



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**DINÂMICA DE DEGRADAÇÃO E REGENERAÇÃO DO
GARIMPO ILEGAL NA TERRA INDÍGENA YANOMAMI
(2019-2025)**

HUGO ALLAN ALBUQUERQUE BARBOSA

ORIENTADOR: DR. DANIEL LUIS MASCIA VIEIRA.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRASÍLIA/DF

MAIO /2026

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS.....	2
LISTA DE FIGURAS.....	2
LISTA DE TABELAS.....	3
Resumo.....	3
1. Introdução.....	5
2. Métodos.....	7
2.1. Área de Estudo.....	7
2.2. Dados e Plataforma de Processamento.....	8
2.3. Classificação e Validação.....	9
2.4. Dinâmica da Degradação.....	11
3. Resultados.....	13
3.1. Acurácia.....	13
3.2. Dinâmica de Degradação e Regeneração.....	15
3.3. Trajetória da Regeneração (NDVI).....	17
3.4. Impacto Hidrológico (Turbidez).....	18
4. Discussão.....	19
5. Conclusões.....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24

LISTA DE SIGLAS

APIB - Articulação dos Povos Indígenas do Brasil

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESA - Agência Espacial Europeia

FUNAI - Fundação Nacional dos Povos Indígenas

GEE - Google Earth Engine

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

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LVQ - Learning Vector Quantization

NDTI - Índice de Turbidez por Diferença Normalizada

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

PAMGIA - Plataforma de Análise e Monitoramento Geoespacial da Informação

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

TI - Terra Indígena

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das áreas de mineração dentro da Terra Indígena Yanomami.

Figura 2. Dinâmica das classes de degradação e regeneração.

Figura 3. Matriz de confusão para avaliação da acurácia da classificação do uso e cobertura da terra na área de estudo.

Figura 4. Variação anual do uso e cobertura da terra resultante das atividades de extração mineral ilegal no rio Uraricoera a partir de 2021, acompanhada por imagens Planet da respectiva área classificada.

Figura 5. Diagrama de Sankey.

Figura 6. Trajetória do NDVI e desvio padrão.

Figura 7. Comparação anual da área de água (ha) e classe de turbidez na Terra Indígena Yanomami (TIY), Brasil, 2019–2025.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Chave de Classificação.

Tabela 2. Áreas (em hectares) de cada classe por ano.

Resumo

A mineração ilegal dentro da Terra Indígena Yanomami (TIY) na Amazônia brasileira expandiu-se drasticamente entre 2019 e 2022, e foi subsequentemente reduzida a partir de 2023 por operações federais de desintrusão, com forte redução da atividade, destruição de equipamentos e períodos sem novos alertas de garimpo. Este estudo analisa a dinâmica espaço-temporal de diferentes tipos de degradação induzida pela mineração, a expressão da regeneração natural através desses tipos, e a dinâmica de corpos d'água artificiais e sua turbidez. A metodologia integra a classificação supervisionada da cobertura da terra (Weka-LVQ) de imagens Sentinel-2 MSI, juntamente com índices de vegetação e turbidez para rastrear a recuperação da vegetação e a qualidade da água, respectivamente. Os resultados revelam uma fase inicial exponencial de desmatamento, seguida por um ciclo crônico de alta rotatividade, no qual a sucessão ecológica incipiente é repetidamente suprimida pela reexploração de áreas previamente mineradas. A recuperação é dificultada pela perda da camada superficial do solo (*topsoil*), resultando em cavas alagadas permanentes

(Pinheiro et al., 2026). As intervenções federais em 2023 levaram a uma redução de 99% na mineração ativa (BRASIL, 2026). Atualmente, a área total de superfície de água dobrou devido ao alagamento de cavas de mineração abandonadas. As avaliações de turbidez indicaram que esses corpos d'água recém-formados atuam como reservatórios de sedimentação. Nessas áreas, os passivos ambientais vão além da perda florestal, criando ambientes estéreis e de baixa resiliência, frequentemente contaminados com mercúrio. As descobertas sugerem que a regeneração passiva é insuficiente; estratégias de restauração ativa são necessárias para lidar com as áreas degradadas deixadas pela extração ilegal.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Garimpo Ilegal, Dinâmica da Paisagem, NDVI, NDTI, Amazônia, Terras Indígenas.

Abstract

Illegal mining within the Yanomami Indigenous Territory (TIY) in the Brazilian Amazon expanded drastically between 2019 and 2022, and was subsequently reduced from 2023 onwards by federal eviction operations, with a strong reduction in activity, destruction of equipment, and periods without new mining alerts. This study analyzes the spatio-temporal dynamics of different mining-induced degradation types, the expression of natural regeneration across these types, and the dynamics of artificial water bodies and their turbidity. The methodology integrates supervised land cover classification (Weka-LVQ) of Sentinel-2 MSI imagery, alongside vegetation and turbidity indices to track vegetation recovery and water quality, respectively. Results reveal an initial exponential phase of deforestation, followed by a chronic cycle of high turnover, in which incipient ecological succession is repeatedly suppressed by the re-exploitation of previously mined areas. Recovery is hindered by topsoil loss, resulting in permanent flooded pits (Pinheiro et al., 2026). Federal interventions in 2023 led to a 99% reduction in active mining (BRASIL,

2026). Currently, the total water surface area has doubled due to the flooding of abandoned mining pits. Turbidity assessments indicated that these newly formed water bodies act as sedimentation reservoirs. In these areas, environmental liabilities extend beyond forest loss, creating sterile, low-resilience environments often contaminated with mercury. The findings suggest that passive regeneration is insufficient; active restoration strategies are required to address the degraded areas left by illegal extraction.

Keywords: Remote Sensing, Illegal Mining, Landscape Dynamics, NDVI, NDTI, Amazon, Indigenous Lands.

1. Introdução

O garimpo ilegal de ouro, conhecido como garimpo, expandiu-se de forma alarmante em terras protegidas na Amazônia brasileira entre 2019 e 2022 (Oviedo e Crivellaro, 2022). A Terra Indígena Yanomami (TIY) tornou-se o epicentro desta atividade (Neto et al., 2024). Impulsionado pelo aumento dos preços do ouro e pelo enfraquecimento da fiscalização ambiental (Araújo et al., 2025), o garimpo levou à ocupação extensiva de novos territórios, caracterizada pela abertura contínua de frentes de mineração (Pinheiro et al., 2026) e pela expansão de zonas existentes em múltiplas bacias hidrográficas em paisagens florestais (Fellows et al., 2024).

Os impactos são devastadores (Kopenawa e Albert, 2015). A mineração envolve a supressão florestal e a perturbação maciça do solo com jatos de água de alta pressão (Araújo et al., 2025), alterando drasticamente a topografia e a drenagem natural (Fellows et al., 2024). A construção de barragens para a lavagem do minério aumenta a turbidez da água (Pinheiro et al., 2026), enquanto o mercúrio usado na amalgamação pode contaminar o sistema hidrológico (Gerson et al., 2022). O mercúrio pode contaminar, pode bioacumular e pode

biomagnificar, representando risco à saúde das populações que consomem o pescado, conforme documentado pela literatura (Villen-perez et al., 2020).

Na TIY, a degradação atingiu níveis críticos em 2022, além da emergência humanitária (Kopenawa e Albert, 2015) e sanitária (Castro et al., 2025), que instituiu medidas de enfrentamento, levando o Governo Federal a decretar estado de emergência e iniciar operações de desintrusão no início de 2023 (BRASIL, 2026). Essas intervenções federais resultaram em uma retração significativa da mineração ilegal. Uma análise comparativa mostrou uma redução de 99% na superfície impactada entre março de 2024 e fevereiro de 2026 (Radioagência, 2026). Embora a degradação ativa tenha cessado (IBAMA, 2024), permanece incerto se seu abandono levará à regeneração florestal natural ou se severas alterações edáficas e hidrológicas exigirão restauração ativa (BRASIL, 2024).

