



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA
DETECÇÃO DE GARIMPOS DE OURO
EMBARCADOS A PARTIR DE IMAGENS DE
SATÉLITE**

Diego Henrique Costa Pereira
Tese de Doutorado

Brasília/DF, 11 de julho de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA
DETECÇÃO DE GARIMPOS DE OURO
EMBARCADOS A PARTIR DE IMAGENS DE
SATÉLITE**

Diego Henrique Costa Pereira

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Tese de Doutorado

Brasília/DF, 11 de julho de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

Diego Henrique Costa Pereira

Tese de Doutorado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Doutor em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial.

Aprovado por:

Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, Doutor (Universidade de Brasília)
(Orientador)

Edilson de Souza Bias (Universidade de Brasília)
(Examinador Interno)

Zuleica Carmen Castilhos (Centro de Tecnologia Mineral)
(Examinador Externo)

Sandro Nunes de Oliveira (Instituto Federal de Brasília)
(Examinador Externo)

Renato Fontes Guimarães (Universidade de Brasília)
(Suplente)

Brasília/DF, 11 de julho de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

I. UnB-IH-GEA

II. Desenvolvimento de Metodologias para
Detecção de Garimpos de Ouro
Embarcados a partir de Imagens de
Satélite.

PEREIRA, DIEGO HENRIQUE COSTA

Desenvolvimento de Metodologias para Detecção de Garimpos de Ouro Embarcados a partir de Imagens de Satélite. 91 p., (UnB-IH-GEA, Doutor, Gestão Ambiental e Territorial, 2023).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| 1. Inteligência artificial | 2. Sensoriamento remoto. |
| 3. Garimpo de Ouro Embarcado | 4. Sentinel-1 e 2 |
| 5. Amazônia | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, D. H. C. Desenvolvimento de Metodologias para Uso do Sensoriamento Remoto para Identificação de Garimpos de Ouro Embarcados a partir de Imagens de Satélite. 2023. 91 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva os direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Diego Henrique Costa Pereira

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese ao meu tudo,
minha filha Lara.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cássio Alves Pereira e Liliane Cristine Costa Pereira, por todo o amor e dedicação voltados a mim e minha irmã.

À minha irmã, Cássia Cristine Costa Pereira.

À minha avó, Elizabeth Caetano da Cunha Costa.

À minha esposa, Lúcia Fernanda Alves Garcia, que me aturou e me apoiou durante todo o percurso do doutorado e que me deu o maior presente da minha vida, nossa filha, Lara Garcia Pereira.

Ao meu Orientador, Professor Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, pela paciência, orientação, compreensão e apoio para desenvolver meu mestrado e doutorado.

Aos meus colegas de trabalho do Ministério do Meio Ambiente que acompanharam essa saga: Pery; Luiz; Bruno; entre tantos. Em especial ao Dr. Felipe Barbosa, também doutor pelo Programa da Pós-Graduação em Geografia, que me ajudou em diversos momentos durante o doutorado.

RESUMO

A existência dos garimpos de ouro remonta ao período colonial brasileiro e até hoje se mantém como uma atividade de reconhecida relevância econômica. Os garimpos de ouro embarcados ocorrem de forma predominante na Amazônia brasileira. Se trata de embarcações que dragam sedimentos de fundo dos rios para produção do ouro mediante o uso de maquinário pesado e que realizam todo o processo produtivo dentro da embarcação. Apesar da reconhecida ocorrência da atividade este é um tema pouco estudado para o qual existem lacunas de conhecimento básicas, desde compreensão da distribuição geográfica, seus impactos ambientais, características operacionais entre outras questões. Logo, o uso de sensoriamento remoto se apresenta como uma alternativa para auxiliar a suprir estas lacunas e produzir informações que podem aprimorar a atuação das instituições responsáveis pela autorização e fiscalização da atividade legal e combate das atividades ilegais. Os principais desafios para emprego do sensoriamento remoto para identificação dos garimpos embarcados podem ser resumidos em: pequeno tamanho do alvo; alta capacidade de locomoção; ausência de mecanismos de localização das embarcações; densa e recorrente cobertura de nuvens na região amazônica. Portanto, a presente tese objetiva avaliar o uso de sensoriamento remoto para identificação dos garimpos embarcados e está estruturada em três artigos. O primeiro artigo avaliou as informações disponíveis referentes aos garimpos de ouro embarcados na região norte do país para identificar oportunidades de aprimoramento do controle institucional da atividade, bem como para auxiliar no preenchimento das lacunas de conhecimento sobre o tema. Concluiu pela necessidade de adequação de instrumentos regulatórios, aprimoramento da atuação das instituições responsáveis pela emissão das devidas autorizações, fortalecimento das ações de combate à atividade ilegal e fiscalização das atividades legalizadas e desenvolvimento de políticas públicas adequadas à realidade. Da mesma forma, demonstrou que o uso de insumos e técnicas de sensoriamento remoto apresentam potencial para auxiliar no melhor controle da atividade. O segundo artigo avaliou o uso de classificadores do tipo *machine learning* e espectral em imagens óticas do Sentinel-2 e concluiu que o classificador *Support Vector Machine* (SVM) com orientação à objeto apresentou os melhores resultados, com score F1 médio de 0,91 e percentual de detecção de garimpos satisfatório, tendo em vista que as omissões foram de 0 a 4 garimpos por imagem. O terceiro artigo empregou algoritmo de detecção de embarcações baseado em método *Constant False Alarm Rate* (CFAR) e de avaliação geométrica das embarcações em imagens *Synthetic Aperture Radar* (SAR) do Sentinel-1. Os resultados gerados produziram score F1 entre 0,76 e 0,85, com percentual de detecção de 70 a 100% e de omissão de 0 a 30%, além de permitir a identificação de garimpos embarcados em áreas legais e em áreas potencialmente ilegais. Por fim, a presente tese comprovou que as imagens Sentinel-1 e 2 podem ser utilizadas de forma complementar e satisfatória para detecção de garimpos embarcados e que podem ser utilizadas como insumos para que as instituições de controle possam aprimorar sua atuação, apontando os benefícios e limitações de utilizar imagens óticas e de radar. Ainda, produziu informações com vistas a contribuir para suprir as lacunas de conhecimento existentes e para auxiliar na melhor compreensão da dinâmica e distribuição geográfica da atividade.

Palavras-Chaves: inteligência artificial; sensoriamento remoto; garimpo de ouro embarcado; Sentinel-1 e 2; Amazônia.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGIES FOR GOLD MINING VESSELS DETECTION FROM SATELLITE IMAGERY

ABSTRACT

The existence artisanal and small-scale gold mining dates to the Brazilian colonial period and until today remains as an activity of recognized economic relevance. Gold mining in riverbeds occurs predominantly in the Brazilian Amazon through gold mining vessels. These vessels dredge river bottom sediments for gold production using heavy machinery that perform the entire production process inside the vessel, including the mixing of mercury to separate the gold from impurities and its subsequent burning. Despite the recognized occurrence of the activity, this is still a little-studied topic for which there are basic knowledge gaps, such as, comprehension of the geographic distribution, its environmental impacts, its operational characteristics, among other issues. Therefore, the use of remote sensing presents itself as an alternative to help fill these gaps and produce information that can help improve the performance of institutions responsible for authorizing and monitoring the legal activity and combating illegal activities. The main challenges for the use of remote sensing for the identification of gold mining vessels can be summarized as: small target size; high locomotion capacity; lack of mechanisms to locate the vessels; dense and recurrent cloud cover in the Amazon region. Therefore, the present thesis aims to evaluate the use of remote sensing for the identification of gold mining vessels, for this it is structured in three articles. The first article evaluated the available information regarding gold mining vessels in the northern region of the country to identify opportunities to improve the institutional control of the activity, as well as to help fill knowledge gaps on the subject. Therefore, it concluded that there is a need to adjust the regulatory instruments, improve the performance of the institutions responsible for issuing the proper authorizations, strengthen the actions to combat illegal activity and to inspect legalized activities, and develop public policies that are appropriate to the reality. The second article evaluated the use of machine learning and spectral classifiers on optical images from Sentinel-2 satellites. It concluded that the object-oriented Support Vector Machine (SVM) classifier achieved the best results, with an average F1 score of 0.91 and a satisfactory percentage of gold mining vessels detection, considering that the omissions ranged from 0 to 4 targets per image. The third article employed detection algorithm based in Constant False Alarm Rate (CFAR) and geometric evaluation technics on Synthetic Aperture Radar (SAR) images from Sentinel-1 satellites. The results produced an F1 score between 0.76 and 0.85, with a detection percentage of 70 to 100% and an omission percentage of 0 to 30%. Besides, it was identified gold mining vessels in legal areas and in potentially illegal areas. Finally, the present thesis proved that Sentinel-1 and 2 images can be used in a complementary and satisfactorily way for gold mining vessels detection and that can be used as inputs for control institutions to improve their performance, pointing out the benefits and limitations of using optical and radar images. Furthermore, it has produced information that will contribute to fill existing knowledge gaps and to support in the better understanding of the dynamics and geographic distribution of the activity.

Keywords: artificial intelligence; remote sensing; gold mining vessels; Sentinel-1 and 2; Amazon.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	6
1.2 APRESENTAÇÃO.	6
CAPÍTULO 2: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA COMPREENSÃO E CONTROLE DA GARIMPAGEM DE OURO EMBARCADA NA REGIÃO AMAZÔNICA DO BRASIL.....	8
INTRODUÇÃO.	10
ÁREA DE ESTUDO.	11
MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	23
CAPÍTULO 3: IDENTIFICAÇÃO DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS ATRAVÉS DE ALGORITMOS DE CLASSIFICAÇÃO EM IMAGENS SENTINEL-2.	27
1. INTRODUÇÃO.	28
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.	38
4. CONCLUSÃO	47
5. REFERÊNCIAS.....	48
CAPÍTULO 4: AVALIAÇÃO DAS IMAGENS SAR/SENTINEL-1 PARA IDENTIFICAÇÃO DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS ATRAVÉS DE ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE EMBARCAÇÕES.	53
INTRODUÇÃO.	54
MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
CONCLUSÃO.	68
REFERÊNCIAS.....	68
CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 1 - ÁREA DE ESTUDO.....	11
FIGURA 2 - METODOLOGIA UTILIZADA.....	12
FIGURA 3 - EXEMPLOS DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS: A) FOTO REAL; B) VISUALIZAÇÃO DE GARIMPOS AGRUPADOS EM IMAGEM DE SATÉLITE SENTINEL-2 COM 10M DE RESOLUÇÃO ESPACIAL.....	13
FIGURA 4 - EXEMPLO DE PROCESSO PRODUTIVO DE UM GARIMPO EMBARCADO.....	14
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE PROCESSOS MINERÁRIOS NA REGIÃO NORTE: A) REQUERIMENTOS DE PLG E PLG TOTAL; B) REQUERIMENTOS DE PLG E PLG EM RIOS.....	20

CAPÍTULO 3

FIGURA 1 - GARIMPOS DE OURO NA AMAZÔNIA.....	29
FIGURA 2 - ÁREA DE ESTUDO.....	31
FIGURA 3 - METODOLOGIA UTILIZADA.....	32
FIGURA 4 - PLUMAS DE SEDIMENTOS DE GARIMPOS EMBARCADOS EM IMAGEM SENTINEL-2 DE 14/06/2021 EM COMPOSIÇÃO FALSA COR AZUL, VERDE E VERMELHO: A) SEM REALCE; B) COM REALCE NA BANDA DO VERMELHO. EM VERDE A PLUMA.....	33
FIGURA 5 - EXEMPLOS DE AMOSTRAS: A) ÁGUA E EMBARCAÇÕES; B) GARIMPOS EMBARCADOS; C) PLUMAS DE SEDIMENTOS VISTAS COM REALCE; D) EMBARCAÇÕES E ÁGUA; E); VEGETAÇÃO, ÁGUAS E PLUMAS DE SEDIMENTOS VISTAS SEM REALCE.....	35
FIGURA 6 - REFLECTÂNCIA DOS ALVOS: A) TODOS OS ALVOS; B) ÁGUA VERSUS PLUMA DE SEDIMENTOS.....	38
FIGURA 7 - CLASSIFICAÇÕES DA IMAGEM DE 14/07/2021: A) SVM PIXEL; B) SVM OBIA; C) KNN PIXEL; D) KNN OBIA; E) RF PIXEL; F) RR OBIA; G) SAM.....	40
FIGURA 8 - PRECISION E RECALL PARA AS CLASSIFICAÇÕES: A) SVM OBIA; B) SVM PIXEL; C) KNN OBIA; D) KNN PIXEL; E) SAM; F) RF OBIA; G) RF PIXEL.....	43
FIGURA 9 - CONFUSÃO ENTRE PEQUENAS EMBARCAÇÕES E GARIMPOS COM OUTROS ALVOS. EM VERMELHO PEQUENOS BANCOS DE AREIA ESCURA. EM BRANCO PEQUENAS EMBARCAÇÕES E GARIMPOS: A) IMAGEM DE 24/07/2021. B) IMAGEM DE 18/08/2021.....	44
FIGURA 10 - MELHORAS NAS CLASSIFICAÇÕES OBIA X PIXEL EM IMAGEM DE 13/08/2021: A) SVM OBIA; D) SVM PIXEL.....	46
FIGURA 11 - GARIMPOS SEM PLUMA AGRUPADOS EM IMAGEM DE 29/07/2021.....	47

CAPÍTULO 4

FIGURA 1 - GARIMPOS EMBARCADOS NO RIO MADEIRA.....	54
FIGURA 2 - IMAGEM SAR SENTINEL-1 DE 16/06/2018 DO RIO MADEIRA, EM RONDÔNIA. EMBARCAÇÕES (VERMELHO) E ÁGUA (AZUL). A) POLARIZAÇÃO VH. B) POLARIZAÇÃO VV.....	55
FIGURA 3 - CONTEXTO DE OCORRÊNCIA DE EFEITO DOUBLE BOUNCE.....	55
FIGURA 4 - ÁREA DE ESTUDO.....	56
FIGURA 5 - METODOLOGIA EMPREGADA.....	57
FIGURA 6 - CARACTERÍSTICAS DAS EMBARCAÇÕES: A) GARIMPOS AGRUPADOS (EM PRETO); B) GARIMPOS AGRUPADOS (EM PRETO) E GRANDE EMBARCAÇÃO (EM LARANJA).....	58

FIGURA 7 - METODOLOGIA DO CFAR E ALGORITMO GEOMÉTRICO IMPLEMENTADOS NO SNAP PARA DETECÇÃO DE EMBARCAÇÕES.....	58
FIGURA 8 - ESTÊNCEL DO ALGORITMO CFAR.....	59
FIGURA 9 - PRÉ-PROCESSAMENTO AVALIADOS.....	60
FIGURA 10 - IDENTIFICAÇÃO DE GARIMPOS EMBARCADOS: A) EMBARCAÇÕES DETECTADAS EM IMAGEM SENTINEL-1 COM PADRÃO DE GARIMPOS; B) IMAGEM SENTINEL-2 USADA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS GARIMPOS.....	61
FIGURA 11 - INTENSIDADE EM VV E VH DAS EMBARCAÇÕES IDENTIFICADAS EM TODAS AS IMAGENS SENTINEL-1.....	62
FIGURA 12 - ASPECTOS DOS ALVOS EM IMAGEM SENTINEL-1: A) GRANDES EMBARCAÇÕES; B) OUTRAS EMBARCAÇÕES; C) PEQUENAS EMBARCAÇÕES AGRUPADAS; D) PEQUENA EMBARCAÇÃO ISOLADA; E) ÁGUA.....	62
FIGURA 13 - RESULTADO GERADO PELO SOFTWARE.....	63
FIGURA 14 - PERCENTUAL DE DETECÇÃO E OMISSÃO DE EMBARCAÇÕES DE TODAS AS IMAGENS SENTINEL-1: A) GERAL; B) GRANDES EMBARCAÇÕES; C) GARIMPOS; D) OUTRAS EMBARCAÇÕES.....	67
FIGURA 15 - GARIMPOS EMBARCADOS IDENTIFICADOS.....	68

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

TABELA 1 - PROCESSOS MINERÁRIOS EXISTENTES NO BRASIL (TERRA FIRME E EM RIOS) EM 11 DE NOVEMBRO DE 2022.	19
TABELA 2 - PROCESSOS MINERÁRIOS LOCALIZADOS EXCLUSIVAMENTE EM RIOS DAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS DA REGIÃO NORTE DO PAÍS EM 11 DE NOVEMBRO DE 2022.	19

CAPÍTULO 3

TABELA 1 - DATA DAS IMAGENS SENTINEL-2 UTILIZADAS.	33
TABELA 2 - QUANTIDADE DE PIXELS DE TREINAMENTO POR IMAGENS.	34
TABELA 3 - RESULTADOS DO ÍNDICE KAPPA E SCORE F1.	41
TABELA 4 - KAPPA E F1 MÉDIO E DESVIO PADRÃO DAS CLASSIFICAÇÕES.	42
TABELA 5 - PRECISION, RECALL E SCORE F1 DAS CLASSIFICAÇÕES.	44
TABELA 6 - IDENTIFICAÇÃO DE GARIMPOS COM PLUMAS NO CLASSIFICADOR SVM OBIA.	46

CAPÍTULO 4

TABELA 1 - IMAGENS SENTINEL-1 UTILIZADAS.	57
TABELA 2 - QUANTIDADE DE EMBARCAÇÕES POR IMAGEM SENTINEL-2.	61
TABELA 3- RESULTADOS PARA OS DIFERENTES PARÂMETROS DOS ALGORITMOS DE DETECÇÃO.	63
TABELA 4 - SCORE F1 DE 24/06/2021, TESTANDO DIFERENTES BACKGROUND WINDOWS.	64
TABELA 5 - SCORE F1 PARA DIFERENTES PRÉ-PROCESSAMENTOS.	65
TABELA 6 - DESEMPENHO DOS ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM TODAS AS IMAGENS SENTINEL-1.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIS - *Automatic Identification System*

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

ANM – Agência Nacional de Mineração

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CFAR – *Constant False Alarm Rate*

COA – Compostos Opticamente Ativos

CGU – Controladoria Geral da União

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

FN – Falso Negativo

FP – Falso Positivo

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IVP – Infravermelho Próximo

IVOC – Infravermelho de Ondas Curtas

LM – Limite do Vermelho

KNN – *K-nearest Neighbors*

MPF – Ministério Público Federal

MSI – *Multispectral Instrument*

OBIA – *Object-Based Image Analysis*

OMS – Organização Mundial da Saúde

P – *Precision*

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PLG – Permissão de Lavra Garimpeira

R – *Recall*

RF – *Random Forest*

SAM – *Spectral Angle Mapper*

SAR - *Synthetic Aperture Radar*

SNAP -*Sentinel Application Platform*

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SIGMINE - Sistema de Informação Geográfica da Mineração

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SVM – *Support Vector Machine*

TJ – Tribunal de Justiça Federal

TJRO – Tribunal de Justiça do Estado de Rondônia

UTM – Universal Transversa de Mercator

VH – Polarização Vertical-Horizontal

VN – Verdadeiro Negativo

VP – Verdadeira Positivo

VV – Polarização Vertical-Vertical

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – Desvio padrão

μ – Média aritmética

Σ – Somatória

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.

A existência de garimpo de ouro no Brasil é histórica e remete do período colonial no século XVI até os dias atuais, se mantendo como uma atividade de reconhecida relevância econômica para o país que produziu cerca de 19 toneladas de ouro provenientes de garimpos legalizados no ano de 2020 (BRASIL, 2021). Não há dados oficiais sobre a produção ilegal de ouro, porém estudos indicam que esta pode variar de 25 a 700% da produção legal declarada (CETEM, 2018).

A Lei nº 7.805/1989 (BRASIL, 1989a) tipifica a atividade garimpeira de ouro como aquela que busca o aproveitamento de substâncias minerais garimpáveis, executada no interior de áreas estabelecidas, exercida por brasileiro ou cooperativas de garimpeiros e que deve possuir uma Permissão de Lavra Garimpeira (PLG), expedida pela Agência Nacional de Mineração (ANM), e licença ambiental prévia, emitida pelo Órgão Ambiental competente. Assim, o solicitante deve apresentar à ANM um Requerimento de PLG que será analisado e, caso cumpra os devidos requisitos, o Requerimento de PLG será deferido.

A PLG é delimitada por um polígono limítrofe onde a garimpagem de ouro é permitida e que possui área máxima de até 50 hectares quando solicitado por pessoa física e 10.000 hectares quando solicitado por cooperativa localizada na região amazônica (BRASIL, 2015). Em 05 de novembro de 2022, cerca de 13.418 Requerimentos de PLG e 1.999 PLG de ouro constavam na base da Agência Nacional de Mineração, estando localizados, essencialmente, nos estados amazônicos, totalizando 80% de todas as PLG de ouro no país (SIGIMINE, 2022). A predominância de Requerimentos se repete quando avaliada somente a região norte onde 92% dos processos estão em fase de Requerimento de PLG e 8% em fase de PLG.

Além do tradicional garimpo em terra firme, existe também a garimpagem de ouro em embarcações (garimpos embarcados). Nesse contexto, existem 1.600 Requerimentos de PLG e 132 PLG localizadas exclusivamente em rios da região amazônica o que representa 702.060 hectares de Requerimento de PLG e 141.021 hectares de PLG de garimpos de ouro embarcados. Merece destaque o Rio Madeira que concentra 55,34% de todas as PLG (78.000 hectares) e 20,61% de todos os Requerimentos de PLG (141.704 hectares) dos rios amazônicos.

Apesar do amplo arcabouço legal existente, sua implementação é o principal desafio uma vez que a atividade sofre com índices alarmantes de ilegalidade, conforme destacado pelo Ministério Público Federal (BRASIL, 2020). De acordo com CETEM (2018), Ministério Público Federal (BRASIL, 2020) e Massaro et al. (2022), os argumentos que explicam esta

situação são complexos e variam a depender do ponto de vista: os garimpeiros argumentam que não há políticas públicas voltadas à questão, apenas coerção; a facilidade de iniciar e deslocar o garimpo dificulta o combate à atividade ilegal; disseminação do sentimento de impunidade em caso de atividade ilegal; as etapas para obtenção da PLG e da licença ambiental são longas e complexas; a fiscalização das atividades legais e o combate às atividades ilegais são pontuais; não há interesse de parte dos garimpeiros em atuar conforme as leis.

Adicionalmente, a atuação das instituições de controle também possui questões a serem consideradas. A Controladoria Geral da União divulgou em 2022, os resultados de auditoria da ANM e concluiu pela “revisão dos modelos de documentos e melhorias em procedimentos internos de acompanhamento e supervisão, de forma a fortalecer um ambiente de controle na Agência” (CGU, 2022). Cita também que a “baixa qualidade das decisões e precariedade dos processos de outorga de PLG comprometem a legalidade das atividades de garimpo que podem acarretar graves danos socioambientais”. Também há questões relacionadas à atuação dos órgãos ambientais que por vezes acabam por licenciar as atividades sem os devidos estudos e/ou carecem de fiscalização do cumprimento de condicionantes ambientais (TJ, 2021).

Apesar da reconhecida ocorrência da atividade, esta é uma problemática pouco estudada e com limitada literatura. Segundo Balzino et al. (2015), os garimpos embarcados são compostos de maquinário que realiza todo o tratamento do minério secundário e recuperação do ouro dentro da própria embarcação. O processo se inicia com a dragagem dos sedimentos de fundo dos rios que pode atingir profundidades de até 40m. Os sedimentos são bombeados para a embarcação e passam por um gradeamento para separação de impurezas grosseiras. O material que passou pelo gradeamento é direcionado para carpetes que objetivam reter sedimentos finos onde é provável de se encontrar as partículas finas de ouro e, posteriormente, são colocados em um misturador onde o mercúrio é adicionado para formação da amálgama com o ouro que será decomposta termicamente para a recuperação do ouro.

A decomposição térmica da amálgama gera vapores de mercúrio e deve ser realizada com equipamentos de controle de emissão, com por exemplo, uma retorta, equipamento que pode recuperar de 89 a 99% dos vapores de mercúrio. Entretanto, essa eficiência depende do tipo de retorta, do treinamento dos operadores e da adequada utilização do equipamento. Trabalhos em campo demonstraram que um mesmo modelo de retorta, de mesmo material, a eficiência variou de <20% a 95% no abatimento das emissões de mercúrio (CETEM, 2018).

O rejeito do tratamento do minério é uma mistura de água e sedimentos, e parte deste material pode estar contaminado com mercúrio, e é descartado diretamente nos rios. Por possuir

elevada concentração de sólidos, seu descarte pode levar a formação de plumas de sedimentos que são perceptíveis sob a água a olho nu e que podem se estender por grandes extensões (FERNANDES, ALAMINO; ARAÚJO, 2014; BALZINO et al., 2015).

O mercúrio é um metal pesado de ocorrência natural cuja presença no meio ambiente é generalizada e persistente (MCDOWEELL et al., 2004) e que apresenta potencial de ocasionar severos danos ao serem humanos, especialmente causar alterações neurológicas em adultos, crianças e até mesmo em bebês em gestação, a depender da sua forma química (DRISCOLL et al., 2013). Além disso, seu indevido descarte no meio ambiente, bem como de rejeitos contaminados, apresenta grande potencial de contaminação das águas, ar, solo e biota (PADOVANI; FORSBERG; PIMENTEL, 1995; MISERENDINO et al., 2018; UNEP, 2019).

Como o garimpo de ouro é uma atividade de uso intenso de mercúrio, os garimpeiros têm contato direto com a substância e acabam por inalar seus vapores. Castilhos et al. (2015) ao avaliar comunidades garimpeiras na Amazônia, observou que 22% dos peixes coletados apresentaram teores de mercúrio acima do recomendado pela Organização Mundial da Saúde para consumo humano (OMS, 1991). Ainda, concluiu que concentrações de mercúrio em amostras de urina, sangue e cabelo em garimpeiros, e em pessoas que viviam perto de áreas de garimpos, foram maiores que em população não garimpeira, provavelmente ocasionado pela inalação de vapores de mercúrio e consumo de peixes contaminados. Essa questão é tão sensível que existem dados demonstrando que determinadas populações indígenas apresentam teor de mercúrio acima do considerado normal para as populações amazônicas em decorrência da poluição ocasionada por garimpos ilegais em seus territórios (VEGA et al., 2018; RAMOS; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2020). Ainda, a Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente estima que os garimpos causam 37,7% das emissões globais de mercúrio, equivalente a 838 toneladas/ano (UNEP, 2019).

Em 2014, mais de 200 países, incluindo o Brasil, adotaram a Convenção de Minamata sobre Mercúrio, tratado internacional que objetiva proteger a saúde humana e o meio ambiente das emissões e liberações antropogênicas de mercúrio e que possui um Artigo específico para a garimpagem de ouro (BRASIL, 2018). Este tratado não proíbe a atividade garimpeira, mas prevê que os países que reconheçam a atividade como “mais que insignificante” devem elaborar um Plano de Ação para a Mineração de Ouro Artesanal e em Pequena Escala para reduzir e eliminar, quando viável, o uso de mercúrio, abrangendo: metas de redução do uso de mercúrio; banimento da queima a céu aberto do amálgama; promoção da formalização, quando possível; regulamentação do setor etc. O referido Plano encontra-se em elaboração no escopo de Projeto

coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, e deverá ser concluído em 2024 (MME, 2022).

