

Seleção e operacionalização de indicadores de sustentabilidade para municípios mineradores da Amazônia

Cézar di Paula da Silva Pinheiro^{1*}, Carlos Elias de Souza Braga²

¹Doutorando em Ciências Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Brasil. (*Autor correspondente: cezarpinheiro18@gmail.com)

²Doutor em Ciências Biológicas, Professor Adjunto II da Universidade do Estado do Pará, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 02/07/2026 – Revisado em: 17/07/2026 – Aceito em: 05/08/2026

RESUMO

A avaliação da sustentabilidade em municípios mineradores da Amazônia enfrenta limitações relacionadas à disponibilidade, padronização e operacionalização de indicadores em escala territorial. O estudo teve como objetivo selecionar e operacionalizar indicadores de sustentabilidade aplicáveis a municípios mineradores amazônicos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão sistemática da literatura indexada na base Scopus, complementada por consulta a bases institucionais e dados públicos. Inicialmente, foram identificados 148 indicadores distribuídos nas dimensões ambiental, econômica, social, governança e cultural, posteriormente submetidos a uma matriz de elegibilidade composta por critérios de relevância regional, disponibilidade, comparabilidade, periodicidade, clareza metodológica e reprodutibilidade. O processo resultou na seleção de 47 indicadores compatíveis com análises comparativas em escala municipal. As maiores taxas de retenção ocorreram nas dimensões de governança (47,1%) e econômica (45,0%), associadas à ampla disponibilidade de bases administrativas padronizadas, enquanto a dimensão ambiental apresentou menor retenção devido à predominância de métricas dependentes de modelagem e sensoriamento indireto. A dimensão cultural não apresentou indicadores elegíveis em razão da baixa disponibilidade de dados padronizados e da predominância de atributos qualitativos associados à diversidade socioterritorial amazônica. Predominaram indicadores derivados de bases administrativas, dados geoespaciais e sistemas de monitoramento ambiental, com periodicidade majoritariamente anual. O conjunto final fornece uma base operacional para avaliações comparativas da sustentabilidade e para o desenvolvimento de ferramentas metodológicas aplicadas à gestão territorial em municípios mineradores da Amazônia.

Palavras-Chaves: Avaliação territorial, Mineração amazônica, Governança ambiental, Planejamento territorial, Indicadores municipais.

Selection and Operationalization of Sustainability Indicators for Mining Municipalities in the Amazon

ABSTRACT

Assessing sustainability in mining municipalities in the Amazon remains challenging due to limitations related to the availability, standardization, and operationalization of indicators at the territorial scale. This study aimed to select and operationalize sustainability indicators applicable to mining municipalities in the Amazon. A systematic literature review was conducted using the Scopus database and complemented with institutional databases and publicly available datasets. A total of 148 indicators distributed across the environmental, economic, social, governance, and cultural dimensions were initially identified and evaluated using an eligibility matrix based on regional relevance, data availability, comparability, periodicity, methodological clarity, and reproducibility. The selection process resulted in a final set of 47 indicators suitable for comparative analyses at the municipal scale. The highest retention rates were observed in the governance (47.1%) and economic (45.0%) dimensions, reflecting the wider availability of standardized administrative data. In contrast, the environmental dimension showed the lowest retention rate because most indicators depended on modeling approaches or indirect remote sensing data. No indicators were retained in the cultural dimension due to the limited availability of standardized information and the predominance of qualitative attributes associated with the socio-territorial diversity of the Amazon. The final set is composed mainly of indicators derived from administrative databases, geospatial information, and environmental monitoring systems with predominantly annual updates. The proposed framework provides an operational basis for comparative sustainability assessments and supports territorial management in mining municipalities across the Amazon.

Pinheiro, C. D. P. da S., & Braga, C. E. de S. (2026). Seleção e operacionalização de indicadores de sustentabilidade para municípios mineradores da Amazônia. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.14, n.2, p.373-391.



Keywords: Territorial assessment, Amazon mining, Environmental governance, Territorial planning, Municipal indicators.

Selección y operacionalización de indicadores de sostenibilidad para municipios mineros de la Amazonia

RESUMEN

La evaluación de la sostenibilidad en municipios mineros de la Amazonia enfrenta limitaciones relacionadas con la disponibilidad, estandarización y operacionalización de indicadores a escala territorial. Este estudio tuvo como objetivo seleccionar y operacionalizar indicadores de sostenibilidad aplicables a municipios mineros amazónicos. Se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando la base de datos Scopus, complementada con bases de datos institucionales y fuentes de información pública. Inicialmente, se identificaron 148 indicadores distribuidos en las dimensiones ambiental, económica, social, de gobernanza y cultural, los cuales fueron evaluados mediante una matriz de elegibilidad basada en criterios de relevancia regional, disponibilidad de datos, comparabilidad, periodicidad, claridad metodológica y reproducibilidad. El proceso de selección dio lugar a un conjunto final de 47 indicadores adecuados para análisis comparativos a escala municipal. Las mayores tasas de retención se observaron en las dimensiones de gobernanza (47,1%) y económica (45,0%), debido a la mayor disponibilidad de datos administrativos estandarizados. En contraste, la dimensión ambiental presentó la menor tasa de retención, ya que gran parte de los indicadores dependía de modelos o de datos obtenidos mediante sensores remotos indirectos. No se retuvieron indicadores en la dimensión cultural debido a la limitada disponibilidad de información estandarizada y al predominio de atributos cualitativos asociados con la diversidad socioterritorial de la Amazonia. El conjunto final está compuesto principalmente por indicadores derivados de bases de datos administrativas, información geoespacial y sistemas de monitoreo ambiental con actualización predominantemente anual. El marco propuesto proporciona una base operativa para evaluaciones comparativas de la sostenibilidad y contribuye al desarrollo de herramientas metodológicas orientadas a la gestión territorial en municipios mineros de la Amazonia.

Palabras clave: Evaluación territorial, Minería amazónica, Gobernanza ambiental, Planificación territorial, Indicadores municipales.

1. Introdução

A atividade mineral exerce influência significativa na organização territorial de regiões onde a exploração de recursos naturais constitui base econômica relevante. Na Amazônia, essa influência ocorre em um contexto caracterizado por elevada sensibilidade ambiental, diversidade socioterritorial e heterogeneidade institucional, fatores que condicionam a forma como os efeitos da mineração se manifestam no território. Evidências empíricas indicam que a expansão da atividade mineral na região está associada a processos de desmatamento, alteração do uso do solo e pressão sobre áreas protegidas e territórios tradicionais (Sonter et al., 2017; Mataveli et al., 2022; Rudke et al., 2020).

A relação entre mineração e sustentabilidade não pode ser inferida a partir de indicadores econômicos isolados. Estudos mostram que a presença de atividade mineral pode coexistir com degradação ambiental, desigualdades sociais e limitações na capacidade institucional local, especialmente em regiões dependentes de economias extrativas (Agusdinata et al., 2022; Antwi et al., 2017; Mancini e Sala, 2018). Esse padrão é particularmente relevante em contextos amazônicos, onde a dinâmica territorial envolve interações entre sistemas naturais, infraestrutura limitada e múltiplas formas de uso do espaço.