O sensoriamento remoto tem sido vital para quantificar áreas degradadas (Pinheiro et al., 2026), mas os tipos de degradação, suas dinâmicas de mudança e sua capacidade de regeneração natural também devem ser capturados, dados que se tem poucas informações na literatura. O garimpo exibe alta rotatividade intra-área, marcada pela reativação sistemática de cavas abandonadas, agravando os passivos ambientais (Oviedo e Crivellaro, 2022). Este ciclo crônico frequentemente impede a regeneração natural (BRASIL, 2017). Além disso, cavas abandonadas alagam, criando lagos artificiais de alta turbidez que servem como reservatórios para sedimentos contaminados e vetores para doenças como a malária (Hutukara, 2022).

Este estudo analisa as dinâmicas de degradação e regeneração na TIY entre 2019 e 2025. Usando imagens Sentinel-2A e aprendizado de máquina, foram abordadas três questões: (i) Quais são as dinâmicas espaço-temporais de diferentes tipos de degradação? (ii) Qual é a

expressão da regeneração natural nesses tipos de degradação? (iii) Qual é o impacto em corpos d'água artificiais e sua variação de turbidez?

2. Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na porção brasileira da Terra Indígena Yanomami (TIY) na Amazônia Legal (BRASIL, 1953). Homologada em 1992, a TIY abrange 9,6 milhões de hectares em Roraima e no Amazonas, abrigando aproximadamente 31.000 pessoas (BRASIL, 2023). A região é dominada pela Floresta Ombrófila Densa no Escudo das Guianas (IBGE, 2012). O clima é Equatorial Úmido, necessitando de um mascaramento de nuvens no sensoriamento remoto óptico (IBGE, 2009). Este estudo foca em 5.432 hectares (Neto et al., 2024) de áreas degradadas acumuladas até 2023 (Figura 1) delimitadas utilizando os polígonos de embargos ambientais do IBAMA (IBAMA, 2025). Os dados do IBAMA foram obtidos através da plataforma PAMGIA (IBAMA, 2025).

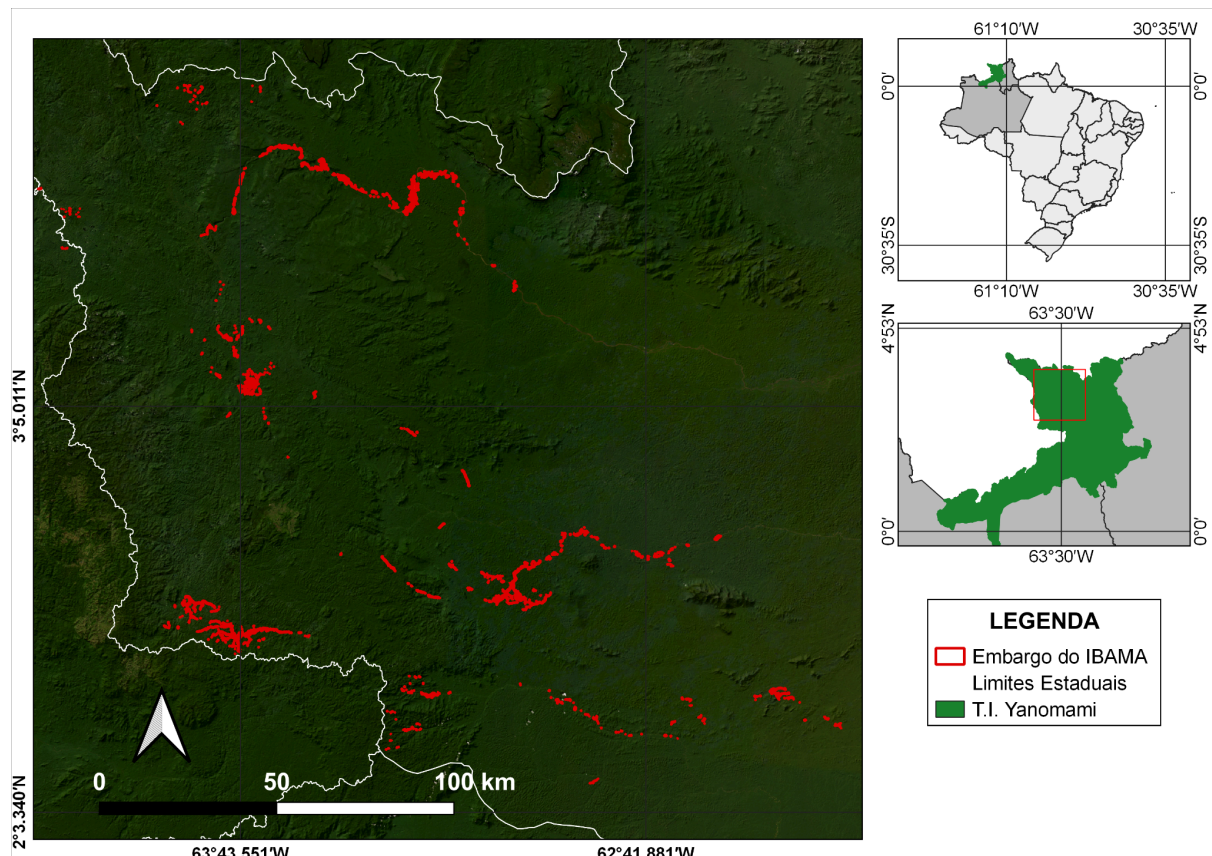


Figura 1. Localização das áreas de mineração dentro da Terra Indígena Yanomami.

2.2 Dados e Plataforma de Processamento

Foram utilizadas imagens multiespectrais Sentinel-2 MSI (Nível 2A, refletância de superfície), com resolução espacial de 10 metros, acessadas através do Copernicus Data Space Ecosystem (ESA, 2026). O Sentinel-2A fornece 13 bandas espectrais e um tempo de revisita de 10 dias. Para a análise visual, delimitação das feições e seleção das amostras de treinamento do algoritmo, procedeu-se à composição colorida em cor verdadeira (RGB) utilizando as bandas 4 (vermelho), 3 (verde) e 2 (azul) do sensor MSI/Sentinel-2. A análise temporal da cobertura do solo no Google Earth Engine baseou-se em mosaicos anuais medianos do satélite Sentinel-2 (2019-2025), classificados pelo algoritmo de *Machine Learning* Weka-LVQ treinado de forma não supervisionada com dados base de 2023. Esse modelo padronizado foi aplicado a toda a série histórica para agrupar espectralmente os

pixels, que foram então remapeados em cinco classes temáticas finais (Água, Solo Exposto, Solo com Matéria Orgânica, Regeneração e Floresta), permitindo calcular o fluxo de transição das áreas ao longo do tempo. O período analisado (janeiro de 2019 a outubro de 2025) captura o pico da expansão da mineração — que cresceu 54% em 2022 (Hutukara, 2023) — e a subsequente redução de 98,9% após a intervenção estatal (BRASIL, 2026). O processamento foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE), gerando mosaicos anuais livres de nuvens utilizando valores medianos e a máscara de nuvens QA60, que foi a solução para contornar o problema do clima do local, por conta das nuvens presente em grande parte do ano.