Em relação ao uso de sensoriamento remoto voltado à atividade garimpeira, percebe-se que variadas técnicas de sensoriamento remoto são empregadas para identificação de garimpos localizados em terra firme. Isidro et al. (2017) utilizou o classificador *Support Vector Machine* (SVM) orientado à objeto. Lobo et al. (2018) empregou o *Classification and Regression Tree*. Asner et al (2013) fez uso de análise de mistura espectral *Auto MCU*. Simionato, Bertano e Osako (2021) usaram técnicas orientadas a objeto, mineração de dados e classificação por meio de árvores de decisão. Contudo, não foram achados estudos dedicados à identificação de garimpos de ouro embarcados, e isto pode estar relacionado com a ocorrência concentrada na região norte, muitas das vezes em locais de difícil acesso, a rápida locomoção das embarcações garimpeiras ao longo dos rios, a ausência de sistemas de localização e o tamanho reduzido das embarcações - características que dificultam a detecção por sensoriamento remoto (LOBO et al., 2018; DECHESNE et al., 2019; BRASIL, 2020).

Não obstante, a literatura demonstra que existem variadas técnicas para detecção de embarcações por sensoriamento remoto através de sensores passivos como sensores óticos, e ativos, como *Synthetic Aperture Radar* (SAR) que apresentam potencial para serem adaptados à detecção de garimpos embarcados. As técnicas utilizadas para sensores passivos abordam classificação supervisionada, algoritmos de avaliação espectral e geométrica, álgebra de bandas e árvores de decisão (HEILSELBERG, 2016; HEILSELBERG; HEILSELBERG, 2017; KANJIR, 2019). Complementarmente, o emprego de imagens SAR para detecção de embarcações vem se intensificando devido ao incremento das resoluções espaciais e temporais, bem como a distribuição gratuita dos produtos de alguns sensores, permitindo otimizar o controle do tráfego naval e o combate às atividades ilegais (OUCHI, 2016). Também, sensores SAR sofrem menor influência de fatores atmosféricos e geram imagens independentemente da iluminação solar e da cobertura de nuvens (ESA, 2012). A cobertura de nuvens é um dos principais desafios para estudos com sensores óticos na região amazônica brasileira, pois além de ser recorrente chega a ser superior a 90% em aproximadamente 60% da bacia amazônica no verão (MARTINS et al., 2018). Estudos para detecção de embarcações com imagens SAR utilizam majoritariamente métodos baseados em algoritmos *Constant False Alarm Rate* (CFAR) (OUCHI, 2016; PARK et al., 2018; DECHESNE et al., 2019; FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2019), técnica que calcula estatísticas locais de uma janela de tamanho definido pelo usuário a fim de criar um limiar de separação entre água e um objeto não água.

Estes métodos são fáceis de serem implementados, de baixo custo computacional e produzem resultados bastante satisfatórios (OUCHI, 2016).

Nesse contexto, merecem destaques os estudos desenvolvidos com imagens dos satélites Sentinel-1 (SAR) e Sentinel-2 (multiespectral) que foram bem-sucedidos em detectar embarcações acima de 10m e, portanto, demonstram que as resoluções temporal e espacial destes sensores são adequadas para esta finalidade (HEILSELBERG, 2016; OUCHI, 2016; HEILSELBERG; HEILSELBERG, 2017; PARK et al., 2018; DECHESNE et al., 2019; FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2019; KANJIR, 2019).

As missões Sentinel-1 e Sentinel-2 são coordenadas pela Agência Espacial Europeia e possuem características distintas. A missão Sentinel-1 é composta dos satélites 1A e 1B e possuem sensores *Synthetic Aperture Radar* (SAR) que operam na banda C a uma frequência de 5.405 GHz (3,8 – 7,5 cm). Os sensores operam nos modos de dupla polarização (HH/HV ou VV/VH) e polarização única (HH ou VV) e possui quatro modos de aquisição distintos: *Stripmap Mode*; *Interferometric Wide Swath Mode*; *Extra-Wide Swath Mode*; e *Wave Mode*. Os produtos gerados pela missão Sentinel-1 são disponibilizados em formato *Single Look Complex*, com informação de amplitude e fase, e *Ground*, sem a informação de fase, mas com dados que são projetados para um alcance no terreno utilizando o modelo de elipsoide terrestre e processados através de *multilooking*. O tempo de revisita é de 12 dias e o espaçamento dos pixels confere resolução espacial próxima de 10m (ESA, 2012). Já a missão Sentinel-2 é composta pelos satélites 2A e 2B que possuem sensores óticos *Multiespectral Instruments* (MSI), registrando informações em 13 bandas espectrais do azul ao infravermelho de ondas curtas com tempo de revisita de 5 dias, quando considerados os dois satélites, e resolução radiométrica de 12 bits. As imagens são gratuitas e disponibilizadas georreferenciadas com as seguintes resoluções espaciais: 10 m para azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (IVP); 20 m para limite do vermelho (LM) 1 a 4 e infravermelho de ondas curtas 1 e 2 (IVOC); e 60 m para aerossol, vapor d'água e cirrus (ESA, 2015).

Mediante à lacuna de estudos de sensoriamento remoto dedicados a detecção de garimpos embarcados, as abordagens citadas apresentam potencial de serem utilizadas para identificação destes alvos, tendo em vista que apresentam dimensão de 8 x 14m a 10 x 30m, conforme Balzino et al. (2015), sendo oportuno o desenvolvimento de estudos que avaliem as potencialidades e limitações para sua detecção. Assim, o sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta que pode auxiliar na compreensão da ocorrência da atividade ao longo do tempo em determinada área, informação que pode auxiliar os órgãos de controle no

monitoramento e fiscalização da atividade legal, no planejamento e implementação de ações de combate à atividade ilegal. Ainda, permite que pesquisas científicas possam ser desenvolvidas a fim de melhor compreender o contexto, ocorrência, distribuição e locomoção dos garimpos embarcados de ouro.

1.1. OBJETIVOS.

1.1.1. Objetivo Geral.

Propor metodologias de sensoriamento remoto para detecção de garimpos de ouro embarcados, avaliando potencialidades e limitações para aprimoramento do controle institucional da atividade.

1.1.2. Objetivos Específicos.

Os objetivos específicos almejados nesta pesquisa, são:

- a) Caracterizar a operação e distribuição geográfica da garimpagem de ouro embarcada no Brasil.
- b) Compreender o contexto normativo referente aos garimpos de ouro embarcados no Brasil.
- c) Compreender a atuação das instituições de controle responsáveis pela garimpagem de ouro embarcada no Brasil.
- d) Identificar oportunidades de aprimoramento do controle institucional da atividade.
- e) Desenvolver metodologia para detecção de garimpos de ouro embarcados a partir do uso de imagens Sentinel-2;
- f) Desenvolver metodologia para detecção de garimpos de ouro embarcados a partir do uso de imagens Sentinel-1.

1.2 APRESENTAÇÃO.

A presente pesquisa é dividida da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta o artigo que avaliou as informações disponíveis referentes aos garimpos de ouro embarcados na região amazônica brasileira, bem como o uso do sensoriamento remoto para detecção da atividade, com intuito de identificar oportunidades de aprimoramento do controle institucional sobre a atividade e auxiliar no preenchimento das lacunas de conhecimento sobre o tema. Esse artigo foi submetido em 10/06/2023, à Revista Geo UERJ (Qualis A1).

- O capítulo 3 apresenta o artigo que avaliou o uso de imagens multiespectrais dos Satélites Sentinel-2 para identificar garimpos de ouro no Rio Madeira, Porto Velho, entre 2018 e 2021. Para tal, utilizou-se os classificadores do tipo *machine learning*, *Support Vector Machine* (SVM), *K-Nearest Neighbor* (KNN) e *Random Forest* (RF), e o classificador espectral *Spectral Angle Mapper* (SAM). Esse artigo foi submetido em 18/05/2023, à revista Sociedade & Natureza da Universidade Federal de Uberlândia (Qualis A1).
- O capítulo 4 apresenta o artigo desenvolvido para avaliar o uso de imagens SAR dos satélites Sentinel-1 para identificar garimpos de ouro embarcados baseados em algoritmo de detecção e de avaliação geométrica no Rio Madeira, em Porto Velho, entre 2018 e 2021. Esse artigo foi submetido em 30/05/2023, à revista Caminhos da Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (Qualis A1).
- O capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa.

CAPÍTULO 2: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA COMPREENSÃO E CONTROLE DA GARIMPAGEM DE OURO EMBARCADA NA REGIÃO AMAZÔNICA DO BRASIL.

DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA COMPREENSÃO E CONTROLE DA GARIMPAGEM DE OURO EMBARCADA NA REGIÃO AMAZÔNICA DO BRASIL

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR COMPREHENSION AND CONTROL OF ARTISANAL AND SMALL-SCALE GOLD MINING VESSELS IN BRAZILIAN AMAZON REGION.

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA COMPRENDER Y CONTROLAR LA PEQUEÑA MINERÍA DE ORO EMBARCADA EN LA REGIÓN AMAZÓNICA DE BRASIL

Resumo

A legislação brasileira permite a garimpagem de ouro embarcada em rios desde que possua Permissão de Lavra Garimpeira emitida pela Agência Nacional de Mineração que demanda o prévio licenciamento ambiental. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo identificar procedimentos para melhorar a compreensão e o controle da atividade garimpeira a partir de sua caracterização, avaliação dos principais marcos regulatórios, levantamento do uso de sensoriamento remoto para identificação de garimpos embarcados, análise da distribuição geográfica e ocorrência da atividade. Ao fim, concluiu pela necessidade de adequação de instrumentos regulatórios, aprimoramento da atuação das instituições responsáveis pela emissão das devidas autorizações, fortalecimento das ações de combate à atividade ilegal e fiscalização das atividades legalizadas e desenvolvimento de políticas públicas adequadas à realidade. Da mesma forma, demonstrou que o uso de insumos e técnicas de sensoriamento remoto apresentam potencial para auxiliar no melhor controle da atividade.

Palavras-chave: garimpo de ouro; sensoriamento remoto; Amazônia brasileira; permissão de lavra garimpeira; licenciamento ambiental.

Abstract

The Brazilian legislation allows artisanal and small-scale gold mining thought vessels in the rivers as long as it has an artisanal and small-scale gold mining authorization issued by the National Mining Agency, which demands the presentation of the previous environmental authorization. This study identified opportunities and challenges to improve the understanding and control of the activity, based on its characterization, evaluation of the main regulatory frameworks, survey of the use of remote sensing for the identification of gold mining in vessels analysis of the geographic distribution and occurrence of the activity. It was concluded that there is a need to: adapt regulatory framework; improve the work done by responsible institutions who issue the licenses; strengthen actions to

combat illegal activity and to monitor legalized activities; and develop appropriate public policies based on the reality. Likewise, the use of inputs and remote sensing techniques have the potential to help better control the activity.

Keywords: Artisanal and small-scale gold mining; remote sensing; Brazilian amazon region; artisanal and small-scale gold mining authorization; environmental authorization.

Resumem

La legislación brasileña permite la pequeña minería de oro embarcada en los ríos, ya que cuenta con Permiso de Minería emitido por la Agencia Nacional de Minería, que requiere licencia ambiental previa. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo identificar los procedimientos para mejorar la comprensión y el control de la actividad minera a partir de su caracterización, evaluación de los principales marcos regulatorios, encuesta sobre el uso de la teledetección para la identificación de las minas a bordo, el análisis de la distribución geográfica y la ocurrencia de la actividad. Al final, concluyó que es necesario ajustar los instrumentos regulatorios, mejorar el desempeño de las instituciones responsables de emitir las autorizaciones necesarias, fortalecer las acciones de combate a la actividad ilegal y de fiscalización de las actividades legalizadas, y desarrollar políticas públicas adecuadas a la realidad. Asimismo, mostró que el uso de insumos y técnicas de teledetección tienen el potencial de ayudar a un mejor control de la actividad.

Palavras-Chaves: Pequeña minería de oro; teledetección; Amazonia Brasileña; permiso de minería; licencia ambiental.

INTRODUÇÃO.

A mineração de ouro é uma atividade econômica intimamente relacionada com a história brasileira e que no ano de 2020, produziu toneladas ano, sendo a maior parcela proveniente de processos industriais de grande mineração. Cerca de 19 toneladas são provenientes de garimpos legalizados (BRASIL, 2021). A lei nº 7.805/1989 (BRASIL, 1989a) tipifica o garimpo como uma atividade de aproveitamento de substâncias minerais garimpáveis, executada no interior de áreas estabelecidas, exercida por brasileiro ou cooperativas de garimpeiros, e que deve possuir uma Permissão de Lavra Garimpeira (PLG), expedida pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Nesse contexto, o garimpo pode ocorrer em terra firme ou em leito de rios (garimpos embarcados), havendo literatura restrita para os garimpos embarcados.

O licenciamento ambiental prévio é uma das exigências para emissão da PLG, etapa na qual são avaliados os impactos ambientais da atividade (BRASIL, 1981). Esta fase é vital frente aos impactos ambientais oriundos dos garimpos, como, desmatamento, assoreamento de corpos d'água, aumento da erosão etc. (LOBO et al., 2017). Além disso, destaca-se a contaminação ambiental devido ao uso e descarte inapropriado de mercúrio (CETEM, 2018).

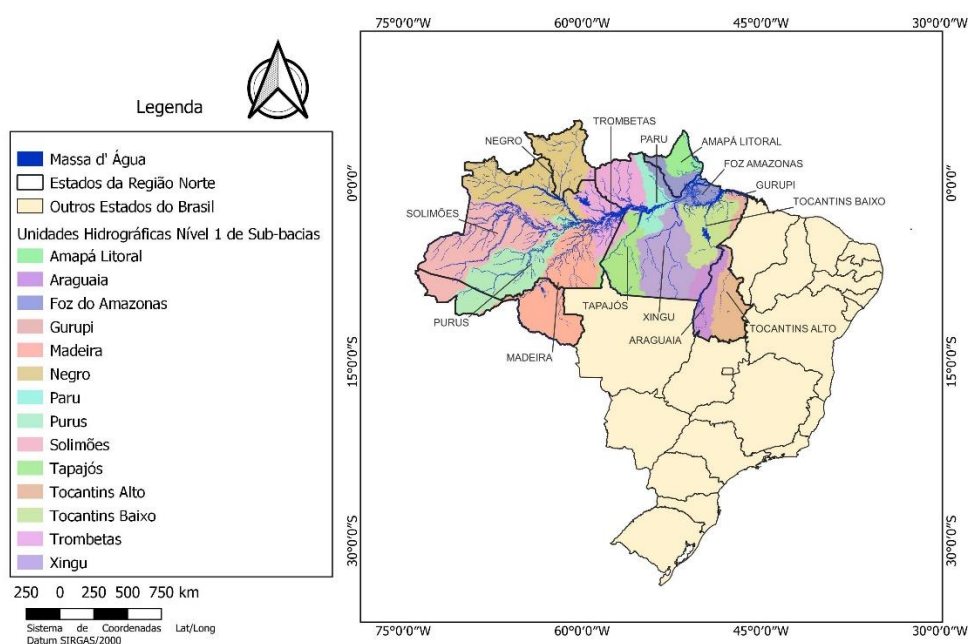
O mercúrio é um metal pesado de ocorrência natural cuja presença no meio ambiente é generalizada e persistente (MCDOWEELL et al., 2004) e que apresenta potencial de ocasionar severos danos ao serem humanos e à biota, com capacidade de causar alterações neurológicas em adultos, crianças e até mesmo em bebês em gestação, a depender da sua forma química (DRISCOLL et al., 2013). O garimpo de ouro é uma atividade de uso intenso de mercúrio em que os garimpeiros têm contato direto com a substância e acabam por inalar seus vapores. Castilhos et al. (2015) ao avaliar comunidades garimpeiras na Amazônia observou que 22% dos peixes coletados apresentavam teor de mercúrio acima do recomendado pela Organização Mundial da Saúde para consumo humano. Ainda, concluiu que concentrações de mercúrio em amostras de urina, sangue e cabelo em garimpeiros e pessoas que viviam perto de áreas de garimpos eram maiores que em população não garimpeira, provavelmente ocasionado pela inalação de vapores de mercúrio e consumo de peixes contaminados. A Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente estima que os garimpos causam 37,7% das emissões globais de mercúrio, equivalente a 838 toneladas/ano (UNEP, 2019). Assim, em 2014, mais de 200 países, incluindo o Brasil, adotaram a Convenção de Minamata sobre Mercúrio, tratado internacional que objetiva proteger a saúde humana e o meio ambiente das emissões e liberações antropogênicas de mercúrio que possui um Artigo específico para a garimpagem de ouro (BRASIL, 2018).

A devida implementação dos instrumentos normativos afetos aos garimpos é um dos principais desafios desta temática, juntamente com o efetivo combate à atuação ilegal, uma vez que a atividade apresenta índices de ilegalidade alarmantes, principalmente na região amazônica do Brasil (BRASIL, 2020). Portanto, o presente estudo objetiva avaliar as informações disponíveis referentes aos garimpos de ouro embarcados na região amazônica brasileira para identificar oportunidades de aprimoramento do controle institucional da atividade, bem como para auxiliar no preenchimento das lacunas de conhecimento sobre o tema.

ÁREA DE ESTUDO.

A área de estudo compreende as Unidades Hidrográficas Nível 1 de Sub-bacias do Plano Nacional de Recursos Hídricos existentes nos estados da região norte do Brasil: Pará; Tocantins; Amapá; Amazonas; Roraima; Acre; e Rondônia (Figura 1). A delimitação das Unidades foi obtida na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (ANA, 2022).

Figura 1 - Área de estudo.



Fonte: os autores.

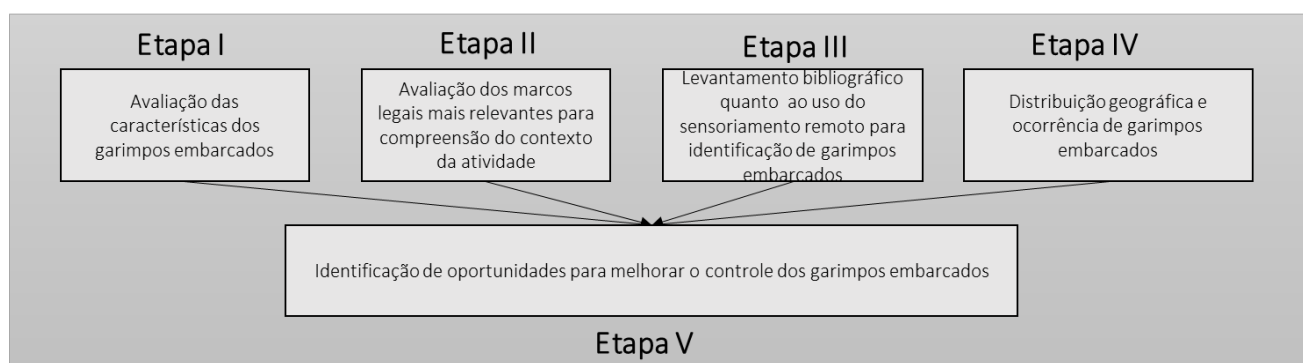
A região norte abriga a maior parte do bioma Amazônia composto predominantemente por Floresta Ombrófila Densa (IBAM, 2015). Conforme classificação Köppen, o clima da região é chuvoso do tipo Af, Am, e Aw, sendo o período de maiores chuvas de novembro/dezembro a maio/junho e de menores nos meses restantes (JÚNIOR; CONTINNI; NAVARRO, 2011). As águas dos rios amazônicos são classificadas de acordo com sua coloração originada por questões biogeoquímicas: brancas (coloração marrom); pretas; e claras (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

A região apresenta grande diversidade social com reconhecida presença de povos originários e comunidades tradicionais, principalmente ribeirinhos, que possuem modo de vida relacionado com a dependência e conservação dos recursos naturais. Por outro lado, a atividade antrópica, como agropecuária e projetos minerários e de infraestrutura de grande, média e pequena escala, vem se intensificando ao longo dos anos, contribuindo para a ocorrência de inúmeros conflitos de uso e ocupação da terra (JÚNIOR; CONTINNI; NAVARRO, 2011).

MATERIAIS E MÉTODOS.

A metodologia foi organizada em 5 etapas conforme apresentado na Figura 2 e detalhada a seguir.

Figura 2 – Metodologia utilizada.



Fonte: os autores.

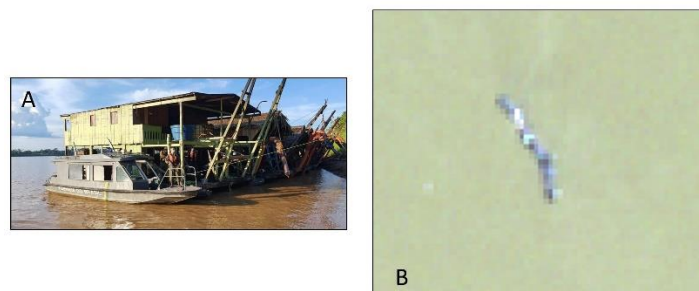
Foi realizado o levantamento bibliográfico das principais características dos garimpos embarcados para avaliar o processo produtivo, operação etc., a fim de auxiliar na caracterização da atividade. Em seguida, foram analisados os marcos regulatórios mais relevantes para auxiliar na compreensão do contexto da atividade, com foco nas obrigações para obtenção das devidas autorizações, responsabilidade de fiscalização e combate à atividade ilegal e controle do mercúrio, bem como seu grau de implementação.

O uso do sensoriamento remoto para identificação de garimpos embarcados foi avaliado mediante a busca por estudos científicos e de iniciativas institucionais, bem como dos potenciais de abordagens passíveis de serem utilizadas para esta finalidade, uma vez que os garimpos são facilmente identificados de forma visual (Figura 3).

As informações referentes aos processos minerários existentes no Brasil foram coletadas no Sistema de Informação Geográfica da Mineração da Agência Nacional de Mineração - ANM (SIGIMINE, 2022). Após, foram analisadas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para auxiliar na compreensão da distribuição geográfica e ocorrência dos garimpos embarcados

e na identificação dos processos minerários localizados exclusivamente em rios, utilizando um arquivo vetorial dos cursos dos rios da ANA (BRASIL, 2022a). Por fim, foram elencadas oportunidades para melhorar o controle institucional sobre a atividade mediante à avaliação dos resultados obtidos nas outras etapas.

Figura 3 - Exemplos de Garimpos de Ouro Embarcados: A) Foto real; B) Visualização de Garimpos Agrupados em Imagem de Satélite Sentinel-2 com 10m de Resolução Espacial.



Fonte: Mb (2020); os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Etapa I - Avaliação das características dos garimpos embarcados.

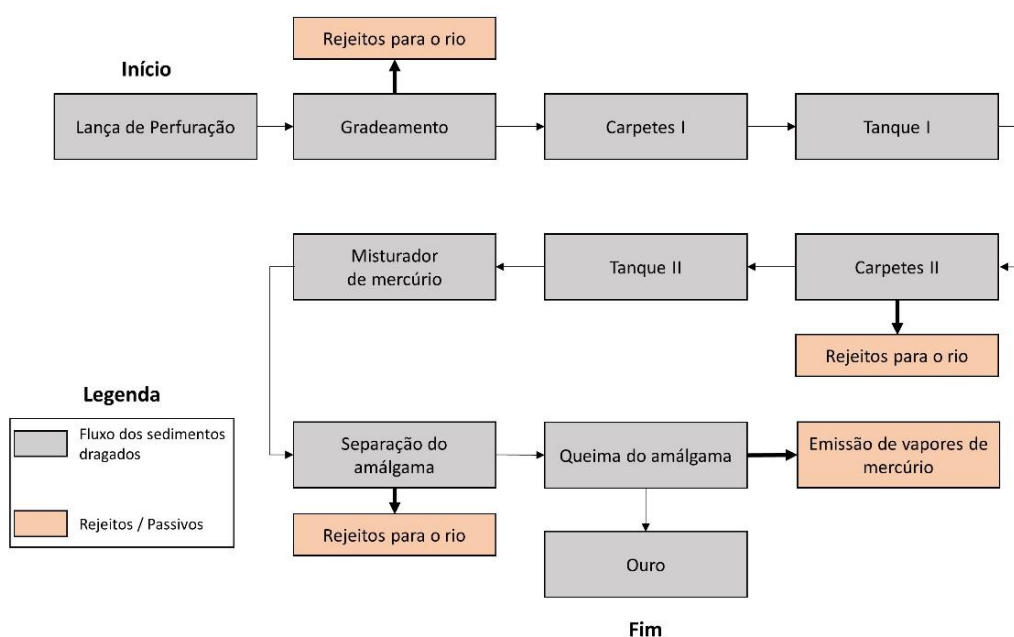
Garimpos embarcados na região amazônica, também chamados de dragas, são compostos de maquinário que realiza o ciclo produtivo do ouro dentro da embarcação. É um ramo de trabalho “peculiar” e pouco estudado, tanto que na pesquisa para desenvolvimento deste estudo, foi encontrado apenas um artigo publicado em periódico que apresenta detalhamento do processo produtivo (BALZINO et al., 2015). O processo inicia com a dragagem do fundo do rio que pode atingir profundidade de até 40m. Os sedimentos são bombeados para a embarcação e passam por um gradeamento para separação de impurezas grosseiras. O material que passou pelo gradeamento é direcionado para carpetes que objetivam reter sedimentos finos. Após, o material restante é direcionado para um tanque que leva para outros carpetes para retenção de sedimentos ainda mais finos. Todo o material que não é retido nos carpetes é lançado no rio (Figura 4). Os sedimentos contidos nos carpetes são colocados em um misturador onde o mercúrio é adicionado para formação da amálgama que será queimada para restar apenas o ouro.

A queima da amálgama gera vapores de mercúrio e deve ser realizada com equipamentos de controle de emissão, com por exemplo, uma retorta, equipamento que pode recuperar de 89 a 99% dos vapores de mercúrio, mas esta eficiência depende do tipo de retorta, do treinamento dos operadores e da adequada utilização do equipamento. Trabalhos em campo demonstraram que um mesmo modelo de retorta, de mesmo material, a eficiência variou de menos de 20% a 95% no abatimento das emissões de mercúrio (CETEM, 2018).

O rejeito do processo produtivo possui elevada concentração de sólidos (BALZINO et al., 2015) e ao ser lançado no rio pode levar a formação de plumas de sedimentos perceptíveis sob a água à olho nu (FERNANDES; ALAMINO; ARAÚJO, 2014). Não foram encontrados estudos sobre a dinâmica de formação das plumas, contudo há relação com o tipo e coloração do sedimento despejado e coloração da água.

A depender das características dos rios e da intensidade e frequência da garimpagem, a dragagem pode contribuir para alterar os limites dos rios, bem como promover seu assoreamento (SANTOS; OLIVEIRA; CRISÓSTOMO, 2021). Em relação ao tempo de operação da dragas, há indicações que podem operar por horas ininterruptas (BALZINO et al., 2015).

Figura 4 – Exemplo de Processo Produtivo de um Garimpo Embarcado.



Fonte: adaptado de BALZINO et al. (2015).

Existe indicação que o mercúrio é utilizado em uma proporção de 1:2 de ouro quando se trata de minério secundário, ou seja, para cada 1 grama de ouro utiliza-se 2 gramas de mercúrio, contudo há um fator de incerteza associado a esta proporção tendo em vista que a estimativa da quantidade de ouro é feita de forma empírica pelo garimpeiro (CETEM, 2018).