A avaliação dessas dinâmicas depende da utilização de indicadores de sustentabilidade capazes de representar, de forma mensurável, diferentes dimensões do sistema socioambiental. Indicadores são utilizados para traduzir fenômenos complexos em variáveis observáveis, permitindo análises comparativas e monitoramento temporal (Meadows, 1998; Moldan, Janoušková & Hák, 2012; Singh et al., 2012). No entanto, a literatura indica que a utilidade desses instrumentos está condicionada à sua operacionalização com base em dados disponíveis, comparáveis e metodologicamente consistentes (OECD, 2008; Ibañez Iralde et al., 2024; Guarini et al., 2025).

Apesar do avanço na proposição de sistemas de indicadores, persistem limitações na aplicação desses instrumentos em escala territorial. Estudos apontam que conjuntos amplos de indicadores frequentemente incluem variáveis conceitualmente relevantes, mas não operacionalizáveis em nível municipal, devido à

ausência de dados padronizados, incompatibilidade de escala ou dependência de modelagens complexas (Ibañez Iralde et al., 2024; Feil et al., 2025; Valizadeh e Hayati, 2025). Essa limitação é mais evidente em regiões como a Amazônia, onde a disponibilidade de dados é desigual e a heterogeneidade territorial impõe restrições adicionais à comparabilidade.

No caso de municípios mineradores, a aplicação de indicadores de sustentabilidade em escala territorial enfrenta limitações relacionadas à disponibilidade de dados, à compatibilidade de escala e à padronização metodológica. Estudos sobre construção e seleção de indicadores indicam que variáveis frequentemente propostas na literatura não podem ser operacionalizadas em nível municipal, seja por ausência de bases de dados consistentes, seja por dependência de modelagens indiretas ou informações não comparáveis entre unidades territoriais (OECD, 2008; Singh et al., 2012; Feil et al., 2025). Essa limitação restringe a utilização de indicadores em análises comparativas e compromete sua aplicação em contextos de gestão pública.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo selecionar e operacionalizar indicadores de sustentabilidade aplicáveis a municípios mineradores da Amazônia, por meio de identificação na literatura, verificação em bases secundárias e aplicação de critérios de elegibilidade.

2. Material e Métodos

2.1 Delineamento da pesquisa

A pesquisa possui delineamento bibliográfico e documental, com foco na sistematização de indicadores de sustentabilidade. Este artigo corresponde à segunda etapa de um percurso metodológico mais amplo, no qual a etapa anterior definiu as dimensões analíticas da sustentabilidade em contextos mineradores (Pinheiro e Braga, 2026). A etapa atual tem como finalidade selecionar e operacionalizar indicadores de sustentabilidade com base nessas dimensões, por meio de busca dirigida na literatura, verificação em bases secundárias e aplicação de critérios de elegibilidade. O conjunto de indicadores estruturado nesta etapa constitui base para aplicações futuras em análises de sustentabilidade em escala municipal.

A combinação de levantamento bibliográfico, triagem documental e verificação em bases secundárias segue procedimentos descritos na literatura para construção de indicadores, que recomendam a identificação inicial de um conjunto amplo de variáveis e posterior refinamento com base em critérios explícitos de seleção (Ayadi et al., 2024; Feil et al., 2025; Valizadeh e Hayati, 2025). Esse procedimento permite explicitar as etapas de seleção e reduzir inconsistências na definição do conjunto final.

A unidade de análise corresponde aos municípios mineradores da Amazônia. A escolha dessa escala está associada à disponibilidade de bases secundárias padronizadas, à possibilidade de comparação entre unidades territoriais e à sua utilização em análises voltadas à gestão pública, incluindo a avaliação de condições socioambientais e institucionais associadas à atividade mineral.

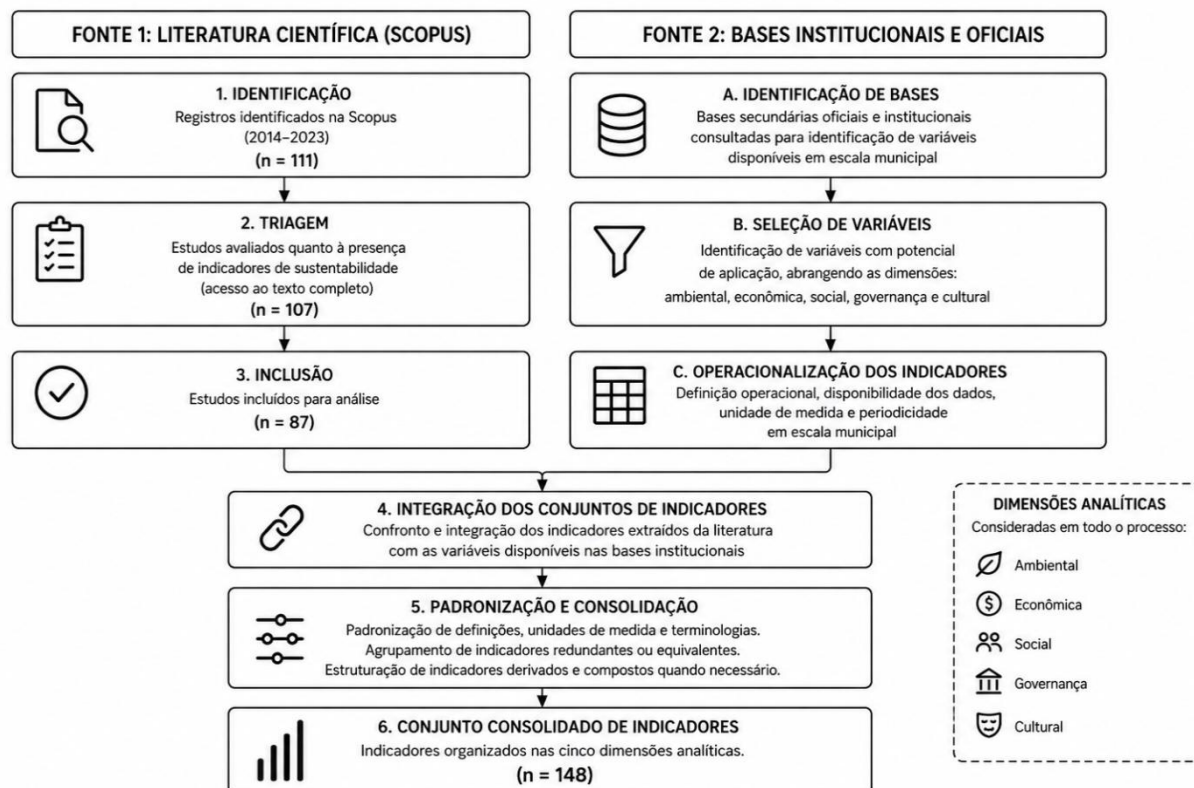
2.2 Identificação preliminar e organização dos indicadores

A identificação preliminar dos indicadores foi conduzida a partir das dimensões analíticas da sustentabilidade definidas por Pinheiro e Braga (2026), que constituíram o referencial conceitual desta etapa. Com base nessas dimensões, foi realizada busca dirigida na base Scopus, utilizando a estratégia: ("sustainability indicator" OR "indicator framework" OR "sustainability assessment") AND (mining OR extractive) AND (region* OR territorial OR governance OR development), com recorte temporal de 2014 a 2023 e restrição a artigos científicos. Buscas exploratórias com estratégia semelhante foram realizadas em outras bases de dados. Entretanto, essas buscas não retornaram estudos compatíveis com os critérios de busca adotados. Dessa forma, a Scopus foi utilizada como base principal por concentrar os registros elegíveis para a extração dos indicadores.

