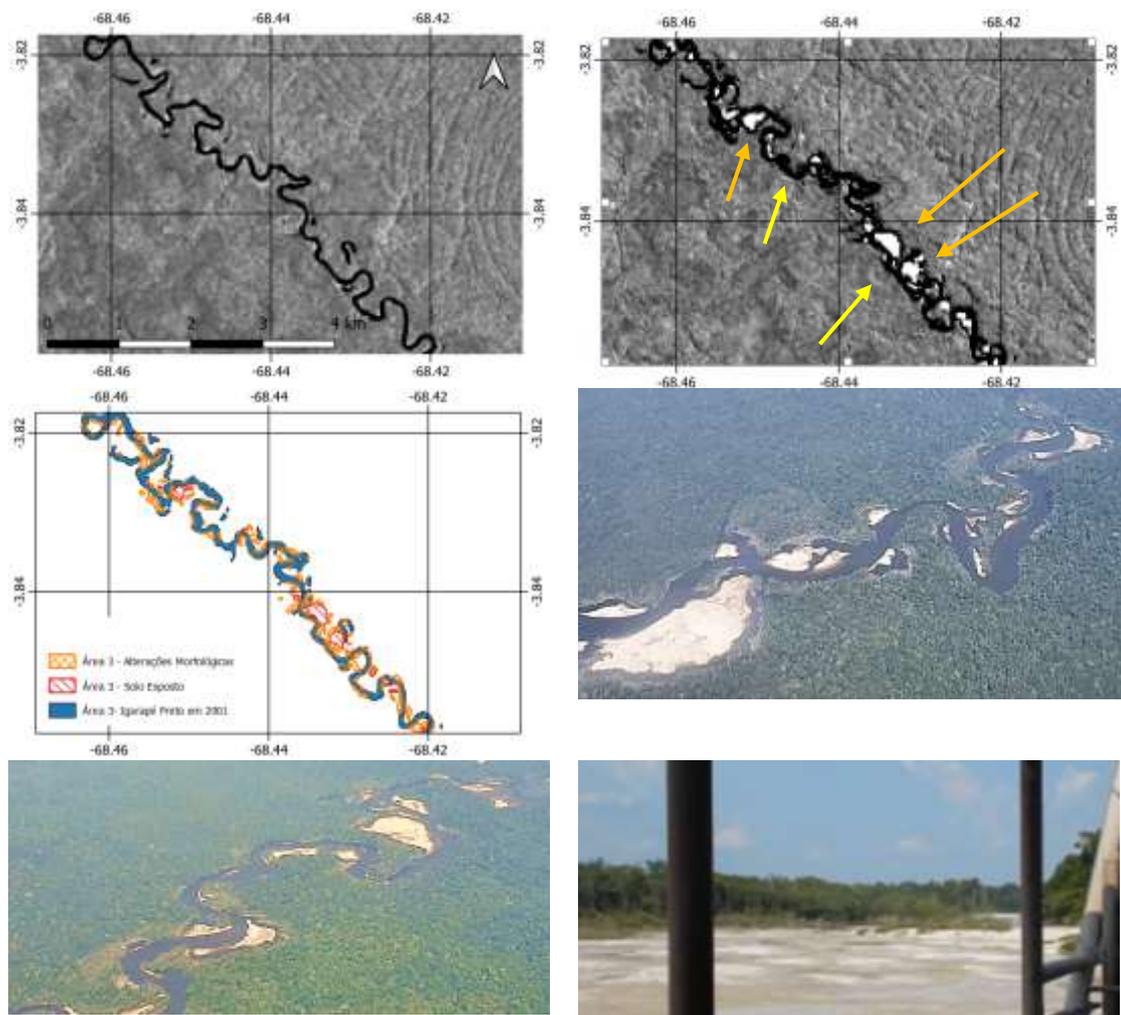


Figura 36. Exemplos de degradação ambiental no trecho E da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).

Alterações geomorfológicas observadas na Figura 37 e citadas:

- Mesmo em locais mais remotos, a montante das drenagens, balsas de pequeno porte conseguem criar mossas na margem, cortar o canal, gerar ilhas, dentre outros – seta amarela.

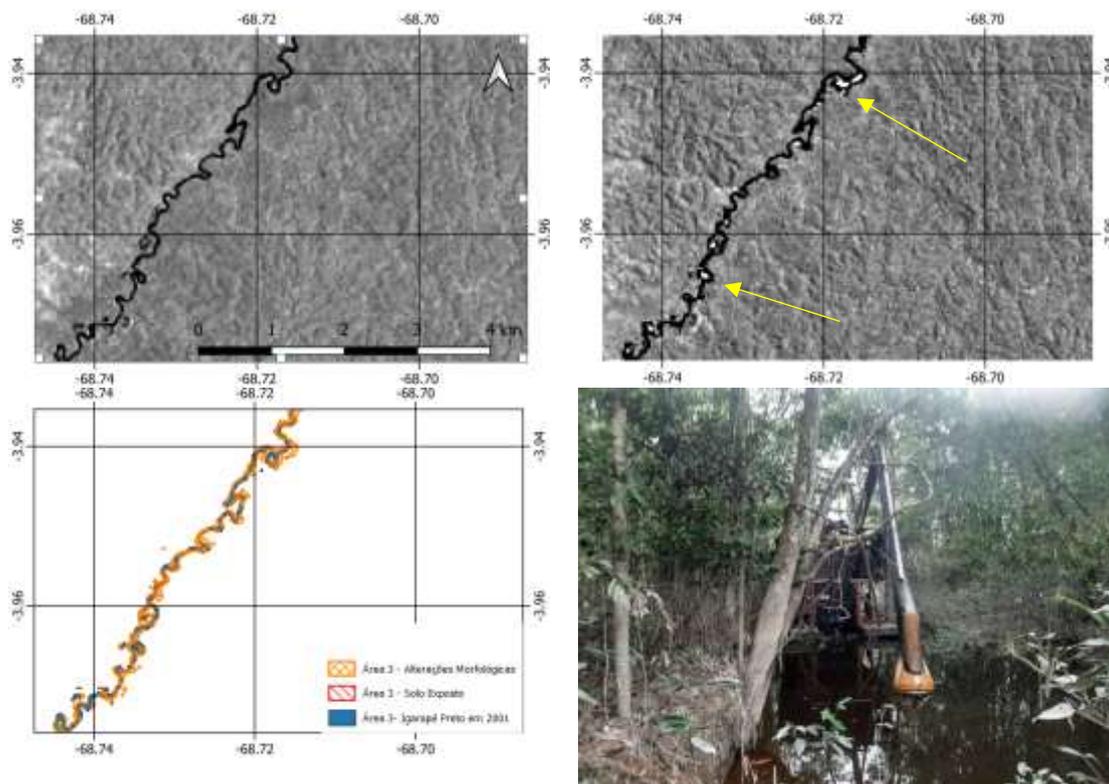


Figura 37. Exemplos de degradação ambiental no trecho F da bacia do rio Boia. Bancos de sedimento assoreando o rio e modificação do curso do rio. Fonte: Marques (2020).

A metodologia utilizada mapeou 404 locais de interesse com alteração superior a 4 *pixel* do sistema (>0,36ha). As áreas entre 1px e 4px foram mantidas para observações. A tabela 13 resume a totalidade dos dados obtidos:

- Polígonos com áreas inferiores a 4px representam aproximadamente 61,63% do total de ocorrências e 20,35% em área;
- 79,65% das alterações ambientais foram explicadas, nessa escala de trabalho, com áreas superiores a 4px, e com 38,37% das ocorrências;
- 76,49% das alterações são diretamente na morfologia fluvial e 23,51% são relacionadas ao assoreamento.

Tabela 13. Resumo dos resultados quantitativos para a área degradada - área 3.

	1 - 4 px	> 4 px	Total	< 4 px	> 4 px	Total
Solo Exposto	147	95	242	22,65%	23,51%	22,98%
Morfologia Fluvial	502	309	811	77,35%	76,49%	77,02%
Total	649	404	1053	61,63%	38,37%	

Para a área 3 pôde-se constatar, da mesma maneira que para as áreas 1 e 2, que o assoreamento é uma consequência direta das alterações na geomorfologia fluvial decorrentes do garimpo; é repetida a associação dos dois alvos.

A Tabela 14 abaixo contém o histograma e o gráfico de áreas com os dados obtidos utilizando técnicas de geoprocessamento para a área 3 quanto as interpretações dos assoreamentos (Figura 38):

- Os polígonos de assoreamento, e bancos de areia, como um todo, possuem áreas menores que as encontradas no rio Boia – consequência direta de tratar-se de uma drenagem de menor porte que o rio Boia, hoje e no tempo geológico – menor planície aluvial e menor disponibilidade de água.
- 64,2% dos locais de degradação são de pequeno porte, menores que 1ha, formam 34,3% da área total – classes 1. As áreas menores são mais representativas para a degradação no igarapé Preto que para o rio Boia;
- Os locais com maiores extensões contínuas degradadas representam 2,11% das ocorrências e 10,4% do total de áreas;
- 63% da degradada é menor que 2ha – 87,4% dos locais.

Tabela 14. Análises quantitativas para solo exposto da área 3.

Classe	Polígonos (ha)		Frequência		Área		Solo Exposto	
1		≤1	61	64,21%	36,50	34,30%	Média	1,12
2	>1	<2	22	23,16%	30,93	29,07%	Erro padrão	0,10
3	>2	<3	7	7,37%	17,41	16,36%	Mediana	0,75
4	>3	<4	3	3,16%	10,47	9,84%	Desvio padrão	0,99
5	>4		2	2,11%	11,10	10,43%	Variância da amostra	0,98
							Curtose	7,75
							Assimetria	2,54
							Intervalo	5,39
							Mínimo	0,37
							Máximo	5,75
							Soma	106,41
							Contagem	95
Total			95		106,41			

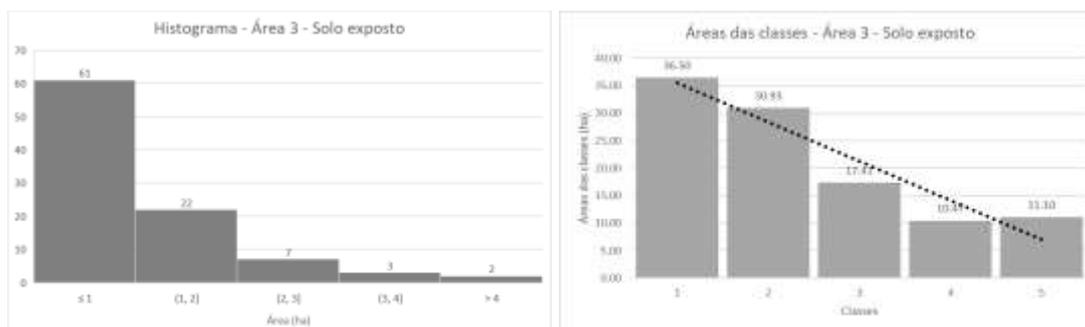


Figura 38. Análises quantitativas para solo exposto da área 3.