Os garimpos embarcados são capazes de se locomover rapidamente, porém caracterizam-se por ficarem fixos quando estão em operação e geralmente se agrupam (FERNANDES; ALAMINO; ARAÚJO, 2014), conforme já demonstrado na Figura 3, logo há registros de mais de 300 dragas operando ao mesmo tempo no Rio Madeira (G1, 2021). Por fim, não foram encontradas informações que permitam compreender como os garimpos se locomovem dentro da PLG, por exemplo, uma base de dados com coordenadas com trajeto da embarcação.

Etapa II - Avaliação dos Principais Marcos Legais para Compreensão do Contexto da Atividade.

A Lei nº 7.805/1989 (BRASIL, 1989a) tipifica a garimpagem como atividade que busca o aproveitamento de substâncias minerais garimpáveis, executada no interior de áreas estabelecidas para este fim, exercida por brasileiro e cooperativas de garimpeiros, autorizada a funcionar como empresa de mineração, sob o regime de Permissão de Lavra Garimpeira (PLG), emitida pela ANM. De forma complementar, as áreas podem ser lavradas, independentemente de prévios trabalhos de pesquisa mineral que objetivam quantificar e caracterizar o minério e a área a ser explorada a partir de trabalhos de campo e de laboratórios que envolvem sondagens, avaliação geológica, geoquímica etc. Chama atenção a área máxima que pode ser requisitada para garimpo. Uma pessoa física pode requerer até 50 hectares e, cooperativas podem requerer até 10.000 hectares. Adicionalmente, não existe limite para a quantidade de Requerimentos de PLG que cada pessoa física ou cooperativa pode protocolar (BRASIL, 2016) o que abre margem para que uma pessoa física/ jurídica concentre grandes áreas.

A ANM solicita que sejam apresentadas diversas informações no ato do protocolo do Requerimento de PLG, como dados do requerente, responsável técnico, delimitação da poligonal substância garimpada etc., juntamente com recolhimento das devidas taxas. Durante a análise, a ANM pode realizar inspeções *in loco* nos garimpos, bem como solicitar complementação de informações. Entre as exigências, consta a necessidade de licenciamento ambiental prévio, que objetiva garantir que atividades potencialmente poluidoras ocorram de forma ambientalmente adequada (BRASIL, 1981).

O licenciamento ambiental é feito somente por um único ente federativo (União, Estados ou Município) e, tendo em vista que a Lei Complementar nº 140/11 não citou explicitamente os garimpos de ouro embarcados como atribuição da União, a responsabilidade recai para os Estados ou Municípios, salvo se a atividade ocorrer nas exceções previstas no Inciso XIV do Artigo 6, como, se estiver localizada ou desenvolvida em dois ou mais Estados. Assim, geralmente o Estado é o ente responsável pelo licenciamento ambiental, porém o município pode realizar o licenciamento respeitados os casos do Inciso XIV do Artigo 9 ou se houver delegação de atribuições, conforme previsto no Artigo 4.

Em relação ao mercúrio, a Convenção de Minamata sobre Mercúrio adotada em 2014 (BRASIL, 2018) não proíbe a atividade garimpeira, mas prevê que os países que consideram a atividade “mais que insignificativa” a elaborarem um Plano de Ação para a Mineração de Ouro Artesanal e em Pequena Escala para reduzir e eliminar, quando viável, o uso de mercúrio, abrangendo: metas de redução do uso de mercúrio; banimento da queima a céu aberto do amálgama; promoção da

formalização, quando possível; regulamentação do setor etc. O referido Plano encontra-se em elaboração no escopo de Projeto coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, e deverá ser concluído em 2024 (MME, 2022). Vale ressaltar que todo o mercúrio utilizado no Brasil é proveniente de importação (CETEM, 2018). Nesse sentido, o Decreto n° 97.364/1989 (BRASIL, 1989b) institui que o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) deverá ser comunicado sobre as operações de importação de mercúrio e da compra e venda no mercado nacional, porém não foram encontrados dados oficiais públicos disponibilizados pela instituição.

Apesar do arcabouço legal existente, sua implementação é o principal desafio do país (BRASIL, 2020). De acordo com Cetem (2018), Ministério Público Federal (BRASIL, 2021) e Massaro et al. (2022), os argumentos que explicam esta situação são complexos e variam a depender do ponto de vista: os garimpeiros argumentam que não há políticas públicas voltadas à questão, apenas coerção; a facilidade de iniciar e deslocar o garimpo dificulta o combate à atividade ilegal; disseminação do sentimento de impunidade em caso de atividade ilegal; as etapas para obtenção da PLG e da licença ambiental são longas e complexas; a fiscalização das atividades legais e o combate às atividades ilegais são pontuais; não há interesse de parte dos garimpeiros em atuar conforme as leis.

O Rio Madeira é um exemplo da complexidade da atividade. O rio corta os estados de Rondônia e Amazonas sendo um local onde a garimpagem embarcada ocorre de forma disseminada (FERNANDES; ALAMINO; ARAÚJO, 2014). O Decreto do Estado de Rondônia n° 5.197/1991 (RONDÔNIA, 1991), suspendeu a garimpagem de ouro no Rio Madeira em determinado trecho, motivado por:

“...atividade ocorria em área navegável e estava causando degradação irremediável ao meio ambiente, ocasionando: variação de qualidade da água; sedimentação do canal principal; poluição das águas por combustíveis; a comprometer a economia da região (navegação fluvial e portuária; atividade pesqueira; etc)...
...altos níveis de poluição sobre os ciclos migratórios das espécies; a intoxicação humana por mercúrio, sem embargo de repercutir negativamente no aspecto social, tanto quanto econômico, pelos elevados índices de prostituição e criminalidade, dentre outras consequências danosas.” (Tjro, 2022).

Em 2021, foi publicado o Decreto Estadual n° 25.780/2021 (RONDÔNIA, 2021) que revogou a proibição, contudo o Ministério Público protocolou Ação Direta de Inconstitucionalidade n° 0800253-97.2022.8.22.000000 (TJRO, 2022) que foi julgada parcialmente precedente pela justiça que considerou inconstitucional a revogação do Decreto n° 5.197/1991.

Ainda em 2021, o Ministério Público solicitou o cancelamento das licenças ambientais de PLGs expedidas pelo Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas em mais de 37.000 hectares no Rio Madeira – Ação Civil Pública n° 1003598-84.2017.4.01.3200 (TJ, 2021). Dentre os argumentos, consta a ausência de estudo de impacto ambiental prévio, descumprimento de condicionantes

ambientais e desrespeito aos limites das PLGs. Por fim, a Justiça Federal decidiu liminarmente pelo cancelamento das licenças.

Além das questões jurídicas, a atuação das instituições de controle também possui questões a serem consideradas. A Controladoria Geral da União divulgou em 2022 os resultados de auditoria da ANM e concluiu pela “revisão dos modelos de documentos e melhorias em procedimentos internos de acompanhamento e supervisão, de forma a fortalecer um ambiente de controle na Agência” (CGU, 2022). Cita também que a “baixa qualidade das decisões e precariedade dos processos de outorga de PLG comprometem a legalidade das atividades de garimpo que podem acarretar graves danos socioambientais”. Portanto, a atuação da ANM necessita de aprimoramentos para que se consiga realizar uma avaliação padronizada mais completa e abrangente, objetivando melhorar a qualidade das informações necessárias para devida análise e acompanhamento dos processos. Quanto à fiscalização das PLG emitidas, cabe ao órgão ambiental licenciador e à ANM verificar o devido cumprimento das autorizações, conforme Lei Complementar nº 140/2011 e Lei nº 13.575/2017 (BRASIL, 2011; 2017).

Por fim, a Constituição Federal institui no artigo 23 que a proteção do meio ambiente para combater poluição é competência comum da União, Estados e Municípios (BRASIL, 1988). Logo, é comum que ações de repressão sejam realizadas por meio de operações conjuntas para otimizar o uso dos recursos materiais e humanos disponíveis e incrementar os resultados das ações de fiscalização e repressão. São encontrados diversos exemplos destas operações no Rio Madeira envolvendo: Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental de Rondônia; Polícia Militar Ambiental de Rondônia; Exército Brasileiro; Polícia Federal; e IBAMA (SEDAM, 2021; G1, 2022).

Etapa III – Levantamento Bibliográfico quanto ao Uso do Sensoriamento Remoto para Identificação de Garimpos Embarcados.

Não foram encontrados estudos que se dedicam ao mapeamento de garimpos embarcados de ouro por sensoriamento remoto. Isto pode estar relacionado com a rápida locomoção dos garimpos ao longo dos rios e o tamanho reduzido das embarcações que dificulta a sua detecção por sensores remotos de média e baixa resolução espacial (LOBO et al., 2018; BRASIL, 2020). Além disso, os garimpos embarcados aparentam não dispor, ou não ativar, equipamentos de localização em tempo real, como *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e o *Automatic Identification System* (AIS). O AIS é um sistema que envia informações de forma automática sobre a identificação, localização, velocidade, orientação, entre outras, das embarcações (DECHESSNE et al., 2019). Nesse sentido, a ausência de dados sobre a localização dos garimpos é um dos principais desafios para controle da atividade e desenvolvimento de estudos.

Em 2020, a Polícia Federal lançou o Programa Brasil M.A.I.S que objetiva promover a

aplicação da geotecnologia em apoio às funções de segurança pública, polícia judiciária, administrativa e demais atividades de Estado. O Programa disponibiliza imagens Planet de resolução espacial de 3m e tempo de revisita diária em toda extensão do Brasil, e produz alertas de desmatamento, pistas de pouso, embarcações (entre eles de garimpos embarcados) entre outros (BRASIL, 2022b). Esta foi a única iniciativa identificada que aborda o uso de sensoriamento remoto para detecção de garimpos embarcados, contudo o acesso ao Programa é restrito a órgãos públicos.

Apesar da inexistência de estudos dedicados à detecção de garimpos embarcados, a literatura demonstra que existem variadas técnicas para detecção de embarcações utilizando sensores passivos, como sensores óticos, e ativos, como *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Os resultados dos estudos com sensores óticos são bastante satisfatórios. Kanjir (2019) realizou pré-deteção de embarcações por meio de álgebra de bandas e aplicou uma árvore de decisão para detectar embarcações de variados tamanhos, incluindo menores que 20m, e alcançou taxa de detecção de 0,63 a 0,96, omissão de 0,04 a 0,36, falsos alarmes de 0,22 a 0,37. Heiselberg e Heiselberg (2017) propuseram método de classificação supervisionada orientada a objeto que obteve fator de performance de 97 a 100% para detecção de grandes embarcações (> 20m) e de 68 a 80 % para pequenas (entre 10 e 20m). Heiselberg (2016) foi bem-sucedido para detectar e estimar a dimensão, orientação e velocidade de deslocamento de grandes embarcações (>30m), e que também obteve resultados satisfatórios para detectar pequenos barcos entre 10m e 20m. Para tal, desenvolveu um algoritmo de avaliação geométrica e da análise espectral dos alvos.

De forma complementar, o emprego de imagens SAR para detecção de embarcações vem se intensificando devido a melhora da resolução espacial e temporal das imagens, bem como a distribuição gratuita de alguns produtos, permitindo incrementar o controle do tráfego naval e o combate às atividades ilegais (OUCHI, 2016). Sensores SAR sofrem menor influência de fatores atmosféricos e geram imagens independentemente da iluminação solar e da cobertura de nuvens (ESA, 2012). Vale ressaltar que a presença de nuvens é um dos principais desafios para estudos com sensores óticos na região amazônica brasileira, pois a ocorrência de nuvens é recorrente e pode ser superior a 90% em aproximadamente 60% da bacia amazônica no verão (MARTINS et al., 2018).

Ouchi (2016) destaca o uso de métodos baseados em *Constant False Alarm Rate* (CFAR) para detecção de embarcações em imagens SAR, técnica de rápida implementação e baixo custo computacional que calcula estatísticas locais de uma janela de tamanho definido pelo usuário a fim de criar um limiar de separação entre água e um objeto não água. Assim, Fitriani, Gaol e Kushardono (2019) conseguiram detectar no mar de Java embarcações pesqueiras >25m com média de falsos alarmes de 34,5%. Park et al. (2018) alcançou uma faixa de probabilidade de detecção de 80% para embarcações até 20m e de 93,59% para maiores que 20m. Dechesne et al. (2019) registrou *F score*

global de 97,45 para detecção de embarcações, incluindo embarcações de menor porte, como, pesqueiras (26m) e rebocadores (47m).

Os estudos citados anteriormente utilizaram imagens dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2 com resolução espacial de 10m, e conseguiram detectar variados tipos de embarcações com dimensão de 10 a 400m.

Etapa IV - Distribuição Geográfica e Ocorrência dos Garimpos Embarcados.

Em novembro de 2022, data de elaboração do presente estudo, existiam 15.417 Requerimentos de PLG e de PLG de ouro no Brasil, sendo que 13.418 são Requerimentos e 1.999 são PLG. A maioria das solicitações estão concentradas nos estados da região norte que somam 80% de todos os processos do país (Tabela 1). Ainda, verificou-se a existência de 132 PLG e de 1.600 Requerimentos de PLG localizados exclusivamente em rios da região norte que representam 141.021 hectares de PLG e 702.060 hectares de requerimentos (Tabela 2).

Tabela 1 - Processos Minerários existentes no Brasil (Terra Firme e em Rios) em 11 de novembro de 2022.

Descrição	Quantidade Processos Minerários	Área (hectares)
<i>Todos os Estados do Brasil</i>		
Requerimento de PLG	13.418	8.767.573,99
PLG	1.999	906.418,54
Total	15.417	9.673.992,53
<i>Estados da Região Norte</i>		
Requerimento	11.350	5.076.280,07
PLG	1.012	406.154,99
Total	12.362	5.482.435,06

Fonte: os autores.

Tabela 2 - Processos Minerários Localizados Exclusivamente em Rios das Unidades Hidrográficas da Região Norte do País em 11 de novembro de 2022.

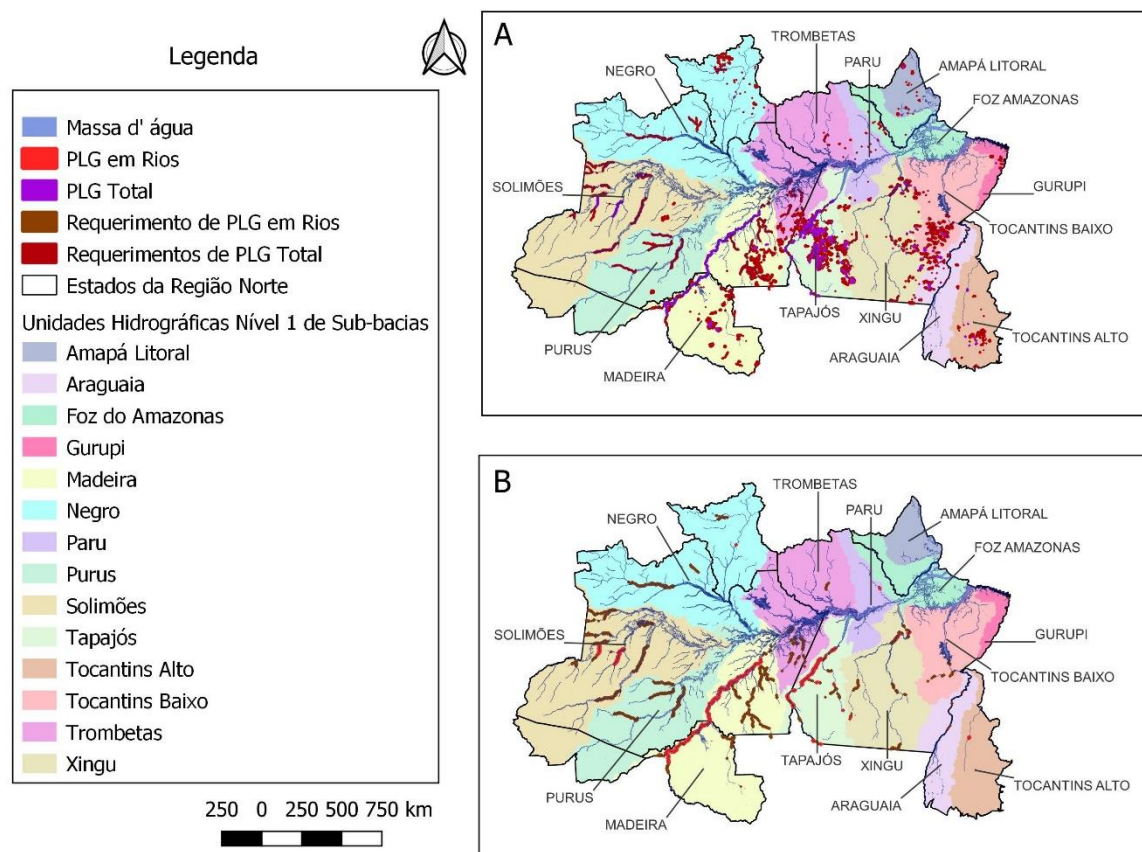
Bacia	PLG		Requerimento de PLG	
	Área (Hectares)	%	Área (Hectares)	%
Madeira	78.047,03	55,34	144.704,04	20,61
Tapajós	52.233,51	37,04	23.995,78	3,42
Solimões	9.968,27	7,07	139.550,83	19,88
Xingu	624,60	0,44	123.596,97	17,60
Tocantins Alto	94,85	0,07	6,92	0,00
Negro	48,61	0,03	59.683,44	8,50
Paru	4,89	0,00	97,11	0,01
Araguaia	0	0,00	763,8	0,11
Tocantins Baixo	0	0,00	31.503,43	4,49
Purus	0	0,00	122.191,34	17,40
Trombetas	0	0,00	55.917,97	7,96
Gurupi	0	0,00	48,83	0,01
Total	141.021,77	100,00	702.060,46	100,00

Fonte: os autores.

A Figura 5A apresenta a distribuição dos Requerimentos de PLG e de PLG existentes na área de estudo, localizados tanto em terra firme quanto em rios, com destaque para a concentração existente nas bacias dos Rios Madeira e Tapajós. Ao avaliar somente os Requerimentos de PLG e PLG em rios (Figura 5B) percebe-se a concentração de Requerimentos nas bacias dos Rios Madeira, Solimões, Xingu e Purus (que somam mais de 75%) e de PLG nas bacias do Rios Madeira e Tapajós que representam mais de 90% das PLG em rios. A menor área de PLG é justificada porque nem todos os processos de Requerimentos obtém licença ambiental e/ou cumprem todas as exigências solicitadas pela ANM, impossibilitando a emissão da PLG (CGU, 2022).

O Rio Madeira concentra 55% das áreas de PLG de garimpos embarcados e 20,61% dos Requerimentos de PLG e se estendem por 850 km entre os estados de Rondônia e Amazonas. Logo, sua situação é crítica em virtude não somente do quantitativo de área requerida e autorizada, mas também pela extensão onde a atividade ocorre.

Figura 5 - Distribuição de Processos Minerários na Região Norte: A) Requerimentos de PLG e PLG Total; B) Requerimentos de PLG e PLG em Rios.



Fonte: os autores com dados do SIGIMINE (2022).

Etapa V - Identificação de oportunidades para melhorar o controle dos garimpos embarcados.

A garimpagem de ouro embarcada é uma problemática exclusiva da região amazônica para a qual existem lacunas de conhecimento básicas. Cetem (2018) destaca que não existe nem mesmo um número confiável referente à quantidade de garimpeiros existentes no país, quiçá sobre a dinâmica de deslocamento dos garimpos embarcados nas áreas de PLG. Logo, é oportuno o desenvolvimento de iniciativas para melhorar a compreensão sobre a atividade e qualificar o debate sobre a questão.

Existem regramentos detalhados referentes ao controle minerário da atividade (Lei nº 7.805/1989) e ambiental (BRASIL, 1989a), porém, que não são devidamente implementados, seja por questões judiciais, fragilidades nos procedimentos administrativos e fiscalizatórios por parte das instituições e/ou por dolo dos garimpeiros (BRASIL, 2020). Nesse ponto, a CGU aponta a necessidade de aprimoramento das instâncias decisórias responsáveis pela emissão de PLG, bem como de padronização na avaliação das informações contidas nos Requerimentos de PLG (CGU, 2022). Da mesma forma, é necessária uma padronização nacional sobre o teor mínimo dos estudos ambientais a serem apresentados aos órgãos competentes no ato do licenciamento ambiental. Por mais que a legislação permita o licenciamento ambiental pelos Estados e Municípios (BRASIL, 2011), há de se destacar a coordenação institucional que Ministério do Meio Ambiente e Ministério de Minas e Energia podem desempenhar nesse processo, levando em consideração diferentes pontos de vistas e realidades locais de forma convergente com a Política Nacional de Meio Ambiente (LEME, 2010). Nesse sentido, é possível coordenar esforços para avaliar a necessidade de eventual revisão do arcabouço legal e de medidas infralegais. Por exemplo, podem articular uma Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 1981) - sobre o teor mínimo e principais pontos a serem observados no licenciamento ambiental dos garimpos embarcados. Ainda, o Ministério Público Federal (BRASIL, 2020) cita a oportunidade de fortalecer iniciativas que objetivem impedir o esquentamento e comércio ilegal de ouro e mercúrio e de medidas para auxiliar na rastreabilidade destes materiais dificultando e encarecendo os custos da ilegalidade.

O combate à atividade ilegal precisa ser robusto e efetivo, e o fortalecimento de operações conjuntas, como as ocorridas em Rondônia e Amazonas (SEDAM, 2021; G1, 2022) apresenta-se como uma alternativa para otimizar o uso dos limitados recursos humanos e materiais disponíveis para cobrir à extensão territorial da Amazônia. Além disso, é importante que estas ações sejam empoderadas o suficiente para implementar medidas previstas no Decreto nº 6.514 (BRASIL, 2008), como, inutilização e apreensão do maquinário, embargo ou suspensão da atividade e penalização dos responsáveis, pois descapitalizam e desmotivam a ocorrência e recorrência da atividade ilegal. Ainda, deve-se ater especial atenção às áreas sensíveis, como, terras indígenas e outros territórios ocupados por povos originários e comunidades tradicionais. Já existem dados demonstrando que populações indígenas apresentam teor de mercúrio acima do considerado normal pela Organização Mundial da

Saúde para as populações amazônicas em decorrência da poluição ocasionada por garimpos ilegais em seus territórios (VEGA et al., 2018).

O uso de sensoriamento remoto pode auxiliar na detecção de garimpos de ouro embarcados e, assim, auxiliar para sanar lacunas de conhecimento sobre a dinâmica da atividade uma vez que podem ser realizados estudos para identificar *hotspots* de ocorrência da atividade nos rios e os meses de maior ocorrência, bem como identificar se os garimpos estão localizados dentro de PLG ou em áreas ilegais. Também pode contribuir para que as instituições responsáveis possam melhorar o planejamento de ações de fiscalização e combate das atividades ilegais e aprofundamento dos conhecimentos na etapa de avaliação do Requerimento de PLG e do licenciamento ambiental. Nessa linha, o Programa Brasil M.A.I.S (BRASIL, 2022b) se apresenta como uma importante fonte de informações, pois concede aos órgãos de controle acesso às imagens dos satélites Planet com tempo de revisita diária e resolução espacial de 3m. Também, pode-se aproveitar imagens de sensores ativos e passivos que possuem média resolução espacial para o desenvolvimento dos supracitados estudos.

Tendo em vista a previsão legal de existência dos garimpos, o Estado deve propor políticas alinhadas à Convenção de Minamata sobre Mercúrio voltadas aos garimpeiros que irão atuar legalmente, abordando: eliminação/redução do uso do mercúrio; melhores práticas produtivas; qualificação de mão de obra; capacitação sobre requisitos legais; programas sociais para a população vulnerável dependente dos garimpos; questões trabalhistas; saúde pública etc. (BRASIL, 2018; MASSARO et al., 2022). Também é oportuno o fomento à instrumentos que atestem a adequada produção e rastreabilidade do ouro produzido e comercializado. Nesse sentido, como o ouro de garimpo só pode ser comercializado em um Posto de Compra de Ouro que atue como Distribuidor de Título Mobiliários, é necessário fortalecer as exigências para que o ouro ilegal não seja esquentado e adentre ao mercado legal (BRASIL, 2020). Além do mais, o aumento da demanda por certificações, como a *Fairmined Standard for Gold from Artisanal and Small-Scale Mining, including associated precious metals*”, é uma alternativa, pois promove o emprego de melhores práticas de produção, exigindo o cumprimento de requisitos para que o ouro seja considerado “ético”, abordando questões sociais, trabalhistas e ambientais, como: remuneração digna; carga horária de trabalho justa; direito a férias; ambiente de trabalho seguro; proteção para evitar e mitigar riscos ambientais. (DOMINGOS; CASTILHOS; RAMOS, 2020).

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou informações disponíveis para auxiliar na melhor compreensão da problemática dos garimpos de ouro embarcados no país. Para tal, realizou a caracterização do processo produtivo e do comportamento da atividade e atestou que os marcos regulatórios existentes

atualmente são abrangentes, porém necessitam de aprimoramentos e que sua devida implementação é uma fragilidade latente. Foi demonstrado que a ocorrência dos garimpos embarcados é predominante na região amazônica e que o uso de sensoriamento remoto apresenta potencial para auxiliar na compreensão e controle da atividade. Para tal, técnicas de detecção de embarcações em imagens de sensores óticos e de *Synthetic Aperture Radar* (SAR) podem ser usadas para suprir a lacuna de conhecimento sobre a atividade. Ao fim, foram elencadas oportunidades para melhorar o controle sobre a atividade.

A garimpagem de ouro na Amazônia brasileira é um tema complexo que há muito tempo é estudado e para o qual não existe solução rápida, única e permanente. Por isso, o país, com suas diferentes esferas de governo, precisa se debruçar sobre o tema a fim de propor medidas que sejam aderentes aos atuais e diferentes contextos socioambientais da Amazônia.

REFERÊNCIAS

BALZINO, Michela et al. Gold losses and mercury recovery in artisanal gold mining on the Madeira River, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 370–377, 2015.

BARBOSA, Claudio. C. F.; NOVO, Evelyn. M. L. M.; MARTINS, Vitor. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: Princípios e Aplicações**. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 19 de dez. 2022.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 05 de jan. 2022.

BRASIL. **Lei Nº 7.805, de 18 de julho de 1989a**. Disponível em: <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/103411/lei-7805-89>. Acesso em: 30 de nov. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 97.634, de 10 de abril de 1989b**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d97634.htm. Acesso em: 09 de dez. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008**. Disponível em: <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/93411/decreto-6514-08>. Acesso em: 09 de nov. 2022.

BRASIL. **Lei Complementar nº 140, de 08 de dezembro de 2011**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 30 de out. 2022.

BRASIL. **Portaria DNPM Nº 155, de 12 de maio de 2016**. Disponível em https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/CN_DNPM.htm. Acesso em: 17 de out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/lei/113575.htm. Acesso em: 28 de out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 9.470, de 14 de agosto de 2018**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2018/decreto/D9470.htm. Acesso em: 01 de nov. 2022.