A aplicação da estratégia resultou em 111 artigos, dos quais 107 foram analisados integralmente. Quatro estudos não estavam disponíveis para acesso completo no momento da coleta e não foram incluídos na análise. Entre os artigos analisados, 20 não apresentaram indicadores ou variáveis relacionadas à sustentabilidade, sendo excluídos. Ao final, 87 estudos foram considerados elegíveis para extração de indicadores. O processo de identificação, triagem dos estudos, extração de indicadores e verificação em bases secundárias para consolidação do conjunto final está apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxo de identificação, triagem, extração e consolidação de indicadores de sustentabilidade a partir da literatura científica e de bases institucionais (2014–2023).

Figure 1 - Flow of identification, screening, extraction and consolidation of sustainability indicators from scientific literature and institutional databases (2014–2023).



Nota 1: (n) refere-se ao número de estudos ou de indicadores, conforme etapa.

Nota 2: A Figura 1 foi elaborada pelos autores com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa para organização dos elementos gráficos, sendo posteriormente revisada e editada.

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

A partir da leitura dos estudos elegíveis, foram extraídos indicadores, métricas ou variáveis relacionadas à avaliação da sustentabilidade, considerando diferentes escalas de análise. A inclusão foi condicionada à existência de definição operacional, unidade de medida e potencial de adaptação à escala municipal (OECD, 2008; Ibañez Iralde et al., 2024).

Para cada indicador identificado, foram registradas, em planilhas estruturadas, informações referentes ao estudo de origem, autoria, ano de publicação, nome do indicador, definição, dimensão analítica associada, tipo de indicador, unidade de medida, escala de aplicação e fonte de dados potencial. Esse procedimento

assegurou a rastreabilidade entre indicadores e estudos de origem. Os indicadores foram preliminarmente associados às dimensões analíticas com base em sua função predominante.

Conforme representado na Figura 1, a etapa de verificação em bases secundárias foi conduzida de forma paralela à extração dos indicadores da literatura, com o objetivo de identificar variáveis disponíveis para aplicação em escala municipal. Foram consideradas bases oficiais e institucionais abrangendo as dimensões ambiental, econômica, social, de governança e cultural, conforme apresentado na Tabela 1. Os indicadores identificados na literatura foram confrontados com as variáveis disponíveis nessas bases para avaliação de sua viabilidade empírica.

Tabela 1 - Bases de dados e fontes institucionais consultadas para verificação e operacionalização preliminar dos indicadores.

Table 1 - Databases and institutional sources consulted for verification and preliminary operationalization of the indicators.

Dimensão analítica	Bases de dados e fontes institucionais	Aplicação principal
Ambiental	ANA, SNIRH, SNIS, MapBiomas, PRODES, TerraBrasilis, MMA, IBAMA, ICMBio, SEEG	Recursos hídricos, saneamento, cobertura e uso da terra, desmatamento, emissões e conservação ambiental
Econômica	ANM, RAIS, CEMPRE, Tesouro Nacional, SEFAZ estaduais, IBGE	Produção mineral, emprego formal, arrecadação pública, dinâmica econômica e dependência produtiva
Social	IBGE, PNUD, SIM, e-Gestor AB, CadÚnico	Demografia, renda, saúde, vulnerabilidade social e acesso a serviços
Governança	Portal da Transparência, SICAR, portais oficiais de prefeituras municipais (transparência e legislação local), legislação municipal	Transparência, regularização, planejamento, instrumentos de gestão e controle institucional
Cultural	Plataforma de Territórios Tradicionais e portais oficiais municipais	Levantamento de comunidades tradicionais e aspectos do patrimônio cultural.

Nota: ANA = Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. SNIRH = Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. SNIS = Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. PRODES = Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia. MMA = Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. IBAMA = Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. ICMBio = Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. SEEG = Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. ANM = Agência Nacional de Mineração. RAIS = Relação Anual de Informações Sociais. CEMPRE = Compromisso Empresarial para Reciclagem. PNUD = Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. SIM = Sistema de Informações sobre Mortalidade.

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

O conjunto inicial apresentou redundâncias, variações terminológicas e sobreposição conceitual. Foi realizada etapa de padronização e consolidação com base na equivalência conceitual, definição operacional e unidade de medida, agrupando indicadores que representavam o mesmo fenômeno e mantendo a rastreabilidade das fontes originais (Ibañez Iralde et al., 2024; Guarini et al., 2025).

Após a consolidação, obteve-se um conjunto de 148 indicadores, organizados nas cinco dimensões analíticas adotadas no estudo (Anexo). Nesse processo, os indicadores foram classificados segundo sua natureza operacional, de modo a compatibilizar a forma de mensuração com o tipo de dado disponível e sua função analítica. Foram adotadas três categorias: indicadores primários, correspondentes a variáveis diretamente observáveis em bases estatísticas ou institucionais; indicadores binários, que representam a presença ou ausência de condições ou instrumentos institucionais; e indicadores compostos, resultantes da agregação de duas ou mais variáveis elementares (OECD, 2008; Ayadi et al., 2024; Guarini et al., 2025).

2.3 Matriz de elegibilidade

A seleção dos indicadores foi conduzida por meio de uma matriz de elegibilidade, estruturada para avaliar cada variável com base em critérios explícitos de retenção. A utilização de critérios formais na seleção de indicadores é descrita na literatura como forma de garantir consistência e reprodutibilidade (Singh et al., 2012; Moldan, Janoušková & Hák, 2012).

A definição dos critérios considerou simultaneamente a pertinência conceitual e a viabilidade empírica dos indicadores, conforme abordagens aplicadas à avaliação de sustentabilidade em sistemas produtivos e contextos territoriais (Eslami et al., 2023; Jiskani et al., 2021). Foram adotados seis critérios: relevância regional, disponibilidade, comparabilidade, periodicidade, clareza metodológica e reprodutibilidade, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios de elegibilidade para seleção dos indicadores de sustentabilidade.

Table 2 - Eligibility criteria for the selection of sustainability indicators.

Critério	Definição operacional
Relevância regional	Capacidade do indicador de representar dinâmicas recorrentes em municípios mineradores amazônicos
Disponibilidade	Existência de dado acessível em fonte oficial ou institucional
Comparabilidade	Possibilidade de comparação padronizada entre municípios
Periodicidade	Existência de atualização periódica identificável
Clareza metodológica	Presença de definição, fórmula ou critério explícito
Reprodutibilidade	Possibilidade de reaplicação do indicador em outros municípios ou séries

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

Na avaliação dos indicadores, foram considerados a adequação à escala municipal, a existência de base de dados identificável e a consistência das unidades de medida, fatores necessários para comparabilidade entre municípios (OECD, 2008; Jiskani et al., 2021; Eslami et al., 2023).

Indicadores com sobreposição conceitual foram avaliados quanto à clareza metodológica e disponibilidade de dados, sendo mantidos aqueles com maior possibilidade de aplicação. Indicadores sem definição operacional ou sem fonte de dados identificável foram excluídos. Indicadores com limitações parciais de dados foram mantidos quando apresentaram relevância analítica e possibilidade de aplicação em parte dos municípios, considerando limitações recorrentes em dimensões como governança e cultura (Antwi et al., 2017; Agusdinata et al., 2022).

A aplicação da matriz consistiu na avaliação sistemática de cada indicador em relação aos critérios estabelecidos. A permanência no conjunto final exigiu atendimento simultâneo aos critérios mínimos definidos. Esse procedimento definiu o conjunto final de indicadores selecionados, cuja composição e distribuição entre dimensões são apresentadas na seção de resultados.