A Tabela 15 abaixo contém o histograma e o gráfico mostrando as interpretações para as áreas degradadas da morfologia do rio (Figura 39):

- Há um amplo domínio de áreas menores – consequência direta de ser um rio de menor porte que o rio Boia.
- 87,6% dos locais de degradação são menores que 2ha e representam 96,1% de todos os locais mapeados.

Tabela 15. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 3.

Classe	Polígonos (ha)		Frequência		Área		Morfologia Fluvial	
1		<=1	216	69,90%	130,76	47,26%	Média	0,90
2	>1	<2	81	26,21%	111,67	40,36%	Erro padrão	0,03
3	>2	<3	8	2,59%	19,29	6,97%	Mediana	0,73
4	>3		4	1,29%	14,97	5,41%	Desvio padrão	0,58
							Variância da amostra	0,33
							Curtose	9,29
							Assimetria	2,44
							Intervalo	4,38
							Mínimo	0,36
							Máximo	4,74
							Soma	276,68
							Contagem	309
Total			309		276,68			

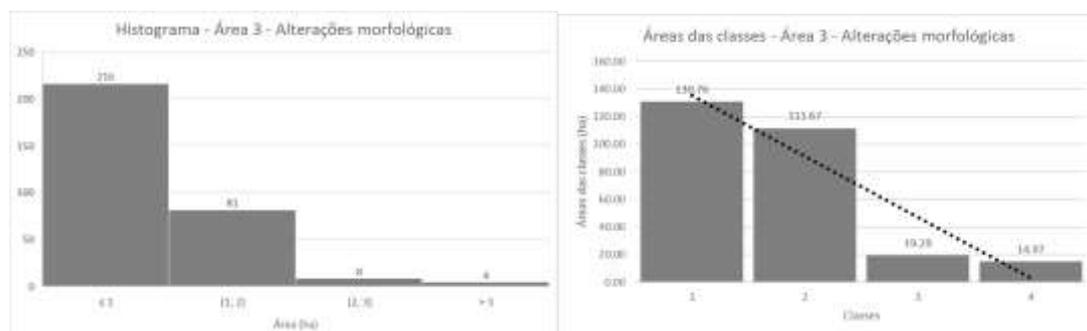


Figura 39. Análises quantitativas para morfologia fluvial da área 3.

Na escala definida para o trabalho, e com a metodologia adotada, mapeou-se para a área 2: 404 locais com interferência humana somando 383ha de área (Tabela 16).

Tabela 16. Resumo da degradação para a área 3.

	Solo Exposto	Morfologia Fluvial	Total
Locais > 4px	95	309	404
Área (ha)	106,41	276,68	383

5.1.4. Área 1 - PLANET

Os estudos complementares utilizando o sistema de imageamento PLANET focaram no alvo solo exposto para a área 1 (Figura 40). Forneceu entendimento para o estudo geomorfológico e a interpretação visual das feições realizado para as 3 áreas.

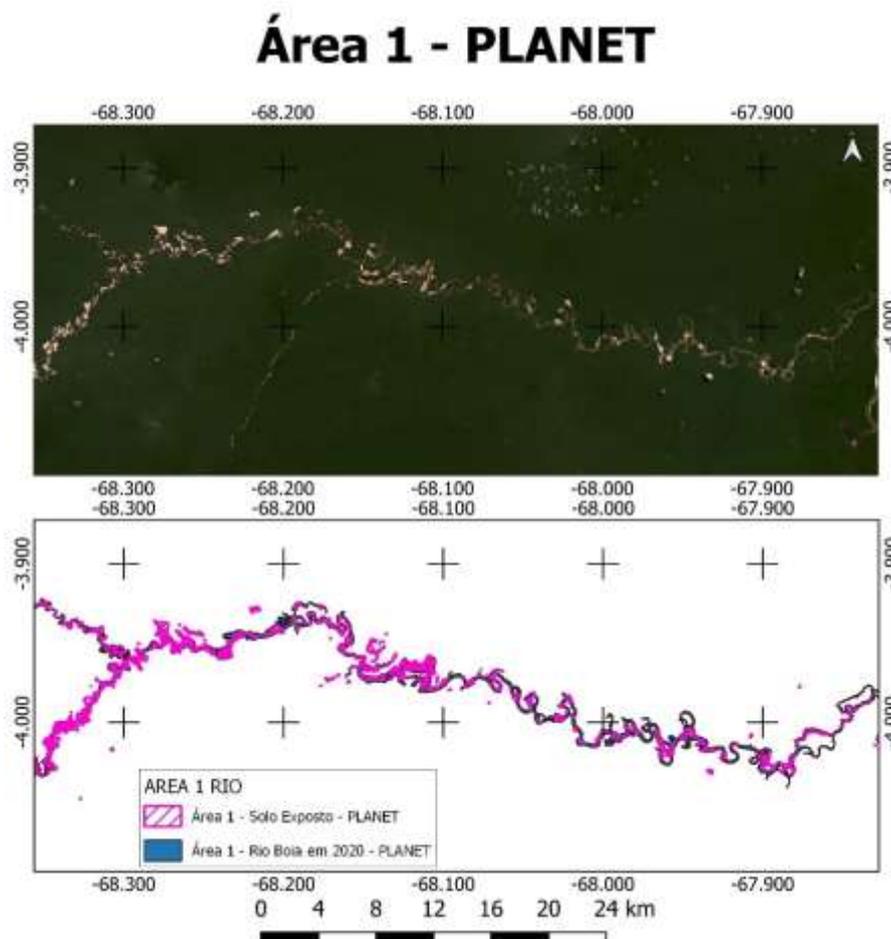


Figura 40. Situação da área 1 interpretada sobre imagens do sistema PLANET (2020).
Fonte: Marques (2020).

As interpretações foram realizadas na escala 1:10.000, com possibilidades de especificar alvos na escala 1:5.000, nível de detalhe muito superior às possíveis com as imagens LANDSAT.

As Figuras 41 e 42 exemplificam duas porções do rio para observações em detalhe, trechos A e B da Figura 25, respectivamente. São coincidentes com partes das feições LANDSAT apresentadas no item 5.1.1. São cortes feitos na escala 1:25.000, intermediária entre as interpretações LANDSAT – 1:50.000 – e as interpretações

PLANET – 1:10.000. Essa escala facilita a apresentação em conjunto de dados produzidos em escalas diferentes.

Observa-se na Figura 41 que:

- A metodologia aplicada aos dois conjuntos de dados (LANDSAT e PLANET) conseguiram mapear as mesmas morfologias;
- A feições obtiveram melhor definição nas imagens de melhor resolução espacial, possibilitando melhor mapeamento.
- Os polígonos definidos para as imagens PLANET, em geral, circunscrevem os polígonos LANDSAT;
- Reativação de meandro abandonado e lavra na planície aluvial com desbarrancamento e assoreamento – seta amarela.

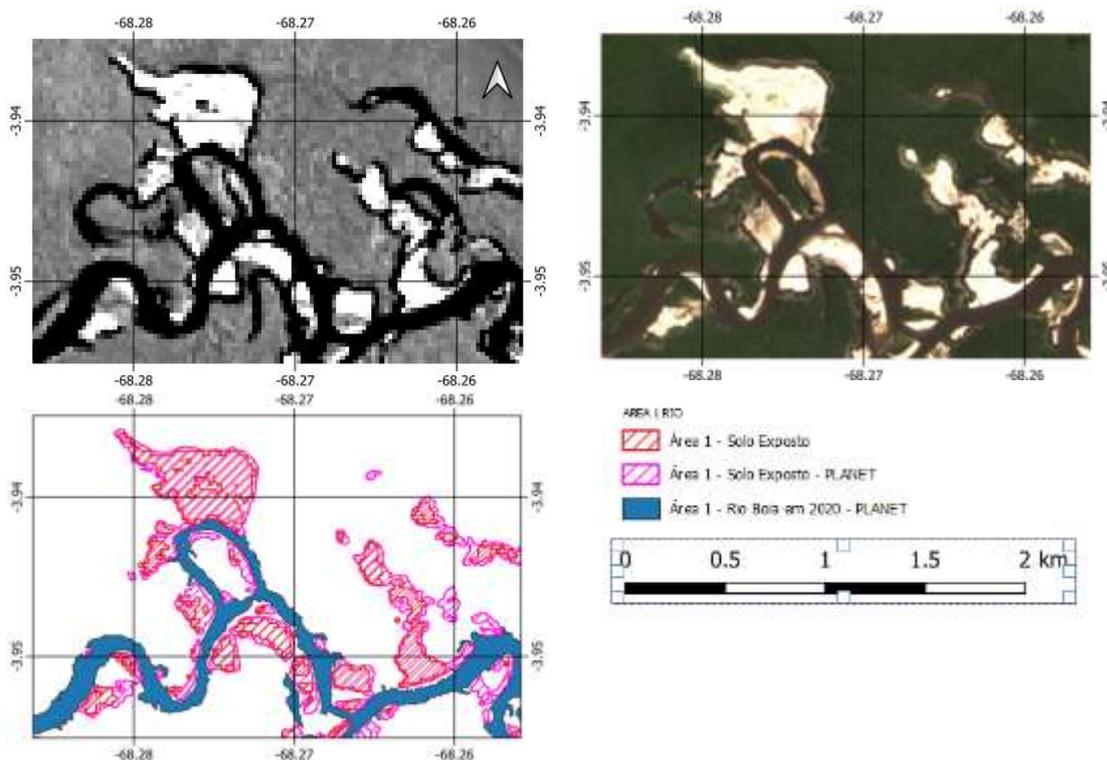


Figura 41. Exemplos de degradação ambiental no trecho A da bacia do rio Boia, usando Imagens de maior resolução, PLANET (2020). Fonte: Marques (2020).