- BRASIL. **Anuário Mineral Brasileiro 2021**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>. Acesso em: 29 de nov. 2022.
- BRASIL. **Catálogo de Metadados**. 2022a. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br>. Acesso em: 19 de set. 2022.
- BRASIL. **Plataforma Brasil M.A.I.S.** 2022b. Disponível em: <https://plataforma-pf.scon.com.br>. Acesso em: 21 de out. 2022.
- BRASIL. **Mineração Ilegal de Ouro na Amazônia: Marcos Jurídicos e Questões Controversas**. Ministério Público Federal. Série Manuais de Atuação. v.7. Brasília-259p. 2020.
- CASTILHOS, Zuleica et al. Human exposure and risk assessment associated with mercury contamination in artisanal gold mining areas in the Brazilian Amazon. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 11255-11264, 2015.
- CETEM. **Inventário Nacional de Emissões e Liberações de Mercúrio pelos Garimpos de Ouro**. Centro de Tecnologia Mineral. 2018. Disponível em: <https://diretoriopre.mma.gov.br>. Acesso em: 04 de out. 2022.
- CGU. **Relatório de Avaliação Agência Nacional de Mineração - ANM - 905627**. Controladoria Geral da União. 2022. Disponível em: <https://eaud.cgu.gov.br/relatorios/download/1274960>. Acesso em: 23 de set. 2022.
- DECHESNE, Clément et al. Ship identification and characterization in Sentinel-1 SAR images with multi-task deep learning. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p.2997, 13 dec. 2019.
- DOMINGOS, Lilian Maria Borges; CASTILHOS, Zuleica Carmem; Ramos, JÉSSICA Zickwolf. **Certificação de ouro de garimpo – Estudo dos requisitos da norma “Fair mined Standard for Gold from Artisanal and Small-scale Mining, including Associated Precious Metals (V2.0 ARM / 5 April2014)**. Série Estudos e Documentos, v.103, CETEM, Rio de Janeiro – 55p. 2020.
- DRISCOLL, Charles T. et al. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 10, p. 4967-4983, 2013.
- ESA. **ESA’s radar observatory mission for GMES operational services**. 2012. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349449/s1_sp-1322_1.pdf. Acesso em: 29 de ago. 2022.
- FERNANDES, Francisco Rego Chaves; ALAMINO, Renata de Carvalho Jimenez; ARAÚJO, Eliane Rocha (Org). **Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais, econômicos**. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro - 392p. 2014.
- FITRIANI, Sarah Putri; GAOL, Jonson Lumban; KUSHARDONO, Dony. Fishing-Vessel Detection Using Synthetic Aperture Radar (Sar) Sentinel-1 (Case Study: Java Sea). **International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)**, v. 16, n. 2, p. 131-142, 2019.
- G1. **Dragas e barcos de garimpeiros começam a deixar Rio Madeira no AM**. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2021/11/26/dragas-e-barcos-de-garimpeiros-comecam-a-deixar-rio-madeira-no-am.ghtml>. Acesso em: 06 de jan. 2023.
- HEISELBERG, Henning. A direct and fast methodology for ship recognition in sentinel-2 multispectral imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, 1 dez. 2016.
- HEISELBERG, Peder; HEISELBERG, Henning. Ship-iceberg discrimination in Sentinel-2 multispectral imagery by supervised classification. **Remote Sensing**, v. 9, n. 11, 1 nov. 2017.
- IBAM. **Caderno de estudo: bioma Amazônia e o desmatamento**. Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. 2015. Isidro, C. M. et al. Applicability of earth observation for

- identifying small-scale mining footprints in a wet tropical region. **Remote Sensing**. v.9, n.9, p. 945, 12 sep. 2017.
- JÚNIOR, Geraldo Bueno Martha; CONTINI, Elisio; NAVARRO, Zander. **Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo**. Brasília. Embrapa Estudos e Capacitação, 2011.
- KANJIR, Urška. Detecting migrant vessels in the Mediterranean Sea: Using Sentinel-2 images to aid humanitarian actions. **Acta Astronautica**. v. 155, p. 45–50, 1 fev. 2019.
- LEME, Taciana Neto. Os Municípios e a Política Nacional de Meio Ambiente. **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 35, p. 25–52, 2010.
- LOBO, Felipe de Lucia. et al. Effects of small-scale gold mining tailings on the underwater light field in the Tapajós River Basin, Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 579, 09 ago. 2017.
- LOBO, Felipe de Lucia. et al. Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1178, 25 jul. 2018.
- MCDOWELL, Margaret A. et al. Hair mercury levels in US children and women of childbearing age: reference range data from NHANES 1999–2000. **Environmental health perspectives**, v. 112, n. 11, p. 1165-1171, 2004.
- MME. Ministério de Minas e Energia. 2022 Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-lanca-projeto-para-plano-de-acao-nacional-para-extracao-de-ouro-sem-mercurio>. Acesso em: 14 de jul. 2023.
- MB. Capitania Fluvial de Porto Velho apreende embarcações durante Operação “Verde Brasil 2”. Marinha do Brasil. 2020. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/com9dn/cfpvel_aprensao_verde. Acesso em: 27 de fev. 2023.
- MARTINS, Vitor S. et al. Seasonal and interannual assessment of cloud cover and atmospheric constituents across the Amazon (2000–2015): Insights for remote sensing and climate analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 309–327, 1 nov. 2018.
- MASSARO, Luciana et al. Balancing economic development and environmental responsibility: Perceptions from communities of garimpeiros in the Brazilian Amazon. **Resources Policy**, v. 79, p. 103063, dez. 2022.
- OUCHI, Kazuo. Current Status on Vessel Detection and Classification by Synthetic Aperture Radar for Maritime Security and Safety. **The 38th Symposium on Remote Sensing for Environmental Sciences**, n. September, p. 5–12, 2016.
- PARK, Kyung-Ae et al. Multi-Spectral Ship Detection Using Optical, Hyperspectral, and Microwave SAR Remote Sensing Data in Coastal Regions. **Sustainability**, 2018.
- RONDÔNIA. Decreto nº 5.197, de 29 de julho de 1991. Disponível em: <https://www.al.ro.leg.br/leis/decretos-do-poder-executivo-suspenso-seus-efeitos-via-decreto-legislativo/decreto-5-197-sustado-os-efeitos-via-decreto-legislativo-no-646-2016.pdf>. Acesso em: 02 de out. 2022.
- SANTOS, Waldemir Lima; OLIVEIRA, Rafaela Ferreira de; CRISÓSTOMO, Cleyton Aguiar. Dinâmica hidrossedimentológica do médio rio Acre: investigação inicial do processo de assoreamento. **Revista GeoUECE**, v. 18, n. 10, p. 57–66, 2021.
- SEDAM. **Operação de Fiscalização**. Disponível em: www.sedam.ro.gov.br/operacao-de-fiscalizacao-ambiental-apreende-12-dragas-atuando-de-forma-ilegal-no-rio-madeira. Acesso em: 27 de nov. 2022.

SIGIMINE. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração**. 2022. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br>. Acesso em: 05 de nov. 2022.

TJ. **Sentença Ação Civil Pública 1003598-84.2017.4.01.3200**. 2021. Tribunal da Justiça Federal da 1º Região. 2021. Disponível em: <https://www.amazonasdireito.com.br/wp-content/uploads/2021/08/Sentenca-acao-MPF-licenciamento-Ipaam-garimpo-no-rio-Madeira.pdf>. Acesso em: 14 de dez. 2022.

TJRO. **Decreto estadual que autorizou garimpagem em rio de RO é inconstitucional, decide Pleno do TJRO**. 2022. Tribunal de Justiça do Estado de Rondônia. Disponível em: <https://www.tjro.jus.br/noticias/item/16823-decreto-estadual-que-autorizou-garimpagem-no-rio-madeira-e-inconstitucional-decide-pleno-do-tjro> Acesso em: 14 de dez. 2022.

UNEP. **Global Mercury Assessment 2018**. United Nations Environment Program. UNEP, Geneve – 62p. 2019

VEGA, Claudia M. et al. Human mercury exposure in yanomami indigenous villages from the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.15, n.6, p.1051, 23 mai. 2018.

CAPÍTULO 3: IDENTIFICAÇÃO DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS ATRAVÉS DE ALGORITMOS DE CLASSIFICAÇÃO EM IMAGENS SENTINEL-2.

Resumo

Garimpos de ouro podem ocorrer em terra firme ou em leitos de rios na forma de embarcações. Nesse sentido, o uso de imagens dos satélites Sentinel-2 se apresenta como ferramenta para identificação de garimpos de ouro embarcados devido à resolução temporal, gratuidade de imagens, cobertura global e resolução espacial mais refinada. Este estudo objetivou identificar garimpos de ouro embarcados no Rio Madeira, próximo à Porto Velho, Rondônia, em 13 imagens Sentinel-2 de 2018 a 2021, a partir dos seguintes classificadores: *Support Vector Machine (SVM)*, *K-Nearest Neighbor (KNN)*, *Random Forest (RF)* e *Spectral Angle Mapper (SAM)*. Os resultados demonstraram que o classificador SVM orientado a objeto apresentou melhor *score* F1 médio (0,91). Além disso, o percentual de detecção foi satisfatório, com omissão de 0 a 4 garimpos em operação, ou seja, com plumas de sedimentos, por imagem. Portanto, o uso de classificadores se mostrou eficaz para identificar garimpos de ouro embarcados.

Palavras-chave: Sentinel-2, garimpos embarcados, classificadores.

Identification of gold mining vessels based on classification algorithms using Sentinel-2 images.

Abstract

Artisanal and small-scale gold mining can occur on land or in riverbeds. The use of images from Sentinel-2 satellites presents itself as a tool for identifying gold mining in vessels due to the temporal resolution, free imagery, global coverage, and more refined spatial resolution. This study aimed to identify gold mining vessels on the Madeira River near Porto Velho, Rondônia, in 13 Sentinel-2 images from 2018 to 2021 using the classifiers: Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), Random Forest (RF) and Spectral Angle Mapper (SAM). The results showed that the object-oriented SVM classifier had the best average F1 score (0.91). Furthermore, the percentage of detection was satisfactory, from 0 to 4 plume-formed artisanal and small-scale gold mining vessels per image. Therefore, the use of classifiers proved to be effective for identifying gold mining vessels.

Keywords: SAR, Sentinel-2, gold mining vessels, classifiers.

1. INTRODUÇÃO.

Garimpos de ouro ocorrem em terra firme ou em leitos de rios e podem operar caso possuam Permissão de Lavra Garimpeira (PLG) expedida pela Agência Nacional de Mineração (BRASIL, 1989). Os garimpos em rios são embarcações que dragam sedimentos de fundo que podem conter de 3 a 30 g/m³ de ouro (BALZINO et al., 2015). Estas embarcações possuem o maquinário necessário para produção do ouro e caracterizam-se por lançar rejeito do processo produtivo diretamente no rio e agrupar durante a sua operação (Figura 1). O rejeito lançado possui concentração de sedimentos maior que a concentração natural das águas e pode levar a formação de plumas de sedimentos (FERNANDES; ALAMINO; ARAUJO, 2014), porém isto depende da

capacidade de dragagem, tipo de sedimento, coloração da água, entre outros. (CETEM, 2018; BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

A resposta espectral da água registrada por sensores óticos é resultado da interação da radiação eletromagnética com a coluna d'água e com Compostos Opticamente Ativos (COA) - partículas inorgânicas, matéria orgânica e pigmentos de fitoplânctons (LOBO et al., 2012). Barbosa, Novo e Martins (2019) realizaram compilação de vários estudos que usam sensoriamento remoto aplicado aos recursos hídricos, demonstrando a capacidade para diferenciar coloração de água, estimar COA e avaliar a reflectância de cada tipo de COA ao longo do espectro eletromagnético.

Figura 1 - Garimpos de Ouro na Amazônia.



Fonte: Balzino et al. (2015); Polícia Federal no site G1 (2021).

Variadas técnicas de sensoriamento remoto são empregadas para detecção de garimpos localizados em terra firme (ASNER et al., 2013; ISIDRO et al., 2017; SIMIONATO; BERTANI; OSAKO, 2021), contudo métodos dedicados exclusivamente à identificação de garimpos embarcados são escassos devido: ao tamanho reduzido dos alvos e sua alta capacidade de locomoção (LOBO et al., 2018; TRINDADE; BARBOSA FILHO, 2002); à inexistência de sistemas de localização automática e tempo real (DECHESENE et al., 2019), seja pelo relevante grau de informalidade da

atividade, precariedade e porte das embarcações.

Por outro lado, existem inúmeras abordagens que utilizam imagens Sentinel-2 para detecção de embarcações. Ciocarlan e Stoian (2021) utilizaram a arquitetura de deep learning *U-Net* e concluíram que métodos de *deep learning* apresentam resultados promissores, contudo são sensíveis à quantidade e qualidade das amostras, tanto que encontraram *score* F1 entre $<0,10$ a $>0,50$. Isso ocorreu devido à alta variação de falsos positivos, uma vez que em todos os casos foram encontrados

recall acima de 0,75, tanto para grandes embarcações (> 2.500 m²) quanto para pequenas (<2.500 m²). Heiselberg (2016) propôs algoritmo de avaliação geométrica e de resposta espectral das embarcações e obteve sucesso na detecção, identificação da orientação de navegação e mensuração da largura e comprimento dos alvos acima de 30 metros. Embarcações menores que 30 metros foram apenas detectadas, sem estimativa dos outros parâmetros. Heiselberg e Heiselberg (2017) desenvolveram classificador supervisionado orientado a objeto. O método foi bem-sucedido para detecção de embarcações e diferenciação de outros alvos (gelo, pequenas ilhas e nuvens), destacando a perda de eficiência conforme a dimensão da embarcação diminui, pois 32% das embarcações menores que 10 m foram confundidas com nuvens e outros pequenos objetos. Kanjir (2019) alcançou resultados satisfatórios na detecção de embarcações, inclusive daquelas com dimensão inferior a 20 m, alcançando taxa de detecção de até 0,96. Para tal, recorreu a árvore de decisão

após realizar uma pré-detecção baseada na subtração de bandas. Porém, destacou que a baixa presença/inexistência de embarcações por imagem e a pequena dimensão podem ocasionar piora na eficiência do método.

Um dos grandes desafios para estes estudos é obter quantidade suficiente de amostras de treinamento de qualidade, por poder haver poucas embarcações nas imagens selecionadas (CIOCARLAN; STOIAN, 2021). Assim, é oportuno avaliar outras abordagens que consigam gerar resultados satisfatórios em cenário de poucas embarcações.

Portanto, o presente estudo objetiva avaliar o uso de imagens Sentinel-2 para identificação de garimpos de ouro embarcados através do uso de classificadores do tipo *machine learning*, como *Support Vector Machine* (SVM) (VAPNIK, 1995), *K-Nearest Neighbor* (KNN) (FIX; HODGES, 1951), *Random Forest* (RF) (BREIMAN, 2001), e também o classificador espectral *Spectral Angle Mapper* (SAM) (KRUSE et al., 1993).

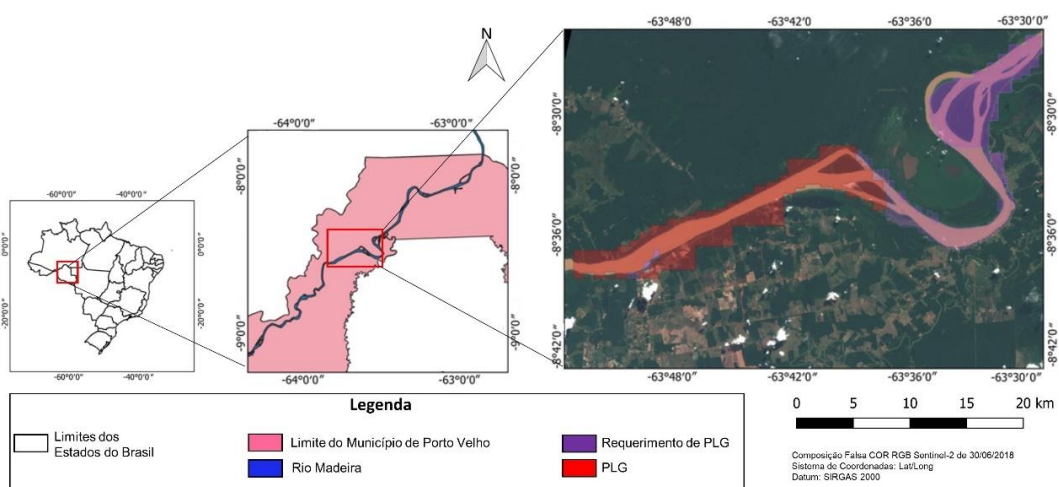
2. MATERIAIS E MÉTODOS.

2.1 Área de Estudo.

A área de estudo compreende o Rio Madeira, na região de Porto Velho, Rondônia, coordenadas $-63^{\circ} 24' 25,25''$ O / $-8^{\circ} 51' 9,92''$ S e $-65^{\circ} 1' 34,89''$ O / $-8^{\circ} 23' 43,874''$ S (Figura 2). A garimpagem de ouro embarcada nesta região ocorre de forma intensa e disseminada o que confere maiores chances de obter imagens com garimpos embarcados, e totaliza 80 km do rio, sendo uma das principais áreas de garimpagem de ouro embarcado no Brasil, totalizando 9.400 hectares de Permissão de Lavra Garimpeira (PLG) e 14.400 hectares de Requerimento de PLG (SIGIME, 2022).

O Rio Madeira é um rio de águas brancas com elevada concentração de sólidos em suspensão (ESPINOZA VILLAR et al., 2013). O clima da região é classificado como Awi e seu regime pluviométrico varia 38,7 a 329 mm/mês (BEZERRA; DANTAS; TRINDADE, 2010). Seu comportamento hidrológico é tipicamente sazonal, com vazão partindo de 5.000 m³/s no período seco a 50.000 m³/s no período chuvoso (ADAMY, 2016). Além disso, apresenta boas condições de navegabilidade com largura de 700 a 2.000 m e cota fluviométrica de 8 a 20 m (RODRIGUEZ et al., 2017).

Figura 2 - Área de Estudo.



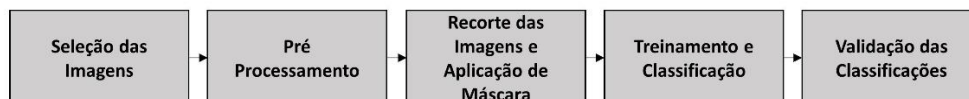
Fonte: os autores.

2.2 Metodologia.

A metodologia foi dividida em cinco etapas (Figura 3). A missão Sentinel-2 é composta pelos satélites 2A e 2B que possuem sensores *Multispectral Instruments* (MSI), registrando informações em 13 bandas espectrais do azul ao infravermelho de ondas curtas com tempo de revisita de 5 dias, quando considerados os

dois satélites, e resolução radiométrica de 12 bits. As imagens são gratuitas e disponibilizadas georreferenciadas com as seguintes resoluções espaciais: 10 m para azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (IVP); 20 m para limite do vermelho (LM) 1 a 4 e infravermelho de ondas curtas 1 e 2 (IVOC); e 60 m para aerossol, vapor d'água e cirrus (ESA, 2015).

Figura 3 - Metodologia Utilizada.



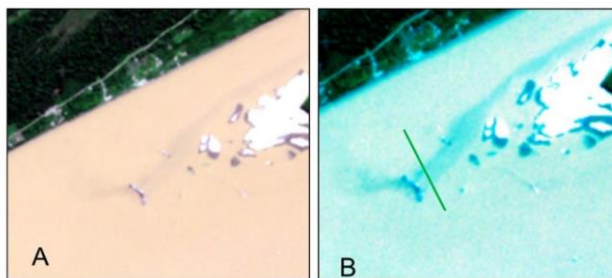
Fonte: os autores.

Etapa 1 - Seleção das Imagens.

Foram avaliadas imagens da órbita 20LMR entre os anos de 2018 e 2021 para selecionar as imagens com a presença de garimpos embarcados que coincidisse com as imagens Planet de 3m de resolução espacial que foram utilizadas para validação

das classificações, a ser detalhado em etapa posterior (REDEMAIS/MJSP E © 2020 PLANET, 2022). A avaliação das imagens foi feita visualmente utilizando realce histrogramático em uma composição falsa cor azul, verde e vermelho (Figura 4).

Figura 4 - Plumas de Sedimentos de Garimpos Embarcados em Imagem Sentinel-2 de 14/06/2021 em Composição Falsa Cor Azul, Verde e Vermelho: A) Sem Realce; B) Com Realce na Banda do Vermelho. Em Verde a Pluma.



Fonte: os autores.

Treze imagens, entre junho e setembro de 2018 a 2021, foram selecionadas (Tabela 1). Este é o período de menores chuvas e com cobertura de nuvens de 0 a 40% na região (MARTINS et al., 2018).

Etapa 2 - Pré-Processamento.

As imagens foram adquiridas no nível de processamento L1C sem correção

atmosférica sendo convertidas para o nível L2A para descontar a contribuição da atmosfera através do plugin Sen2Cor, desenvolvido para imagens Sentinel-2, (ESA, 2015; LOUIS et al., 2016). Após, as bandas foram reamostradas para 10 m, com exceção do vermelho, verde, azul e infravermelho próximo que já possuem resolução de 10 m.

Tabela 1 - Data das Imagens Sentinel-2 Utilizadas.

Data	Garimpo sem Pluma	Garimpo com Pluma
30/06/2018	Sim	Sim
25/07/2018	Sim	Sim
19/08/2018	Sim	Não
20/06/2019	Sim	Não
09/07/2020	Sim	Sim
22/09/2020	Sim	Não
14/06/2021	Sim	Sim
14/07/2021	Sim	Sim
24/07/2021	Sim	Sim
29/07/2021	Sim	Sim
08/08/2021	Sim	Não
13/08/2021	Sim	Sim
18/08/2021	Sim	Sim

Fonte: os autores.

Etapa 3 - Recorte e Aplicação de Máscara.

As imagens foram recortadas nos limites da área de estudo e uma máscara foi aplicada na porção continental, utilizando os limites do Rio Madeira disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (BRASIL, 2022).

Etapa 4 - Treinamento e Classificação.

As amostras de treinamento foram coletadas nas imagens Sentinel-2, sendo que a quantidade não foi igual, pois o número de embarcações, garimpos embarcados e plumas de sedimentos varia entre datas

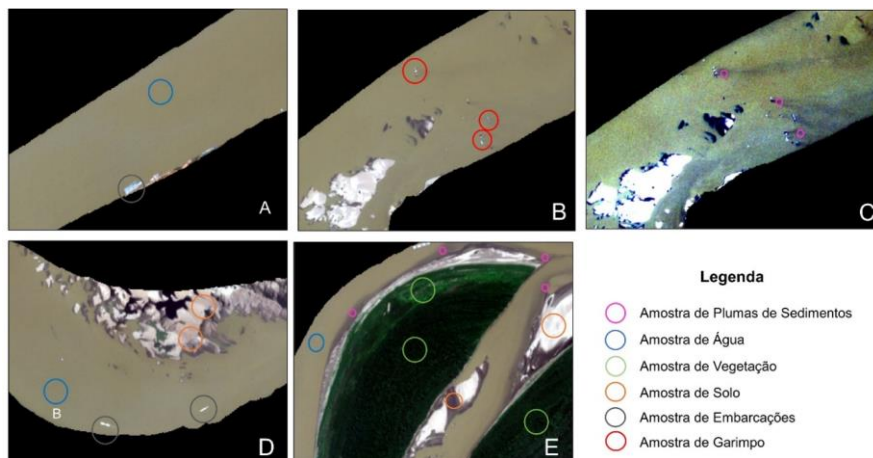
distintas, existindo por vezes poucos alvos na imagem. Foram coletados 3000 pixels para água (na inexistência de pluma), vegetação e solo, os dois últimos presentes nas ilhas e nos bancos de areia existentes ao longo do rio. Quando existia pluma, a quantidade coletada de pixels atingiu o máximo possível e, nesses casos, a quantidade de pixels de água foi a mesma. Foram coletados o máximo possível de pixels por imagem para garimpos embarcados (Tabela 2 e Figura 5).

Tabela 2 - Quantidade de Pixels de Treinamento por Imagens.

Data	Classes					
	Vegetação	Solo	Água	Pluma	Embarcações	Garimpos
30/06/2018	3000	3000	1000	1000	250	95
25/07/2018	3000	3000	1200	1200	330	145
19/08/2018	3000	3000	3000	Inexiste	230	100
20/06/2019	3000	3000	3000	Inexiste	380	80
09/07/2020	3000	3000	1500	1500	390	100
22/09/2020	3000	3000	3000	Inexiste	160	45
14/06/2021	3000	3000	1000	1000	130	100
14/07/2021	3000	3000	2000	2000	300	200
24/07/2021	3000	3000	1000	1000	270	225
29/07/2021	3000	3000	1500	1500	450	160
08/08/2021	3000	3000	3000	Inexiste	285	120
13/08/2021	3000	3000	1000	1000	420	100
18/08/2021	3000	3000	1000	1000	255	135

Fonte: os autores.

Figura 5 - Exemplos de Amostras: A) Água e Embarcações; B) Garimpos Embarcados; C) Plumas de Sedimentos Vistas com Realce; D) Embarcações e Água; E); Vegetação, Águas e Plumas de Sedimentos Vistas sem Realce.



Fonte: os autores.

A análise considerou os seguintes classificadores: RF; KNN; SVM; e SAM. O RF gera árvores de decisão de forma aleatória com base em um subconjunto de dados e procura o melhor resultado a partir de um processo de votação (BREIMAN, 2001). O KNN avalia a distância da amostra em relação aos seus “k” vizinhos mais próximos e a classifica conforme a maioria dos vizinhos (FIX; HODGES, 1951). O SVM plota amostras como pontos no espaço n-dimensional e busca a melhor forma de separar as classes a partir da construção de um hiperplano que age como fronteira entre as classes (VAPNIK, 1995). O SAM se

baseia na similaridade das respostas espectrais e calcula ângulos entre as amostras a serem classificadas e as de referência (KRUSE et al., 1993). RF, KNN e SVM são classificadores *machine learning*, podendo ter uma abordagem de classificação pixel a pixel ou de classificação orientado a objeto. O método pixel a pixel utiliza a informação espectral dos pixels enquanto método orientado a objeto realiza o agrupamento dos pixels a fim de criar objetos que possuem determinada similaridade, sendo uma etapa vital a segmentação da imagem (SIMIONATO; BERTANI; OSAKO, 2021). As

segmentações foram realizadas no software ArcGIS Pro a partir do algoritmo *Mean Shift Segmentation* (COMANICIU; MEER, 2002) que dispersa os pixels em um espaço n-dimensional e constrói uma área de interesse, calcula o centroide e a direção para qual a área de interesse deve se mover. Após, altera o centroide e repete o processo até que seja atingida a convergência, ou seja, que todos os pixels sejam agrupados em segmentos. O software ArcGIS Pro requer três parâmetros para realizar a segmentação: detalhes espectrais e espaciais (variam de 1 a 20); tamanho mínimo do segmento (ArcGIS PRO, 2023). O primeiro refere-se ao nível de importância dado às diferenças espectrais entre os pixels. O segundo controla o nível de relevância dado à proximidade entre os pixels. O último é o tamanho mínimo do segmento a ser construído (LODI; FRANZINI; CASELLA, 2019). No caso do detalhe espectral, valores maiores são apropriados para separar objetos que possuem características espectrais semelhantes, enquanto valores menores são apropriados para generalização

de objetos. No caso do detalhe espacial, os valores maiores são apropriados quando os objetos são pequenos e formam *clusters*, e o oposto se aplica para objetos maiores (ArcGIS PRO, 2023).