3. Resultados e Discussão

A aplicação da matriz de elegibilidade resultou na redução do conjunto inicial de 148 para 47 indicadores, correspondendo a uma taxa de retenção de 31,8%. Reduções dessa magnitude são recorrentes em processos de seleção de indicadores, nos quais a aplicação simultânea de critérios relacionados à disponibilidade de dados, comparabilidade territorial e operacionalização em escala local restringe substancialmente o conjunto inicial de variáveis (Singh et al., 2012; Valizadeh e Hayati, 2025). Estudos sobre harmonização de indicadores indicam que conjuntos preliminares frequentemente incluem métricas

conceitualmente relevantes, mas sem viabilidade empírica para aplicação em análises territoriais comparativas, especialmente em escala municipal (Ibañez Iralde et al., 2024; Guarini et al., 2025).

Em contextos mineradores, limitações adicionais decorrem da predominância de indicadores originalmente desenvolvidos para escalas produtivas, corporativas ou setoriais, cuja adaptação para avaliações territoriais apresenta restrições metodológicas e limitações de disponibilidade de dados (Fonseca, McCall e Duarte, 2019; Agusdinata et al., 2022). Estudos aplicados à sustentabilidade mineral indicam que métricas dependentes de modelagem indireta, dados não padronizados ou ausência de séries temporais consistentes tendem a apresentar baixa aplicabilidade em análises subnacionais (Eslami et al., 2023; Feil et al., 2025). A distribuição dos indicadores selecionados por dimensão, bem como as respectivas taxas de retenção em relação ao conjunto inicial, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição dos indicadores selecionados por dimensão e respectivas taxas de retenção.

Table 3 - Distribution of the selected indicators by dimension and their respective retention rates.

Dimensão	Inicial	Selecionados	Retenção (%)
Ambiental	65	15	23,1
Econômica	20	9	45,0
Social	40	15	37,5
Governança	17	8	47,1
Cultural	6	0	0,0
Total	148	47	31,8

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

As taxas de retenção variaram entre as dimensões analíticas, com menores valores na dimensão ambiental (23,1%) e maiores nas dimensões econômica (45,0%) e de governança (47,1%). A menor retenção observada na dimensão ambiental está associada à predominância, no conjunto inicial, de indicadores dependentes de modelagem, sensoriamento indireto ou escalas biofísicas incompatíveis com a disponibilidade de dados municipais. Estudos sobre avaliação da sustentabilidade indicam que métricas ambientais frequentemente apresentam maior complexidade operacional e menor padronização territorial quando comparadas a indicadores socioeconômicos e administrativos (Moldan, Janoušková & Hák, 2012; Singh et al., 2012).

As maiores taxas de retenção nas dimensões econômica e de governança estão associadas à maior disponibilidade de dados administrativos produzidos de forma sistemática por instituições públicas, condição que favorece comparabilidade territorial, continuidade temporal e reprodutibilidade metodológica em escala municipal (OECD, 2008; Feil et al., 2025). A dimensão social apresentou retenção intermediária (37,5%), associada à coexistência de indicadores amplamente padronizados com métricas dependentes de levantamentos irregulares ou escalas espaciais não compatíveis com análises municipais, limitação recorrente em sistemas territoriais de indicadores de sustentabilidade (Singh et al., 2012; Ibañez Iralde et al., 2024; Valizadeh e Hayati, 2025).

A ausência de indicadores na dimensão cultural está relacionada à limitada disponibilidade de dados padronizados e comparáveis em escala municipal, bem como à predominância de atributos qualitativos e contextuais, condição que restringe sua operacionalização em análises quantitativas territoriais (Ibañez Iralde et al., 2024; Guarini et al., 2025). Esse resultado também reflete a elevada variabilidade socioterritorial observada em municípios mineradores amazônicos, onde aspectos culturais frequentemente estão associados à presença de povos indígenas, comunidades tradicionais e formas específicas de organização social distribuídas de maneira heterogênea no território (Agusdinata et al., 2022; Athayde et al., 2017). Estudos aplicados à Amazônia indicam que transformações associadas à mineração podem afetar dinâmicas territoriais, modos de vida e relações socioculturais locais, aspectos frequentemente analisados por

abordagens qualitativas e com baixa disponibilidade de métricas padronizadas em escala municipal (Palacios et al., 2021; Sonter et al., 2017). Esse padrão evidencia limitações na operacionalização quantitativa da dimensão cultural e reforça a necessidade de desenvolvimento de indicadores compatíveis com a diversidade socioterritorial amazônica.

O conjunto final é composto predominantemente por indicadores primários e compostos derivados de bases secundárias, com baixa participação de indicadores binários. Predominam dados administrativos, geoespaciais e de monitoramento ambiental, com periodicidade majoritariamente anual e elevada observabilidade. Esse padrão é compatível com recomendações metodológicas que priorizam indicadores diretamente mensuráveis, comparáveis e passíveis de atualização periódica em análises territoriais de sustentabilidade (Meadows, 1998; OECD, 2008; Guarini et al., 2025).

3.1 Dimensão Ambiental

Os indicadores ambientais selecionados organizam-se em três eixos: uso de recursos, transformação do território e qualidade ambiental. Predominam métricas derivadas de dados geoespaciais, administrativos e de monitoramento ambiental, com elevada observabilidade e aplicação recorrente em avaliações territoriais da sustentabilidade (Li et al., 2017; Kucukvar et al., 2014; Yang et al., 2018; Silva et al., 2023). O conjunto apresenta predominância de variáveis relacionadas à cobertura e uso da terra, qualidade ambiental, recursos hídricos, resíduos sólidos e emissões, refletindo a priorização de indicadores compatíveis com monitoramento contínuo e comparabilidade em escala municipal (Charikinya et al., 2017; Eslami et al., 2023).

Em municípios mineradores da Amazônia, a retenção desses indicadores está associada à capacidade de representar alterações territoriais frequentemente relacionadas à expansão da atividade mineral. Estudos indicam que a mineração na região está associada a mudanças no uso da terra, expansão de áreas degradadas e pressão sobre ecossistemas florestais, aspectos diretamente relacionados aos indicadores selecionados no conjunto final (Sonter et al., 2017; Mataveli et al., 2022; Rudke et al., 2020). A predominância de métricas derivadas de sensoriamento remoto e monitoramento ambiental também reflete a maior disponibilidade de dados padronizados para variáveis biofísicas em escala municipal, condição recorrente em sistemas territoriais de avaliação ambiental (Charikinya et al., 2017; Eslami et al., 2023).

Os indicadores selecionados incorporam métricas associadas tanto a pressões ambientais quanto a estados do sistema, abrangendo alterações no uso da terra, emissões, resíduos sólidos e qualidade da água. Esse conjunto amplia a capacidade de representação das diferentes formas de degradação ambiental associadas à atividade mineradora e favorece análises integradas em escala territorial (Antwi et al., 2017; Devkota et al., 2021; Konare et al., 2023; Palacios et al., 2021). A inclusão de parâmetros físico-químicos da água complementa o conjunto ao incorporar indicadores sensíveis a alterações locais em corpos hídricos, frequentemente utilizados em programas de monitoramento ambiental e avaliação de impactos antrópicos (Chidiac et al., 2023; Zainurin et al., 2022). A Tabela 4 apresenta os indicadores ambientais selecionados, incluindo definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade.