Locais onde as áreas antropizadas apresentam geometria mais complexa, ocorrem maiores diferenças entre as interpretações LANDSAT e PLANET. Esta outra característica decorrente da resolução espacial. A metodologia semiautomatizada para individualização e classificação dos alvos, com constantes interações do interprete, sua

experiência visual e sistema simbólico, é outro fator que beneficia os resultados de uma interpretação sobre dados com melhor resolução espacial. Em geral os polígonos interpretados ficam maiores, áreas de baixa definição espectrométrica ou espacial são mais bem interpretadas, agrupamentos de áreas e áreas anexas também ganham em definição (Figura 42).

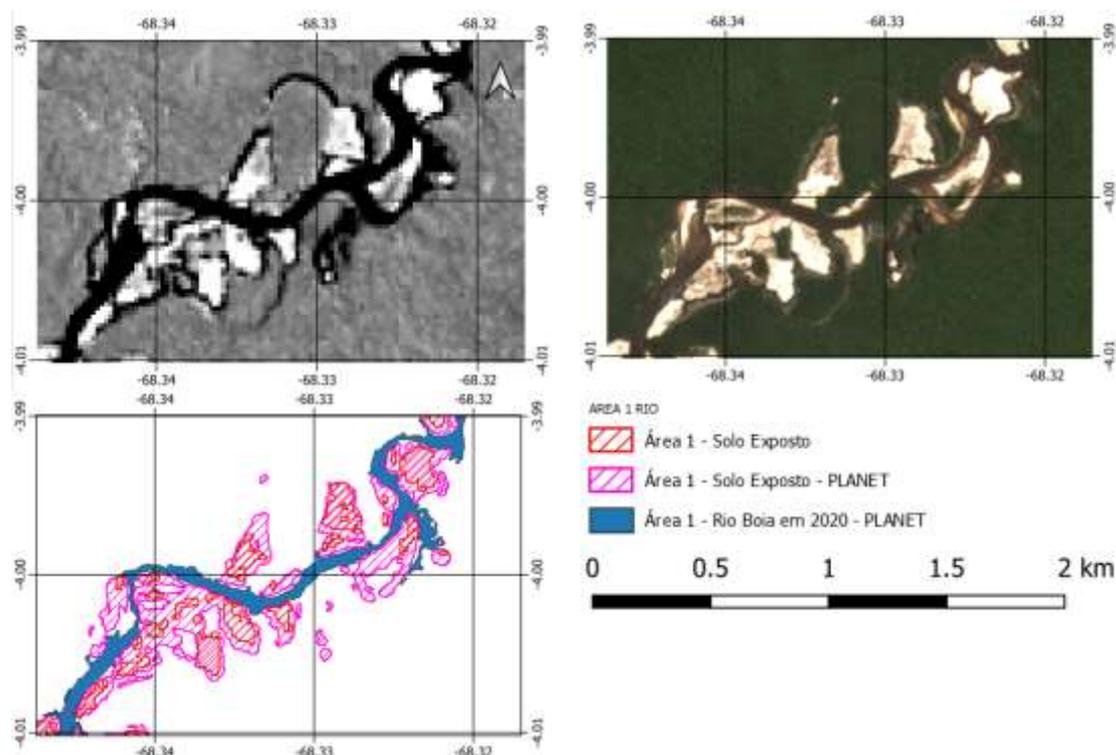


Figura 42. Exemplos de degradação ambiental no trecho B da bacia do rio Boia, usando Imagens de maior resolução, PLANET (2020). Fonte: Marques (2020).

Sobre as imagens PLANET a metodologia mapeou 599 alvos como solo exposto, totalizando uma área de 1.070, 97ha (Tabela 17 e Figura 43). Essa área é aproximadamente 267% superior às mapeadas utilizando o sistema LANDSAT, na escala 1:50.000. Outras diferenças imediatas observadas em relação as interpretações 1:10.000 e 1:50.000 são:

- Mapeou 358% mais locais com solo exposto;
- O maior aumento percentual no número de alvos mapeados, foram os com áreas menores ou iguais a 1ha;
- O maior aumento percentual em área contínua são os polígonos maiores que 9ha;

- Ter maior resolução na detecção de alvos é inerente ao aumento da escala. A concentração de polígonos com grandes áreas é, em parte, explicada pela concatenação de alvos adjacentes por istmos imperceptíveis na escala 1:50.000. Outro fator é a melhor definição de borda.

Tabela 17. Análises quantitativas para solo exposto da área 1, imagens PLANET (2020).

Classe	Polígonos (ha)		Frequência		Área		Morfologia Fluvial	
1	<=1		427	71,29%	127,38	11,89%	Média	1,79
2	>1	<2	54	9,02%	77,01	7,19%	Erro padrão	0,17
3	>2	<3	29	4,84%	70,21	6,56%	Mediana	0,38
4	>3	>4	18	3,01%	63,20	5,90%	Desvio padrão	4,05
5	>4	>5	17	2,84%	76,25	7,12%	Variância da amostra	16,44
6	>5	>6	5	0,83%	27,52	2,57%	Curtose	29,76
7	>6	>7	7	0,83%	33,80	3,16%	Assimetria	4,76
8	>7	>8	37	1,17%	52,49	4,90%	Intervalo	39,76
9	>8			6,18%	543,10	50,71%	Mínimo	0,05
							Máximo	39,81
							Soma	1070,97
							Contagem	599,00
Total			599		1070,97			

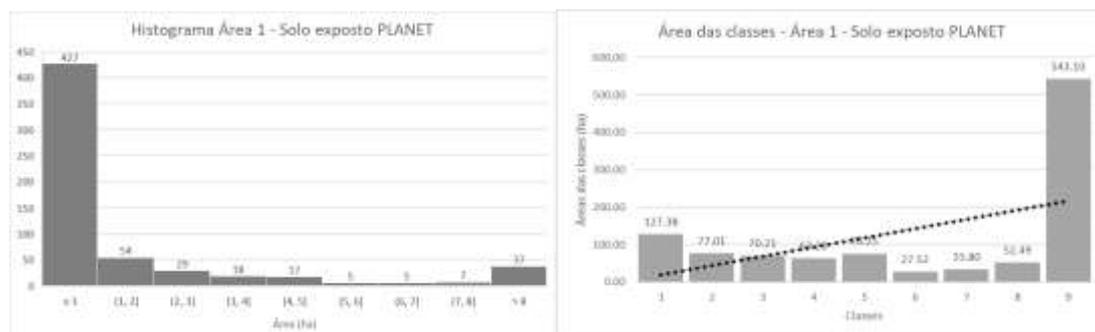


Figura 43. Análises quantitativas para solo exposto da área 1, imagens PLANET (2020).

5.2. Resultados analíticos por FRX

5.2.1. Amostras ambientais rio Boia

A Figura 14 mostra o local de coleta das amostras ambientais no rio Boia. Foram analisadas três amostras de água e quatro de sedimentos coletada no primeiro ponto de

amostragem - RB1, a amostra de água e duas de sedimento coletadas no segundo ponto de amostragem. A tabela 3 resume as características as amostras ambientais.

Foram realizadas análises repetidas sobre as amostras e suas duplicatas - análises e reanálises para verificar a reprodutibilidade dos resultados pelos equipamentos. Entre 3 e 5 análises foram realizadas para cada amostra. Foram selecionadas, de cada amostra, 3 ou 2 resultados, os que menos contribuem com a variância. São apresentados na tabela 18 a e b, os resultados obtidos, retiradas as análises com valores 'outliers' e resumida aos elementos de interesse.

Tabela 18 a e b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água do rio Boia.

Amostras H2O	Co (µg/l)	Cu(µg/l)	Au(µg/l)	Pb(µg/l)	Hg(µg/l)	Y(µg/l)
ARB1	1,40	7,60	0	6,08	12,66	13,24
ARB1	0,00	0,00	0	5,76	12,22	0
ARB1	0,00	0,00	0	5,76	12,22	13,73
ARB2	0,00	3,14	0	4,54	13,61	18,59
ARB2	0,00	3,59	0	4,35	12,87	18,72
ARB1.2	15,66	9,92	0	16,72	8,40	27,98
ARB1.2	10,82	12,11	0	17,14	8,28	0
ARB1.2	17,11	6,10	0,81	20,53	8,49	0
ARB1.3	14,06	3,64	0	14,10	7,57	0
ARB1.3	17,49	9,78	0	15,68	8,55	0

Tabela 18b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água do rio Boia.

Amostras H2O	Co (µg/l)	Cu(µg/l)	Au(µg/l)	Pb(µg/l)	Hg(µg/l)	Y(µg/l)
ARB1	0,47	2,53	0,00	5,86	12,37	8,99
ARB2	0,00	3,37	0,00	4,44	13,24	18,66
ARB1.2	14,53	9,37	0,27	18,13	8,39	9,33
ARB1.3	15,78	6,71	0,00	14,89	8,06	0,00

O foco dessa pesquisa reside na contaminação ambiental por metais pesados, especialmente o mercúrio, por essa razão os dados foram resumidos para os elementos de interesse e que, em análise preliminar, melhor resumem os dados de contaminação ambiental. Os resultados obtidos com o tubo de raios-x de W bean não foram aproveitados, por hora. Os materiais foram analisados para todos os elementos possíveis entre o magnésio e o urânio, excetuando-se os elementos impossíveis tais como: gases

nobres, tecnécio, zircônio, o padrão – Ga. Os resultados para água são todos em $\mu\text{g/l}$ (ppb) e para sedimentos em mg/kg (ppm).

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, n° 396, de 3 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, apresenta no Anexo 1, os valores máximos de concentração permitidos para os numerosos elementos e para diversas finalidades de uso d'água. O Anexo estabelece que: quando o “uso preponderante da água for o consumo humano ou a recreação, a concentração máxima de mercúrio no corpo d'água deve ser de $1\mu\text{g.L}^{-1}$; e o VMP para irrigação é de $2\mu\text{g.L}^{-1}$.

A tabela 19 mostra os resultados obtidos para as amostras de água. Observa-se que:

- As amostras ARB1 e ARB2, retiradas diretamente da drenagem, apresentam valores de mercúrio 12 e 13 vezes, respectivamente, superiores aos limites estabelecidos pela resolução CONAMA, n° 396;
- As amostras de água retiradas de tambores utilizados no processo de concentração do ouro na balsa de garimpo – ARB1.2 e ARB1.3 – retornaram valores aproximadamente 8 vezes superiores a resolução CONAMA, n° 396;
- A amostra do tambor ARB1.2 apresentou ouro em uma das análises;
- Cu e Y são elementos que auxiliam a caracterizar as populações de amostras.