Foram testadas diferentes combinações, e optou-se por utilizar 20 para detalhe espectral e 18 para detalhe espacial. Essa combinação gerou segmentação composta por vários pequenos segmentos que, após avaliação visual, mostrou-se adequada para delimitar embarcações e plumas de sedimentos, ressaltando, também, a diferença espectral entre os segmentos. Foi utilizado 1 pixel (10 m) como tamanho do segmento, menor dimensão de um garimpo embarcado conforme a resolução das bandas de 10 m das imagens Sentinel-2. Por fim, os pixels de treinamento dos classificadores pixel a pixel foram plotados na imagem segmentada e os segmentos onde incidiram os pixels foram utilizados como segmentos para treinamentos dos classificadores. Por fim, não houve limitação de amostras por classe para nenhum tipo de classificador.

Etapa 5 – Validação das Classificações.

Foram utilizados 300, 150 ou 100 pixels para validação das classificações. A quantidade variou em função do número e tamanho de embarcações, garimpos embarcados e plumas de sedimentos presentes nas imagens. Os pixels foram coletados mediante à visualização das imagens disponibilizadas pelo Programa Brasil M.A.I.S que possuem 3 m de resolução espacial (REDEMAIS/MJSP E © 2020

PLANET, 2022). Foram calculados o Índice *Kappa* e *score* F1, métricas utilizadas em estudos de sensoriamento remoto (CAO et al., 2020; SALGADO et al., 2019). O *score* F1 (Equação 1) é calculado com base no *precision* (Equação 2) e no *recall* (Equação 3) que indicam a precisão da detecção do alvo e capacidade de discriminação:

$$Score\ F1 = 2 * \frac{P * R}{P + R} \quad (1)$$

$$P = \frac{\Sigma VP}{\Sigma VP + \Sigma FP} \quad (2)$$

$$R = \frac{\Sigma VP}{\Sigma VP + \Sigma FN} \quad (3)$$

Onde: P = precision; R = recall; VP = verdadeiro positivo; FP = falso positivo; FN = falso negativo

Deve ser buscado um equilíbrio entre o *precision* e *recall*, pois um resultado alto de *precision* e baixo de *recall* significa que poucos alvos foram devidamente classificados, contudo estes poucos alvos se assemelham bastante com os dados de controle (relação com falsos negativos). Por outro lado, *precision* baixo e alto *recall*

indicam que os alvos foram amplamente classificados, porém, generalizados, possuindo relação com falsos positivos (CAO et al., 2020; BARBOSA et al., 2021). Complementarmente, foi realizada a avaliação visual para cálculo do percentual de detecção e omissão dos garimpos em

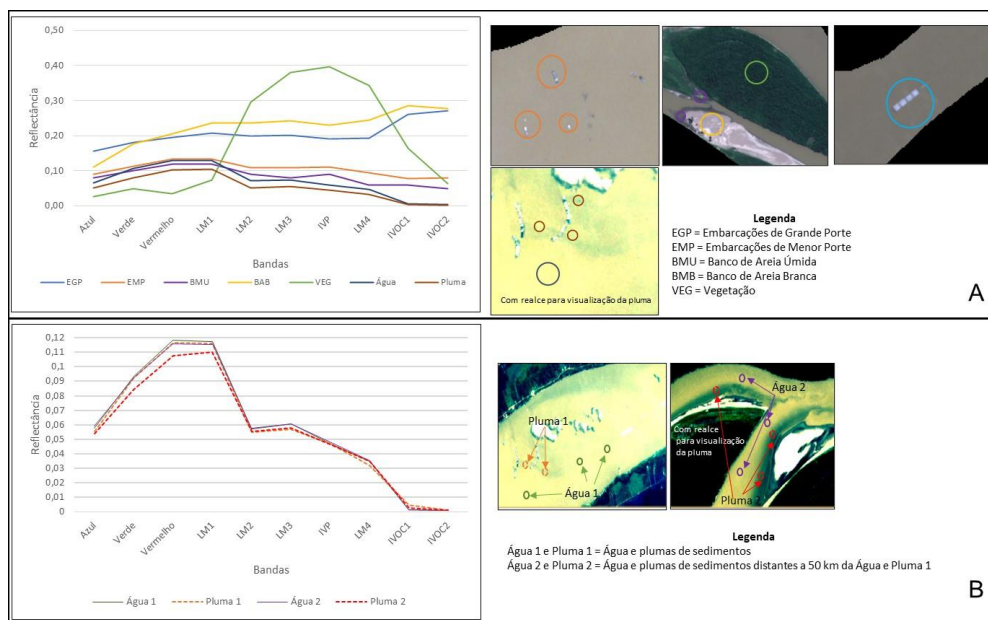
operação (garimpos com pluma de sedimentos com origem nesta).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Os alvos presentes nas imagens foram: água; pluma de sedimentos; garimpos embarcados; embarcações (variados portes); solo; bancos de areia; e vegetação (Figura

6A). Conforme descrito por Espinoza Villar et al. (2013), as águas do Rio Madeira são turvas e possuem elevada concentração de sedimentos em suspensão com reflectância naturalmente maior que a água com baixa concentração de sedimentos.

Figura 6 - Reflectância dos Alvos: A) Todos os Alvos; B) Água Versus Pluma de Sedimentos.



Fonte: os autores.

Esta característica faz com que as águas e plumas de sedimentos da área de estudo apresentem respostas muito próximas, contudo a reflectância das plumas de sedimentos é um pouco menor do que a reflectância das águas entorno dos garimpos embarcados (Figura 11B). O pico de

reflectância, bem como maior diferença entre estes alvos (0,03), ocorreu nas bandas verde, vermelho e LM1, sendo maior no vermelho, contudo ainda muito baixo. Barbosa, Novo e Martins (2019) e Goodin et al. (1993) destacam que a maior reflectância no verde e vermelho ocorre devido ao maior

espalhamento da radiação eletromagnética pela presença de material particulado e menor absorção da água nesta faixa. Ainda, diferença entre os alvos, bem como a reflectância, diminui a partir de LM1, tendendo a zero na região do IVOC.

Além da resposta próxima de água e pluma de sedimentos, ressalta-se que a concentração natural dos COA nos rios amazônicos varia a depender do período hidrológico - vazante, baixa, cheia ou enchente (BARBOSA, 2005). Além disso, as plumas de sedimentos (Figura 6B) podem apresentar mesmo comportamento espectral da água em outras partes do rio quando a concentração sedimentos em suspensão forem semelhantes. Isso foi percebido em áreas próximas a bancos de areias.

Heiselberg (2016) identificou que as embarcações de grande porte (>100 m) possuem reflectância mais elevada, alcançando maiores valores a partir do IVOC, comportamento parecido com os bancos de areia branca presentes na área de estudo. Estes alvos possuem resposta espectral parecida entre si, sendo a maior

diferença a partir da banda LM1. Embarcações menores, incluindo garimpos embarcados, e bancos de areia com a presença de água, de aspecto lamacento, apresentam resposta inferior e próximas em todas as bandas.

As menores dimensões das embarcações dificultam o registro das imagens devido à limitação da resolução espacial e o tipo de material da embarcação que pode ser de palha, madeira ou outros materiais de baixa reflectância (KANJIR, 2019).

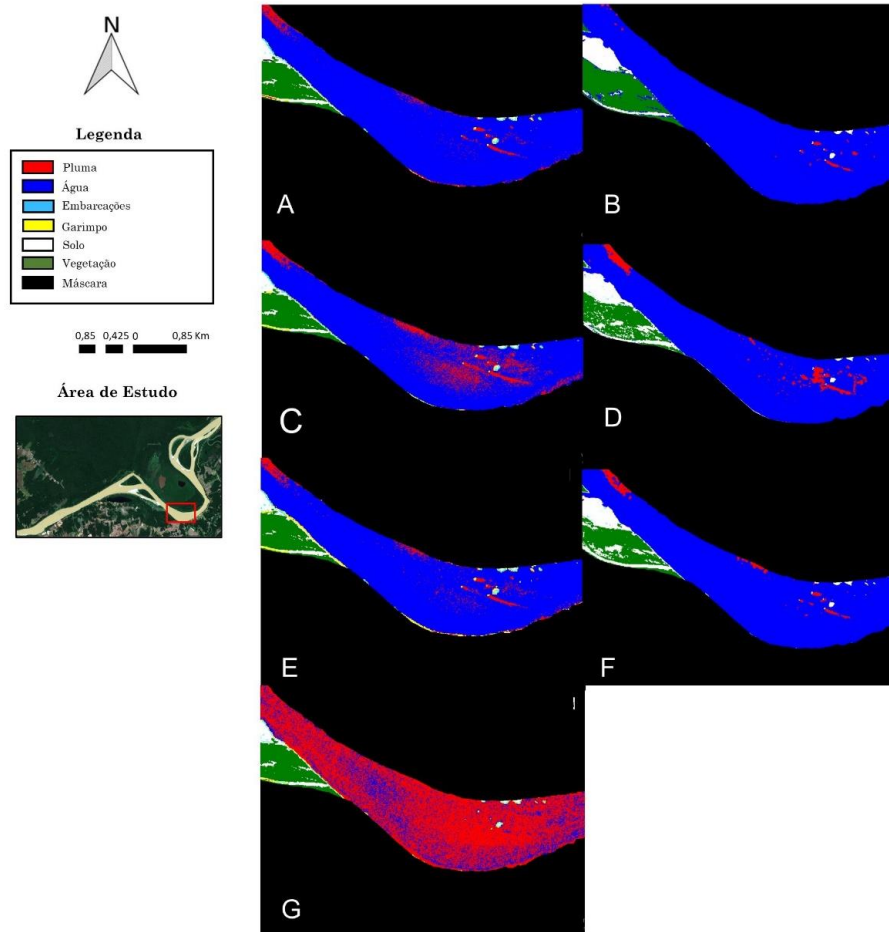
Por fim, as classes utilizadas no estudo foram: água; pluma de sedimentos (quando existente); embarcações (grande, médio e pequeno porte); garimpos (embarcações de médio e pequeno porte com comportamento típico de se agrupar); solo; e vegetação.

A Figura 7 exemplifica as classificações da imagem de 14/07/2021, destacando as diferenças na detecção das plumas de sedimentos dos garimpos embarcados entre os classificadores. A Tabela 3 demonstra que o Índice *Kappa*

variou de 0,70 a 0,95, resultados considerados “muito bom” ($0,6 < k < 0,8$) ou “excelente” ($0,8 < k < 1$) (SALGADO et al.,

2019). Ainda, o *score* F1 variou de 0,74 a 0,96, resultados bastante satisfatórios (BARBOSA et al., 2021; CAO et al., 2020).

Figura 7 - Classificações da Imagem de 14/07/2021: A) SVM Pixel; B) SVM OBIA; C) KNN Pixel; D) KNN OBIA; E) RF Pixel; F) RR OBIA; G) SAM.



Fonte: os autores.

Tabela 3 - Resultados do Índice Kappa e Score F1.

Classificador	Métrica	Data												
		30/06/18	25/07/18	19/08/19	20/06/19	09/07/20	22/09/20	14/06/21	14/07/21	24/07/21	29/07/21	08/08/21	13/08/21	18/08/21
SVM Pixel	Kappa	0,86	0,83	0,84	0,88	0,80	0,84	0,87	0,89	0,87	0,90	0,86	0,85	0,85
	F1	0,88	0,86	0,87	0,91	0,83	0,87	0,89	0,91	0,89	0,92	0,88	0,88	0,87
SVM OBIA	Kappa	0,88	0,84	0,93	0,93	0,87	0,87	0,95	0,89	0,91	0,91	0,87	0,89	0,89
	F1	0,89	0,86	0,94	0,94	0,88	0,89	0,96	0,91	0,92	0,92	0,89	0,90	0,91
KNN Pixel	Kappa	0,81	0,80	0,83	0,86	0,81	0,80	0,86	0,88	0,86	0,89	0,86	0,85	0,85
	F1	0,84	0,84	0,86	0,89	0,83	0,84	0,88	0,90	0,88	0,91	0,88	0,87	0,88
KNN OBIA	Kappa	0,81	0,80	0,87	0,88	0,81	0,82	0,84	0,86	0,87	0,88	0,86	0,86	0,85
	F1	0,84	0,83	0,89	0,90	0,83	0,85	0,86	0,89	0,89	0,90	0,88	0,88	0,87
SAM	Kappa	0,70	0,73	0,80	0,85	0,72	0,79	0,82	0,72	0,73	0,71	0,82	0,83	0,73
	F1	0,74	0,76	0,84	0,87	0,76	0,82	0,85	0,77	0,77	0,75	0,85	0,85	0,78
RF Pixel	Kappa	0,73	0,79	0,83	0,74	0,71	0,74	0,81	0,86	0,87	0,89	0,83	0,83	0,92
	F1	0,77	0,82	0,85	0,76	0,74	0,79	0,84	0,87	0,90	0,91	0,86	0,82	0,93
RF OBIA	Kappa	0,74	0,85	0,85	0,84	0,84	0,79	0,84	0,83	0,84	0,82	0,85	0,85	0,82
	F1	0,77	0,87	0,86	0,86	0,86	0,80	0,86	0,84	0,85	0,84	0,87	0,85	0,84

Nota: pixel = método pixel a pixel; OBIA = método orientado a objeto

Fonte: os autores.

Os valores médios de *Kappa* variaram de 0,76 a 0,89 e de F1 de 0,80 a 0,91, com desvio padrão de 0,06 a 0,02, no qual o SVM OBIA apresentou melhor desempenho, seguido por SVM Pixel, KNN OBIA, KNN Pixel, RF OBIA, RF Pixel e SAM (Tabela 4). Os valores obtidos demonstram estar parecidos com literatura

de referência no qual o fator de performance variou de até 0,68 a 1 (HEISELBERG; HEISELBERG, 2017). Vale ressaltar que as métricas do presente estudo não foram tão diferentes entre os classificadores SVM, KNN e RF com valores médios de *Kappa* de 0,81 a 0,89 e F1 de 0,84 a 0,91.

Tabela 4 - Kappa e F1 Médio e Desvio Padrão das Classificações.

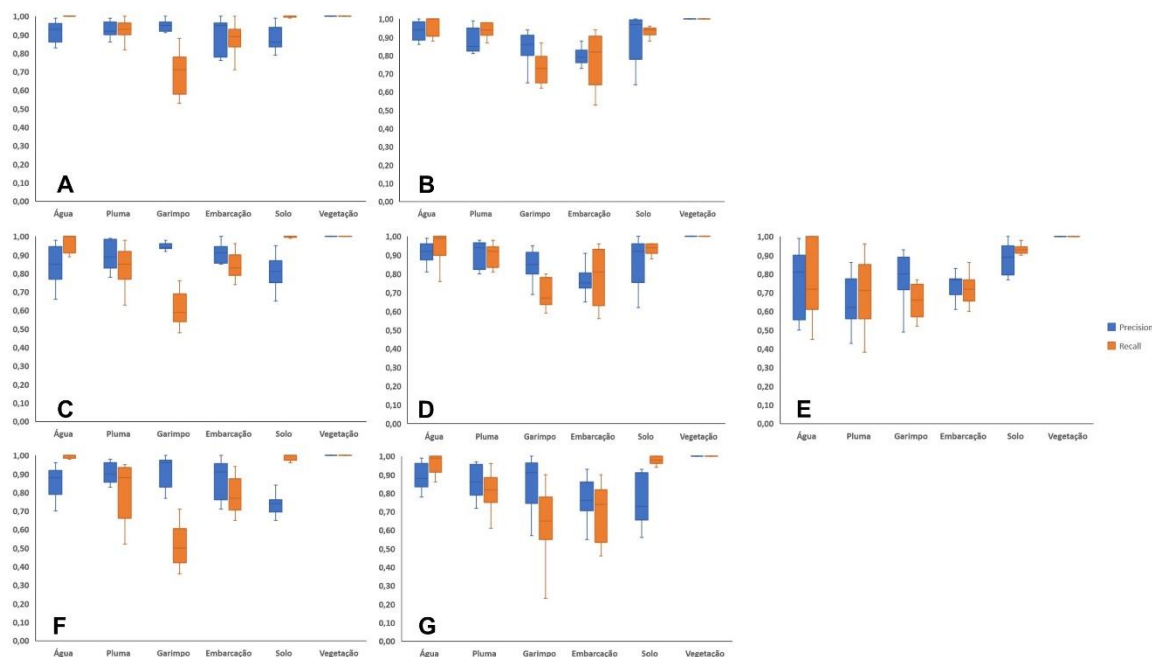
Classificador	Kappa Médio	Desvio Padrão	F1 Médio	Desvio Padrão
SVM OBIA	0,89	0,03	0,91	0,03
SVM Pixel	0,86	0,03	0,88	0,02
KNN OBIA	0,85	0,03	0,87	0,02
KNN Pixel	0,84	0,03	0,87	0,02
RF OBIA	0,83	0,03	0,84	0,03
RF Pixel	0,81	0,06	0,84	0,06
SAM	0,76	0,05	0,80	0,04

Fonte: os autores.

Os valores de *precision* e *recall* foram mais variados, com *precision* entre 0,43 e 1 e o *recall* entre 0,2 e 1 (Figura 8). Algumas classes estudadas foram facilmente classificadas, vegetação e água, quando inexistiam plumas de sedimentos. Nesses casos, *precision* e *recall* foram iguais a 1. Porém, os classificadores tiveram maior dificuldade para separar alvos com resposta espectral próxima, como, garimpos e afetando a performance de classificadores (HEISELBERG, 2016). Além disso, o tamanho reduzido das embarcações afeta os métodos, fazendo o fator de performance decair de 0,93 para 0,68 para embarcações menores por causa de omissões e confusões com outros pequenos alvos (HEISELBERG; HEISELBERG, 2017). Comportamento similar foi percebido para garimpos e bancos

embarcações – que apesar de apresentaram *precision* entre 0,77 e 0,88 (garimpos) e 0,78 e 0,89 (embarcações) obtiveram maior quantidade de falsos negativos, com *recall* de 0,58 a 0,71 (garimpos) e 0,69 a 0,87 (embarcações). Este comportamento é comum na classificação de diferentes tipos de embarcações porque a resposta espectral das embarcações não apresenta padrão claro, por vezes são parecidas ou muito diferentes, de areia úmida (solo), justificada pela baixa e próxima resposta espectral destes alvos e pelo tamanho reduzido de alguns bancos de areia que apresentam resposta semelhante a pequenos alvos não água (KIKAKI et al., 2022).

Figura 8 - Precision e Recall para as Classificações: A) SVM OBIA; B) SVM Pixel; C) KNN OBIA; D) KNN Pixel; E) Sam; F) RF OBIA; G) Rf Pixel.



Fonte: os autores.

O detalhamento dos *scores* F1 médios reforça o melhor comportamento do SVM OBIA que além de alcançar melhor *score* apresentou maior constância, com menores quantidades de falsos negativos e falsos positivos, seguido pelo SVM Pixel (Tabela 5). KNN e RF apresentaram resultados inferiores,

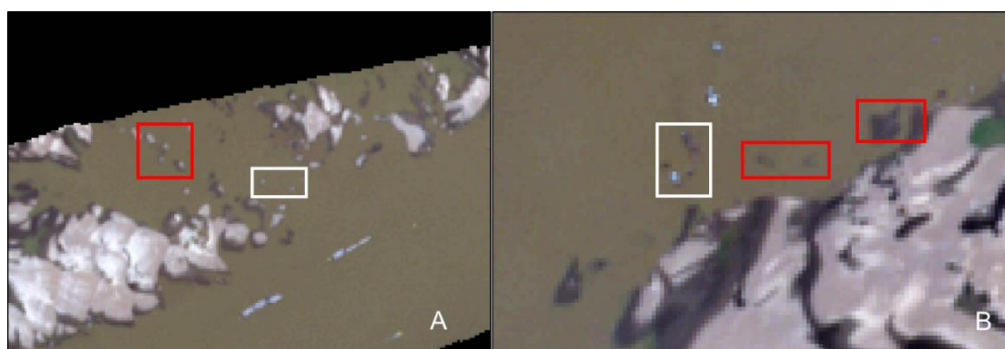
sendo que o RF apresentou maior inconstância, principalmente quanto à ocorrência de falsos negativos. O SAM obteve os piores resultados, com maior grau de confusão principalmente entre garimpos e embarcações, alvos com resposta espectral semelhante (Figura 9).

Tabela 5 - Precision, Recall e Score F1 das Classificações.

Classes	SVM Pixel		SVM OBIA		KNN Pixel		KNN OBIA		RF Pixel		RF OBIA		SAM	
	Precision Médio	Recall Médio	Precision Médio	Recall Médio	Precision Médio	Recall Médio	Precision Médio	Recall Médio	Precision Médio	Recall Médio	Precision Médio	Recall Médio	Precision Médio	Recall Médio
Água	0,88	0,96	0,90	0,99	0,92	0,95	0,85	0,96	0,89	0,95	0,88	0,91	0,75	0,78
Pluma	0,88	0,94	0,91	0,94	0,90	0,87	0,90	0,88	0,82	0,81	0,82	0,82	0,65	0,70
Garimpo	0,84	0,72	0,88	0,72	0,84	0,69	0,86	0,59	0,77	0,63	0,78	0,64	0,78	0,65
Embarcação	0,80	0,78	0,89	0,88	0,76	0,79	0,77	0,83	0,78	0,69	0,81	0,72	0,73	0,72
Solo	0,89	0,93	0,87	0,99	0,87	0,93	0,84	1,00	0,86	0,96	0,85	0,93	0,88	0,93
Vegetação	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
F1 Água	0,92		0,94		0,93		0,90		0,92		0,89		0,77	
F1 Pluma	0,91		0,92		0,88		0,89		0,82		0,82		0,68	
F1 Garimpo	0,78		0,79		0,76		0,70		0,69		0,70		0,71	
F1 Embarcação	0,79		0,89		0,77		0,80		0,73		0,76		0,72	
F1 Solo	0,91		0,93		0,90		0,91		0,91		0,89		0,90	
F1 Vegetação	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
Score F1 Médio	0,88		0,91		0,87		0,87		0,84		0,84		0,80	

Fonte: os autores.

Figura 9 - Confusão entre Pequenas Embarcações e Garimpos com Outros Alvos. Em Vermelho Pequenos Bancos de Areia Escura. Em Branco Pequenas Embarcações e Garimpos: a) Imagem de 24/07/2021. b) Imagem de 18/08/2021.



Fonte: os autores.

Ainda, o SAM apresentou dificuldade em classificar água e pluma de sedimentos, havendo confusão e até mesmo ausência na delimitação das plumas.

Isso ocorreu devido à baixa variação da concentração de COA, uma vez que diferentes tipos de águas são mais bem classificados quando existe maior diferença

na concentração de COA, indo ao encontro das afirmativas de Barbosa (2005) e Vantrepotte et al. (2012).

Ao comparar a abordagem pixel a pixel *versus* orientada a objeto, é perceptível a diferença nos resultados para o SVM (Tabela 5) quando aprimorou todas as métricas de avaliação. Keshtkar, Voigt e

Alizadeh, (2017) e Noi e Kappas, (2017) obtiveram resultados semelhantes em que o classificador SVM apresentou as melhores métricas para identificação de diferentes tipos de águas, melhorando a performance, inclusive, quando utilizado método orientado a objeto (HARTONI et al., 2022).

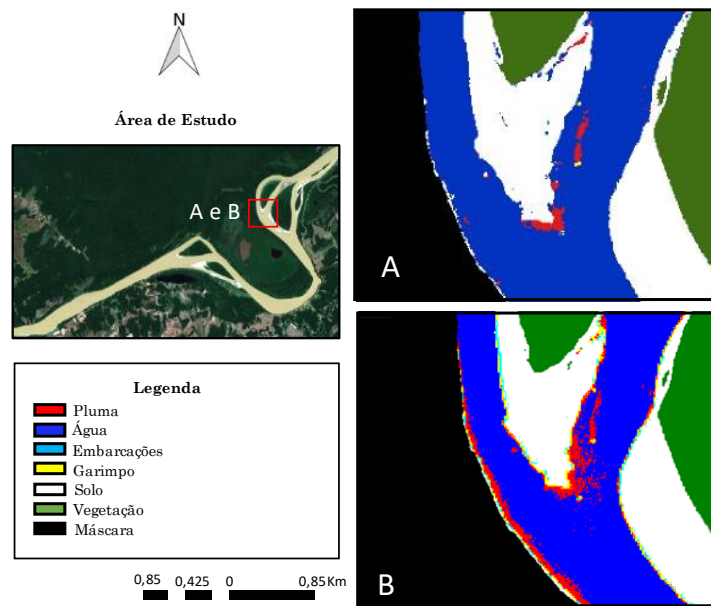
Os resultados para KNN e RF foram variados, pois apesar de terem sido mantidos os *scores* F1 médios, verificou-se que o *precision* e *recall* foram mais aleatórios, melhorando para alguns alvos e piorando para outro, porém ainda se mostraram mais efetivos que SAM.

Ainda, os classificadores pixel a pixel cometeram muitos erros de comissão entre garimpos embarcados e solo, gerando classificações com erros sistêmicos (Figura 10). Neste ponto residiu a principal

vantagem em utilizar o método orientado a objeto. Todos os classificadores OBIA atenuaram de forma acentuada este tipo de erro e deixaram as classificações mais limpas porque ao avaliar segmentos com determinada similaridade espectral e espacial e não somente pixels, ampliou-se a capacidade de distinção entre as classes, fato também observado por Simionato, Bertani e Osako (2021).

Por fim, a avaliação visual permitiu verificar que a detecção dos garimpos sem plumas nas classificações SVM OBIA foi de 100%, não ocorrendo omissões. Em relação aos garimpos em operação, com plumas de sedimentos, a detecção variou de 73 a 100%, e omissão de 0 a 26,6%, deixando de detectar entre 0 a 4 garimpos em operação por imagem (Tabela 6).

Figura 10 - Melhoras nas Classificações OBIA X Pixel em Imagem de 13/08/2021: A) SVM OBIA; D) SVM Pixel.



Fonte: os autores.

Tabela 6 - Identificação de Garimpos com Plumas no Classificador SVM OBIA.

Data	Embarcações com Plumas Utilizadas como Verdades	Embarcações Detectadas na Classificação	Não Detectadas	% de Omissão
30/06/18	18	17	1	5,56%
25/07/18	6	6	0	0,00%
09/07/20	9	8	1	11,11%
14/06/21	15	11	4	26,67%
14/07/21	21	17	4	19,05%
24/07/21	8	6	2	25,00%
29/07/21	5	4	1	20,00%
13/08/21	3	3	0	0,00%
18/08/21	9	8	1	11,11%
Média	--	--	2	13,17

Fonte: os autores.

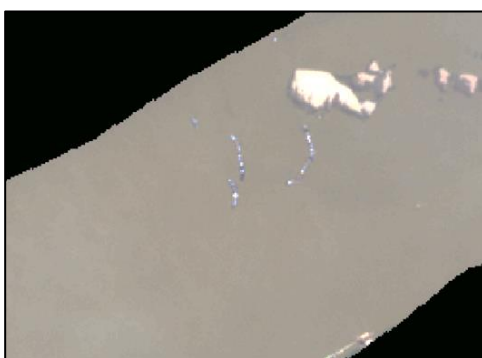
Estes resultados são similares aos percebidos por Kanjir (2019) que obteve detecção de 63 a 96% e omissão entre 4 a 34% e por Heiselberg & Heiselberg (2017) que obteve detecção de 67 a 100% e omissão de 0 a 33%. Em todos os casos as piores

performances foram percebidas por omissões de pequenas embarcações ocasionadas devido ao pequeno tamanho da embarcação e baixa resposta espectral, diretamente relacionada com a limitação da resolução espacial do sensor (10m).