Tabela 4 - Indicadores ambientais selecionados, com definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade em escala municipal.

Table 4 - Selected environmental indicators, including operational definition, type, data source, and periodicity at the municipal scale.

Indicador	Descrição operacional	Tipo	Fonte de dados	Periodicidade	Unidade
Consumo de água per capita	Consumo total de água no município dividido pela população residente	Primário	Dados administrativos	Anual	m ³ /hab/ano
Geração de	Quantidade total de resíduos	Primário	Dados	Anual	kg/hab/ano

resíduos sólidos per capita	sólidos gerados no município ajustada pela população		administrativos		
Área recuperada	Área total recuperada após atividades mineradoras no território municipal	Primário	Dados geoespaciais	Irregular	ha
Área degradada	Área total degradada por atividades antrópicas no território municipal	Primário	Dados geoespaciais	Anual	ha
Taxa de reciclagem de resíduos	Proporção de resíduos sólidos reciclados em relação ao total gerado no município	Primário	Dados administrativos	Irregular	%
Emissões de GEE per capita	Emissões totais de gases de efeito estufa no município ajustadas pela população	Primário	Dados modelados (SEEG)	Anual	tCO ₂ e/hab/ano
Cobertura de coleta de resíduos	Proporção da população atendida por serviços de coleta de resíduos sólidos	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Área protegida	Proporção do território municipal sob proteção legal	Primário	Dados geoespaciais	Anual	%
Cobertura florestal	Proporção do território municipal coberta por vegetação florestal	Primário	Dados geoespaciais	Anual	%
Taxa de desmatamento	Área anual desmatada no território municipal	Primário	Dados geoespaciais	Anual	km ² /ano
Focos de calor	Número anual de focos de calor registrados no território municipal	Primário	Dados geoespaciais	Anual	nº/ano
Condutividade elétrica da água	Condutividade elétrica média da água em corpos hídricos monitorados no município	Primário	Dados de monitoramento	Anual	µS/cm
pH da água	Potencial hidrogeniônico médio da água em corpos hídricos monitorados no município	Primário	Dados de monitoramento	Anual	-
Oxigênio dissolvido	Concentração média de oxigênio dissolvido em corpos hídricos monitorados no município	Primário	Dados de monitoramento	Anual	mg/L
Turbidez da água	Turbidez média da água em corpos hídricos monitorados no município	Primário	Dados de monitoramento	Anual	NTU

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

A composição final evidencia predominância de indicadores observáveis, baseados em dados administrativos, geoespaciais e de monitoramento ambiental, característica que favorece comparabilidade territorial, reprodutibilidade e aplicação em escala municipal (Charikinya et al., 2017; Eslami et al., 2023; OECD, 2008). A seleção priorizou variáveis com séries históricas disponíveis, atualização periódica e obtenção por metodologias consolidadas, critérios frequentemente utilizados na operacionalização de indicadores de sustentabilidade (Guarini et al., 2025). Em conjunto, os indicadores permitem captar

diferentes dimensões das alterações ambientais associadas à mineração, constituindo um conjunto aplicável a análises comparativas em municípios amazônicos (Sonter et al., 2017; Pinheiro et al., 2026).

3.2 Dimensão econômica

Os indicadores econômicos selecionados concentram-se em três eixos: estrutura produtiva, finanças públicas e dependência da atividade mineradora. Predominam métricas derivadas de bases administrativas e fiscais, com cobertura anual e elevada padronização institucional, condição que favorece comparabilidade territorial e aplicação em análises municipais de sustentabilidade (Rodrigues et al., 2021; Chen et al., 2021). O conjunto incorpora indicadores associados à geração de riqueza, estrutura produtiva, arrecadação pública e dinâmica do trabalho, frequentemente utilizados em avaliações territoriais da dependência econômica de atividades extrativas (Li et al., 2017; Yang e Guo, 2021; Shang et al., 2019; Oppon et al., 2023).

Em municípios mineradores da Amazônia, a retenção desses indicadores está associada à capacidade de representar padrões de especialização produtiva e dependência econômica relacionados à exploração de recursos naturais. Estudos indicam que a mineração tende a induzir crescimento econômico localizado, frequentemente acompanhado por concentração setorial e limitada diversificação produtiva (Antwi et al., 2017; Devkota et al., 2021). Evidências empíricas indicam que municípios com forte presença da atividade mineral apresentam elevada participação do setor extrativo no produto local e maior exposição a oscilações no mercado de commodities, condição diretamente relacionada à inclusão de indicadores de dependência econômica e diversificação produtiva no conjunto final (Mentis e Moonsammy, 2022; Singh et al., 2012; Guarini et al., 2025). A Tabela 5 apresenta os indicadores econômicos selecionados, incluindo definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade.

Tabela 5 – Indicadores econômicos selecionados, com definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade em escala municipal.

Table 5 – Selected economic indicators, including operational definition, type, data source and periodicity at the municipal scale.

Indicador	Descrição operacional	Tipo	Fonte de dados	Periodicidade	Unidade
PIB per capita	Produto Interno Bruto municipal dividido pela população residente	Primário	Dados administrativos	Anual	R\$/hab
Dependência da mineração no PIB	Participação da mineração no PIB municipal	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Receita pública per capita	Receita total municipal dividida pela população residente	Primário	Dados administrativos	Anual	R\$/hab
Emprego formal por setor econômico	Participação de vínculos formais por setor no total de empregos formais	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Consumo de energia per capita	Consumo total de energia elétrica dividido pela população residente	Primário	Dados administrativos	Anual	kWh/hab
Receita de CFEM	Valor total arrecadado de CFEM no município	Primário	Dados administrativos	Anual	R\$
Investimento em infraestrutura	Despesa pública municipal com infraestrutura	Primário	Dados administrativos	Anual	R\$
Proporção de compras públicas locais	Participação de fornecedores locais nos gastos públicos municipais	Primário	Dados administrativos	Irregular	%
Diversificação do PIB	Participação de setores não mineradores no PIB municipal	Primário	Dados administrativos	Anual	%

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

Indicadores como participação da mineração no PIB, arrecadação de CFEM e diversificação produtiva permitem representar o grau de especialização econômica e a influência da atividade mineral sobre a estrutura econômica municipal (Shang et al., 2019; Mentis & Moonsammy, 2022; Mota et al., 2017). Em contextos amazônicos, esses padrões estão frequentemente associados à baixa diversificação econômica e à maior vulnerabilidade a oscilações externas relacionadas ao mercado mineral (Roy et al., 2023; Cordella et al., 2023).

O conjunto também incorpora indicadores relacionados à capacidade fiscal municipal, circulação de renda e intensidade da atividade econômica, incluindo métricas de receita pública, transferências intergovernamentais, consumo energético e compras públicas locais. A inclusão dessas variáveis reflete a relevância da estrutura fiscal e da capacidade de internalização dos efeitos econômicos da mineração em territórios dependentes de atividades extrativas (Moldan, Janoušková & Hák, 2012; Singh et al., 2012; Meadows, 1998; OECD, 2008). O consumo de energia per capita é frequentemente utilizado como indicador indireto da intensidade da atividade econômica, enquanto a proporção de compras públicas locais permite representar, de forma indireta, a capacidade de inserção de fornecedores locais nas despesas públicas municipais e sua potencial contribuição para a circulação de recursos financeiros no território (Ibañez Iralde et al., 2024; Park e Kremer, 2017; Maldonado et al., 2019; Eslami et al., 2023).