A Resolução CONAMA n° 454, de 1° de novembro de 2012, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional., assim dispõe em seu art 1° as diretrizes gerais e procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado visando ao gerenciamento de sua disposição em águas jurisdicionais brasileiras. Assim sendo, define o valor máximo aceitável de mercúrio nos sedimentos de fundo de rio, em locais a serem utilizados para dragagem, preconizando os limites em mg Hg/kg (miligramas de mercúrio por quilograma de sedimentos) Nível 1 – com menor probabilidade de efeitos adversos à biota – é de $0,170 \text{ mg Hg/kg}$ e para Nível 2 – acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota – é de $0,486 \text{ mg/kg}$.

A tabela 19 a e b, apresenta os resultados obtidos para os sedimentos em mg/kg :

- Considerando-se a média das análises, todas as amostras apresentam teores de mercúrio acima dos Níveis 1 e 2;

- As amostras SRB1, SRB1.3 e SRB2, retiradas dos bancos de areia formado pelos sedimentos rejeito da atividade. As amostras no ponto 1 (SRB1 e SRB1.3) produziram resultados para Hg acima no Nível 2 contudo próximos do limiar; a amostra do ponto 2 apresentou teores mais altos, cerca de 4,5x superior ao limite do Nível 2;
- A amostra retirada SRB1.2, retirada diretamente dos sedimentos de rejeito imediatamente antes de serem lançados no meio ambiente produziram os teores mais elevados do contaminante, 13,7 vezes superior ao limite máximo do Nível 2.

Tabela 19 a e b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água do rio Boia.

Amostras de Sedimentos	Cu (mg/kg)	Au (mg/kg)	Hf (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Y (mg/kg)
SRB1	---	---	298,00	11,81	0,69	402,10
SRB1	---	0,39	290,40	11,99	0,41	390,90
SRB1	---	0,48	288,20	12,82	0,84	377,10
SRB1.1	---	---	335,30	28,80	1,75	634,90
SRB1.1	---	---	372,50	26,77	2,10	740,20
SRB1.1	---	---	366,90	26,51	1,37	729,50
SRB1.2	28,11	---	8,77	4,27	6,58	9,87
SRB1.2	25,50	---	8,40	4,96	6,71	14,49
SRB1.2	26,12	---	8,20	4,07	6,79	7,28
SRB1.3	---	---	15,42	2,15	0,68	5,17
SRB1.3	---	---	17,64	2,08	0,91	6,06
SRB2	---	---	32,66	2,63	2,52	17,52
SRB2	---	---	33,69	2,86	2,68	18,06
SRB2	---	---	32,71	2,58	1,49	14,33
SRB2.1	---	---	16,92	2,84	2,01	9,11
SRB2.1	---	---	15,55	2,72	2,14	9,25
SRB2.1	---	---	16,81	2,75	2,06	9,04

Tabela 19b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água do rio Boia.

Amostras de Sedimentos	Cu (mg/kg)	Au (mg/kg)	Hf (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Y (mg/kg)
SRB1	0,00	0,29	292,20	12,21	0,64	390,03
SRB1.1	0,00	0,00	358,23	27,36	1,74	701,53
SRB1.2	26,58	0,00	8,46	4,43	6,69	10,55
SRB1.3	0,00	0,00	16,53	2,12	0,80	5,61
SRB2	0,00	0,00	33,02	2,69	2,23	16,64
SRB2.1	0,00	0,00	16,43	2,77	2,07	9,13

5.2.2. Amostras regionais – água de retorta

A Figura 15 mostra o local de coleta das amostras regionais de água de retorta. Foram analisadas nove amostras distintas proveniente de 5 lugares (Tabela 3). As amostras originais, como relatado no subitem 4.3.1, são bifásicas: mercúrio metálico e a água utilizada para a sua condensação (água de retorta) (Figura 44). Foram analisadas cada fase separadamente, o mercúrio metálico apenas com a metodologia EDXRF conforme descrito em 4.4.1.1 e as águas de retorta com EDXRF e TXRF, descritos em 4.4.1.1 e 4.4.1.2. As calibrações analíticas possuem seus algoritmos definidos com as configurações de fábrica, não há opção de interação do usuário, os elementos analisáveis de cada calibração são constantes (descritos em 4.4.1.1).



Figura 44. Amostra original de água de retorta, mostrando as duas fases presentes: mercúrio e água.

As análises por TXRF são consideradas a referência analítica para as comparações realizadas no escopo dessa pesquisa. A metodologia TXRF empregada é quantitativa,

utiliza padrão interno (Ga), não possui efeito matriz, possui alta sensibilidade e baixo limite de detecção, ideal para análise de efluentes líquidos e águas.

Foram realizadas análises de 5 a 7 análises sobre cada amostra no TXRF para as diluições de 20x e de 50x. O objetivo é o de verificar a reprodutibilidade de resultados.

Imediatamente observa-se que as amostras com menor diluição (20x) apresentam maior estabilidade de resultados – menor variância do conjunto de dados –, especialmente para o tubo de W. No início da pesquisa, em um momento no qual as amostras eram desconhecidas, optou-se por iniciar os trabalhos com uma maior diluição, realizar análises exploratórias e evitar altas concentrações de mercúrio. Observado os resultados conseguidos para a diluição de 50x, as amostras foram refeitas com uma diluição menor, 20x, que forneceu resultados com maior reprodutibilidade e menor variância para serem usados nessa pesquisa. São aproveitados no escopo dessa pesquisa os 3 resultados com menor variância para cada amostra. Da mesma forma que para as amostras ambientais do rio Boia, essa pesquisa foca nos elementos de maior interesse ambiental (Hg, Pb) e que melhor resumem o comportamento das amostras.

A tabela 20 'a', 'b' e 'c' e a Figura 45 exibem os resultados das 3 melhores análises e, anexado, as médias destas. Todos os resultados estão convertidos para a concentração original, corrigido o fator de diluição. Sobre os resultados:

- Todas as amostras de água de retorta possuem mercúrio diluído no estado inorgânico em elevados teores.
- A amostra 1826/21B, proveniente do rio Puruês é a que apresenta a menor contaminação – média de 4.249,33 µg/l – e a amostra RB1B é a que retornou os maiores teores de Hg – média de 108.993,33 µg/l.
- As amostras 3076/21A e 3076/21B, provenientes do paraná Anarapu, são as amostras de um mesmo local que apresentam resultados semelhantes para Hg, contudo se diferenciam ao se considerar os resultados para Pb e Y, outros dois elementos tóxicos.
- As amostras RB1A, RB1B, 1035/19, 3076/21A, 3076/21B, 1826/21A, 1827/21 e 2462/21 apresentam ouro diluído na água. A amostra RB1B retornou o maior valor de Au diluído com média de 631 µg/l.
- A amostra 1826/21B é a única que não apresentou ouro e a que retornou menor valor de Hg.

- O gráfico mostrado na figura 46 evidencia correlação positiva entre os teores de ouro e de mercúrio. As duas principais hipóteses a serem testadas posteriormente dizem respeito a uma possível contaminação de sinal, a curva do elemento mercúrio pode estar contaminando o ouro; e a um aumento da solubilidade do ouro em água na presença de mercúrio.

Tabela 20. a, b e c. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água de retorta.

Tipo de Amostra	Amostra	Cu (µg/l)	Au (µg/l)	Pb (µg/l)	Hg (µg/l)	Se (µg/l)	Y (µg/l)
Retorta	RB1A	589	132,34	326,2	8776	0	423,4
Retorta	RB1A	389,6	452,8	224,8	9126	0	615
Retorta	RB1A	386	428,6	268,8	8014	24,4	140,94
Retorta	RB1B	101,68	717,2	103,68	112860	0	450,6
Retorta	RB1B	135,86	630,8	77,06	109680	0	480,8
Retorta	RB1B	170,3	546	185,32	104440	0	442,8
Retorta	1035/19	590,2	348,6	875,6	56860	0	2604
Retorta	1035/19	295,8	378	820,6	56580	0	465,2
Retorta	1035/19	544,2	351,6	887,4	46860	0	1037,6
Retorta	3076/21A	893,4	74,48	59,3	33480	0	0
Retorta	3076/21A	884,6	39,74	40,58	30520	0	519
Retorta	3076/21A	1125,4	71,36	111,66	27780	0	529,6
Retorta	3076/21B	691	124,44	8424	30840	0	246,6
Retorta	3076/21B	745,2	108,96	8434	34520	0	313,6
Retorta	3076/21B	746,4	134,78	8192	28520	20,94	279,2
Retorta	1826/21A	243	47,18	1058,8	32860	0	361,6
Retorta	1826/21A	0	126,74	1169	32560	0	289,2
Retorta	1826/21A	209	163,86	1011	33200	0	382
Retorta	1826/21B	256,4	0	346,2	4656	0	369,2
Retorta	1826/21B	124,96	0	433	4016	0	381,2
Retorta	1826/21B	295,4	0	389	4076	0	347,4
Retorta	1827/21	179,44	352	0	61440	0	307,6
Retorta	1827/21	179,92	288,6	0	59700	0	347
Retorta	1827/21	205,6	86,54	0	57020	0	390
Retorta	2462/21	5948	264,2	5228	33740	0	331,6
Retorta	2462/21	6182	430,8	5522	31880	0	1611,2
Retorta	2462/21	5946	324,6	5378	29500	0	292,2

Tabela 20b. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água de retorta.

Tipo de Amostra	Amostra	Cu (µg/l)	Au (µg/l)	Pb (µg/l)	Hg (µg/l)	Se (µg/l)	Y (µg/l)
Retorta	RB1A	454,87	337,91	273,27	8638,67	8,13	393,11
Retorta	RB1B	135,95	631,33	122,02	108993,33	0,00	458,07
Retorta	1035/19	476,73	359,40	861,20	53433,33	0,00	1368,93
Retorta	3076/21A	967,80	61,86	70,51	30593,33	0,00	349,53
Retorta	3076/21B	727,53	122,73	8350,00	31293,33	6,98	279,80
Retorta	1826/21A	150,67	112,59	1079,60	32873,33	0,00	344,27
Retorta	1826/21B	225,59	0,00	389,40	4249,33	0,00	365,93
Retorta	1827/21	188,32	242,38	0,00	59386,67	0,00	348,20
Retorta	2462/21	6025,33	339,87	5376,00	31706,67	0,00	745,00

Tabela 20c. Resultados analíticos gerais e de médias para as amostras ambientais de água de retorta.