No presente estudo, as omissões de garimpos em operação não ocorreram pela não detecção do garimpo em si, mas porque não foi possível identificar a pluma de sedimentos com origem na embarcação. Nos casos dos garimpos sem pluma a avaliação

visual se faz extremamente necessária para atestar que os alvos são garimpos de fato, uma vez que somente por meio visual é possível identificar o comportamento típico de tais garimpos (agrupamentos de embarcações) (Figura 11).

Figura 11 - Garimpos sem Pluma Agrupados em Imagem de 29/07/2021.



Fonte: os autores.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que o classificador SVM apresentou as melhores métricas de avaliação. Ao comparar a abordagem pixel a pixel *versus* orientada a objeto, os resultados do SVM foram perceptivelmente melhores, alcançando o maior *score* F1 do estudo (0,91). Nesse contexto, 100% dos garimpos sem plumas de sedimentos foram detectados, bem como grande parte dos garimpos em operação. As omissões ocorreram porque não foi possível identificar o ponto de origem da pluma na

embarcação. Portanto, a metodologia se mostrou eficaz para identificar garimpos de ouro embarcados a partir de classificadores do tipo *machine learning* utilizando imagens Sentinel-2.

A performance dos classificadores é influenciada por diversos fatores, como, as características dos alvos e quantidade e qualidade das amostras de treinamento. Logo, a escolha do classificador depende dos objetivos buscados uma vez que um método que obteve desempenho satisfatório pode ter resultados alterados sensivelmente quando

aplicado a outro contexto. A limitada quantidade de pixels de treinamentos para as classes embarcações e garimpos e a

similaridade espectral de determinados alvos é um ponto sensível à metodologia empregada.

5 REFERÊNCIAS

ADAMY, A. Dinâmica fluvial do Rio Madeira. In: **SILVA, R.G.C. (org.). Porto Velho: cultura, natureza e território.** p. 120–147, 2016.

ASNER, G. P. et al. Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 46, p. 18454–18459, 29 out. 2013.

ARCGIS PRO. **Segmentation**. Disponível em < <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/segmentation.htm> > Acesso em: Abril 15, 2023.

BALZINO, M. et al. Gold losses and mercury recovery in artisanal gold mining on the Madeira River, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 370–377, 2015.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto da Dinâmica da Circulação da Água do Sistema Planície de Curuai/Rio**

Amazonas. 2005. Thesis (Doctorat in Remote Sensing) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2005.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: Princípios e Aplicações.** São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019.

BARBOSA, F. L. R. et al. Classificação do uso e cobertura da terra utilizando imagens SAR/Sentinel 1 no Distrito Federal. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. e55954, 2 fev. 2021.

BEZERRA, R. B.; DANTAS, T. R.; TRINDADE, A. G. Caracterização Temporal da Precipitação Pluvial no Município de Porto Velho/RO no Período de 1945 a 2003. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 3, p. 609–623, 2010.

- BRASIL. **Lei Nº 7.805, de 18 de julho de 1989.** Disponível em < <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/103411/lei-7805-89> > Acesso em: Agosto 02, 2022.
- BRASIL. **Catálogo de Metadados.** 2022. Disponível em: < <https://metadados.snirh.gov.br> > Acesso em: Setembro 04, 2022.
- BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.
- CAO, R. et al. Deep learning-based remote and social sensing data fusion for urban region function recognition. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 163, n. February, p. 82–97, 2020
- CETEM. **Inventário Nacional de Emissões e Liberações de Mercúrio pelos Garimpos de Ouro.** 2018. Disponível em < <https://diretoriopre.mma.gov.br> > Acesso em: julho 29, 2022.
- CIOCARLAN, A.; STOIAN, A. Ship detection in sentinel 2 multi-spectral images with self-supervised learning. **Remote Sensing**, v. 13, n. 21, 1 nov. 2021.
- COMANICIU, D.; MEER, P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 24, n. 5, p. 603–619, 2002.
- DECHESNE, C. et al. Ship identification and characterization in Sentinel-1 SAR images with multi-task deep learning. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 1–18, 2019.
- ESA. **Sentinel-2 User Handbook.** 2015. Disponível em < https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/8869acdf-fd84-43ec-ae8c-3e80a436a16c?t=1438278087000 > Acesso em: Setembro 03, 2022.
- ESPINOZA VILLAR, R. et al. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45–54, 2013.
- FERNANDES, F. R. C.; ALAMINO, R. C. J.; ARAUJO, E. Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. Rio de Janeiro. CETEM. 2014.

- FIX, E; HODGES; J. L. JR. Discriminatory analysis, nonparametric discrimination. **USAF School of Aviation Medicine**, Randolph Field, Tex., Project 21-49-004, Rept. 4, AF41(128)-31, February 1951.
- G1. **PF e fiscais destroem balsas no rio madeira**. 2022. Disponível em: < <https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2022/10/13/pf-e-fiscais-do-ibama-destroem-dragas-de-garimpo-ilegal-no-rio-madeira-em-rondonia-veja-video.ghtml> >. Acesso em: 29 Fevereiro. 2023.
- GOODIN, D. G. et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 4, p. 505–510, 1993.
- HARTONI et al. Object based classification of benthic habitat using Sentinel 2 imagery by applying with support vector machine and random forest algorithms in shallow waters of Kepulauan Seribu, Indonesia. **Biodiversitas**, v. 23, n. 1, p. 514–520, 1 jan. 2022.
- HEISELBERG, H. A direct and fast methodology for ship recognition in sentinel-2 multispectral imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, 1 dez. 2016.
- HEISELBERG, P.; HEISELBERG, H. Ship-iceberg discrimination in Sentinel-2 multispectral imagery by supervised classification. **Remote Sensing**, v. 9, n. 11, 1 nov. 2017.
- ISIDRO, C. M. et al. Applicability of earth observation for identifying small-scale mining footprints in a wet tropical region. **Remote Sensing**. v.9, n.9, p. 945, 12 sep. 2017.
- KANJIR, U. Detecting migrant vessels in the Mediterranean Sea: Using Sentinel-2 images to aid humanitarian actions. **Acta Astronautica**. v. 155, p. 45–50, 1 fev. 2019.
- KESHTKAR, H.; VOIGT, W.; ALIZADEH, E. Land-cover classification and analysis of change using machine-learning classifiers and multi-temporal remote sensing imagery. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 6, 1 mar. 2017.
- KIKAKI, K. et al. MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data. **PLoS ONE**, v. 17, n. 1 January, 1 jan. 2022.

- KRUSE, F. A. et al. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163, 1993.
- LODI, L. A.; FRANZINI, M; CASELLA, V. Mapping Land Cover Types using Sentinel-2 Imagery: A Case Study. In: **GISTAM**. 2019. p. 242-249.
- LOBO, F. DE L. et al. Reference spectra to classify Amazon water types. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 11, p. 3422–3442, 2012.
- LOBO, F. DE L. et al. Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1178, 25 jul. 2018.
- LOUIS, J. et al. SENTINEL-2 SEN2COR: L2A PROCESSOR FOR USERS. **Proceeding living planet symposium**, p. 1–8, 2016.
- MARTINS, V. S. et al. Seasonal and interannual assessment of cloud cover and atmospheric constituents across the Amazon (2000–2015): Insights for remote sensing and climate analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 309–327, 1 nov. 2018.
- NOI, P. T.; KAPPAS, M. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 18, n. 1, 22 dez. 2017.
- REDEMAIS/MJSP E © 2020 PLANET. Disponível em: < <https://plataforma-pf.sccon.com.br> > Acesso em: Junho 22, 2022.
- RODRIGUEZ, D. A. et al. Previsões de cheias extremas nos horizontes sazonais e de curto e médio prazos na bacia do rio Madeira: estudo de caso da enchente de 30 de março de 2014 em Porto Velho. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 827–836, 2017.
- SALGADO, C. B. et al. Análise da interferência de nuvens na classificação de séries temporais MODIS-NDVI na região da Amazônia, município de Capixaba, Acre. **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1–20, 2019.
- SIGIME. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração**. 2022.

Disponível em: < <https://geo.anm.gov.br>>

Acesso em: Julho 04, 2022.

SIMIONATO, J.; BERTANI, G.; OSAKO, L. S. Identification of artisanal mining sites in the Amazon Rainforest using Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) and Data Mining techniques. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 24, p.100633. 1 nov. 2021.

TRINDADE, R. B. E.; BARBOSA FILHO, O. **Extração de ouro - princípios, tecnologia e meio ambiente**. CETEM/MCT & PUC-RJ, 2002.

VANTREPOTTE, V. et al. Optical classification of contrasted coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 306-323, 2012

CAPÍTULO 4: AVALIAÇÃO DAS IMAGENS SAR/SENTINEL-1 PARA IDENTIFICAÇÃO DE GARIMPOS DE OURO EMBARCADOS ATRAVÉS DE ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE EMBARCAÇÕES.

RESUMO

A garimpagem de ouro está presente no Brasil há muito tempo e, atualmente, produz de cerca de 19 toneladas/ano. Garimpos de ouro embarcados são embarcações que dragam sedimentos de fundo dos rios para produção do ouro mediante ao uso de maquinário pesado. O uso de imagens de *Synthetic Aperture Radar* (SAR) para detecção de embarcações vem ganhando destaque devido à disponibilização gratuita de imagens de melhor qualidade e com melhor resolução temporal e à menor influência de fatores atmosféricos nas imagens, o que permite seu uso em locais com densa cobertura de nuvens. Este estudo objetivou identificar garimpos de ouro embarcados no Rio Madeira, em Porto Velho, em sete imagens Sentinel-1 entre 2018 e 2021, por meio do uso de algoritmos *Constant False Alarm Rate* (CFAR) e de avaliação geométrica das embarcações. Os resultados gerados produziram *score F1* entre 0,76 e 0,86, com percentual de detecção de 70 a 100% e de omissão de 0 a 30%. Por fim, foram identificados garimpos embarcados em áreas legais e em áreas potencialmente ilegais.

Palavras-chave: SAR, Sentinel-1, garimpos embarcados, detecção de embarcações.

EVALUATION OF SAR/SENTINEL-1 IMAGES FOR IDENTIFICATION OF GOLD MINING VESSELS BASED ON VESSEL DETECTION ALGORITHMS

ABSTRACT

Artisanal and Small-Scale Gold mining has been present in Brazil for a long time and nowadays produces more nearly 19 tons/year. Artisanal and Small-Scale Gold mining in vessels dredge river bottom sediments for gold production using heavy machinery. The use of Synthetic Aperture Radar (SAR) images for vessel detection has been gaining prominence due to the increase of the costless images of better quality, images with better temporal resolution and minor influence of atmospheric conditions, which allows for its use in locations with dense cloud cover. This study aimed at identifying gold mining vessels in Madeira River, in Porto Velho, in seven Sentinel-1 images from 2018 to 2021 by using vessel detection workflow based in CFAR and geometric analysis algorithms. The results produced satisfactory F1 score between 0,76 and 0,86, detection percentage from 70 to 100%, omission percentage from 0 to 30%. Finally, gold mines in vessels were identified in legal areas and in potentially illegal areas.

Keywords: SAR, Sentinel-1, gold mining vessels, vessel detection.

INTRODUÇÃO.

A garimpagem de ouro está presente no Brasil há muito tempo e, atualmente, produz cerca de 19 toneladas/ano, levando em consideração somente a produção formalmente declarada o que representa cerca de 20% da produção total de ouro no país (BRASIL, 2021). A legislação brasileira estabelece que um garimpo de ouro deve possuir a Permissão de Lavra Garimpeira (PLG) para que possa operar de forma legal, juntamente com licença ambiental (BRASIL, 1989), podendo ocorrer em terra firme e em rios. Quando em rios, são garimpos embarcados, ocorrem em embarcações que dragam sedimentos de fundo dos rios para produção do ouro mediante o uso de maquinário pesado, separação gravimétrica das partículas de ouro e uso de mercúrio para amalgamação do ouro (BALZINO et al., 2015) e que apresentam comportamento típico de se agrupar e ficarem fixos durante sua operação, formando aglomerados de embarcações (Figura 1).

Figura 1 - Garimpos Embarcados no Rio Madeira.



Fonte: IBAMA (2017); G1 (2022).

A densa e recorrente cobertura de nuvens na Amazônia (MARTINS et al., 2018) é um empecilho para uso de imagens de sensores passivos, como os sensores óticos, para identificação de garimpos embarcados. Complementarmente, a pequena dimensão e a capacidade de se locomover rapidamente (TRINDADE e BARBOSA FILHO, 2002; LOBO et al., 2018) também são desafios para identificação via sensoriamento remoto.

O uso de imagens SAR vem se intensificando devido ao refinamento da resolução espacial e temporal, menor influência atmosférica que permite seu uso em locais com densa cobertura de nuvens e redução/eliminação dos custos de aquisição (ESA, 2012). Nesse contexto, a missão Sentinel-1 gera imagens na banda C do micro-ondas (5.405 GHz) e possui tempo de revisita de 5 a 12 dias, resolução espacial de 5 a 40 m e quatro polarizações distintas: VV, VH, HV e HH.

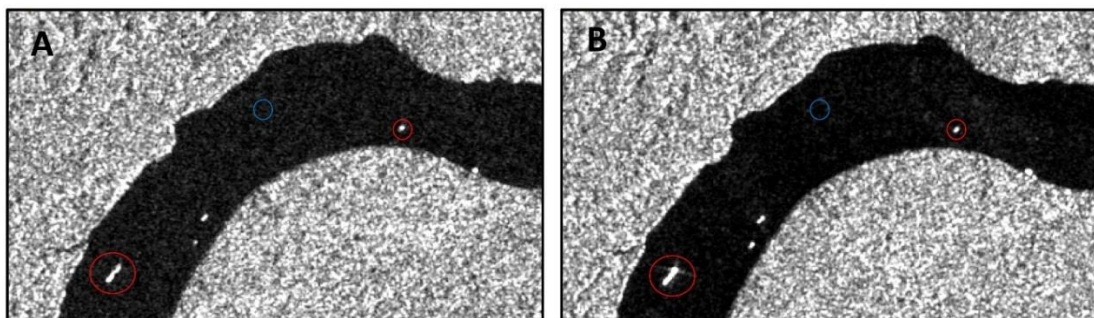
A detecção de embarcações por meio de imagens SAR também vem se intensificando em virtude da necessidade de maior controle das embarcações e combate às atividades ilegais, com destaque para métodos baseados em algoritmos *Constant False Alarm Rate* (CFAR) que são de fácil e rápida implementação (OUCHI, 2016). Os algoritmos CFAR utilizam critérios estatísticos para estabelecer um limiar de separação água-embarcação (CRISP, 2004; PAES, 2009). Dechesne et al. (2019) utilizou o algoritmo CFAR para detecção de embarcações em uma aplicação *multi-task deep learning* para categorizar diferentes tipos de embarcações com base nas suas dimensões, e obteve *F score* de 97,45, conseguindo detectar inclusive embarcações de menor porte, como, pesqueiras (26 m) e rebocadores (47 m). Contudo, os autores ressaltaram a necessidade de um número grande de amostras de treinamento. Pelich et al. (2019) implementou o algoritmo CFAR na Inglaterra e México e obteve taxa de detecção superior a 80% com baixa incidência de falsos alarmes para embarcações até 400 m. Fitriani, Gaol e Kushardono (2020) foram exitosos em detectar embarcações no mar de Java com dimensão superior a 25 m, obtendo média de falsos alarmes de 34,5%.

Os estudos citados utilizam uma prática comum em que são utilizadas informações pré-existentes de sistemas automatizados para treinamento, avaliação e validação dos resultados, como o *Automatic Identification System* (AIS) - sistema que disponibiliza a localização em tempo real, o tipo

de embarcação, bem como suas dimensões (DECHESNE et al., 2019). Isso viabiliza quantificar e qualificar as embarcações detectadas a fim de melhor compreender as limitações e potencialidades dos métodos empregados (FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2020).

De acordo com Paes (2009) e Na, Xie e Yaun (2014), algoritmos CFAR possuem as seguintes características: apresentam melhor performance em áreas homogêneas; tendem a apresentar dificuldade próximo às margens ou de grandes estruturas; e são influenciados por fatores ambientais, como, o movimento da água, chuvas e intensidade do vento, que conferem um aspecto rugoso à superfície da água, comportamento semelhante a alvos pequenos e de baixo sinal – Figura 2.

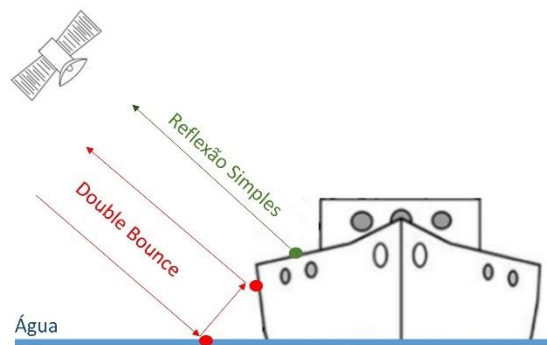
Figura 2 - Imagem SAR Sentinel-1 de 16/06/2018 do Rio Madeira, em Rondônia. Embarcações (Vermelho) e Água (Azul). A) Polarização VH. B) Polarização VV.



Fonte: os autores.

A polarização do sensor, bem como características das embarcações (dimensão, orientação e forma) influenciam em como estas são registradas pelo radar, sendo que a polarização VV registra sinais mais intensos que VH (OUCHI, 2016). Ainda, é comum a ocorrência de efeito *double bounce*, ou reflexão de canto, em grandes embarcações, conferindo um registro muito forte ao alvo (WANG et al., 2019) (Figura 3).

Figura 3- Contexto de Ocorrência de Efeito Double Bounce.



Fonte: WANG et al., 2019. Adaptação: os autores.

Além disso, o material que constitui e/ou recobre a embarcação também influencia no contraste com a água, sendo que embarcações de metal apresentam melhor contraste do que as de madeira, palha ou similares (AIELLO; VEZZOLI; GIANINETTO, 2019). O ruído *speckle* também deve ser levado em consideração, pois sua presença pode influenciar na detecção de embarcações e na interpretação visual da imagem (BIORESITA; PRIBADI; FIRDAUS, 2018). Logo, resta o desafio de atenuá-lo sem prejuízo da informação original.

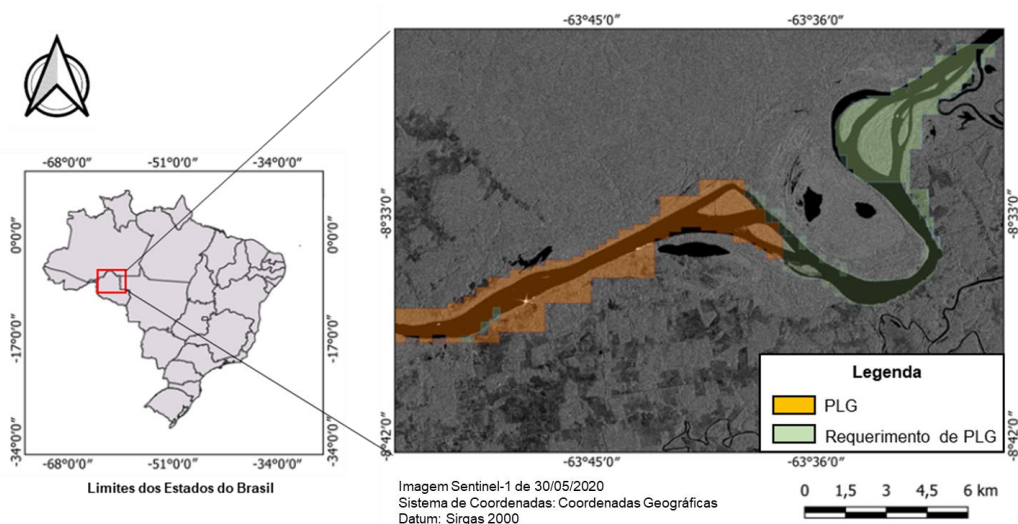
Desta forma, o presente artigo avaliou o uso de imagens SAR dos satélites Sentinel-1 para identificar garimpos de ouro embarcados baseados em algoritmo de detecção.

MATERIAIS E MÉTODOS.

Área de estudo.

A área de estudo está localizada no Rio Madeira próxima a Porto Velho, capital do estado de Rondônia - coordenadas $-63^{\circ}24'25,25''\text{O}$ / $-8^{\circ}51'9,92''\text{S}$ e $-65^{\circ}1'34,89''\text{O}$ / $-8^{\circ}23'43,874''\text{S}$ (Figura 4). As águas do Rio Madeira são classificadas como águas brancas com elevada concentração de sólidos em suspensão e de coloração marrom (ESPINOZA VILLAR et al., 2013). Seu regime hidrológico varia a depender da época, com vazão de $50.000\text{ m}^3/\text{s}$ a $5.000\text{ m}^3/\text{s}$ nos períodos chuvoso e seco, respectivamente (ADAMY, 2016), cota fluviométrica de 8 a 20 m e largura de 700 a 2.000 m (RODRIGUEZ et al., 2017). A pluviometria varia de 38,7 a 329 mm/mês com clima classificado como Awi (BEZERRA; DANTAS; TRINDADE, 2010). Por último, a área é uma das principais regiões de ocorrência de garimpagem de ouro embarcado do país, existindo 9.400 hectares de Permissão de Lavra Garimpeira (PLG) e 14.400 hectares de Requerimento de PLG (SIGIME, 2022). A PLG é a autorização expedida pela Agência Nacional de Mineração para que o garimpo possa funcionar, e que demanda prévio licenciamento ambiental. O Requerimento de PLG é apenas um pedido e indica que a atividade pode se intensificar neste local, caso seja deferido pela ANM.

Figura 4 - Área de Estudo.

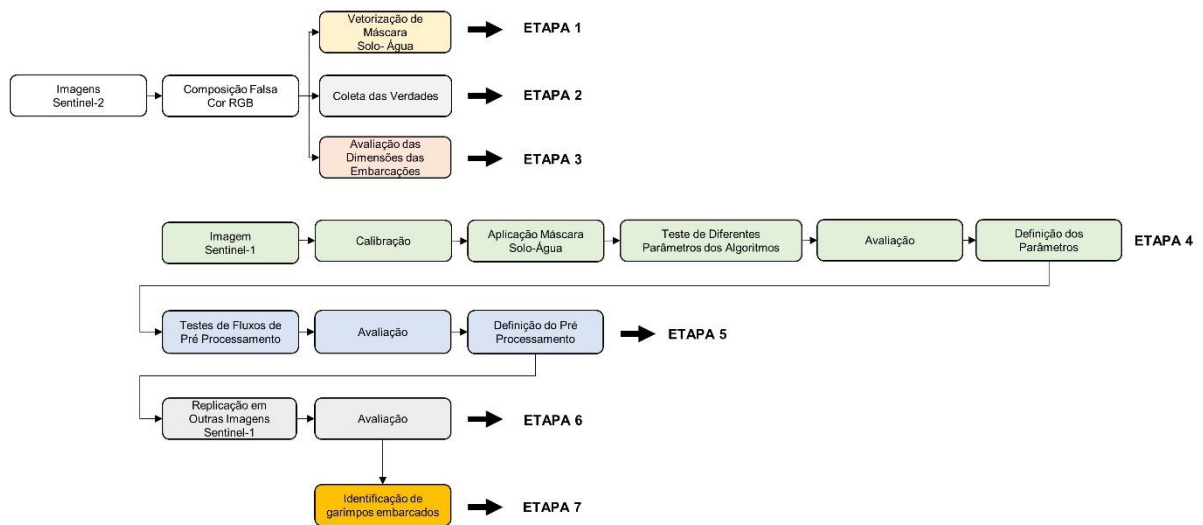


Fonte: os autores.

Metodologia.

A metodologia foi organizada em sete etapas (Figura 5) com uso de sete imagens Sentinel-1 entre 2018 e 2021 nas polarizações VV e VH (Tabela 1) – estas foram as únicas datas em que existiam imagens Sentinel-2 com cobertura de nuvens adequada para realizar a avaliação dos resultados.

Figura 5 - Metodologia Empregada.



Fonte: os autores.

Tabela 1- imagens Sentinel-1 Utilizadas.

Data	Imagem
11/05/2018	S1A_IW_GRDH_1SDV_20180511T094907_20180511T094932_021855_025BDC_CB00
10/07/2018	S1A_IW_GRDH_1SDV_20180710T094910_20180710T094935_022730_0276A0_2497
03/09/2019	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190903T094920_20190903T094945_028855_034518_C4F4
30/05/2020*	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200530T094814_20200530T094843_021809_02965F_D1C6
	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200530T094843_20200530T094908_021809_02965F_FD0C
27/09/2020*	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200927T094820_20200927T094849_023559_02CC3A_FBA9
	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200927T094849_20200927T094914_023559_02CC3A_732E
24/06/2021	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210624T094928_20210624T094953_038480_048A73_EB90
23/08/2021	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210823T094931_20210823T094956_039355_04A5ED_299F

* Foi feito mosaico das imagens para abranger a área de estudo.

Fonte: os autores.

Etapa 1 - Vetorização da máscara solo-água.

Os satélites Sentinel-2 geram imagens por meio de sensores passivos *Multi Spectral Instruments* com resolução espacial de 10 m nas bandas do vermelho, verde e azul, ou *Red, Green e Blue* (RGB), e são disponibilizadas georreferenciadas (ESA, 2015). Foram utilizadas imagens Sentinel-2 da órbita T20LMR das mesmas datas das imagens Sentinel-1 para vetorizar de forma manual máscaras água-solo por meio de composição falsa cor RGB.

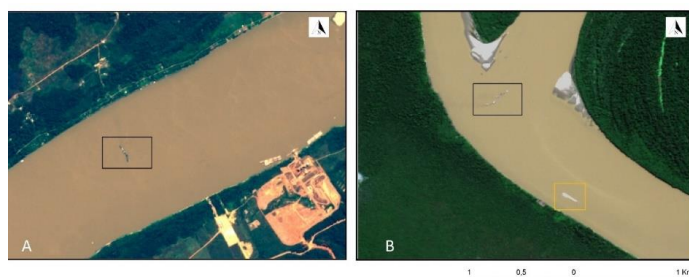
Etapa 2 - Coleta das verdades.

Apesar de existirem dispositivos para localização automática e em tempo real de embarcações que geram dados que podem ser utilizados para treinamento e validação, como o AIS, esta situação não se aplica à realidade da região amazônica - onde o deslocamento de grande parte da população e

de cargas é feito por embarcações de pequeno/médio porte, de pouca estrutura e em muitas vezes em estado precário de conservação (MOURA; FROTA, 2016).

Por isso, foi utilizada composição falsa cor RGB de imagens Sentinel-2 de mesma data das imagens Sentinel-1 para coletar as coordenadas das embarcações a serem usadas como amostras de verdade (Figura 6). Vale ressaltar que a hora de registro das imagens Sentinel-1 e Sentinel-2 são diferentes, logo as embarcações podem se locomover entre a geração das imagens. Contudo, alvos fixos, característica dos garimpos embarcados, tendem a ser registrados em ambas as imagens.

Figura 6 - Características das Embarcações: A) Garimpos Agrupados (em Preto); B) Garimpos Agrupados (em Preto) e Grande Embarcação (em Laranja).



Fonte: os autores.

Etapa 3 - Avaliação das dimensões das embarcações.