Apesar da eficácia do classificador Weka-LVQ no mapeamento da dinâmica do garimpo, este estudo apresenta limitações intrínsecas ao sensoriamento remoto óptico e ao contexto geopolítico da Terra Indígena Yanomami (TIY). Primeiro, a janela temporal de observação após a intervenção estatal é relativamente curta. Uma vez que as operações de desintrusão e a paralisação efetiva das frentes de mineração só se consolidaram a partir de 2023 (BRASIL, 2023), o período analisado até 2025 permite apenas a observação dos estágios mais incipientes da sucessão ecológica.

2.3 Classificação e Validação

A cobertura da terra foi mapeada anualmente usando o classificador Weka Learning Vector Quantization (LVQ) (Kohonen, 2003). Para garantir a consistência temporal, o algoritmo foi treinado no mosaico de 2023, por conta de ser o período inicial da intervenção no local e aplicado a toda a série. Utilizamos uma abordagem em duas etapas: segmentação inicial em 9 agrupamentos via K-Means para isolar sutilezas espectrais (ex: tons de solo e turbidez da água), que foram então mescladas em 5 classes temáticas: (i) Água, (ii) Solo Exposto, (iii) Solo com Matéria Orgânica, (iv) Regeneração Inicial, e (v) Floresta Madura/Secundária. A

validação utilizou 500 pontos de referência independentes e imagens PlanetScope de resolução de 3m.

Todo o processamento metodológico foi automatizado na plataforma de computação em nuvem *Google Earth Engine* (GEE). A aquisição de dados baseou-se na coleção de refletância de superfície do satélite Sentinel-2 (*COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED*). Para gerar os cenários anuais de 2019 a 2025, estabeleceu-se um filtro de cobertura de nuvens inferior a 20% e aplicou-se uma função de mascaramento baseada na banda de qualidade (QA60) para a eliminação sistemática de nuvens e *cirrus*. Em seguida, calculou-se a mediana temporal dos pixels para formar mosaicos anuais representativos e livres de ruídos atmosféricos.

A classificação operou exclusivamente sobre as bandas com 10 metros de resolução espacial: Azul (B2), Verde (B3), Vermelho (B4) e Infravermelho Próximo (B8). Para a etapa de *machine learning*, extraiu-se uma amostra aleatória de 10.000 pixels do mosaico de 2023 para treinar o Weka-LVQ de forma não supervisionada. Esse modelo único foi aplicado às imagens de todos os outros anos, assegurando a comparabilidade direta da assinatura espectral ao longo da série histórica. Posteriormente, os 9 *clusters* gerados pelo algoritmo foram remapeados para as 5 classes temáticas finais por meio da função de reclassificação supervisionada. Por fim, a rotina de validação extraiu os valores classificados de 2023 sobre os pontos de referência para a construção da matriz de confusão e o cálculo automatizado da acurácia global e do coeficiente Kappa.

Tabela 1. Chave de Classificação. Fonte: IBAMA, 2024.

CLASSES	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS DE CAMPO
---------	-----------	--------------------------

Solo Exposto	Áreas de mineração ativa ou recente, caracterizadas pela remoção total da vegetação e do <i>topsoil</i>, expondo o substrato mineral.	
Água	Corpos d'água naturais (rios) e artificiais (lagoas e cavas de garimpo inundadas).	
Solo com Matéria Orgânica	Solo revolvido pela atividade de mineração, mas com deposição de matéria orgânica, vegetação rasteira ou áreas com alto teor de argila ou silte, indicando áreas que diferenciam do rejeito arenoso.	

Regeneração	Vegetação secundária em estágio inicial, colonizando áreas previamente degradadas.	
Floresta Madura e Secundária	Floresta secundária ou madura.	

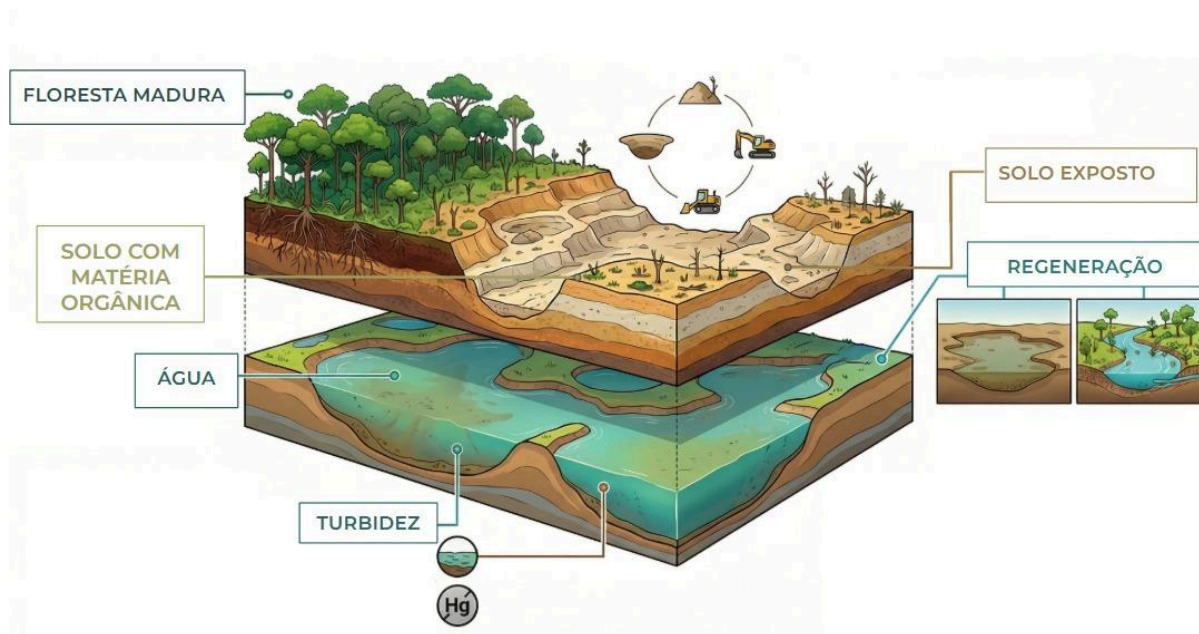


Figura 2. Classes de degradação e regeneração.

2.4 Dinâmica de degradação

As transições foram quantificadas usando matrizes de transição anuais e visualizadas através de um Diagrama de Sankey. Para quantificar as mudanças espaço-temporais e modelar o diagrama de Sankey, as matrizes de transição foram calculadas iterativamente entre pares de anos consecutivos (ex: 2019-2020, 2020-2021) na plataforma GEE. Em seguida, utilizou-se uma operação algébrica de sobreposição multiplicando a imagem do ano anterior (ano base) por 100 e somando à imagem do ano subsequente (ano destino), gerando códigos numéricos únicos que identificam a classe de origem e a de destino de cada pixel. A área total de cada trajetória de conversão foi quantificada em hectares (`ee.Image.pixelArea`) por meio da função de redução zonal (`reduceRegion`), resultando em uma base de dados sequencial exportada em formato tabular (CSV) para a geração do fluxo visual.

Para complementar a avaliação da degradação e do garimpo, o estudo integrou análises secundárias utilizando o NDVI para monitorar a estabilidade e trajetória da vegetação. A recuperação da vegetação foi monitorada através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada: $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$ (Rouse et al., 1973). O impacto hidrológico foi avaliado usando o Índice de Turbidez por Diferença Normalizada: $NDTI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$ (Lacaux et al., 2007). Um limiar de -0,06 foi empiricamente definido (Xu, 2006) para classificar a água em "Alta Turbidez" e "Baixa Turbidez".

Além disso, foram identificadas dificuldades na separação espectral de fisionomias vegetais. A similaridade na resposta de reflectância entre florestas maduras e florestas secundárias em estágios sucessionais avançados exigiu a fusão dessas categorias em uma única classe temática. Essa simplificação, embora necessária para a estabilidade do modelo, limita a compreensão da perda de biodiversidade primária em relação ao ganho de biomassa secundária.