TXRF - água de retorta	
Estatística Básica	
Média	40129,78
Erro padrão	5815,39
Mediana	32860,00
Desvio padrão	30217,68
Variância da amostra	913107995,2
Mínimo	4016
Máximo	112860
Soma	1083504
Contagem	27

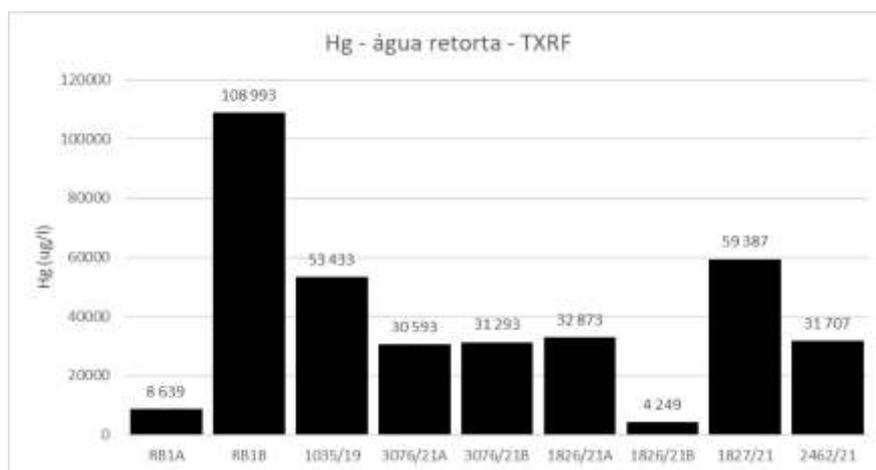


Figura 45. Tores de mercúrio para as amostras analisadas.

- As calibrações GeoMining Ox 2 phases e Ox 3 phases retornaram resultados compatíveis entre si. A mesma ordem de grandeza separa os dois dos teores reais obtidos com TXRF.
- A calibração GeoExploration retornou resultados com a ordem de grandeza bem superior que GeoMining e não identificou Hg na amostra 1826/21B. Essa é a amostra que resultou os menores teores ao ser analisada no TXRF. Para essa matriz e sob as condições analíticas empregadas, o limite de detecção de Hg por essa calibração é superior a 4.000 µg/l (Tabela 24 e Figura 47).

Tabela 21. Resultados do EDXRF, usando a calibração ‘Oxide 3 phases’ para amostras água de retorta.

Tipo de Amostra	Calibração	Amostra	Fe (%)	Pd (%)	Hg (%)	Pb (%)	Hg média
RETORTA	Oxide 3phases	RB1A	0,0288	0,0038	0,0100	---	0,0103
RETORTA	Oxide 3phases	RB1A	0,0308	0,0046	0,0106	---	
RETORTA	Oxide 3phases	RB1B	0,0288	0,0036	0,0433	---	0,0446
RETORTA	Oxide 3phases	RB1B	0,0284	0,0024	0,0458	---	
RETORTA	Oxide 3phases	1035/19	0,0271	0,0023	0,0374	---	0,0384
RETORTA	Oxide 3phases	1035/19	0,0242	---	0,0394	---	
RETORTA	Oxide 3phases	3076/21A	0,0304	---	0,0112	---	0,0125
RETORTA	Oxide 3phases	3076/21A	0,0287	0,0023	0,0138	---	
RETORTA	Oxide 3phases	3076/21B	0,0422	0,0023	0,1022	0,0020	0,0601
RETORTA	Oxide 3phases	3076/21B	0,0334	0,0042	0,0180	0,0008	
RETORTA	Oxide 3phases	1826/21A	0,0283	0,0042	---	---	0,0578
RETORTA	Oxide 3phases	1826/21A	0,0339	0,0030	0,0578	---	
RETORTA	Oxide 3phases	1826/21B	0,0333	0,0028	---	---	0,0030
RETORTA	Oxide 3phases	1826/21B	0,0282	0,0034	0,0030	---	
RETORTA	Oxide 3phases	1827/21	0,0327	0,0022	0,0749	---	0,0527
RETORTA	Oxide 3phases	1827/21	0,0259	0,0032	0,0305	---	
RETORTA	Oxide 3phases	2462/21	0,0427	0,0024	0,1413	0,0018	0,1505
RETORTA	Oxide 3phases	2462/21	0,0471	0,0026	0,1596	0,0018	

Tabela 22. Resultados do EDXRF, usando a calibração ‘Oxide 2 phases’ para amostras água de retorta.

Tipo de Amostra	Calibração	Amostra	Fe (%)	Pd (%)	Hg (%)	Pb (%)	Hg média
RETORTA	Oxide 2phases	RB1A	0,0063	0,0032	0,0120	---	0,0128
RETORTA	Oxide 2phases	RB1A	---	0,0033	0,0135	---	
RETORTA	Oxide 2phases	RB1B	---	0,0031	0,0414	---	0,0444
RETORTA	Oxide 2phases	RB1B	0,0147	---	0,0522	---	
RETORTA	Oxide 2phases	RB1B	0,0190	0,0036	0,0397	---	0,0686
RETORTA	Oxide 2phases	1035/19	0,0138	0,0034	0,0672	---	
RETORTA	Oxide 2phases	1035/19	0,0190	0,0020	0,0941	0,0004	0,0686
RETORTA	Oxide 2phases	1035/19	0,0208	0,0028	0,0446	---	
RETORTA	Oxide 2phases	3076/21A	0,0039	0,0039	0,0114	---	0,0144
RETORTA	Oxide 2phases	3076/21A	0,0175	0,0031	0,0173	---	
RETORTA	Oxide 2phases	3076/21A	0,0036	0,0039	0,0145	---	0,1702
RETORTA	Oxide 2phases	3076/21B	0,0322	0,0032	0,1768	0,0020	
RETORTA	Oxide 2phases	3076/21B	0,0443	0,0036	0,2044	0,0022	0,1702
RETORTA	Oxide 2phases	3076/21B	0,0283	0,0036	0,1293	0,0015	
RETORTA	Oxide 2phases	1826/21A	0,0233	0,0029		---	0,0548
RETORTA	Oxide 2phases	1826/21A	0,0232	0,0033	0,0662	---	
RETORTA	Oxide 2phases	1826/21A	0,0052	0,0052	0,0434	---	0,0023
RETORTA	Oxide 2phases	1826/21B	---	0,0025	---	---	
RETORTA	Oxide 2phases	1826/21B	0,0153	0,0034	0,0023	---	0,0736
RETORTA	Oxide 2phases	1827/21	0,0267	0,0038	0,0639	---	
RETORTA	Oxide 2phases	1827/21	0,0215	0,0053	0,0707	---	0,0736
RETORTA	Oxide 2phases	1827/21	0,0187	0,0040	0,0863	---	
RETORTA	Oxide 2phases	2462/21	0,0195	0,0042	0,0851	0,0007	0,1001
RETORTA	Oxide 2phases	2462/21	0,0224	0,0022	0,1150	0,0008	
RETORTA	Oxide 2phases	2462/21	0,0213	0,0035		0,0009	

Tabela 23. Resultados do EDXRF, usando a calibração 'Geoexploration-OX' para amostras água de retorta.

Tipo de Amostra	Calibração	AMOSTRA	Fe (%)	Pd (%)	Hg (%)
RETORTA	Geoexploration - Ox	RB1A	0,0316	---	0,113
RETORTA	Geoexploration - Ox	RB1B	0,0297	0,0035	0,194
RETORTA	Geoexploration - Ox	1035/19	0,0358	0,0024	0,5679
RETORTA	Geoexploration - Ox	3076/21A	0,0323	0,003	0,0783
RETORTA	Geoexploration - Ox	3076/21B	0,0468	0,0039	0,8464
RETORTA	Geoexploration - Ox	1826/21A	0,0354	0,0021	0,1818
RETORTA	Geoexploration - Ox	1826/21B	0,0304	0,0035	---
RETORTA	Geoexploration - Ox	1827/21	0,0347	0,0041	0,3373

Tabela 24. Comparação entre todos os resultados analíticos para mercúrio para amostras de água de retorta.

Tipo de Amostra	Amostra	Hg média - Ox3 (%)	Hg média - Ox2 (%)	Hg - Oxcon (%)	Hg - TXRF (%)	Ox3/Ox2	Ox/TXR F
RETORTA	RB1A	0,0103	0,0128	0,1130	0,00086	-19,22%	1334,12%
RETORTA	RB1B	0,0446	0,0444	0,1940	0,01090	0,26%	408,21%
RETORTA	1035/19	0,0384	0,0686	0,5679	0,00534	-44,05%	1001,56%
RETORTA	3076/21A	0,0125	0,0144	0,0783	0,00306	-13,19%	439,64%
RETORTA	3076/21B	0,0601	0,1702	0,8464	0,00313	-64,68%	3679,16%
RETORTA	1826/21A	0,0578	0,0548	0,1818	0,00329	5,47%	1712,63%
RETORTA	1826/21B	0,0030	0,0023	0,0000	0,00042	30,43%	623,63%
RETORTA	1827/21	0,0527	0,0736	0,3373	0,00594	-28,43%	1063,65%
RETORTA	2462/21	0,1505	0,1001	0,5531	0,00317	50,37%	3950,27%

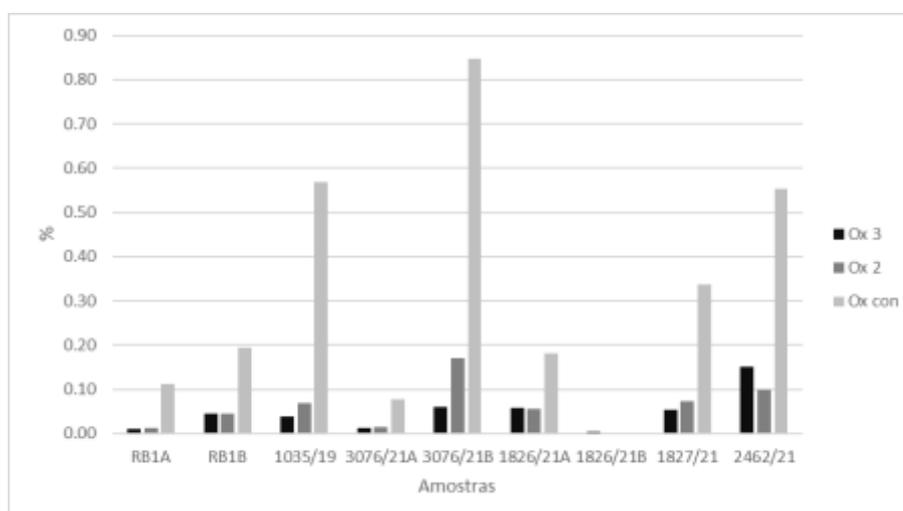


Figura 47. Gráficos comparativos entre os resultados analíticos de EDXRF para mercúrio de amostras de água de retorta.