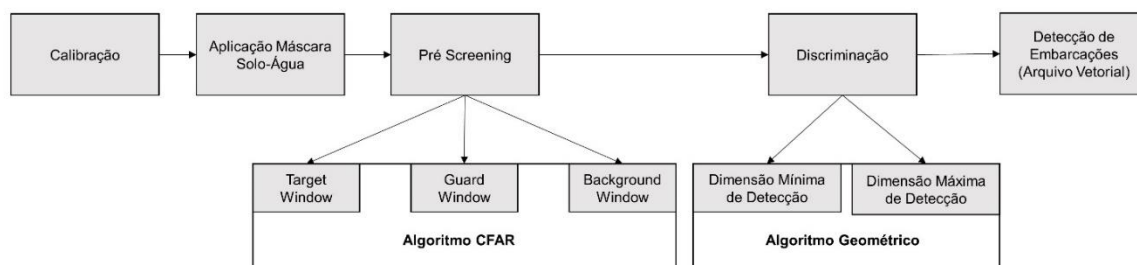
A imagem Sentinel-2 de 24/06/2021 foi utilizada para avaliar o comprimento e largura das embarcações por possuir a maior quantidade de embarcações entre todas as imagens, permitindo uma melhor compreensão das dimensões dos alvos. A mensuração foi feita de forma manual.

Etapa 4 - Definição dos parâmetros do algoritmo de detecção.

A imagem Sentinel-1 de 24/06/2021 foi utilizada para definir os melhores parâmetros do algoritmo de detecção presente no software SNAP, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia especificamente para manipular e realizar análises das imagens Sentinel.

O software SNAP dispõe de um workflow de detecção de embarcação em imagem Sentinel-1 (Figura 7) de fácil manipulação que é baseado em um algoritmo CFAR e outro de avaliação geométrica (BIORESITA; PRIBADI; FIRDAUS, 2018; SPA, 2018; FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2020). Assim, o usuário deve apenas inserir os parâmetros solicitados (*target*, *guard* e *background windows* e dimensões mínima e máxima de detecção).

Figura 7 - Metodologia do CFAR e Algoritmo Geométrico Implementados no Snap para Detecção de Embarcações.



Fonte: os autores.

O algoritmo CFAR calcula estatísticas locais a partir de uma janela que percorre toda imagem (Figura 8) cujas dimensões são definidas em função do tamanho das embarcações a serem detectadas a partir de três parâmetros: *target window*, *guard window*, e *background window* (todos em metros). O *target window* deve ser igual à dimensão da menor embarcação a detectar. O *guard window* funciona como um muro para impedir que as estatísticas do *background window* sejam contaminadas pelas estatísticas do *target window*, e deve ser igual a dimensão da maior

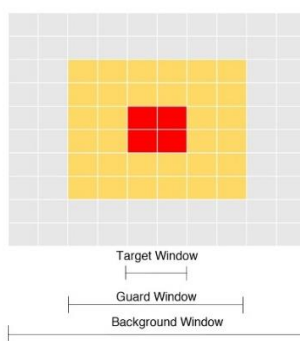
embarcação a detectar. Por último, o *background window* deve ser maior do que o tamanho da *guard window* – definido de forma empírica a depender de cada contexto (SPA, 2018).

Por fim, o algoritmo CFAR do SNAP utiliza dois parâmetros para diferenciar a água das embarcações – Equação 1 (BIORESITA; PRIBADI; FIRDAUS, 2018):

$$\mu_t > \mu_b + \sigma_b \sqrt{n} \rightarrow \text{Alvo} \quad (1)$$

Onde μ_t é a média dos valores da *target window*; μ_b é a média dos valores do *background window*; σ_b é o desvio padrão dos valores do *background window*, e t é o limiar que acima deste, considera-se a feição como embarcação.

Figura 8 - Estêncil do Algoritmo CFAR.



Fonte: os autores.

Na etapa de discriminação, o algoritmo agrupa pixels iguais e contíguos em um único *cluster* e extrai informações de largura/comprimento, comparando-as com as dimensões máximas e mínimas das embarcações que são definidas pelo usuário (SPA, 2018). Os resultados gerados pelos algoritmos foram validados por meio do *score F1* (CAO et al., 2020) a partir das amostras verdade coletadas na Etapa 2 (Equações 2, 3 e 4). O *precision* envolve as classificações positivas corretas entre as classificações positivas geradas, possuindo relação com os falsos positivos. O *recall* se relaciona com os positivos classificados de forma correta entre todos os positivos existentes, e gera informação sobre falsos negativos. Portanto, quanto mais alto o *score F1*, mais equilibrados são os resultados.

$$\text{Score F1} = 2 * \frac{P * R}{P + R} \quad (2)$$

$$P = \frac{\Sigma VP}{\Sigma VP + \Sigma FP} \quad (3)$$

$$R = \frac{\Sigma VP}{\Sigma VP + \Sigma FN} \quad (4)$$

Onde: P = *precision*; R = *recall*; VP = verdadeiro positivo; FP = falso positivo; FN = falso negativo.

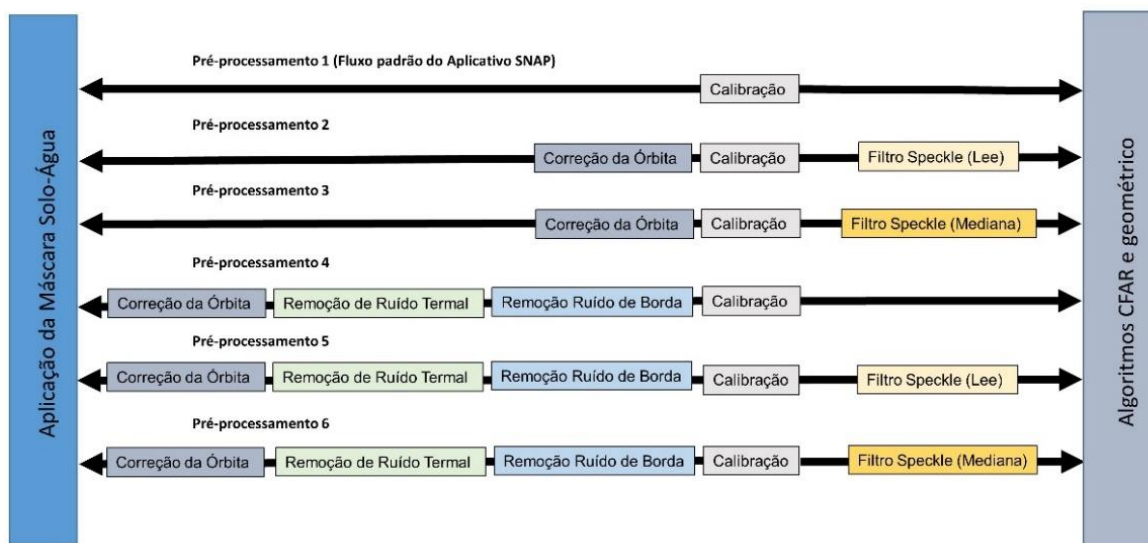
Etapa 5 - Definição do pré-processamento.

Foi utilizada a imagem Sentinel-1 de 24/06/2021 para definir o melhor fluxo de pré-processamento. A metodologia contida no software SNAP orienta apenas a calibração como etapa de pré-processamento. Deste modo, objetivou-se avaliar também a influência da inclusão de mais etapas (Figura 9).

Isto foi importante para a definição da melhor metodologia para detecção de embarcações de forma precisa e rápida, já que a etapa de pré-processamento de imagens SAR apresenta custo de tempo operacional que pode variar de minutos a horas a depender do tamanho da área que será processada.

Filipponi (2019) descreve as etapas do pré-processamento da seguinte forma: i) a calibração converte os valores registrados em níveis digitais para valores de retroespalhamento radiometricamente calibrados, convertendo os valores de intensidade para sigma; ii) a correção de órbita incrementa a confiabilidade das imagens a partir da atualização de informações sobre posição e velocidade dos satélites; iii) a remoção de ruído térmico atenua os efeitos do ruído térmico aditivo que altera a textura das imagens de intensidade, normalizando o sinal de intensidade da imagem; iv) a remoção de ruído de borda remove ruídos de baixa intensidade e dados inválidos criados nas bordas das imagens em decorrência da compensação geométrica da mudança da curvatura terrestre; v) a remoção do *speckle*, que é um ruído multiplicativo ocasionado pela interferência construtiva e destrutiva das ondas, evita a degradação da qualidade da imagem e minimiza a confusão entre alvos, facilitando a interpretação da imagem.

Figura 9 - Pré-Processamento Avaliados.



Fonte: os autores.

Foram utilizados filtros conhecidos e aplicados em imagens SAR para atenuação do *speckle* - mediana e Lee, ambos de janela 3x3 (RODRIGUES et al., 2019; FILHO et al., 2020). A avaliação dos resultados foi realizada por meio do *score* F1, de forma similar à Etapa 4.

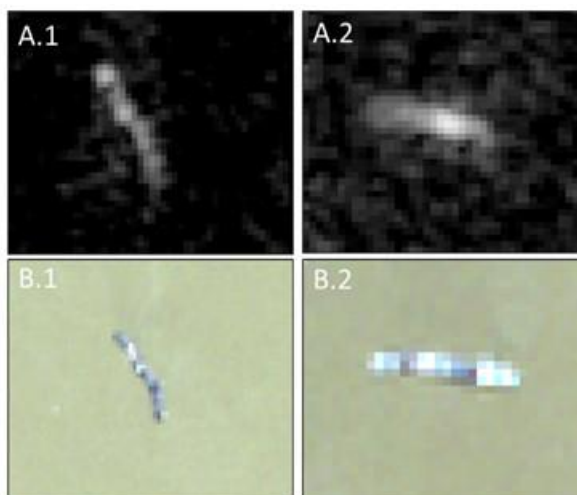
Etapa 6 - Replicação em outras 6 imagens Sentinel-1.

A metodologia de detecção foi replicada nas outras imagens Sentinel-1, utilizando a polarização mais adequada, os melhores parâmetros e o melhor fluxo de pré-processamento, conforme identificados nas Etapas 4 e 5. Os resultados foram avaliados em função do *score* F1, de forma similar às Etapas 4 e 5.

Etapa 7 - Identificação de garimpos de ouro embarcados.

Os garimpos foram identificados mediante à avaliação visual dos resultados, utilizando imagens Sentinel 1 e 2, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Identificação de Garimpos Embarcados: A) Embarcações Detectadas em Imagem Sentinel-1 com Padrão De Garimpos; B) Imagem Sentinel-2 Usada Para Identificação Dos Garimpos.



Fonte: os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO.

As máscaras solo-água foram vetorizadas facilmente uma vez que as margens do rio e bancos de areia são prontamente identificáveis nas imagens óticas do sensor Sentinel-2. O mesmo ocorre com as embarcações o que permitiu coletar amostras verdade de forma satisfatória e contabilizar de 14 a 44 embarcações por imagem (Tabela 2). O Rio Madeira é uma via de transporte de cargas e de pessoas relevante sendo comum a circulação de grandes, médias e pequenas embarcações. Por isso, existe grande variação no tamanho, forma e tipo de embarcações presentes na área de estudo.

Tabela 2 - Quantidade de Embarcações por Imagem Sentinel-2.

Data	Quantidade de Embarcações
11/05/2018	17
10/07/2018	40
03/09/2019	21
30/05/2020	14
7/09/2020	22
24/06/2021	44
23/08/2021	18

Fonte: os autores.

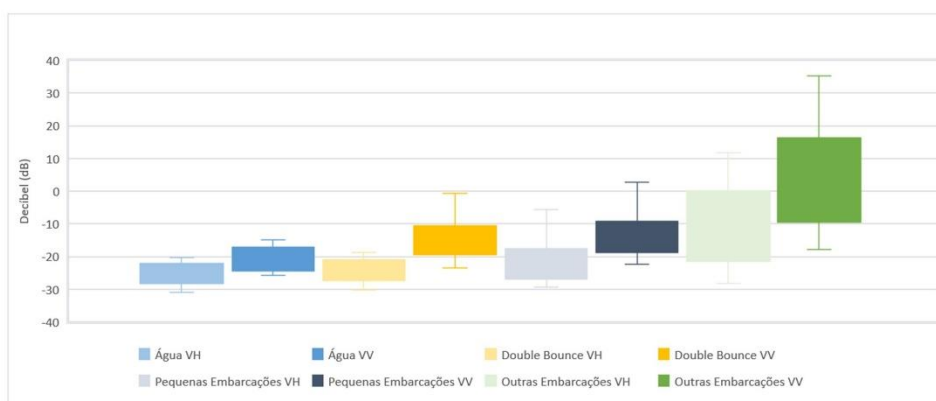
A variação das dimensões das embarcações presentes na imagem Sentinel-2 de 24/06/2021 foi de 20 a 280 m, existindo grandes embarcações, garimpos agrupados e embarcações isoladas de diferentes tamanhos. Em alguns casos, as embarcações de grande porte que são recobertas de metal, material de grande capacidade reflexiva, sofreram efeito *double bounce* nas imagens

Sentinel-1, como também foi percebido por Paes (2009), o que, por vezes, inviabilizou a visualização da área vizinha à embarcação.

Certas vezes, algumas embarcações registradas na imagem Sentinel-2 não estavam presentes na imagem Sentinel-1 em virtude do horário diferente da passagem de satélite e pela movimentação da embarcação. Nestes casos a embarcação não foi utilizada como amostra verdadeira.

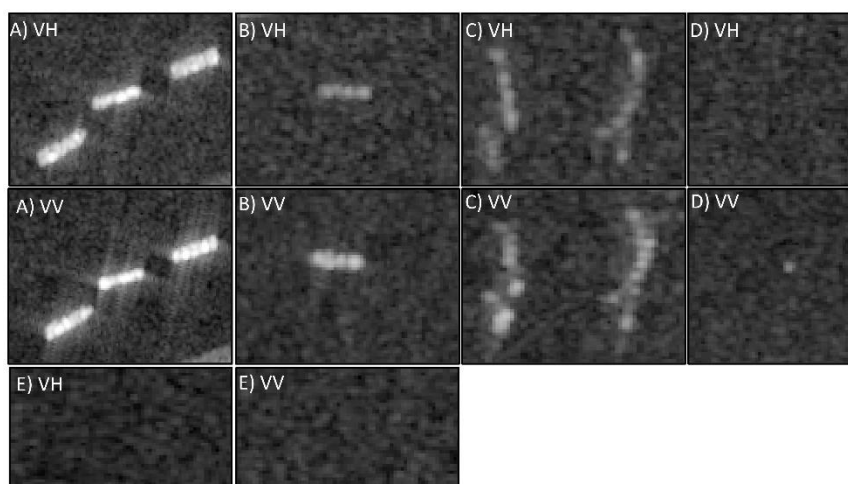
A literatura demonstra que a polarização VV registra sinais mais fortes que VH (OUCHI, 2016; PELICH et al., 2019), fazendo com que os alvos sejam registrados de formas diferentes a depender da polarização. A intensidade média das embarcações em VV foi de 3,74 dB ($\sigma = 16,92$) e -9,03 dB ($\sigma = 11,95$) em VH (Figura 11 e 12), sendo que todos os tipos de embarcações apresentaram maior intensidade em VV. Vale ressaltar que grandes embarcações, são comumente revestidas, cobertas, transportam cargas ou possuem estruturas de metal, o que faz com que registrem maiores intensidades (WANG et al., 2019). Já as embarcações menores registram intensidade inferior devido ao tamanho reduzido do alvo e ao material que constitui ou recobre embarcação, por exemplo, madeira, palha ou cerâmica (AIELLO; VEZZOLI; GIANINETTO, 2019).

Figura 11 - Intensidade em VV e VH das Embarcações Identificadas em todas as Imagens Sentinel-1.



Fonte: os autores.

Figura 12 - Aspectos dos Alvos em Imagem Sentinel-1: A) Grandes Embarcações; B) Outras Embarcações; C) Pequenas Embarcações Agrupadas; D) Pequena Embarcação Isolada; E) Água.



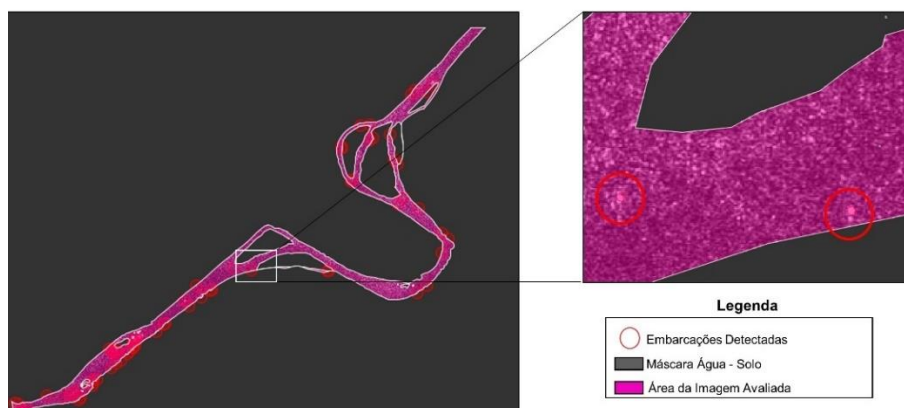
Fonte: os autores.

A intensidade da água também foi maior em VV, pois as polarizações cruzadas registram de forma mais amena o retroespalhamento deste alvo, conforme descrito por Ouchi (2016). Contudo, a diferença média não foi tão acentuada: -25,23 dB ($\sigma = 3,54$) em VH e -20,21 dB ($\sigma = 3,84$) em VV. Isso significa que a superfície da água apresenta certo grau de homogeneidade, condição adequada

para implementação dos algoritmos CFAR (AN; XIE; YUAN, 2014).

A Figura 13 exemplifica como os resultados de detecção são apresentados pelo software SNAP, e a Tabela 3 apresenta os resultados dos seis conjuntos de parâmetros testados que variaram em função das dimensões das embarcações medidas (entre 20 e 280m).

Figura 13 - Resultado Gerado pelo Software.



Fonte: os autores.

Tabela 3 - Resultados para os Diferentes Parâmetros dos Algoritmos de Detecção.

Janelas TGB* (metros)	VH						VV					
	Falsos Positivos	Acertos	Falsos Negativos	Precision	Recall	F1	Falsos Positivos	Acertos	Falsos Negativos	Precision	Recall	F1
10x30x90	9	19	25	0,68	0,43	0,53	16	28	16	0,64	0,64	0,64
10x50x150	8	24	20	0,75	0,55	0,63	13	33	11	0,72	0,75	0,73
10x70x210	8	29	15	0,78	0,66	0,72	12	34	10	0,74	0,77	0,76
10x280x310	7	30	14	0,81	0,68	0,74	19	33	11	0,63	0,75	0,69
20x40x120	8	26	18	0,76	0,59	0,67	13	25	19	0,66	0,57	0,61
20x60x180	9	27	17	0,75	0,61	0,68	13	28	16	0,68	0,64	0,66
20x80x240	8	32	12	0,8	0,73	0,76	16	36	8	0,69	0,82	0,75
20x280x310	9	34	10	0,79	0,77	0,78	14	41	3	0,75	0,93	0,83
30x70x110	8	22	22	0,73	0,5	0,59	13	31	13	0,7	0,7	0,7
30x90x180	7	25	19	0,78	0,57	0,66	12	28	16	0,7	0,64	0,67
30x110x220	7	26	18	0,79	0,59	0,68	11	28	16	0,72	0,64	0,67
30x280x310	5	31	13	0,86	0,7	0,78	11	35	9	0,76	0,8	0,78

* T = target window; G= guard window; B= Background window.

Fonte: os autores.

O score F1 variou de 0,53 e 0,83, sendo que os valores de VH foram inferiores aos de VV: F1_{VH} entre 0,53 e 0,78; e F1_{VV} entre 0,61 e 0,83. A polarização VV apresentou performance mais equilibrada que VH, sendo que na maioria dos parâmetros os scores F1 foram superiores. Isso ocorreu porque o número de falsos negativos foi menor em VV (Recall_{VH} de 0,43 a 0,77 e Recall_{VV} e 0,57 a 0,93). Portanto, os parâmetros 20 m x 280 m x 310 m em VV geraram o melhor score F1

(0,83). Como a polarização VV registra sinais de forma mais fortes que em VH, acaba por destacar alvos mais difíceis de serem visualizados em VH, aumentando o número de acertos. Contudo, isso faz com que seja uma polarização mais propensa à ocorrência de falsos positivos (PELICH et al., 2019).

A quantidade de omissões aumentou conforme os valores de *target window* e *background window* se distanciavam das dimensões máximas e mínimas das embarcações, tanto que os piores scores F1 foram observados nos conjuntos de parâmetros mais distantes das dimensões mínima e máxima (10 m x 30 m x 90 m; 20 m x 40 m x 120 m; 30m x 70 m x 110 m), justificados pela maior ocorrência de falsos negativos (*recall*_{VH} de 0,53, 0,67 e 0,59 e *recall*_{VV} de 0,64, 0,61 e 0,70). Por outro lado, foi percebida uma relação inversamente proporcional entre a ocorrência de falsos positivos e a dimensão do *target window*, sendo que aumentaram conforme esta janela foi reduzida. Assim, quanto menor a dimensão da embarcação a ser detectada, maior a quantidade de falsos positivos. Não foram encontrados estudos testando diferentes valores daqueles orientados pela metodologia do software SNAP. Como os garimpos embarcados ocorrem em embarcações de menor dimensão, que por vezes se agrupam, se torna prejudicial aumentar a *target window* a fim de diminuir a ocorrência de falsos positivos em detrimento de aumentar as omissões destas embarcações, ainda mais que a ocorrência de omissões em VV é menor.

Ao adotar dimensões intermediárias como valores de *target window* e *guard window* são criadas linhas de corte que ora omitem embarcações de menor porte ora de grande porte. Por isso, utilizar as dimensões máximas e mínimas das embarcações, no caso 20 m e 280 m, conferiu melhor performance para a detecção das embarcações, similar ao descrito por Spa (2018).

Os falsos negativos ocorreram em embarcações pequenas e com sinal baixo que dificultou o contraste com a água, fato ocasionado pelo tamanho reduzido do alvo e ao material de cobertura da embarcação. Já os falsos positivos ocorreram, principalmente, por influência do efeito *double bounce* (WANG et al., 2019) e pela rugosidade da água (AN; XIE; YUAN, 2014), representada por pontos isolados no leito ou às margens do rio e que apresentam sinal próximo de embarcações de menor porte e sinal mais fraco.

Como a metodologia disponível no SNAP não orienta quanto à definição do *background window*, foram testadas quatro diferentes opções na polarização VV (310, 330, 370 e 400 m), utilizando o melhor conjunto identificado de *target window* (20 m) e *guard window* (280 m). Foi constatado um leve aumento das omissões de embarcações conforme o aumento do tamanho do *background window*, principalmente das menores de 50 m, causando uma queda no *recall* de 0,93 para 0,89 (Tabela 4). Também foi percebida queda na quantidade de falsos positivos conforme o aumento do *background window*, aumentando o *precision* de 0,75 para 0,80. Um grande *background* leva em consideração muitos pixels de água, fazendo com que embarcações com menor intensidade sejam omitidas. Ressalta-se que também não foram achados estudos que avaliam diferentes tamanhos de *background windows*.

Assim, os melhores valores para a imagem de 24/06/2021 foram 340 m e 370 m, com score F1 de 0,85. Portanto, conclui-se pela necessidade de testar diferentes *background windows* a fim de encontrar aquele que melhor se adapta à imagem utilizada.

Tabela 4 - Score F1 de 24/06/2021, testando Diferentes Background Windows.

Janelas TGB* (metros)	Falso Positivo	Acertos	Falsos Negativos	Precision	Recall	Score F1
20x280x310	14	41	3	0,75	0,93	0,83
20x280x340	12	41	3	0,77	0,93	0,85
20x280x370	12	41	3	0,77	0,93	0,85
20x280x400	10	39	5	0,8	0,89	0,84

* T = target window; G= guard window; B= Background window em metros

Fonte: os autores.

O teste de diferentes fluxos de pré-processamentos produziu scores F1 entre 0,57 e 0,83, sendo que o

melhor *score* foi obtido quando foi utilizada apenas calibração (0,83) (Tabela 5). Ao implementar filtros, remover o ruído termal e o ruído de borda a quantidade de falsos positivos aumentou, com queda no *precision* de 0,75 a 0,43. Da mesma forma, aumentou-se também a quantidade de omissões, com queda no *recall* de 0,93 a 0,84. Os filtros modificam o valor original do pixel e tal alteração ocasionou aumento dos falsos positivos e de omissões. Este comportamento foi similar ao descrito por Marino et al. (2015) que destacou que o emprego de técnicas para remoção do *speckle* afeta a performance de algoritmos de detecção, devendo ser avaliado caso a caso sobre os benefícios de usá-las, uma vez que podem piorar ou melhorar os resultados, a depender do contexto (FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2020). Além disso, o fluxo de pré-processamento composto pela remoção de ruído de borda e termal e a calibração apresentou o segundo melhor *score* F1, fato ocorrido porque houve apenas ajustes radiométricos nas imagens (FILIPPONI, 2019) que alteraram os valores dos pixels de forma mais suave que os filtros. Portanto, a adição de etapas que alteram os dados originais piorou a eficiência da detecção das embarcações, sendo que o uso somente da calibração apresentou os melhores resultados, como mencionado também em outros estudos (BIORESITA; PRIBADI; FIRDAUS, 2018; FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2020).

A replicação dos algoritmos de detecção com os parâmetros e fluxo de pré-processamento mais adequados nas outras imagens Sentinel-1 apresentou *score* F1 entre de 0,76 a 0,85 (Tabela 6). O tamanho ótimo de *background window* não foi igual para todas as imagens, sendo que os melhores resultados foram obtidos com janelas de 340 m e 370 m, e em alguns casos não houve diferença de performance entre *background window* distintas.

Tabela 5 - Score F1 para Diferentes Pré-Processamentos.

Performance	VV					
	1*	2*	3*	4*	5*	6*
Falsos Positivos	14	30	19	14	54	49
Acertos	41	37	35	38	39	37
Omissões	3	7	6	6	5	7
	Avaliação					
Precision	0,75	0,55	0,65	0,73	0,42	0,43
Recall	0,93	0,84	0,85	0,86	0,89	0,84
F1	0,83	0,67	0,74	0,79	0,57	0,57

* 1 = CALIBRAÇÃO; 2 = CALIBRAÇÃO + SPEACKLE FILTER LEE; 3= CALIBRAÇÃO + SPEACKLE FILTER MEDIANA; 4 = CALIBRAÇÃO + THERMAL NOISE REMOVAL + REMOVE BORDER NOISE; 5 = CALIBRAÇÃO +THERMAL NOISE REMOVAL + REMOVE BORDER NOISE + CALIBRAÇÃO + SPEACKLE FILTER LEE; 6 = CALIBRAÇÃO +THERMAL NOISE REMOVAL + REMOVE BORDER NOISE + CALIBRAÇÃO + SPEACKLE MEDIANA.

Fonte: os autores.

Tabela 6 - Desempenho dos Algoritmos de Detecção de Embarcações em todas as Imagens Sentinel-1.