3. Resultados

3.1 Acurácia

A classificação atingiu uma Acurácia Global de 84,8% e um Índice Kappa de 0,80 (Figura 3), indicando concordância "Quase Perfeita" (Landis e Koch, 1977) e validando a metodologia para monitorar a dinâmica da mineração. O classificador se comportou melhor nas classes de Solo exposto e Água, tendo mais dificuldade em diferenciar as classes de Regeneração e Solo com Matéria Orgânica, como pode ser observado no exemplo abaixo (Figura 5). A classe de Regeneração teve a menor precisão, com 25% dos polígonos classificados incorretamente, o que influencia em entender melhor o processo de regeneração, por conta de criar uma transição rápida que pode não refletir o que acontece. Os valores numéricos dispostos em cada célula representam a quantidade absoluta de amostras (pontos de validação) utilizadas na avaliação de acurácia. Os números situados na diagonal principal quantificam os acertos diretos do modelo, indicando as instâncias em que a classificação gerada pelo Sentinel-2 concordou integralmente com a classe verdadeira observada nos dados de referência de alta resolução (Planet). Em contrapartida, os valores posicionados fora dessa diagonal evidenciam os erros de omissão e comissão, discriminando quantitativamente as instâncias em que o algoritmo confundiu as assinaturas espectrais e atribuiu equivocadamente as amostras de uma classe real a outras categorias temáticas.

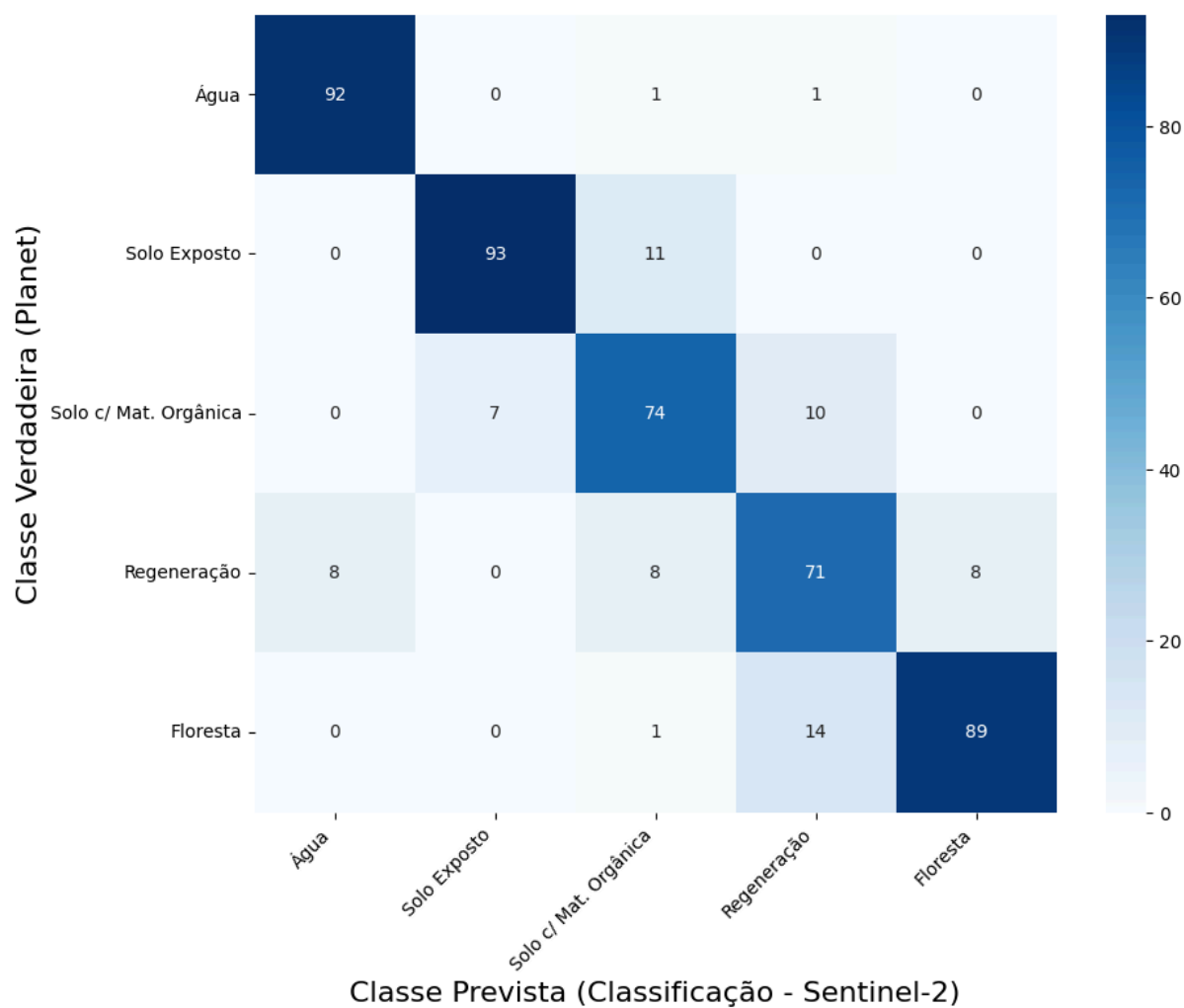


Figura 3. Matriz de confusão para avaliação da acurácia da classificação do uso e cobertura da terra na área de estudo, com a presença dentro de cada célula da quantidade de pontos classificados.

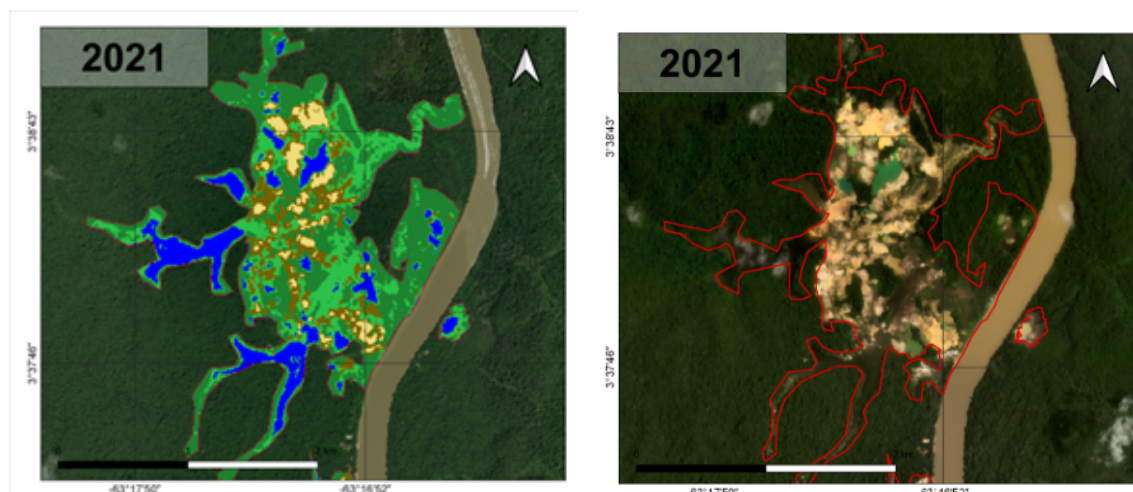


Figura 4. A) Classificação da cobertura da terra resultante das atividades de extração mineral ilegal no rio Uraricoera em 2021, B) Imagem Planet da respectiva área classificada.