As análises por EDXRF foram capazes de identificar o contaminante Hg em todas as amostras, contudo não foi capaz de quantificar propriamente os teores – características inerentes ao método. O estabelecimento de uma curva de calibração possibilitaria realizar as correções necessárias para um melhor aproveitamento dos dados. Além do mercúrio, as análises por EDXRF fornecem uma ideia geral das amostras e auxilia o entendimento do arcabouço químico-ambiental. São análises rápidas e que exigem um mínimo de preparação. A calibração GeoExploration foi a que retornou os resultados menos consistentes.

Deve-se considerar que o equipamento não é indicado para esse tipo de matriz (água) e não foi projetado para analisar amostras dentro de *ependorfs*. Mesmo assim a pesquisa com EDXRF possibilitou a aquisição de resultados consistentes e que indubitavelmente apontam a contaminação ambiental por mercúrio. É ineficiente na quantificação, daí tratar-se de uma metodologia prospectiva, inicial que apresenta grande robustez e possibilita orientar os trabalhos.

As análises sobre o mercúrio metálico foram realizadas exclusivamente com a metodologia EDXRF. A metodologia para análises de mercúrio metálico no TXRF se mostra com um nível de complicação superior ao intento dessa pesquisa.

Com base nos resultados apresentados na tabela 25 a e b, observa-se que:

- Os teores de mercúrio são sempre superiores a 97%.
- Todas as amostras possuem ouro – os gráficos na figura 48 mostra que há uma correlação negativa entre a concentração de mercúrio e a de ouro. Em caso de contaminação de sinal, de picos no espectro, visto a proximidade e mesmo sobreposição dos picos de ouro e mercúrio, a correlação seria positiva. Os resultados mostram que há ouro diluído no mercúrio, e que segue um padrão que pode ser utilizado em estudos de proveniência, datação, correlação, isotopia, dentre outros.
- As análises TXRF para as águas de retorta que se encontravam originalmente juntas dessas amostras de mercúrio metálico mostram que a água contém ouro diluído
- De fato, os dados sugerem que o mercúrio consiga diluir o ouro até uma determinada quantidade representada na calibração Metais Preciosos II por teores próximos de 0,65%, a partir da qual o teor desse metal se estabiliza (Figura 48).
- Todas as amostras apresentam teores de Elementos do Grupo da Platina (EGP – elementos com grande afinidade geoquímica entre sí). Há uma correlação negativa

entre os valores de Hg e a soma dos teores de todos os EGP (Figura 49). Deve ser checado as curvas e contaminações no espectro, contudo teores espaços de EGP encontrados nas análises TXRF para água de retorta corroboram com a possibilidade de o mercúrio também reter concentrações desses elementos.

- Não foram encontrados teores de prata.

Tabela 25. a e b. Resultados analíticos EDXRF gerais e de médias para as amostras de mercúrio metálico.

Tipo de Amostra	Amostra	Hg (%)	Au (%)	Pd (%)	Ru (%)	Rh (%)	In (%)
Mercúrio Metálico	RB1A	97,458	0,646	0,223	0,765	0,579	0,329
Mercúrio Metálico	RB1A	97,962	0,550	---	0,635	0,565	0,288
Mercúrio Metálico	RB1A	97,941	0,595	---	0,656	0,552	0,255
Mercúrio Metálico	RB1B	97,716	0,703	---	0,670	0,592	0,319
Mercúrio Metálico	RB1B	97,950	0,608	---	0,631	0,545	0,266
Mercúrio Metálico	RB1B	97,570	0,753	0,217	0,642	0,572	0,246
Mercúrio Metálico	1035/19	96,617	0,673	0,376	1,071	0,793	0,470
Mercúrio Metálico	1035/19	97,355	0,567	0,286	0,833	0,615	0,346
Mercúrio Metálico	1035/19	97,514	0,580	0,273	0,733	0,592	0,308
Mercúrio Metálico	3076/21A	97,300	0,668	0,281	0,786	0,637	0,329
Mercúrio Metálico	3076/21A	97,557	0,548	0,273	0,723	0,590	0,310
Mercúrio Metálico	3076/21A	97,120	0,735	0,300	0,812	0,660	0,373
Mercúrio Metálico	3076/21B	98,287	0,495	---	0,469	0,507	0,243
Mercúrio Metálico	3076/21B	98,268	0,398	---	0,460	0,561	0,314
Mercúrio Metálico	3076/21B	98,371	0,322	---	0,573	0,518	0,217
Mercúrio Metálico	1826/21B	98,027	0,597	---	0,598	0,554	0,225
Mercúrio Metálico	1826/21B	97,990	0,614	---	0,576	0,552	0,267
Mercúrio Metálico	1826/21B	98,208	0,495	---	0,532	0,529	0,237
Mercúrio Metálico	1826/21A	98,017	0,650	---	0,584	0,506	0,243
Mercúrio Metálico	1826/21A	97,479	0,623	0,287	0,745	0,586	0,281
Mercúrio Metálico	1826/21A	97,943	0,616	---	0,583	0,561	0,297
Mercúrio Metálico	1827/21	98,036	0,465	---	0,556	0,602	0,341
Mercúrio Metálico	1827/21	98,257	0,360	---	0,542	0,560	0,281
Mercúrio Metálico	1827/21	98,064	0,502	---	0,643	0,515	0,276
Mercúrio Metálico	2462/21	98,121	0,549	---	0,528	0,529	0,273
Mercúrio Metálico	2462/21	98,242	0,446	---	0,482	0,585	0,245
Mercúrio Metálico	2462/21	98,199	0,521	---	0,525	0,520	0,236

Tabela 25b. Resultados analíticos EDXRF gerais e de médias para as amostras de mercúrio metálico.

Tipo de Amostra	Amostra	Hg - média (%)	Au - média (%)	Pd - média (%)	Ru - média (%)	Rh - média (%)	In - média (%)
Mercúrio Metálico	RB1A	97,79	0,60	0,22	0,69	0,57	0,29
Mercúrio Metálico	RB1B	97,75	0,69	0,22	0,65	0,57	0,28
Mercúrio Metálico	1035/19	97,16	0,61	0,31	0,88	0,67	0,37
Mercúrio Metálico	3076/21A	97,33	0,65	0,28	0,77	0,63	0,34
Mercúrio Metálico	3076/21B	98,31	0,40	0,00	0,50	0,53	0,26
Mercúrio Metálico	1826/21A	97,81	0,63	0,29	0,64	0,55	0,27
Mercúrio Metálico	1826/21B	98,07	0,57	0,00	0,57	0,55	0,24
Mercúrio Metálico	1827/21	98,12	0,44	0,00	0,58	0,56	0,30
Mercúrio Metálico	2462/21	98,19	0,51	0,00	0,51	0,54	0,25
Mercúrio Metálico	Médias	97,84	0,57	0,15	0,64	0,57	0,29

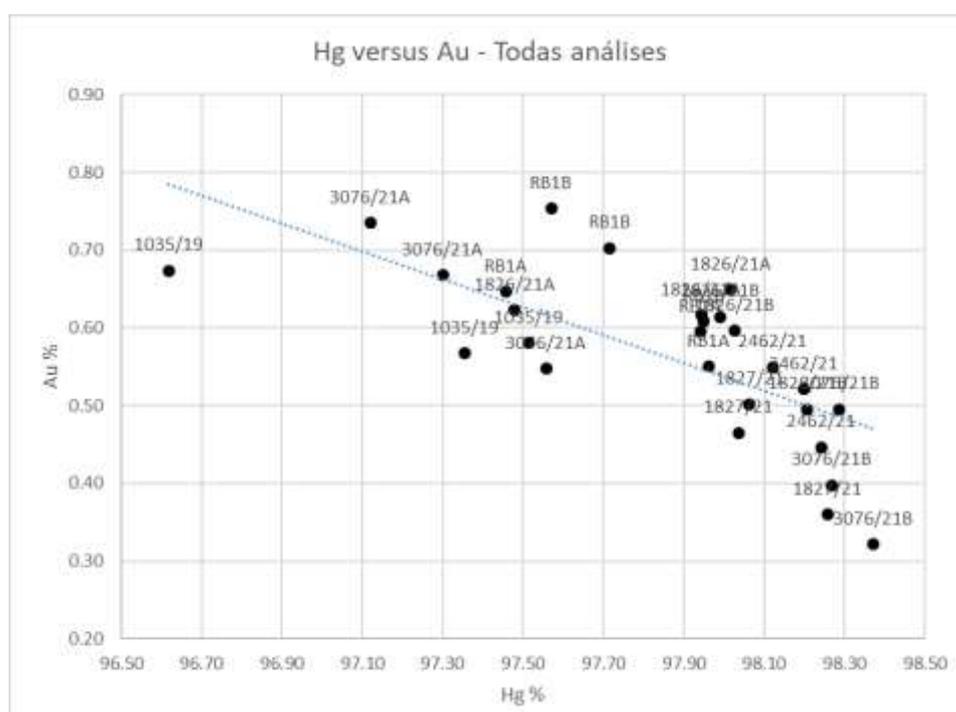


Figura 48. Correlação negativa entre os resultados analíticos de mercúrio e ouro para as amostras de mercúrio metálico.

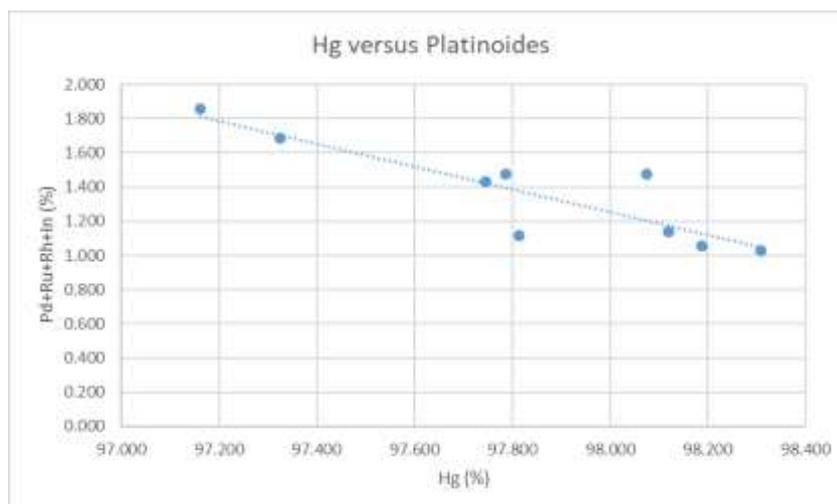


Figura 49. Correlação negativa entre os resultados analíticos de mercúrio e platinóides para as amostras de mercúrio metálico.