Imagem	Background Window (metros)	Precision	Recall	Score F1
11/05/2018	310	0,45	0,88	0,60
	340	0,78	0,88	0,83
	370	0,83	0,88	0,86
	400	0,82	0,82	0,82
10/07/2018	310	0,61	0,72	0,66
	340	0,82	0,70	0,76
	370	0,82	0,68	0,74
	400	0,82	0,68	0,74
03/09/2019	310	0,67	0,86	0,75
	340	0,75	0,86	0,80
	370	0,68	0,81	0,74
	400	0,68	0,81	0,74
30/05/2020	310	0,38	1,00	0,55
	340	0,74	1,00	0,85
	370	0,74	1,00	0,85
	400	0,76	0,93	0,84
27/09/2020	310	0,71	0,91	0,80
	340	0,77	0,91	0,83
	370	0,77	0,91	0,83
	400	0,76	0,86	0,81
24/06/2021	310	0,75	0,93	0,83
	340	0,77	0,93	0,85
	370	0,77	0,93	0,85
	400	0,80	0,89	0,84
23/08/2021	310	0,67	1,00	0,80
	340	0,69	1,00	0,82
	370	0,69	1,00	0,82
	400	0,68	0,94	0,79

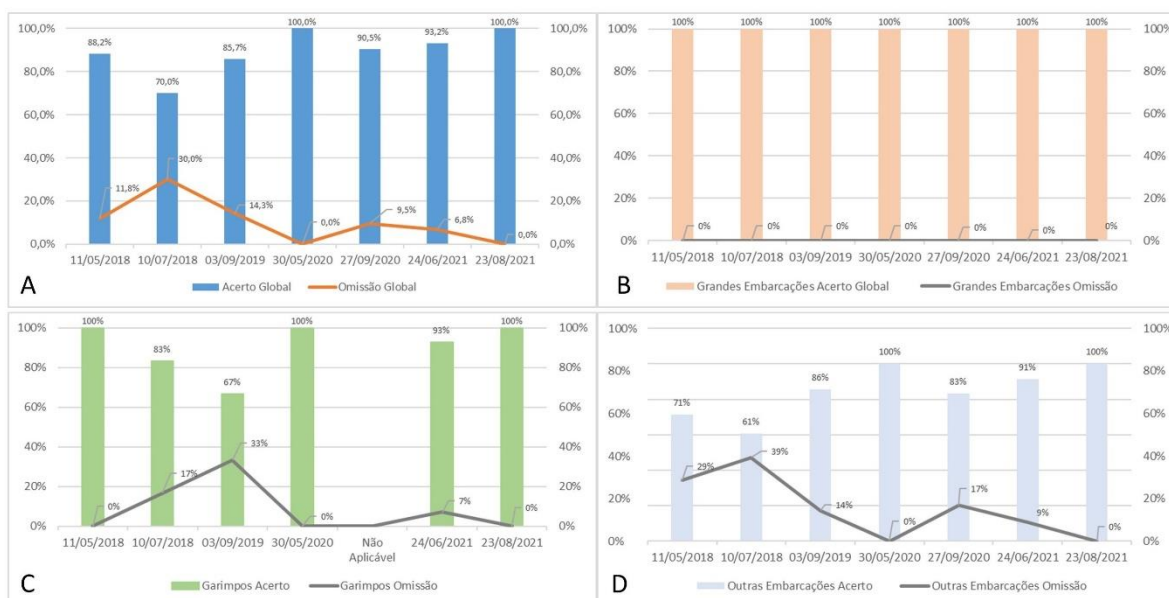
Fonte: os autores.

O percentual de detecção variou 70 a 100% e de omissão de 0 e 30%, com média de 89,7 e 10,3%, respectivamente (Figura 14A), valores convergentes com resultados encontrados na literatura cuja detecção varia de 66% até > 90% e omissão de 34,5% a 5% (MARINO et al., 2015; BIORESITA; PRIBADI; FIRDAUS, 2018; PELICH et al., 2019; WANG et al., 2019; FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2020). Ao categorizar embarcações em grandes embarcações (maiores que 50 m, Figura 14B), garimpos (embarcações agrupadas menores que 50m, Figura 14C) outras embarcações (menores que 50 m, Figura 14D) a compreensão das limitações e potencialidades do método se torna mais clara.

O percentual de detecção das grandes embarcações foi 100%, enquanto para garimpos foi de 67 a 100%, e outras embarcações de 61 a 100%. O método apresentou perda de eficiência quanto menor foi a intensidade do alvo e sua dimensão, tanto que o percentual de detecção diminuiu para embarcações menores, comportamento também percebido em outros estudos (PELICH et al., 2019; FITRIANI; GAOL; KUSHARDONO, 2020).

O percentual de detecção dos garimpos só foi maior que o de outras embarcações menores porque estes se agrupam e acabam formando *cluster* de embarcações que facilita sua visualização e aumenta o sinal registrado pelo sensor.

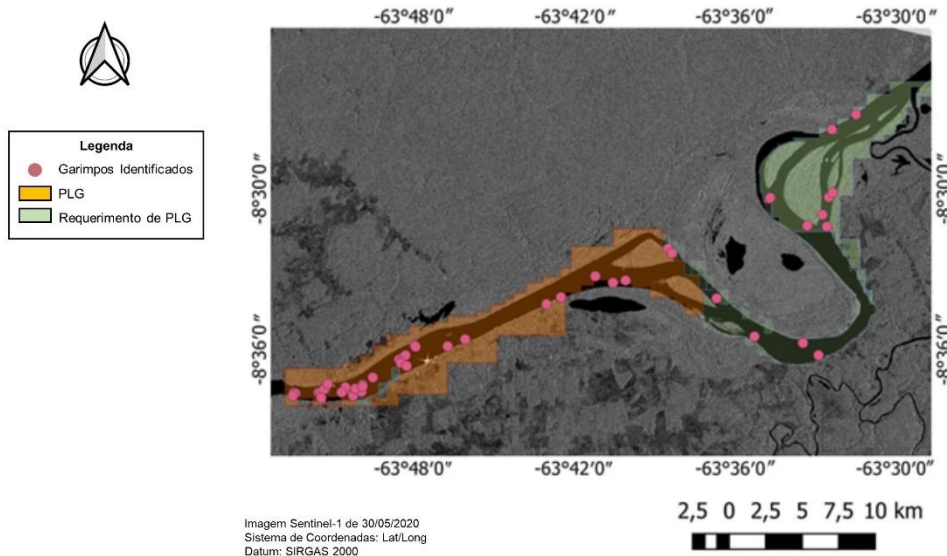
Figura 14 - Percentual de Detecção e Omissão de Embarcações de Todas as Imagens Sentinel-1: A) Geral; B) Grandes Embarcações; C) Garimpos; D) Outras Embarcações.



Fonte: os autores.

Por fim, em todas as imagens avaliadas foram identificados 28 garimpos, sendo que 14 ocorreram em área onde existe a PLG, em tese, de produção legalizada, 14 em área de Requerimento de PLG, ou seja, ilegais (Figura 15). Ressalta-se que a quantidade de garimpos deve ser muito maior do que a identificada neste estudo, pois as características das embarcações e o grau de informalidade da atividade prejudicam a coleta de amostras de verdade, subestimando a real dimensão da atividade na área de estudo.

Figura 15 - Garimpos Embarcados Identificados.



Fonte: os autores.

CONCLUSÃO.

O estudo utilizou algoritmos de detecção de embarcações e demonstrou que as imagens SAR Sentinel-1 podem ser utilizadas para identificação de garimpos de ouro embarcados, alcançando os seguintes resultados: *score* F1 entre 0,76 e 0,86; percentual detecção de embarcações de 70 a 100%; percentual de omissões de 0 e 30%. Estes resultados foram alcançados ao implementar apenas a calibração como etapa de pré-processamento, e utilizadas as dimensões mínimas (20 m) e máximas (280 m) das embarcações presentes nas imagens como *target* e *guard window*, devendo ser testado diferentes valores de *background window*, no caso do estudo foi entre 340 e 370 m.

A compreensão das dimensões das embarcações foi vital para otimizar a eficiência da sua detecção, auxiliando na definição dos parâmetros mais adequados para os algoritmos que variam a depender do contexto dos alvos. Da mesma forma, as etapas de pré-processamento utilizadas também influenciaram na detecção dos alvos, sendo que os melhores resultados foram obtidos quando os dados originais foram menos alterados. Por fim, foi possível identificar garimpos embarcados localizados em áreas legais e em áreas ilegais o que pode ser utilizado como um subsídio para o controle da atividade por parte dos órgãos competentes para planejamento das atividades de fiscalização da atividade legalizada e combate às atividades ilegais, bem como para identificar *hotspots* de ocorrência da atividade ao longo dos rios e análise temporal do comportamento dos garimpos.

REFERÊNCIAS.

ADAMY, A. Dinâmica fluvial do Rio Madeira. In: **SILVA, R.G.C. (org.). Porto Velho: cultura, natureza e território.**, p. 120–147, 2016.

AIELLO, M.; VEZZOLI, R.; GIANINETTO, M. Object-based image analysis approach for vessel detection on optical and radar images. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 13, n. 01, p. 1, 2019.

AN, W.; XIE, C.; YUAN, X. An improved iterative censoring scheme for CFAR ship detection with SAR imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 8, p. 4585–4595, 2014.

BALZINO, M. et al. Gold losses and mercury recovery in artisanal gold mining on the Madeira River, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 370–377, 2015.

- BEZERRA, R. B.; DANTAS, T. R.; TRINDADE, A. G. Caracterização Temporal da Precipitação Pluvial no Município de Porto Velho/RO no Período de 1945 a 2003. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 3, p. 609–623, 2010.
- BIORESITA, F.; PRIBADI, C. B.; FIRDAUS, H. S. Ship detection in Madura Strait and Lamong Gulf using Sentinel-1 SAR Data. **Digital Press Physical Sciences and Engineering**, v.1, p. 13-23, Oct. 2018.
- BRASIL. **Lei Nº 7.805, de 18 de julho de 1989**. Disponível em: <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/103411/lei-7805-89> Acesso em: 30 de ago. 2022.
- BRASIL. **Anuário Mineral Brasileiro 2021**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf> Acesso em: 04 de set. 2022.
- CAO, R. et al. Deep learning-based remote and social sensing data fusion for urban region function recognition. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 163, p. 82–97, 1 maio 2020.
- CETEM. **Inventário Nacional de Emissões e Liberações de Mercúrio pelos Garimpos de Ouro**. 2018. Disponível em: <https://diretorio.pre.mma.gov.br> Acesso em: 12 de ago. 2022.
- CRISP, D. J. **The state-of-the-art in ship detection in synthetic aperture radar imagery**. Defence Science and Technology Organisation Salisbury (Australia) Info Sciences Lab, 2004.
- DECHESNE, C. et al. Ship identification and characterization in Sentinel-1 SAR images with multi-task deep learning. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 1–18, 2019.
- ESA. **ESA's radar observatory mission for GMES operational services**. 2012. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349449/s1_sp-1322_1.pdf Acesso em: 29 de ago. 2022.
- ESA. **Sentinel-2 User Handbook**. 2015. Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/8869acdf-fd84-43ec-ae8c-3e80a436a16c?t=1438278087000 Acesso em: 01 de set. 2022.
- ESPINOZA VILLAR, R. et al. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45–54, 2013.
- FILHO, H. C. DE C. et al. Rice crop detection using LSTM, Bi-LSTM, and machine learning models from Sentinel-1 time series. **Remote Sensing**, v. 12, n. 16, p. 1–25, 2020.
- FILIPPONI, F. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. **Proceedings**, v. 18, n. 1, p. 11, 2019.
- FITRIANI, S. P.; GAOL, J. L.; KUSHARDONO, D. Fishing-Vessel Detection Using Synthetic Aperture Radar (Sar) Sentinel-1 (Case Study: Java Sea). **International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)**, v. 16, n. 2, p. 131, 2020.
- G1. **PF e fiscais do IBAMA destroem dragas-de-garimpo-ilegal-no-rio-madeira-em-rondonia-veja-video**. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2022/10/13/pf-e-fiscais-do-ibama-destroem-dragas-de-garimpo-ilegal-no-rio-madeira-em-rondonia-veja-video.ghtml>. Acesso em: 28 de fev. 2023.
- IBAMA. **ibama combate garimpo ilegal de ouro e apreende 19 dragas no rio Madeira (AM)**. 2021. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/noticias/422-2017/1024-ibama-combate-garimpo-ilegal-de-ouro-e-apreende-19-dragas-no-rio-madeira-am> Acesso em: 27 de fev. 2023.
- LOBO, F. DE L. et al. Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1178, 25 jul. 2018.
- MARINO, A. et al. Ship detection with spectral analysis of synthetic aperture radar: A comparison of new and well-known algorithms. **Remote Sensing**. V7, n 5, p. 5416-5439, 2015.

- MARTINS, V. S. et al. Seasonal and interannual assessment of cloud cover and atmospheric constituents across the Amazon (2000–2015): Insights for remote sensing and climate analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 309–327, 2018.
- MOURA, J. B; FROTA, C. D. Transporte misto de cargas e passageiros através de barcos regionais (recreios) no estado do Amazonas: uma proposta para cálculo da modicidade da tarifa. **Revista Eletrônica Ciência e Desenvolvimento**, v. 2, n. 3, p. 23-41, 2016.
- OUCHI, K. Current Status on Vessel Detection and Classification by Synthetic Aperture Radar for Maritime Security and Safety. **The 38th Symposium on Remote Sensing for Environmental Sciences**, September, p. 5–12, 2016.
- PAES, R. L. **Detecção de Alvos na Superfície do Mar Utilizando Imagens SAR Orbitais**. 2009. 169f. Thesis (Master in Remote Sensing) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2009.
- PELICH, R. et al. Large-scale automatic vessel monitoring based on dual-polarization Sentinel-1 and AIS data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 9, p. 1–21, 2019.
- RODRIGUES, T. et al. Detecção de mudanças na cobertura vegetal natural do Cerrado por meio de dados de radar (Sentinel-1A). **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1–22, 2019.
- RODRIGUEZ, D. A. et al. Previsões de cheias extremas nos horizontes sazonais e de curto e médio prazos na bacia do rio Madeira: estudo de caso da enchente de 30 de março de 2014 em Porto Velho. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 827–836, 2017.
- SIGIME. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração**. 2022. Disponível em: <<https://geo.anm.gov.br>> Acesso em outubro, 10. 2022.
- SPA, S. I. **Ship Detection with Sentinel-1 Using Snap S-1 Toolbox-Gulf of Trieste, Italy Training Kit-Ocea01**. 2018. Disponível em: https://rus-copernicus.eu/portal/wp-content/uploads/library/education/training/OCEA01_ShipDetection_Trieste_Tutorial.pdf Acesso em 02 de set. 2022.
- TRINDADE, R. B. E.; BARBOSA FILHO, O. **Extração de ouro - princípios, tecnologia e meio ambiente**. CETEM/MCT & PUC-RJ, 2002.
- WANG, Y. et al. A SAR dataset of ship detection for deep learning under complex backgrounds. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 765–778, 2019.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A presente tese objetivou desenvolver metodologias para detecção de garimpos embarcados a partir do uso de imagens Sentinel-1 e Sentinel-2, e contribuir para melhor compreensão do contexto operacional, geográfico e legal da garimpagem de ouro embarcada no Brasil para subsidiar a identificação oportunidades de otimização da atuação das instituições de controle frente à temática.

Em relação à distribuição geográfica da atividade foi constatado que esta é uma problemática predominante da região norte do país, que contabilizou 1.600 Requerimentos de PLG (702.060 hectares) 132 PLG (141.021h hectares) localizados exclusivamente em rios. A situação do Rio Madeira merece destaque, pois concentra 55% das áreas de PLG e 20,61% dos Requerimentos que se estendem por 850 km entre os estados de Rondônia e Amazonas. Logo, sua situação é crítica em virtude não somente do quantitativo de área requerida e autorizada, mas também pela extensão da atividade e pela intensidade da atividade ilegal.

Apesar da existência de arcabouço regulatório referente à atividade, sua devida implementação é o principal desafio no país. Portanto, os obstáculos para existência de forma legalizada dos garimpos embarcados de ouro são variados e complexos e perpassam por necessidades em diferentes frentes de ação: revisão de instrumentos regulatórios; aprimoramentos na atuação da ANM na análise dos Requerimentos de PLG e fiscalização das PLG; aprimoramento na atuação dos órgãos ambientais competentes no processo de licenciamento ambiental e na fiscalização das atividades; fortalecimento das ações de combate à atividade ilegal; e o desenvolvimento de estratégias para a garimpagem de ouro legalizada.

Quanto às metodologias de sensoriamento remoto para detecção de garimpos de ouro embarcados, percebeu-se que o uso de classificadores em imagens multiespectrais Sentinel-2 se mostrou bastante satisfatório, sendo que o classificador SVM orientado a objeto apresentou a melhor performance (*score* F1 de 0,91) entre os classificadores testados (SVM, RF, KNN e SAM). Além disso, constatou-se melhora nos resultados ao comparar a abordagem pixel a pixel *versus* orientada a objeto. Isso ocorreu porque a abordagem orientada a objeto reduziu confusões sistêmicas apresentadas pelos classificadores pixel a pixel, produzindo classificações mais limpas. Vale ressaltar que em determinadas ocasiões as plumas de sedimentos formadas pelo descarte dos rejeitos no rio são perceptíveis nos sensores multiespectrais o que serviu como elemento adicional para identificação dos

garimpos embarcados em operação. Nesse contexto, 100% dos garimpos sem plumas foram detectados, bem como grande parte dos garimpos com plumas (as omissões foram de 0 a 4 garimpos com plumas por imagem). Estas omissões ocorreram devido à similaridade da resposta espectral entre plumas e águas o que impossibilitou identificar o ponto de origem da pluma na embarcação. Vale ressaltar que a performance dos classificadores é severamente influenciada pela qualidade das amostras de treinamento o que pode ser um fator limitante para o emprego do método, pois em determinadas imagens podem existir poucos, ou até mesmo inexistir, garimpos embarcados para servir de amostra para os classificadores.

Da mesma forma, o uso das imagens SAR dos satélites Sentinel-1 para identificação de garimpos embarcados de ouro por meio de método baseado em algoritmo CFAR e de avaliação geométrica apresentou performance satisfatória. Os melhores *scores* F1 foram obtidos na polarização VV que variaram de 0,76 a 0,85, percentual detecção de embarcações de 70 a 100%, e de omissões de 0 e 30%, o que permitiu identificar garimpos localizados em áreas legais e em áreas potencialmente ilegais. Para tal, a compreensão das dimensões das embarcações foi vital para otimizar a eficiência da detecção das embarcações, auxiliando na definição dos parâmetros mais adequados para os algoritmos que variam a depender de cada objetivo e contexto, tanto que houve casos em que o score F1 obtidos foram significativamente mais baixos variando apenas os parâmetros do algoritmo (0,64 *versus* 0,83). Ainda, as etapas de pré-processamento utilizadas também influenciaram na detecção dos alvos, sendo que os melhores resultados foram obtidos quando os dados originais foram menos alterados, neste caso, quando foi realizada apenas a calibração.

Ambas as abordagens se mostraram eficientes para identificação de garimpos embarcados de ouro, apresentando potencial para auxiliar no desenvolvimento de estudos que objetivem compreender a ocorrência e recorrência da atividade com vistas a aprimorar a compreensão sobre a temática, bem como para subsidiar o melhor controle institucional por parte das organizações responsáveis por ações de combate à atividade ilegal e fiscalização.

É ressaltado que a inexistência de registros e de sistemas de localização dos garimpos embarcados é um fator limitante para o desenvolvimento de estudos de sensoriamento remoto. Ainda, os resultados gerados pela metodologia utilizando imagens Sentinel-2 obteve métricas de controle superiores ao uso das imagens Sentinel-1 (F1 médio de 0,91 *versus* 0,82), principalmente pela ocorrência de falsos positivos em virtude do efeito *double bounce* e por pontos isolados na água. Todavia, a densa e recorrente cobertura de

nuvens na Amazônia inviabiliza o uso de imagens óticas durante grande parte do ano. Dessa forma, a metodologia que utilizou imagens de radar Sentinel-1, possibilita realizar o monitoramento de forma contínua independentemente de condições atmosféricas.

Por fim, a presente tese apresentou informações com vistas a contribuir para suprir as lacunas de conhecimento existentes sobre a temática, abordando questões operacionais, legais e contextuais. Ainda, demonstrou que o uso de imagens Sentinel-1 e 2 e, por consequência, de sensoriamento remoto, se apresenta como uma abordagem capaz de detectar garimpos embarcados de ouro e que pode auxiliar os órgãos de controle no monitoramento e fiscalização da atividade legal e no planejamento e implementação de ações de combate à atividade ilegal, assim como no planejamento do emprego estratégico dos recursos humanos, materiais e financeiros disponíveis, pois possibilita a melhor compreensão de: *hotspots* de ocorrência da atividade; legalidade ou não em relação ao respeito da poligonal da PLG; ocorrência da atividade ao longo do tempo; distribuição espacial da atividade; locomoção dos garimpos embarcados de ouro. Contudo, ressalta-se que a temática não foi esgotada e que é pertinente o desenvolvimento de pesquisas adicionais para avaliar as potencialidades e limitações de outras metodologias, usando outras técnicas, bem como outras imagens.

REFERÊNCIAS.

ASNER, G. P. et al. Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 46, p. 18454–18459, 29 out. 2013.

BALZINO, M. et al. Gold losses and mercury recovery in artisanal gold mining on the Madeira River, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 370–377, 2015.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Disponível < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm > Acesso em: 19 dez. 2022.

BRASIL. **Lei Nº 7.805, de 18 de julho de 1989**. Disponível em < <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/103411/lei-7805-89> > Acesso em: 30 nov. 2022.

BRASIL. **Lei Complementar nº 140, de 08 de dezembro de 2011**. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm > Acesso em: 30 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 9.470, de 14 de agosto de 2018**. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9470.htm > Acesso em: 01 nov. 2022.

BRASIL. **Mineração Ilegal de Ouro na Amazônia: Marcos Jurídicos e Questões Controversas**. Ministério Público Federal. Série Manuais de Atuação. v.7. Brasília-259p. 2020.

BRASIL. **Anuário Mineral Brasileiro 2021**. Disponível em < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuário-mineral/anuário-mineral-brasileiro> > Acesso em: 29 nov. 2022.

CASTILHOS, Z. et al. Human exposure and risk assessment associated with mercury contamination in artisanal gold mining areas in the Brazilian Amazon. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 11255-11264, 2015.

CETEM. **Inventário Nacional de Emissões e Liberações de Mercúrio pelos Garimpos de Ouro**. Centro de Tecnologia Mineral. 2018. Disponível em: <https://diretoriopre.mma.gov.br>. Acesso em: 04 out. 2022.

CGU. **Relatório de Avaliação Agência Nacional de Mineração - ANM - 905627**. Controladoria Geral da União. 2022. Disponível em: <https://eaud.cgu.gov.br/relatorios/download/1274960>. Acesso em: 23 de set. 2022.

DECHESNE, C. et al. Ship identification and characterization in Sentinel-1 SAR images with multi-task deep learning. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, p. 1–18, 2019.

DRISCOLL, C. T. et al. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 10, p. 4967-4983, 2013.

ESA. **ESA's radar observatory mission for GMES operational services**. 2012. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349449/s1_sp-1322_1.pdf Acesso em: 29 de ago. 2022.

ESA. **Sentinel-2 User Handbook**. 2015. Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/8869acdf-fd84-43ec-ae8c-3e80a436a16c?t=1438278087000 Acesso em: 01 de set. 2022.

FERNANDES, F. R. C.; ALAMINO, R. C. J.; ARAÚJO, E. R (Org). **Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais, econômicos**. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro - 392p. 2014.

FITRIANI, S. P.; GAOL, J. L.; KUSHARDONO, D. Fishing-Vessel Detection Using Synthetic Aperture Radar (Sar) Sentinel-1 (Case Study: Java Sea). **International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)**, v. 16, n. 2, p. 131-142, 2019.

HEISELBERG, H. A direct and fast methodology for ship recognition in sentinel-2 multispectral imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, 1 dez. 2016.

HEISELBERG, P.; HEISELBERG, H. Ship-iceberg discrimination in Sentinel-2 multispectral imagery by supervised classification. **Remote Sensing**. v. 9, n. 11, 1 nov. 2017.

ISIDRO, C. M. et al. Applicability of earth observation for identifying small-scale mining footprints in a wet tropical region. **Remote Sensing**. v.9, n.9, p. 945, 12 sep. 2017.

KANJIR, U. Detecting migrant vessels in the Mediterranean Sea: Using Sentinel-2 images to aid humanitarian actions. **Acta Astronautica**. v. 155, p. 45–50, 1 fev. 2019.

LOBO, F. de L. et al. Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1178, 25 jul. 2018.

MASSARO, Luciana et al. Balancing economic development and environmental responsibility: Perceptions from communities of garimpeiros in the Brazilian Amazon. **Resources Policy**, v. 79, p. 103063, dez. 2022.

MCDOWELL, M. A. et al. Hair mercury levels in US children and women of childbearing age: reference range data from NHANES 1999–2000. **Environmental health perspectives**, v. 112, n. 11, p. 1165-1171, 2004.

MISERENDINO, R. A. et al. Mercury Pollution in Amapá, Brazil: Mercury Amalgamation in Artisanal and Small-Scale Gold Mining or Land-Cover and Land-Use Changes? **ACS Earth and Space Chemistry**, v.2, n.5, p.441-450, 2018.

MME. Ministério de Minas e Energia. 2022 Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-lanca-projeto-para-plano-de-acao-nacional-para-extracao-de-ouro-sem-mercuro>. Acesso em: 14 de jul. 2023.

OMS. Environmental health criteria 118. Inorganic mercury. 1991. Organização Mundial da Saúde.

OUCHI, K. Current Status on Vessel Detection and Classification by Synthetic Aperture Radar for Maritime Security and Safety. **The 38th Symposium on Remote Sensing for Environmental Sciences**, n. September, p. 5–12, 2016.

PARK, K.-A. et al. Multi-Spectral Ship Detection Using Optical, Hyperspectral, and Microwave SAR Remote Sensing Data in Coastal Regions. **Sustainability**, v.10, n.11, p. 4064 2018.

PADOVANI, C.R.; FORSBERG, B. R.; PIMENTEL, T. P. Contaminação mercurial em peixes do rio Madeira: Resultados e recomendações para consumo humano. **Acta Amazonica**, v. 25, p. 127-135, 1995.

RAMOS, A. R. A.; OLIVEIRA, K. A. DE; RODRIGUES, F. DOS S. Mercury-Based Mining in Yanomami Indigenous Lands and Accountabilities. **Ambiente e Sociedade**, v. 23, p. 1–22, 2020.

SIGIMINE. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração**. 2022. Disponível em: < <https://geo.anm.gov.br>> Acesso em 11 nov. 2022.

SIMIONATO, J.; BERTANI, G.; OSAKO, L. S. Identification of artisanal mining sites in the Amazon Rainforest using Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) and Data Mining techniques. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 24, p.100633. 1 nov. 2021.

TJ. **Sentença Ação Civil Pública 1003598-84.2017.4.01.3200**. 2021. Tribunal da Justiça Federal da 1º Região. 2021. Disponível em: <https://www.amazonasdireito.com.br/wp-content/uploads/2021/08/Sentenca-acao-MPF-licenciamento-Ipaam-garimpo-no-rio-Madeira.pdf>. Acesso em: 14 de dez. 2022.

UNEP. **Global Mercury Assessment 2018**. United Nations Environment Program. UNEP, Geneve – 62p. 2019

VEGA, C. M. et al. Human mercury exposure in yanomami indigenous villages from the Brazilian Amazon. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.15, n.6, p.1051, 23 mai. 2018.