A composição final evidencia predominância de indicadores derivados de bases administrativas e fiscais, condição que favorece disponibilidade de séries temporais, padronização metodológica e comparabilidade territorial em escala municipal (OECD, 2008; Guarini et al., 2025). Essas características ampliam a reprodutibilidade do conjunto e sua aplicação em análises comparativas da sustentabilidade econômica em municípios mineradores amazônicos.

3.3 Dimensão social

Os indicadores sociais selecionados organizam-se em três grupos: condições socioeconômicas, acesso a serviços básicos e características demográficas do território. Predominam métricas derivadas de bases administrativas, com atualização majoritariamente anual e elevada padronização institucional, condição que favorece comparabilidade territorial e aplicação em escala municipal (Li et al., 2017; Yang e Guo, 2021). O conjunto incorpora variáveis clássicas de bem-estar, desigualdade e acesso a serviços públicos, frequentemente utilizadas em avaliações territoriais das condições sociais e da distribuição de oportunidades (Falck & Spangenberg, 2014; Olalekan et al., 2023; Rivera et al., 2014).

Em municípios mineradores da Amazônia, a retenção desses indicadores está associada à capacidade de representar assimetrias entre crescimento econômico e condições sociais. Estudos indicam que a expansão da atividade mineral pode gerar aumento de renda e emprego formal sem que esses ganhos se traduzam proporcionalmente em melhorias nas condições de vida da população, resultando na persistência de desigualdades e vulnerabilidades sociais (Antwi et al., 2017; Devkota et al., 2021; Mancini e Sala, 2018). Evidências aplicadas à região amazônica apontam que o crescimento associado à mineração frequentemente ocorre de forma espacialmente concentrada, com distribuição desigual dos benefícios econômicos e limitações na melhoria de indicadores sociais (Agusdinata et al., 2022; Mota et al., 2017). A Tabela 6 apresenta os indicadores sociais selecionados, incluindo definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade.

Tabela 6 – Indicadores sociais selecionados, com definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade em escala municipal.

Table 6 – Selected social indicators, including operational definition, type, data source and periodicity at the municipal scale.

Indicador	Descrição operacional	Tipo	Fonte de dados	Periodicidade	Unidade
Densidade demográfica	População residente dividida pela área do município	Primário	Dados administrativos	Anual	hab/km ²
Taxa de pobreza	Proporção da população em situação de pobreza	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Taxa de desemprego	Proporção da população economicamente ativa desocupada	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Acesso à água potável	Proporção da população com acesso à água potável	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Trabalho infantil	Proporção de crianças em situação de trabalho infantil	Primário	Dados administrativos	Irregular	%
Proporção de emprego formal	Participação de trabalhadores com vínculo formal	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Mortalidade infantil	Número de óbitos infantis por mil nascidos vivos	Primário	Dados administrativos	Anual	‰
Cobertura da atenção primária à saúde	Proporção da população coberta por atenção básica	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Taxa de escolarização (6–14 anos)	Proporção de crianças matriculadas na escola	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Taxa de pobreza extrema	Proporção da população em extrema pobreza	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Taxa de homicídios	Número de homicídios por 100 mil habitantes	Primário	Dados administrativos	Anual	casos/100 mil
Habitação adequada	Proporção de domicílios adequados	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Renda per capita	Renda média por habitante	Primário	Dados administrativos	Anual	R\$/hab
Acesso ao esgotamento sanitário	Proporção da população com acesso a esgotamento sanitário	Primário	Dados administrativos	Anual	%
População rural	Proporção da população residente em área rural	Primário	Dados administrativos	Decenal	%

Fonte: Autores (2026).

Source: Authors (2026).

O conjunto selecionado permite representar diferentes dimensões das condições sociais em municípios mineradores amazônicos, incluindo acesso a serviços públicos, condições de vida e vulnerabilidade social. Estudos indicam que variáveis relacionadas a saneamento, saúde, escolarização e mercado de trabalho são amplamente utilizadas na avaliação das desigualdades sociais e da provisão de serviços essenciais em escala territorial (Antwi et al., 2017; Palacios et al., 2021; Chen et al., 2021; Prasad et al., 2022). Em municípios amazônicos, a disponibilidade desses serviços apresenta forte heterogeneidade espacial, frequentemente associada à dispersão populacional, limitações de infraestrutura e restrições institucionais (Guimarães et al., 2020).

A inclusão de variáveis relacionadas à pobreza, violência, trabalho infantil e distribuição espacial da população amplia a capacidade do conjunto de representar processos de exclusão social e desigualdade territorial em contextos marcados por baixa integração territorial e limitações no acesso a políticas públicas

(Agusdinata et al., 2022; Konare et al., 2023; Rodrigues et al., 2021). A predominância de indicadores derivados de bases administrativas nacionais favorece padronização metodológica, disponibilidade de séries temporais e comparabilidade territorial em análises municipais de sustentabilidade social (Eslami et al., 2023; Charikinya et al., 2017).

3.4 Dimensão de governança

Os indicadores de governança selecionados organizam-se em três eixos: capacidade institucional, gestão pública e estrutura fiscal. Predominam métricas baseadas em dados administrativos, com ênfase em indicadores observáveis e padronizados, condição que favorece comparabilidade territorial e aplicação em escala municipal. A exclusão de indicadores associados a práticas corporativas e métricas organizacionais reflete limitações de compatibilidade entre instrumentos voltados ao nível empresarial e análises territoriais aplicadas a unidades subnacionais (Charikinya et al., 2017; Eslami et al., 2023; Falck & Spangenberg, 2014).

Em municípios mineradores da Amazônia, a retenção desses indicadores está associada à capacidade de representar a atuação institucional do poder público na mediação dos efeitos territoriais da mineração. Estudos indicam que a capacidade administrativa municipal influencia diretamente a conversão das receitas provenientes da atividade mineral em infraestrutura, serviços públicos e mecanismos de controle ambiental (Agusdinata et al., 2022; Mota et al., 2017). Evidências sobre governança territorial em municípios mineradores da Amazônia apontam que diferenças na capacidade administrativa, estrutura institucional e planejamento público influenciam diretamente a implementação de instrumentos de gestão territorial e políticas municipais, especialmente em contextos marcados por dependência minerária e desigualdades territoriais (Enríquez, Formigosa e Câmara, 2025; Gumiero, 2023). A Tabela 7 apresenta os indicadores de governança selecionados, incluindo definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade.

Tabela 7 – Indicadores de governança selecionados, com definição operacional, tipo, fonte de dados e periodicidade em escala municipal.

Table 7 – Selected governance indicators, including operational definition, type, data source and periodicity at the municipal scale.

Indicador	Descrição operacional	Tipo	Fonte de dados	Periodicidade	Unidade
Transparência pública	Índice de transparência da gestão pública municipal	Composto	Dados administrativos	Anual	índice
Existência de plano diretor	Existência de plano diretor vigente no município	Binário	Dados administrativos	Irregular	sim/não
Existência de conselho ambiental	Existência de conselho ambiental ativo no município	Binário	Dados administrativos	Irregular	sim/não
Gasto ambiental e C&T per capita	Despesa municipal em gestão ambiental, ciência e tecnologia dividida pela população	Primário	Dados administrativos	Anual	R\$/hab
Cobertura do CAR	Proporção da área cadastrada no Cadastro Ambiental Rural em relação à área passível de cadastramento no município	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Dependência de transferências	Participação das transferências intergovernamentais na receita total municipal	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Participação da CFEM na receita	Proporção da receita municipal proveniente da CFEM	Primário	Dados administrativos	Anual	%
Gasto com gestão de riscos e desastres per capita	Despesa municipal em gestão de riscos e desastres dividida pela população	Primário	Dados administrativos	Irregular	R\$/hab

Fonte: Autores (2026).
Source: Authors (2026).