A metodologia EDXRF adotada, utilizando o equipamento BRUKER TITAN S1 para as análises em mercúrio metálico contido nos tubos eppendorf produziram resultados estatisticamente consistentes. Checagens adicionais são necessárias. A metodologia, mostrou-se eficiente no estudo preliminar desse material. A presença de ouro no mercúrio metálico indica o caminho: o mercúrio metálico é recuperado a partir do vapor de mercúrio aquecido na retorta e resfriado em contato com a água. Essa água, nas condições de temperatura e pressão a que está sujeita consegue diluir o mercúrio, o ouro e platinóides provenientes do vapor de mercúrio. A água é descartada após o uso e a fração recuperada do mercúrio é reutilizado.

5.3. Montante da degradação ambiental

A degradação ambiental antrópica provocada pela atividade de extração mineral artesanal (garimpo), em solos e sedimentos aluvionares na bacia do rio Boia é sumarizada na figura 50. Observa-se que o trecho de rio correspondente a área 2 concentra o maior montante de ocorrências mapeadas por alterações da geomorfologia fluvial e assoreamento da drenagem, somadas as áreas degradadas, para as interpretações realizadas na escala 1:50.000. As amostras de água retiradas diretamente do rio Boia evidenciam contaminação química por mercúrio. A poluição por esse metal supera os valores estabelecidos pela resolução CONAMA, n° 396 em até 1300%. Não há controle sobre os valores de *background* desse metal para a área, contudo, visto o despejo da água

de retorta e a própria queima do mercúrio, o liame da contaminação com a atividade garimpeira é inquestionável.

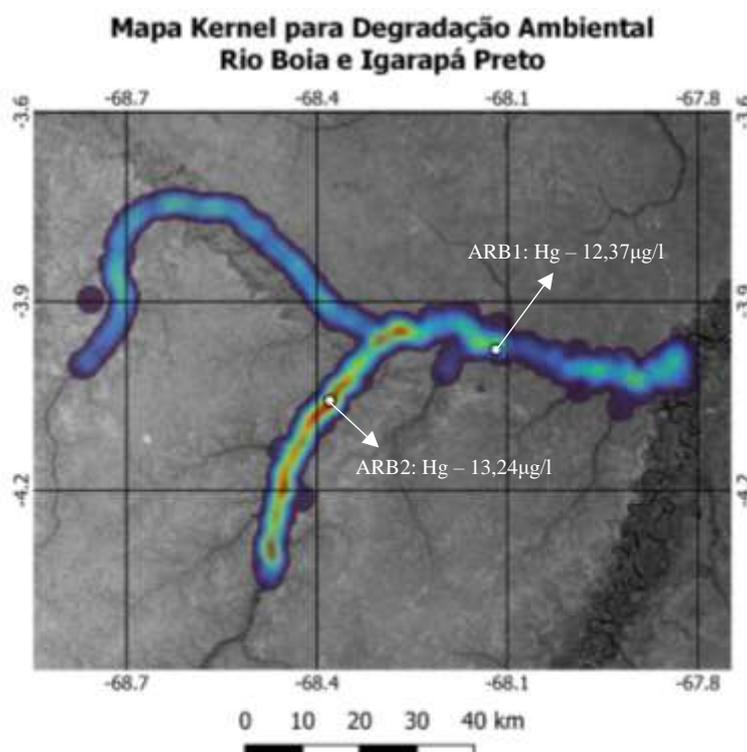


Figura 50. Mapa de calor (kernel) para a degradação ambiental no rio Boia e a indicação da contaminação dos locais onde foram identificadas contaminação por mercúrio.

Os resultados obtidos para as amostras de água de retorta demonstram a sua elevada capacidade para contaminação de corpos d'água. Após a sua utilização para condensar o vapor de mercúrio ela é descartada no meio ambiente e leva consigo os metais pesados em solução, especialmente o mercúrio. Por esse motivo é uma amostra rara de ser obtida, cada balsa que opera em garimpos nos rios amazônicos descarta esse material constantemente, é um dos rejeitos do processo de obtenção do ouro. Observando-se as análises químicas por TXRF apresentadas na tabela 21, conclui-se que cada litro dessa substância (água de retorta) chega a ter o potencial para contaminar com mercúrio quantidade superior a 100.000 (cem mil) litros de água potável. A figura 51 mostra o mapa de calor (kernel) regional com as amostras analisadas. De acordo com as amostras obtidas junto a Polícia Federal, o rio Juruá é o que apresenta maior potencial para contaminação por essa forma: descarte da água de retorta.

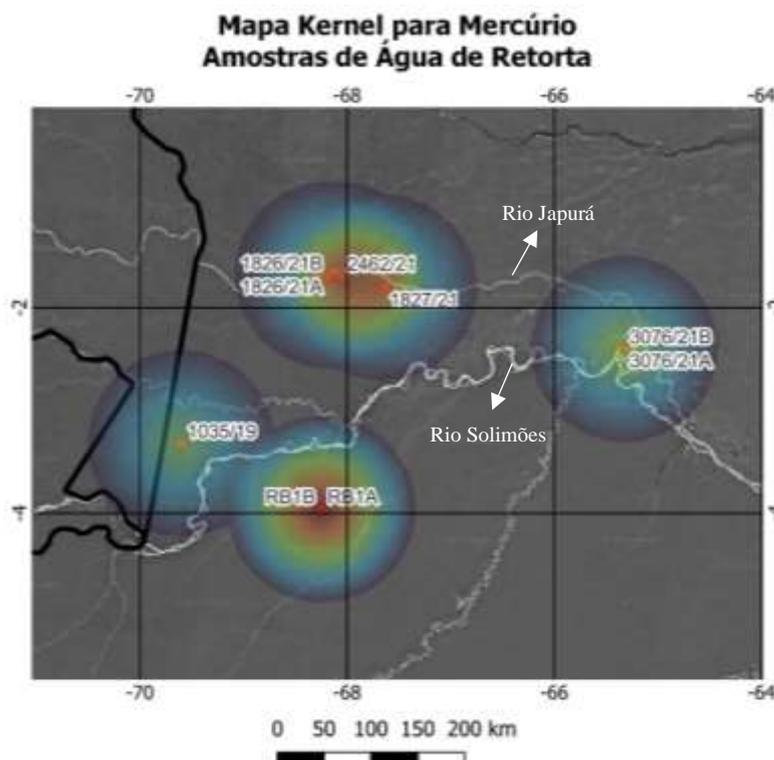


Figura 51. Mapa de calor (kernel) para as amostras regionais de água de retorta. O rio Juruá concentra o maior potencial de contaminação por essa modalidade.

6. CONCLUSÕES

A metodologia de pesquisa adotada demonstra que a mineração aluvionar de ouro que ocorre no rio Boia e no Igarapé Preto, ambos pertencentes à bacia hidrográfica do rio Boia, deixa marcas irrecuperáveis na geomorfologia fluvial desses corpos d'água. Mesmo em escala menor, 1:50.000, a destruição das margens, planícies de inundação, meandros abandonados e o próprio leito do rio por assoreamento, são facilmente identificáveis e quantificáveis. A metodologia utilizada mostra na escala 1:50.000, em dezembro de 2022, para o rio Boia e Igarapé Preto, 1466 locais com degradação ambiental superior a 0,36ha, totalizando uma área de 2.420,04ha; esta área equivale a cerca de 30 estádios de futebol (campo e arquibancada).

Sistemas sensores com melhor resolução espacial, assim como o sistema PLANET utilizado nesse trabalho, possibilitam a identificação de maior número de alvos e a melhor definição deles. Essa característica permite mapeamentos em escalas maiores (1:10.000). O mapeamento de maior detalhe com maior identificação de alvos, faz com que o número de áreas degradadas e a extensão destas aumentem. Durante essa pesquisa,

utilizando imagens PLANET, verifica-se que a degradação, quando mapeada em maior detalhe, revela-se até 300% maior do que a mapeada em escalas menores.

Os trabalhos em campo com amplo levantamento fotográfico são fundamentais para coleta de amostras e para estabelecer o liame entre as feições interpretadas nas imagens e o seu significado no terreno.

As amostras ambientais coletadas no rio Boia indicam uma contaminação pervasiva. Todas as amostras de água e sedimento coletadas apresentaram fortes indícios de contaminação por metais pesados, especialmente o mercúrio. As técnicas analíticas por fluorescência de raios-x são plenamente eficazes para identificar a contaminação (análises qualitativas). A técnica analítica por TXRF é eficiente para quantificar os contaminantes em teores baixíssimos de $\mu\text{g/l}$.

As análises sobre as amostras de água de retorta demonstraram que este material possui elevado potencial poluidor. Ao contaminar os corpos d'água, afeta toda a cadeia trófica. As amostras obtidas e analisadas durante essa pesquisa demonstram que o rio Juruá sofre, atualmente, a maior pressão ambiental de contaminação por mercúrio no Estado do Amazonas, entretanto, trata-se de amostras obtidas sem rigor amostral e fortuitamente.

Os garimpos aluvionares na região Amazônica empregam o mercúrio para a obtenção do ouro. Trata-se de um insumo tão necessário quanto o combustível. O potencial contaminador dessa atividade para toda região amazônica é elevado, estando presente mesmo em locais ermos como o rio Puretê.

8. REFERÊNCIAS

((O)) ECO. O que é a Amazônia Legal. Dicionário Ambiental., Rio de Janeiro, nov. 2014. Disponível em: <http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28783-o-que-e-a-amazonia-legal/> Acesso em: 05 set. 2021.

ALCARDE A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. 2013. Meteorologische Zeitschrift. 22. 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ARIOLI, E. E. & ANDRIOTTI, J. L. S.. Representatividade da amostragem na prospecção geoquímica. Coleção Capítulos de Livros. CPRM, 2007.

ASHRAF, M.; MAAH, M.; YUSOFF, I. Introduction to Remote Sensing of Biomass. 2011. ISBN – 978-953-307-490-0.