3.2 Dinâmica de Degradação e Regeneração

O Diagrama de Sankey (Figura 5) revelou um fluxo bidirecional e persistente entre "Solo com Matéria Orgânica" e "Regeneração Inicial" durante a fase de expansão da mineração. Isso sugere um ciclo de reexploração crônica onde a recuperação incipiente é repetidamente suprimida. A floresta madura mostrou uma perda líquida contínua até a intervenção estatal de 2023. Entre 2021 e 2023, houve um aumento na área da superfície da água ($R^2 = 0,89$), chegando a 371 ha. A área de água mais que dobrou (168 ha para 371 ha) entre 2022 e 2023 (Tabela 2), refletindo o abandono em massa e alagamento das cavas profundas de mineração uma vez que o bombeamento ativo cessou durante a desintrusão.

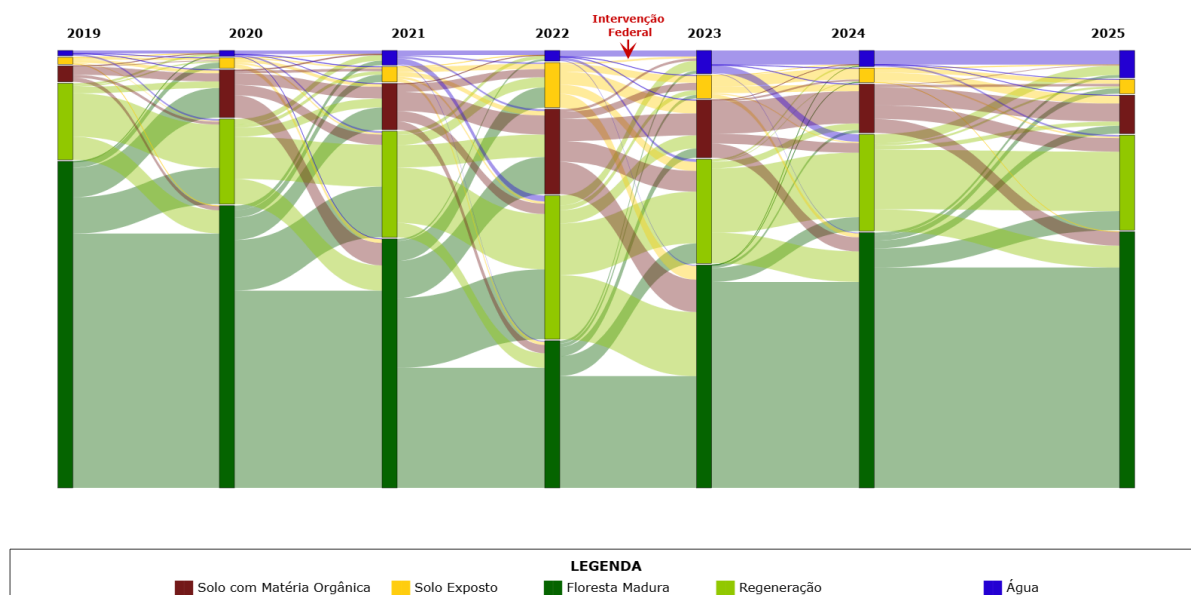


Figura 5. Diagrama de Sankey, ilustrando a dinâmica espaço-temporal e as trajetórias de transição da cobertura do solo entre 2019 e 2025. As barras verticais indicam a proporção total de área ocupada por cada classe em um determinado ano. As faixas horizontais (fluxos) representam a direção e a magnitude das conversões de uma classe para outra,

onde a espessura de cada faixa é diretamente proporcional à área transicionada. O marcador temporal em vermelho destaca o período da "Intervenção Federal", permitindo visualizar o impacto das operações governamentais nas taxas de conversão entre as classes.

Tabela 2. Áreas (em hectares) de cada classe por ano.

Ano	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Classe							
Floresta Madura	5203	4496	3967	2344	3553	4068	4083
Regeneração	1218	1357	1692	2290	1661	1542	1514
Solo Exposto	111	166	245	718	368	231	229
Solo com Matéria Orgânica	256	760	736	1353	922	777	611
Água	84	94	234	168	371	255	435
TOTAL GERAL (Ha)	6873	6873	6873	6873	6873	6873	6873

3.3 Trajetória da Regeneração (NDVI)

A análise do NDVI (Figura 6) indicou que a sucessão ecológica é dependente do tipo de solo e da presença de matéria orgânica. "Solo com Matéria Orgânica" atingiu um NDVI de 0,53 em 2025, maior do que os 0,37 observados em "Solo Exposto". Essa diferença de 0,16 destaca que a preservação do topsoil, ou de um solo argiloso indica ser necessária. Além disso, áreas em regeneração mostraram uma aumento no NDVI após a intervenção das atividades garimpeiras em 2023, indicando que as áreas em regeneração são vulneráveis à instabilidade da atividade garimpeira do que a floresta madura e secundária, segundo a distinção espectral do Sentinel -2A indica. Outro ponto importante de se destacar é a heterogeneidade dos pontos amostrais, mas que em média seguem a mesma tendência.