O conjunto selecionado evidencia a centralidade da capacidade institucional municipal na mediação dos efeitos territoriais da mineração em municípios amazônicos. A retenção predominante de indicadores relacionados à gestão pública, planejamento territorial e estrutura fiscal reflete a maior disponibilidade de dados administrativos padronizados para avaliação da atuação estatal em escala municipal. Em contextos mineradores, diferenças na capacidade administrativa e financeira dos municípios influenciam diretamente a implementação de políticas públicas, o ordenamento territorial e a gestão de pressões socioambientais associadas à atividade mineral (Enríquez, Formigosa e Câmara, 2025; Gumiero, 2023).

A composição final também evidencia limitações na operacionalização de dimensões qualitativas da governança, especialmente aquelas relacionadas à efetividade institucional e à participação social, cujas métricas apresentam menor disponibilidade de dados comparáveis em escala municipal. Predominam, assim, indicadores observáveis derivados de bases administrativas nacionais, condição que favorece comparabilidade territorial, disponibilidade de séries temporais e reprodutibilidade metodológica em análises municipais de governança (Eslami et al., 2023; Charikinya et al., 2017).

4. Conclusão

O estudo resultou na seleção e operacionalização de 47 indicadores de sustentabilidade aplicáveis a municípios mineradores da Amazônia, organizados nas dimensões ambiental, econômica, social e de governança. A aplicação dos critérios de elegibilidade evidenciou predominância de indicadores observáveis, derivados principalmente de bases administrativas, geoespaciais e sistemas institucionais de monitoramento, com periodicidade majoritariamente anual e compatibilidade operacional com a escala municipal. Esse padrão reflete a priorização de métricas passíveis de comparação territorial, atualização periódica e reprodutibilidade metodológica, aspectos considerados centrais em sistemas territoriais de avaliação da sustentabilidade.

Os resultados indicam que a retenção dos indicadores variou entre as dimensões analíticas em função da disponibilidade, padronização e compatibilidade das informações com análises municipais. Indicadores econômicos e de governança apresentaram maiores taxas de retenção devido à ampla disponibilidade de dados administrativos estruturados, enquanto a dimensão ambiental concentrou maior exclusão de métricas dependentes de modelagem, sensoriamento indireto ou escalas biofísicas não compatíveis com bases municipais. A ausência de indicadores culturais evidencia limitações persistentes na operacionalização quantitativa de atributos socioculturais em sistemas comparativos de indicadores, especialmente em contextos amazônicos marcados por elevada diversidade socioterritorial e presença de povos indígenas e comunidades tradicionais.

A configuração final do conjunto evidencia que a aplicação de indicadores de sustentabilidade em municípios mineradores depende não apenas de relevância conceitual, mas também da existência de bases de dados compatíveis com análises territoriais padronizadas. Nesse sentido, o estudo contribui para reduzir a distância entre proposições teóricas de indicadores e sua viabilidade empírica em escala municipal, fornecendo um conjunto operacional aplicável a análises comparativas da sustentabilidade em contextos mineradores amazônicos.

Os resultados também evidenciam limitações relacionadas à disponibilidade e padronização de informações territoriais, especialmente para dimensões associadas a aspectos culturais, participação social e efetividade institucional. Esses aspectos indicam a necessidade de desenvolvimento de métricas operacionais capazes de incorporar maior diversidade socioterritorial em avaliações quantitativas da sustentabilidade. Estudos futuros podem avançar na aplicação empírica do conjunto selecionado, bem como no

desenvolvimento de indicadores compostos e métodos de agregação capazes de apoiar avaliações integradas da sustentabilidade em municípios mineradores da Amazônia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e pelo fomento à pesquisa.

6. Referências

- Agusdinata, D. B., Liu, W., Sulisty, S., LeBillon, P., & Wegner, J. (2022). Evaluating sustainability impacts of critical mineral extractions: Integration of life cycle sustainability assessment and SDGs frameworks. *Resources Policy*, 77, 102742.
- Antwi, E. K., Owusu-Banahene, W., Boakye-Danquah, J., Mensah, R., Tetteh, J. D., & Aboagye-Debrah, K. (2017). Sustainability assessment of mine-affected communities in Ghana: Towards ecosystems and livelihood restoration. *Sustainable Development*, 25(5), 361-374.
- Athayde, S., Silva-Lugo, J., Schmink, M., Kaiabi, A., & Heckenberger, M. (2017). Reconnecting art and science for sustainability: learning from indigenous knowledge through participatory action-research in the Amazon. *Ecology and Society*, 22(2).
- Ayadi, H., Benaissa, M., Hamani, N., & Kermad, L. (2024). Selecting indicators to assess the sustainability of urban freight transport using a multi-criteria analysis. *Logistics*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.3390/logistics8010012>
- Charikinya, E., Robertson, J., Platts, A., Becker, M., Lamberg, P., & Bradshaw, D. (2017). Integration of mineralogical attributes in evaluating sustainability indicators of a magnetic separator. *Minerals Engineering*, 107, 53-62.
- Chen, P., Zhang, L., Wang, Y., Fang, Y., Zhang, F., & Xu, Y. (2021). Environmentally friendly utilization of coal gangue as aggregates for shotcrete used in the construction of coal mine tunnel. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00751.
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): History, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349-395.
- Cordella, M., Horn, R., Hong, S. H., Bianchi, M., Isasa, M., Harmens, R., et al. (2023). Addressing sustainable development goals in life cycle sustainability assessment: Synergies, challenges and needs. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137719.
- Devkota, K. P., Devkota, M., Paudel, G. P., & McDonald, A. J. (2021). Coupling landscape-scale diagnostics surveys, on-farm experiments, and simulation to identify entry points for sustainably closing rice yield gaps in Nepal. *Agricultural Systems*, 192, 103182.