BERZAS NEVADO, J. J. et al. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: a review. Environmental International, 2010 Aug; 36(6), p. 593 – 608. DOI: 10.1016/j.envint.2010.03.011. PMID: 20483161.

BRASIL. Decreto no 875, de 19 de julho de 1993 – Promulga o texto da Convenção sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D0875.htm#_blank Acesso em 02 out. 2021.

BRASIL. Decreto nº 9.470, de 14 de agosto de 2018 - Promulga a Convenção de Minamata sobre Mercúrio, firmada pela República Federativa do Brasil, em Kumamoto, em 10 de outubro de 2013. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/36849570/do1-2018-08-15-decreto-n-9-470-de-14-de-agosto-de-2018-36849564 Acesso em: 01 out. 2021.

BRASIL. Decreto nº 97.507 de 13/02/1989 – Dispõe sobre licenciamento de atividade mineral, o uso do mercúrio metálico e do cianeto em áreas de extração de ouro, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d97507.htm Acesso em: 01 out. 2021.

BRASIL. Lei nº 11.685, de 2 de junho de 2008. Institui o Estatuto do Garimpeiro e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/111685.htm. Acesso em: 30 set. 2021.

BRASIL. Lei nº 7.805 de 18 de julho de 1989. Altera o Decreto-Lei no 227, de 28 de fevereiro de 1967, cria o regime de permissão de lavra garimpeira, extingue o regime de matrícula, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil03/leis/17805.htm> Acesso em: 19 set. 2021.

BRASIL. Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990 - O Ministro da Saúde, no uso das atribuições que lhe confere o artigo 2º do Decreto nº 79.367, de 9 de março de 1977. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1990/prt003619011990.html> Acesso em: 02 out. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 454, de 1° de novembro de 2012 - Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=128537>. Acesso em: 10 out. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 344, DE 25 DE MARÇO DE 2004 Publicada no DOU n° 087, de 07/05/2004 - Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.suape.pe.gov.br/pt/publicacoes/245/resolucao/172-resolucao-n-344-de-25-de-marco-de-2004-publicada-no-dou-n-087de-07-05-2004-pags-56-57?layout=publicacoes> Acesso em 03 out. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 396, de 3 de abril de 2008 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAM%0C2%BA%20396.pdf> Acesso em: 02 out. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 420 de 28/12/2009 - Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf> Acesso em: 03 out. 2021.

BRUKER. Principles of TXRF. Element analysis with Total Reflection X-ray Fluorescence Spectrometry, Bruker Nano GmbH, Berlin, Germany, 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo/SP: Blucker, 1980, 2ª ed. ISBN 978-85-212-0130-4.

CONRAD, O., ET AL.. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geoscience Model Dev., 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

CROSTA A. P.. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Ed. rev. ISBN 85-85369-02-7. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992.

DE LA CALLE, I. et al. Sample pretreatment strategies for total reflection X-ray fluorescence analysis: A tutorial review. Spectrochimica Acta Part B 90 (2013) 23-54. 2013.

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Folha AS. 19 Içá; geologia, geomorfologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1977.

EDWARDS, R. Ore Deposit Geology and its Influence on Mineral Exploration. Netherlands: Publisher Springer, p. XVI, 466. 1986. ISBN 978-94-011-8058-0.

EINEDER B. R. et al. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 57, 241–262. 2003.

EVANS, Anthony M. *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction*. Wiley-Blackwell 3^o ed, 2013, 400 Pages. ISBN: 978-1-118-68502-0.

FAZAL, S. *GIS basics*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2008.

FERNÁNDEZ, et al. EDXRF as an alternative method for multielement analysis of tropical soils and sediments. *Environ Monit Assess* 189: 447 DOI 10.1007/s10661-017-6162-5, 2017.

FORTESCUE, J.A.C. *Landscape geochemistry: retrospect and prospect – 1990*. *Applied Geochemistry*, l. v. 7, p. 1-53. 1992.

GOLDPRICE. Where the world checks the gold price, c2016. Página - gold-price-chart. Disponível em: <https://goldprice.org/gold-price-chart.html>. Acesso em 28 de setembro de 2021.

GOMES, C. B. (coord.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 218 p, 1984.

GRASS Development Team, 2017. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2*. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document: <http://grass.osgeo.org>. acessado em 10 de setembro de 2021

GUPTA A. K.. Total reflection x-ray fluorescence spectroscopy -working principles. *International Journal Of Core Engineering & Management (IJCEM)*, Volume 1, Issue 5, August 2014.

GUTH, P. L. et al. Digital elevations models: terminology and definitions. *Remote Sensing*, 13, 3581. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. 1991.

INPE – INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite – Projeto Prodes*. 2020a. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE a). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-azonia-legal.html?=&t=o-que-e> Acesso em 22 de set. de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE b). Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/porta1.php#homepage>. Acessado em 22 de set. de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Introdução ao processamento digital de imagens: Manuais Técnicos em Geociências - número 9. Rio de Janeiro, 2000.

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Banco de dados de queimadas – Inpe Programa Queimadas. 2020b. Disponível em: **Erro! A referência de hiperlink não é válida.** Acesso em: 05 de out de 2021.

JURGIEL B. ET. AL.. (2022) Plots terrain profile Versão instalada 4.2.2, 31 de janeiro de 2022. <https://github.com/PANOimagen/profiletool>, 2022.

LACERDA, L. D.; DOS SANTOS, A. F.; MARINS, R. V. Emissão de mercúrio para a atmosfera pela queima de gás natural no Brasil. *Quim. Nova*, Vol. 30, No. 2, p.366-369, 2007.

LATRUBESSE, E. M. et al. Tropical rivers. *Geomorphology* 70, 2005, 187-206.

MAGALHÃES, JR A. P. (org.) & BARROS, L. F. de P. (org.). Hidrogeomorfologia: formas, processos, e registros sedimentares fluviais. – 1º ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. ISBN 978-85-286-2461-8.

MALTSEV, A.S. et al. Features of sample preparation techniques in the total-reflection X-ray fluorescence analysis of tea leaves. *Food Chemistry*, v. 343, 2021, p. 128502.

MMA/ICMBio. Plano de manejo da Reserva extrativista do rio Jutaí. 2011. Tefé/AM.

MOLINER, et al. A. Hydrologie du bassin de l'Amazone. *Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques*, 335 – 344, PEGI, Paris, 1995.

MOTTA L. Gimp Selection Feature - Plugin for adding selected area in GIMP how a feature in polygon layer. Versão 1.6 atualizado em 12/10/2020. Desenvolvido sob demanda do IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. <http://www.ibama.gov.br>

NASCIMENTO FILHO et al. Sensibilidade analítica de um sistema de fluorescência de raios-x por reflexão total. *Anais VII CGEN*, Belo Horizonte, MG, 1998.

NASCIMENTO, T.S. Caracterização das condições atmosféricas no período 1991-2007 em cidades que compõem a calha do rio Solimões-Amazonas. 2008. Dissertação (mestrado) - Programa de pós-graduação em geografia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus/AM, 2008.

NOVO, E. M. L. DE M. Sensoriamento remoto princípios e aplicações. Editora Blucher, 4ª ed., 388pg. 2010. ISBN: 978-8521205401.

OLAYA V.. Module Channel Network and Drainage Basins, Versão 2.12.99 - 2003, em: https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.7/ta_channels_5.html, acessado em 10 de setembro de 2021.

OTCA/PNUMA/OEA. Projeto Gerenciamento Integrado e Sustentável dos Recursos Hídricos Transfronteiriços na Bacia do Rio Amazonas. Visão Estratégica para o Planejamento e Gerenciamento dos Recursos Hídricos e do solo, frente às mudanças climáticas e para o desenvolvimento sustentável da bacia hidrográfica do rio Amazonas. Relatório Final. ANA. Agência Nacional da Água. Consultor. Gonçalves, U.C. 2006.

PARREIRA P. S. & NASCIMENTO FILHO V. F.. Determinação de Th e U em amostras ambientais por TXRF: Implantação da técnica de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) para a determinação de tório e urânio. Novas Edições Acadêmicas (30 maio 2016).

PASHKOVA, G.V. et al. Total-reflection X-ray fluorescence spectrometry as a tool for the direct elemental analysis of ores: Application to iron, manganese, ferromanganese, nickel-copper sulfide ores and ferromanganese nodules. 2020. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, v. 168, p. 105856.

PEREIRA L. F. Caracterização e reconstituição paleoambiental da formação Içá na Bacia do Rio Negro - AM. 2016. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

POMEROL C. et al. Princípios de Geologia: Técnicas, Modelos e Teorias. 2013. Bookman 14ª ed. 1052p.

QGIS Development Team, 2021. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>, acessada em 10 de setembro de 2021.

SCHUMM, S. Patterns of alluvial rivers. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 13, 5-27, 1985.

SILVA C.L. et al. Analysis of tectonic-controlled fluvial morphology and sedimentary processes of the western Amazon Basin: an approach using satellite images and digital elevation model. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 79(4): 693-711. 2007.

SILVA, A. P. et al. Emissões na queima de mercúrio de amálgama: estudo da contaminação de ar, solos e poeira em domicílios de Poconé, MT. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1996. (Série Tecnologia Ambiental, 13), 1996.

SILVA, M. do S. R. da. Bacia hidrográfica do rio Amazonas: contribuição para o enquadramento e preservação. Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Química, Universidade Federal do Amazonas, Manaus/AM, 2013.

SILVEIRA R. R. DA; SOUZA, P.A. Palinoestratigrafia da Formação Solimões na região do alto Solimões (Atalaia do Norte e Tabatinga), Amazonas, Brasil. Geociências, v. 36, n. 1 - São Paulo, UNESP, p. 100-117, 2017.

SINHA R. e LATRUBESSE E. M. Geomorphology of fluvial systems: Focus on tropical rivers. Geomorphology 363, 2020.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Geomorfologia fluvial. São Paulo/SP: Oficina de Textos, 331p. ISBN: 978-85-7975-075-5, 2017.

SYVERSEN T.; KAUR, P. The toxicology of mercury and its compounds. *Jornal of Trace Elements in Medicine and Biology* 26, p.215 -226, 2012.

TADONO T. et al. Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-4, 2014.

TALOORA A. K. et al. Remote sensing and GIS applications in geoscience. *Applied Computing and Geosciences* nº 11, 2021.

TOWETT, E. K. et al. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). *Science of the total Environment*, 463 – 464, 2013.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021. EarthExplorer, Science for changing the world. Acessado em 18, outubro, 2021 at URL <https://earthexplorer.usgs.gov/>