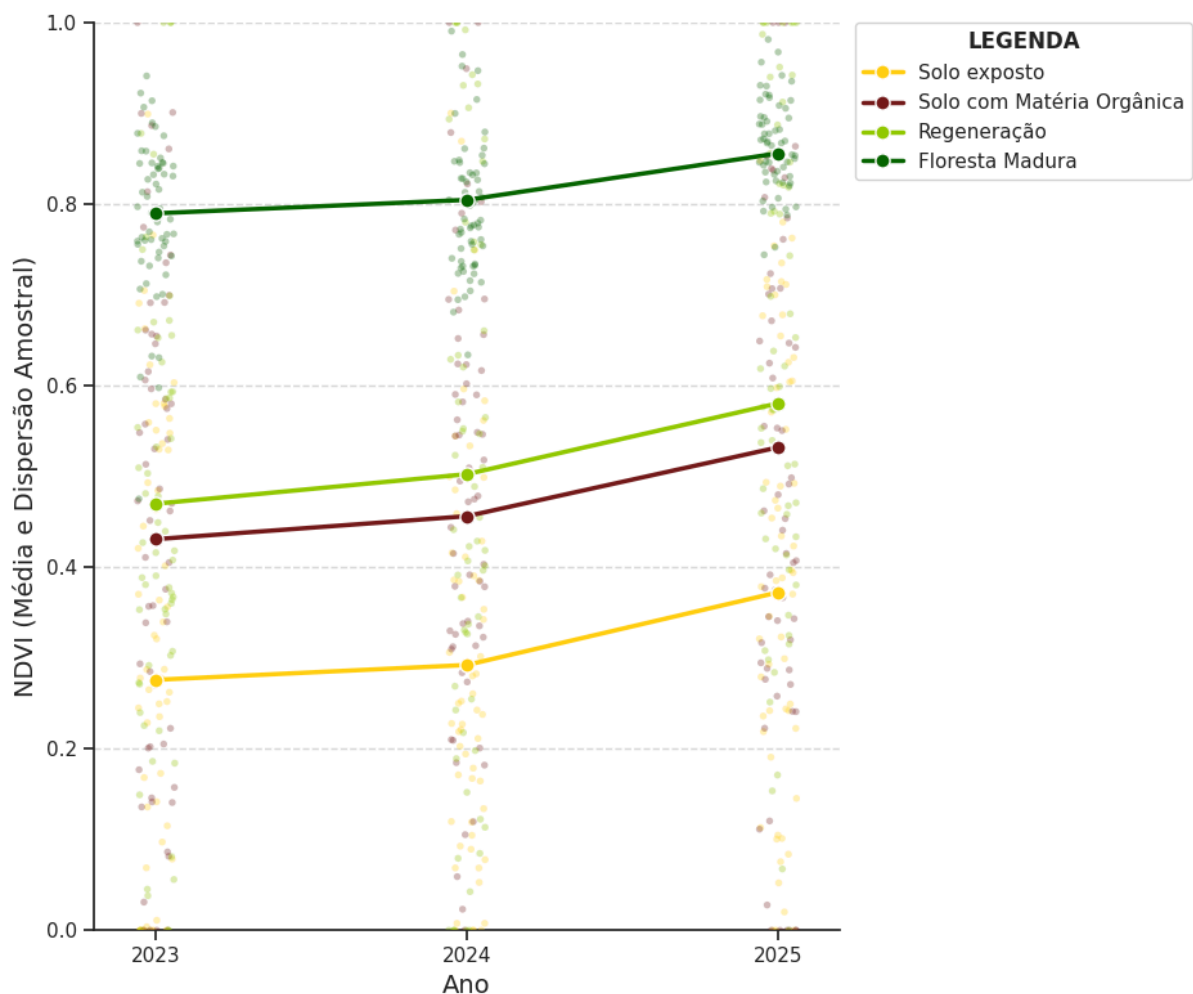


Figura 6. Trajetória do NDVI e dispersão amostral a partir de 2023.

3.4 Impacto Hidrológico (Turbidez)

A superfície total de água aumentou e pode sugerir uma melhora na qualidade, segundo o que indica o índice. Durante a mineração ativa (2019-2021), 60% dos corpos d'água apresentavam "Alta Turbidez". A partir de 2023, a água de "Baixa Turbidez" tornou-se a maioria (55%) (Figura 7). Essa mudança indica a decantação de sedimentos em cavas abandonadas, transformando a paisagem em uma série de reservatórios lânticos estagnados.

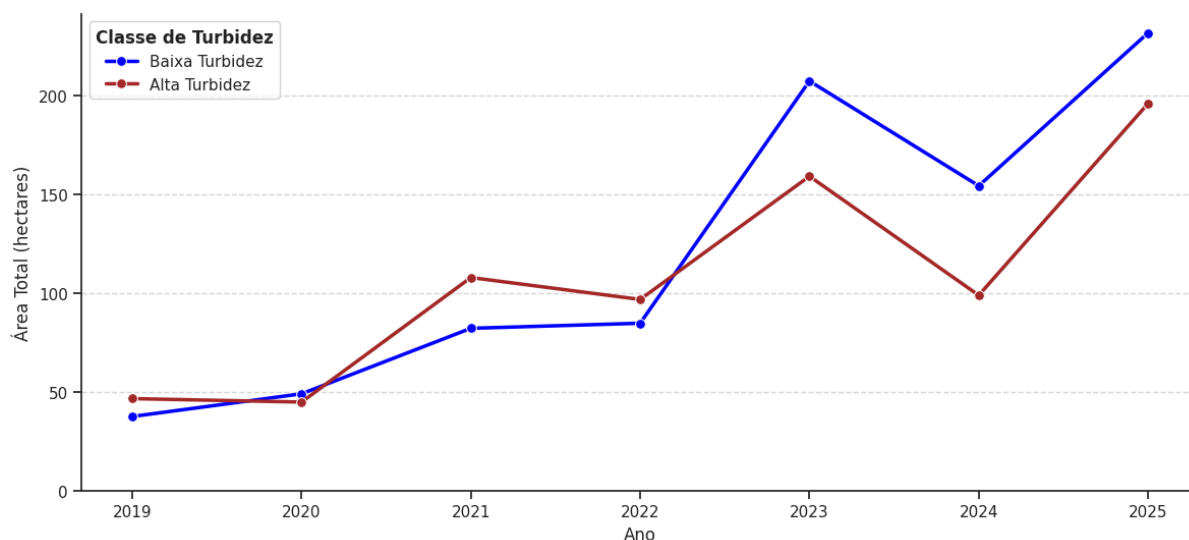


Figura 7. Comparação anual da área de água (ha) e classe de turbidez na Terra Indígena Yanomami (TIY), Brasil, 2019–2025.

4. Discussão

O monitoramento detalhado revelou que a degradação cumulativa na área de estudo atingiu 5.432 hectares até o ano de 2023. O pico da atividade mineradora ocorreu em 2022 (Castro et al., 2025), período durante o qual a expansão do garimpo cresceu 54%, impulsionada pela valorização dos preços do ouro (Santos et al., 2026) e pelo enfraquecimento da fiscalização ambiental (Neto et al., 2024). Esse ciclo de crescimento exponencial só foi interrompido no início de 2023 com o lançamento de operações federais de desintrusão, que resultaram em uma redução de 99% na mineração ativa (BRASIL, 2026).

Entre 2022 e 2025, observou-se uma mudança na paisagem (Figura 5). Enquanto a área da superfície hídrica dobrou entre 2022 e 2023 (aumentando de 168 ha para 371 ha) devido ao abandono massivo das cavas de mineração (Castro et al., 2025), o indicativo da recuperação da vegetação nativa mostrou-se heterogênea (Araújo et al., 2025). Durante a fase de expansão, houve um fluxo bidirecional entre solos perturbados e regeneração inicial,

compatível com um ciclo crônico onde a recuperação incipiente foi sistematicamente suprimida por novas frentes de garimpo (Castro et al., 2025). Somente após 2023 a classe de Regeneração começou a indicar maior potencial em áreas de abandono definitivo.

A disparidade na capacidade de recuperação do ecossistema entre as diferentes fisionomias degradadas é ditada por diversos fatores, podendo ser eles pelo histórico de perturbação da área, solo presente no local, presença de matéria orgânica (Pinheiro et al., 2026). A análise das trajetórias do NDVI ao longo do tempo indica que a sucessão ecológica natural é mais rápida quando se tem a presença de matéria orgânica ou solo argiloso, visto que as áreas classificadas como "Solo com Matéria Orgânica" atingiram índices de recuperação significativamente maiores (NDVI de 0,53 em 2025) quando comparadas às áreas de "Solo Exposto" (NDVI de apenas 0,37). Essa diferença metodológica demonstra que a técnica de desmonte hidráulico empregada no garimpo, ao remover completamente a camada superficial do solo (*topsoil*), indica que gera barreiras abióticas e cicatrizes estéreis, podendo limitar a colonização por espécies nativas e produzindo ambientes que indicam resiliência lenta (Fellows et al., 2024). Além disso, o sucesso regenerativo em áreas potencialmente favoráveis foi, até 2023, interrompido pela natureza crônica da mineração na região, marcada por uma rotatividade que reexplorava o substrato e interrompia repetidamente os estágios incipientes da sucessão (Neto et al., 2024).

Diante da heterogeneidade da degradação deixada pela mineração, a recuperação ambiental exige intervenções estruturadas e específicas para cada classe de degradação presente na paisagem (Santos et al., 2026). Nas áreas de "Solo com Matéria Orgânica", onde há preservação residual do substrato e maior taxa de recuperação (Figura 5), intervenções como a regeneração natural assistida podem ser soluções adequadas e viáveis para catalisar a trajetória de recuperação florestal. Em contrapartida, para os polígonos de "Solo Exposto", a

restauração ativa parece necessária, englobando o condicionamento topográfico para estabilizar o terreno e a aplicação de técnicas de bioengenharia de solos com o uso de corretivos orgânicos, o que pode ajudar a reverter a esterilidade edáfica antes de facilitar a recolonização ou o plantio direto de espécies pioneiras. Por fim, a classe "Água", gerada pelo abandono e consequente alagamento de cavas profundas, representa o passivo hidroecológico mais complexo, pois essas feições podem atuar como reservatórios lânticos estagnados (Figura 7) que retêm sedimentos contaminados por mercúrio e criam habitats para a proliferação de mosquitos vetores da malária (Fiocruz, 2024). A remediação dessas cicatrizes hídricas transcende o mero plantio ciliar, podendo ser necessário intervenções de engenharia hidrológica voltadas para a drenagem estrutural das cavas, a instalação de barreiras físicas de contenção de sedimentos e a reconexão da dinâmica dos fluxos fluviais naturais, eliminando assim os focos de contaminação e doenças (BRASIL, 2024).