- Enríquez, M. A., Formigosa, C. D. A. C., & Câmara, T. R. (2025). O desafio da governança de municípios mineradores na Amazônia Oriental Brasileira no contexto da transição energética. *Anais de Constitucionalismo, Transnacionalidade e Sustentabilidade*, 15(1), 235-251.
- Eslami, Y., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2023). An indicator-based sustainability assessment framework in manufacturing organisations. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, 100516.
- Falck, W. E., & Spangenberg, J. H. (2014). Selection of social demand-based indicators: EO-based indicators for mining. *Journal of Cleaner Production*, 84, 193-203.
- Feil, A. A., Zapata, A. L. G., Lazo, M. A. P., Rosa, M. C. d., Oliveira, J. d., & Schreiber, D. (2025). A set of sustainability indicators for Brazilian small and medium-sized non-alcoholic beverage industries. *Sustainability*, 17(15), 6794. <https://doi.org/10.3390/su17156794>
- Fonseca, A., McCall, J., & Duarte, F. (2019). Methodological challenges in assessing the sustainability of mining regions. *Resources Policy*, 62, 241-252.
- Guarini, M. R., Ghiani, G., Sica, F., & Tajani, F. (2025). Which minimum indicator set of sustainability may be utilized in urban assessments? Meta-evidence gained through a systematic literature review. *Sustainability*, 17(7), 3221. <https://doi.org/10.3390/su17073221>
- Guimarães, A. F., Barbosa, V. L. M., Silva, M. P. D., Portugal, J. K. A., Reis, M. H. D. S., & Gama, A. S. M. (2020). Acesso a serviços de saúde por ribeirinhos de um município no interior do estado do Amazonas, Brasil. *Revista Pan-Amazônica de Saúde*, 11.
- Gumiero, R. G. (2023). Preâmbulo entre a modernização da mineração e o planejamento territorial na Amazônia: O caso da habitação e vilas rurais em Canaã dos Carajás-PA. *Redes. Revista do Desenvolvimento Regional*, 28, 1-26.
- Ibañez Iralde, N. S., Lecocq, E. M., Pascual, J., Martí Audí, N., & Salom, J. (2024). Harmonising indicators to report sustainable development goals and sustainable energy and climate action plan: Systemic analysis of existing regional and city indicators sets. *Sustainability*, 16(18), 7943. <https://doi.org/10.3390/su16187943>
- Jiskani, I. M., Cai, Q., Zhou, W., & Shah, S. A. A. (2021). Green and climate-smart mining: A framework to analyze open-pit mines for cleaner mineral production. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123322.
- Konare, Z. M., Ajayi, D. D., Ba, S., & Aremu, A. K. (2023). Application of life cycle sustainability assessment (LCSA) in the gold mining sector: A systematic review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(6), 684-703.
- Kucukvar, M., Egilmez, G., & Tatari, O. (2014). Sustainability assessment of US final consumption and investments: Triple-bottom-line input-output analysis. *Journal of Cleaner Production*, 81, 234-243.
- Li, J., Zhang, Y., Du, D., & Liu, Z. (2017). Improvements in the decision making for cleaner production by data mining: Case study of vanadium extraction industry using weak acid leaching process. *Journal of Cleaner Production*, 143, 582-597.

- Maldonado, T. V., Panhoca, L., & Allievi, F. (2019). MuSIASEM analysis structure proposal for micronarratives on extractive productive chains in the Amazon context. *Ecological Indicators*, 106, 105509.
- Mancini, L., & Sala, S. (2018). Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 57, 98-111.
- Mataveli, G., Chaves, M., Guerrero, J., Escobar-Silva, E. V., Conceição, K., & de Oliveira, G. (2022). Mining is a growing threat within indigenous lands of the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 14(16), 4092.
- Meadows, D. H. (1998). *Indicators and information systems for sustainable development*. Hartland: The Sustainability Institute.
- Mentis, A., & Moonsammy, S. (2022). A critical assessment of Guyana's sustainability pathway: Perspectives from a developing extractive economy. *Resources Policy*, 76, 102554.
- Moldan, B., Janoušková, S., & Hák, T. (2012). How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological Indicators*, 17, 4-13.
- Mota, J., Maneschy, M. C., Souza-Filho, P. W., Navarro Torres, V. F., de Siqueira, J. O., dos Santos, J. F., & Matlaba, V. (2017). Uma nova proposta de indicadores de sustentabilidade na mineração. *Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate*, 8(2), 15.
- OECD. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris: OECD Publishing.
- Olalekan, A. S., Adewoye, S. O., Henry, S. O., & Raimi, M. O. (2023). Comprehensive understanding of hydrogeochemical evaluation of seasonal variability in groundwater quality dynamics in the gold mining areas of Osun State, Nigeria. *International Journal of Hydrology*, v. 7, n. 5, p. 206-220, 2023.
- Oppon, E., Richter, J. S., Koh, S. L., & Nabayiga, H. (2023). Macro-level economic and environmental sustainability of negative emission technologies: Case study of crushed silicate production for enhanced weathering. *Ecological Economics*, 204, 107636.
- Palacios, L., Espí Rodríguez, J. A., & Romero Martinez, P. (2021). Economic, technological and sustainability-based qualifications with reference to Europe: Iberia's new metal mining projects. *Mineral Economics*, 34(2), 277-304.
- Park, K., & Kremer, G. E. O. (2017). Text mining-based categorization and user perspective analysis of environmental sustainability indicators for manufacturing and service systems. *Ecological Indicators*, 72, 803-820.
- Pinheiro, C. P. S., & Braga, C. E. S. (2026). Tipologia dos estudos sobre mineração na Amazônia oriental: uma análise bibliométrica. *Revista Multidebates*, v.10, n.1.

- Pinheiro, J. V., Martins, W. B. R., Siqueira-Gay, J., Villén-Pérez, S., & Giglio, V. J. (2026). Ecological impacts of mining in the Amazon: Thematic trends and research gaps. *Environmental Management*, 76(4), 112.
- Prasad, V., Bandyopadhyay, G., Adhikari, K., & Gupta, S. (2022). An integrated framework for prioritizing sustainability indicators for the mining sector with a multicriteria decision-making technique. *Operations research forum*, 4, 5.
- Rivera, S. J., Minsker, B. S., Work, D. B., & Roth, D. (2014). A text mining framework for advancing sustainability indicators. *Environmental Modelling & Software*, 62, 128-138.
- Rodrigues, L., da Silva Neves, S. M. A., Schaffrath, V. R., & Kreitlow, J. P. (2021). Indicadores de sustentabilidade ambiental sistematizados pelo modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) na Bacia Hidrográfica do Alto Iguaçu, PR. *Ra'e Ga*, 50, 62-84.
- Roy, P., Hossain, M. N., Uddin, S. M., & Hossain, M. M. (2023). Unraveling the sustainability aspects of coal extraction and use in Bangladesh using material flow analysis and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135895.
- Rudke, A. P., de Souza, V. A. S., Dos Santos, A. M., Xavier, A. C. F., Rotunno Filho, O. C., & Martins, J. A. (2020). Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS-and remote sensing-based assessment. *Journal of Environmental Management*, 263, 110392.
- Shang, C., Wu, T., Huang, G., & Wu, J. (2019). Weak sustainability is not sustainable: Socioeconomic and environmental assessment of Inner Mongolia for the past three decades. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 243-252.
- Silva, L. D., Barbosa, J. R. R., Vieira, I. C. G., & Ferreira, A. D. M. (2023). Sustentabilidade urbana: Avanços e desafios na Região de Integração Baixo Amazonas, Pará, Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 62, 81921.
- Singh, R. K. et al. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15(1), 281-299.
- Sonter, L. J., Herrera, D., Barrett, D. J., Galford, G. L., Moran, C. J., & Soares-Filho, B. S. (2017). Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 8(1), 1013.
- Valizadeh, N., & Hayati, D. (2025). Formulating indicator selection and composite index validation and application system for agricultural sustainability assessment. *Results in Engineering*, 28, 106978.
- Yang, J., & Guo, L. (2021). Dynamic evaluation of water utilization efficiency in large coal mining area based on life cycle sustainability assessment theory. *Geofluids*, 2021(1), 7793988.
- Yang, Y., Erskine, P. D., Lechner, A. M., Mulligan, D., Zhang, S., & Wang, Z. (2018). Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 178, 353-362.

Zainurin, S. N., Wan Ismail, W. Z., Mahamud, S. N. I., Ismail, I., Jamaludin, J., Ariffin, K. N. Z., & Wan Ahmad Kamil, W. M. (2022). Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14080.