A alteração geomorfológica induzida pela mineração ilegal resulta na formação de corpos d'água artificiais (Araujo et al., 2025), classificados primariamente em cavas profundas inundadas (lagos lânticos) decorrentes do desmonte hidráulico, barramentos de igarapés criados como reservatórios de lavagem, e calhas de rios principais severamente modificadas por dragas de sucção (Fellows et al., 2024). Nesses ambientes, a dinâmica da turbidez atua como um indicador direto do colapso hidroecológico: a fase ativa do garimpo eleva drasticamente a carga de sedimentos em suspensão e altera os parâmetros físico-químicos da água, ao passo que o abandono massivo dessas frentes promove uma inversão para águas de baixa turbidez, um fenômeno que não reflete a recuperação do ecossistema, mas sim ilustra a decantação crônica de partículas finas no fundo das cavas, o que não é ruim, porém não representa a recuperação completa. Consequentemente, essas cicatrizes hídricas convertem-se em ecossistemas que indicam baixa resiliência, atuando como sumidouros de sedimentos contaminados por mercúrio (Fiocruz, 2024), o que amplifica os riscos de saúde, criando

habitats aquáticos ensolarados ideais para a proliferação de mosquitos vetores da malária (Castro et al., 2025). Dado os indicativos da regeneração passiva nesses lagos isolados não seria tão eficaz (Pinheiro et al., 2026), a remediação ambiental transcende o simples abandono ou plantio ciliar, exigindo estratégias de restauração ativa e engenharia hidrológica; tais medidas devem englobar a drenagem estrutural das cavas, o reafeiçoamento topográfico do terreno, a instalação de barreiras físicas para a contenção de sedimentos tóxicos e a reconexão da dinâmica dos fluxos fluviais naturais, desmantelando assim os focos de contaminação e restabelecendo a conectividade e a saúde hídrica da paisagem (Castro et al., 2025).

Enquanto plataformas de referência como o MapBiomias (MapBiomias, 2026) utilizam classificadores baseados em Random Forest para mapear o uso e a cobertura da terra em escala nacional ou redes neurais para detecção de desmatamento (Silva et al., 2025), a abordagem deste estudo empregou o algoritmo Weka-LVQ (*Learning Vector Quantization*) para um escopo intra-área. A principal diferença reside na granularidade temática; o MapBiomias foca na extensão da área minerada, enquanto o uso do LVQ permitiu a distinção de subtipos de degradação (Solo Exposto vs. Solo com Matéria Orgânica), o que é fundamental para o planejamento da restauração ativa.

A integração de sensores ópticos Sentinel-2 (ESA, 2026) com o classificador LVQ mostrou-se um bom caminho em capturar as "micro-dinâmicas" do garimpo. Os resultados aqui apresentados corroboram a existência de um ciclo crônico de reexploração. A alta exatidão global (84,8%) valida o uso de aprendizado de máquina supervisionado para isolar sutilezas espectrais que classificadores automatizados generalistas frequentemente ignoram, como a turbidez em corpos d'água artificiais.

Este estudo destaca que a análise de imagens não deve se limitar à classificação estática. A inclusão dos índices NDVI (Vegetação) e NDTI (Turbidez) transforma o mapa em um indicador da saúde do ecossistema. O NDVI, por exemplo, indicou que a regeneração em áreas de solo exposto é menor do que em áreas com matéria orgânica, fornecendo evidências espectrais de que a perda da camada superficial do solo cria barreiras abióticas que o sensoriamento remoto convencional de baixa resolução não consegue medir totalmente.

Os processos de restauração florestal em áreas de mineração, caracterizados por degradação edáfica severa, podem exigir períodos maiores para demonstrar tendências de recuperação definitivas (Pinheiro et al., 2026). Segundo, a validação dos resultados baseou-se na interpretação visual de sensores de alta resolução (PlanetScope), com o auxílio de campanhas de campo, presentes em fotos, para "verdade terrestre". A insegurança regional e as dificuldades logísticas ao longo de um território de 9,6 milhões de hectares dificultam a coleta total *in situ* de dados para verificar a composição florística e a estrutura da vegetação em regeneração (Kopenawa e Albert, 2015). Por fim, a identificação da classe "Regeneração" apresentou os maiores desafios de acurácia, com 25% de erro de classificação. A confusão espectral entre o solo exposto com a presença de serrapilheira e a colonização inicial por espécies pioneiras dificulta a detecção precisa do momento exato em que a recuperação biológica começa.

5. Conclusão

O impacto da mineração ilegal na Terra Indígena Yanomami transcende a simples perda de cobertura florestal, estabelecendo um ciclo crônico de alta rotatividade e reexploração que atrapalha a sucessão ecológica natural. Em relação às dinâmicas espaço-temporais dos diferentes tipos de degradação, observou-se a recuperação da paisagem, indicando ser dependente da presença residual de matéria orgânica no solo. Em áreas submetidas ao

desmonte hidráulico, a remoção completa do horizonte superficial do solo (*topsoil*) criou "cicatrices" que indicam resiliência ecológica lenta, onde a regeneração passiva talvez não se mostre eficiente.

Como consequência direta desse distúrbio, a expressão da regeneração natural se indicou limitada. O legado mais alarmante da atividade, no entanto, recaiu sobre os recursos hídricos. O impacto na formação de corpos d'água artificiais e na variação de sua turbidez foi uma das principais consequências. O abandono massivo das frentes de mineração, impulsionado por operações federais de desintrusão iniciadas em 2023, causou a interrupção das bombas de drenagem e o subsequente alagamento de cavas profundas. Isso resultou em uma duplicação exponencial da superfície de água na região, criando um vasto sistema de lagos artificiais lânticos e estagnados. A análise da dinâmica de turbidez indicou que esses novos corpos d'água atuam como sumidouros crônicos para sedimentos (potencialmente contaminados por mercúrio) e criadouros ideais para vetores de doenças, como a malária, o que agrava a crise humanitária e a contaminação da cadeia trófica local.

Por fim, conclui-se que apenas interromper as atividades ilícitas, embora essencial, é insuficiente para garantir a restauração do ecossistema e a proteção das comunidades Yanomami. Diante de um passivo ambiental caracterizado por esterilidade edáfica e colapso hidroecológico, é imperativo que futuras políticas públicas transitem do monitoramento e fiscalização para a implementação de estratégias de restauração ativa. A remediação da paisagem exigirá governança intersetorial e intervenções envolvendo bioengenharia de solos, condicionamento topográfico e a reconexão da dinâmica natural dos fluxos fluviais, que são fundamentais para restaurar a saúde e a integridade deste território vulnerável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APIB, 2022. Yanomami sob ataque: garimpo ilegal na Terra Indígena Yanomami e propostas

para combate.

<https://apiboficial.org/2022/05/04/yanomami-sob-ataque-garimpo-ilegal-na-terra-indigena-yanomami-e-propostas-para-combate-lo/> (acessado em 09 de dezembro de 2024).

Araújo, A. K. A. et al., 2025. Análise multitemporal da expansão de garimpos no Tapajós por imagens de satélite. *Revista Caderno Pedagógico*.

Brasil, 1992. Portaria n. 580 que demarca o território da população indígena Yanomami. *Anuário Indigenista* 30, 461-471.

Brasil, 2023. Relatório da Missão Yanomami: Missão exploratória. Ministério da Saúde, Secretaria Especial de Saúde Indígena (SESAI), Centro de Operações de Emergências em Saúde Pública (COE-Yanomami), Brasília.

Brasil, 2024. Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – PLANAVEG 2025-2028. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Brasília. https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg/planaveg_2025-2028_2dez2024.pdf (acessado em 25 de novembro de 2025).

Brasil, 2026. Governo do Brasil acelera desintrusão e já reduziu em 98,9% a área de garimpo na Terra Yanomami. Secretaria de Comunicação Social. <https://www.gov.br/secom/pt-br/acompanhe-a-secom/noticias/2026/02/governo-do-brasil-acelera-desintrusao-e-ja-reduziu-em-98-9-a-area-de-garimpo-na-terra-yanomami> (acessado em 10 de março de 2026).

Castro, M. C. et al., 2025. Mining and malaria in the Brazilian Amazon and in the Yanomami indigenous land. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, v. 19, n. 11, e0013677.

De Bakker, L.B., Gasparinetti, P., de Queiroz, J.M., de Vasconcellos, A.C.S., 2021. Economic

Impacts on Human Health Resulting from the Use of Mercury in the Illegal Gold Mining in the Brazilian Amazon: A Methodological Assessment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 11869. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211869>.

El Bizri, H.R., Macedo, J.C.B.M., Plaglia, A.P., Morcatty, T.Q., 2016. Mineração prejudicando o meio ambiente do Brasil. *Science* 353, 2-3.

ESA (European Space Agency), 2026. Copernicus Data Space Ecosystem. ESA, Paris. <https://dataspace.copernicus.eu/> (acessado em 10 de março de 2026).

Fellows, M., Alencar, A., Silvestrini, R., Diniz, C., Cortinhas, L., Carvalho, N., Shimbo, J., 2024. As Cicatrizes do Garimpo em Terras Indígenas da Amazônia Brasileira. Nota técnica. IPAM, Brasília. <https://ipam.org.br/bibliotecas/as-cicatrizes-do-garimpo-em-terras-indigenas-da-amazonia-brasileira> (acessado em 08 de fevereiro de 2025).

Fiocruz, 2024. *Aumento dos casos de malária na Terra Yanomami tem correlação direta com o garimpo ilegal*. Instituto Oswaldo Cruz - FIOCRUZ.

FUNAI, 2024. Geoprocessamento e mapas. <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas> (acessado em 09 de dezembro de 2024).

Galvis, S.R., 2020. The Amazon Biome in the Face of Mercury Contamination: An Overview of Mercury Trade, Science, and Policy in the Amazonian Countries. *WWF Gaia Amaz*, 1-168.

Gerson, J.R., Szponar, N., Zambrano, A.A., Bergquist, B., Broadbent, E., Driscoll, C.T., Erkenwick, G., Evers, D.C., Fernandez, L.E., Hsu-Kim, H., Inga, G., Lansdale, K.N., Marchese, M.J., Martinez, A., Moore, C., Pan, W.K., Purizaca, R.P., Sanchez, V., Silman, M.,

Bernhardt, E.S., 2022. Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. *Nat. Commun.* 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-27997-3>.

Google Earth Engine, 2026. Google Earth Engine. Google, Mountain View, CA. <https://earthengine.google.com> (acessado em 10 de março de 2026).

Hutukara Associação Yanomami, Associação Wanasseduume Ye'kwana, 2022. Yanomami sob ataque: garimpo ilegal na Terra Indígena Yanomami e propostas para combatê-lo.

Hutukara Associação Yanomami, Boa Vista. <https://site-antigo.socioambiental.org/pt-br/noticias-socioambientais/yanomami-sob-ataque>.

IBAMA, 2024. Governo federal anuncia presença permanente e investimentos de R\$ 1,2 bi na TI Yanomami.

IBAMA. <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2024/governo-federal-anuncia-presenca-permanente-e-investimentos-de-r-1-2-bi-na-ti-yanomami> (acessado em 18 de novembro de 2024).

IBAMA, [n.d.]. *PAMGIA - Plataforma de Análise e Monitoramento Geoespacial da Informação Ambiental*. <https://pamgia.ibama.gov.br/home/> (acessado em 08 de fevereiro de 2025).

IBGE, 2009. *Manual Técnico de Geomorfologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBGE, 2012. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Kohonen, T., 2003. Learning Vector Quantization. In: Arbib, M.A. (Ed.), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks* (2nd ed., pp. 631-634). MIT Press.

Kopenawa, D.; Albert, B., 2015. *A queda do céu: Palavras de um xamã yanomami*. São Paulo: Companhia das Letras.

Lacaux, J.P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A., Lafaye, M., 2007. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66-74.

Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>.

MAAP – Monitoring of the Andes Amazon Program, com dados recentes até dez/2025. Fonte: <https://www.maaprogram.org/gold-mining-brazil-yanomami/>

MapBiomas, 2021. *Área ocupada pela mineração no Brasil cresce mais de 6 vezes entre 1985 e 2020*. <https://brasil.mapbiomas.org/2021/08/30/area-ocupada-pela-mineracao-no-brasil-cresce-mais-de-6-vezes-entre-1985-e-2020/> (acessado em 11 de novembro de 2024).

MapBiomas, 2026. *Coleção de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil*. São Paulo: SEEG/Observatório do Clima. <https://mapbiomas.org/> (acessado em 10 de março de 2026).

Nilsson, M.S.T., 2010. *Mobilidade Yanomami e os Efeitos à Paisagem Florestal de seu Território*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA.

Neto, L.F., Diniz, C.G., Maretto, R.V., Peresello, C., Silva Pinheiro, M.L., Castro, M.C., Sadeck, L.W.R., Filho, A.F., Cansado, J., Souza, A.A.A., Feitosa, J.P., Santos, D.C., Adami, M., Souza-Filho, P.W.M., Stein, A., Biehl, A., Klautau, A., 2024. Uncontrolled Illegal Mining and Garimpo in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 15, 9847. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54220-2>.

Oviedo, A.F.P., Crivellaro, G.C., 2022. *A expansão do garimpo de ouro e estimativa do impacto ambiental na Amazônia legal: Nota técnica*. São Paulo: Instituto Socioambiental.

Qi, J., Wang, C., Matricardi, E., Skole, D., 2002. Improved selective logging detection with Landsat images in tropical regions. In: *Proceedings of the "IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)"*. IEEE, pp. 2078-2080.

Pinheiro, J. V. et al., 2026. Ecological Impacts of Mining in the Amazon: Thematic Trends and Research Gaps. *Environmental Management*, v. 76, p. 112.

Radioagência, 2026. *Áreas de garimpo ativo caem quase 99% na Terra Indígena Yanomami*. Brasília: EBC.
<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/meio-ambiente/audio/2026-01/areas-de-garimpo-ativo-caem-quase-99-na-terra-indigena-yanomami> (acessado em 10 de março de 2026).

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C., 1973. *Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. Greenbelt, Maryland, USA: NASA/GSFC.

Silva, R. et al., 2025. Deep-learning deforestation detection in the Legal Amazon area based on Sentinel-1 data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 40, 101747.

Santos, S. L.; Moxoto, A. C. A.; Dutra, J. M., 2026. Illegal Gold Mining in the Brazilian Amazon: Environmental Degradation in Yanomami Indigenous Lands, and Regulatory Failures. *Sustainable Development*.

Villen-Perez, S., et al., 2020. Brazilian Amazon gold: indigenous land rights under risk. *Elem Sci Anth*, 8: 31. <https://doi.org/10.1525/elementa.427>.