



## Avaliação da Sustentabilidade na Mineração: Um Índice Socioambiental para Minas Gerais

Mateus Rafael de Souza<sup>1</sup>  
Melquesedeque Sage Brilhante<sup>2</sup>  
Rafael Faria de Abreu Campos<sup>3</sup>

**Resumo:** A mineração é uma atividade econômica central em Minas Gerais, responsável por 44% da produção mineral brasileira em 2023, mas seus impactos socioambientais, agravados pelos desastres de Mariana, em 2015, e de Brumadinho, em 2019, demandam práticas mais sustentáveis. Este estudo propõe o Índice de Sustentabilidade na Mineração (ISM), um índice composto que avalia a sustentabilidade da atividade mineral em 223 municípios mineiros, selecionados por receberem Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) entre 2010 e 2020. O ISM integra três dimensões – econômica, ambiental e social – com foco na distribuição equitativa dos *royalties* da CFEM, que concentrou 81% da arrecadação em apenas 27 municípios em 2023. Inspirado na metodologia de Viana (2012), o ISM utiliza sete indicadores normalizados pela técnica min.-max.: CFEM per capita e investimento em lavra *per capita* (econômico); área de mineração, desmatamento, número de minas e emissões de gases de efeito estufa per capita (ambiental); e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM (social). A ponderação atribui 40% ao componente ambiental, 30% ao econômico e 30% ao social, refletindo a criticidade dos impactos ambientais no estado. A aplicação do ISM revelou uma média estadual de 0,247, indicando baixa sustentabilidade, com forte assimetria: a maioria dos municípios apresentou valores abaixo de 0,3, enquanto poucos, como São Gonçalo do Rio Abaixo (ISM acima de 0,5), destacaram-se pela capacidade de mitigar impactos e distribuir benefícios. A análise por dimensão mostrou desigualdades na arrecadação da CFEM e baixo reinvestimento em lavra, enquanto impactos ambientais, como desmatamento (12% da área degradada associada à mineração), predominaram. Em uma análise temporal, o Norte de Minas apresentou melhora de 30%, influenciada pela Lei n.º 13.540/2017, que ampliou a distribuição da CFEM. Os resultados corroboram a literatura, como Rezende (2016), e Leão e Rabelo (2023), que apontam desequilíbrios entre ganhos econômicos concentrados e danos socioambientais difusos. A pesquisa contribui com uma ferramenta analítica para políticas públicas, promovendo alocação eficiente de recursos e práticas sustentáveis. Alinhado à Economia Ecológica e à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), o ISM oferece um instrumento para monitorar e comparar a sustentabilidade da mineração, com potencial de adaptação a outros contextos.

<sup>1</sup> Graduado em Economia pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: [matheusrafael.ds@gmail.com](mailto:matheusrafael.ds@gmail.com)

<sup>2</sup> Mestre em Economia pela Universidade Federal de Viçosa e Pesquisador com Bolsa de Desenvolvimento em Ciência, Tecnologia e Inovação – Fapemig APQ-02012-22.

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Economia na Universidade Federal de Viçosa.

**Palavras-chave:** Índice de Sustentabilidade na Mineração; Economia Ambiental; Desenvolvimento Sustentável; Indicadores Compostos.

**Código JEL:** Q56, R11

**Área Temática:** 7.3 Inovação, desenvolvimento e sustentabilidade

### **Sustainability Assessment in Mining: A Socio-Environmental Index for Minas Gerais**

**Abstract:** Mining is a key economic activity in Minas Gerais, accounting for 44% of Brazilian mineral production in 2023, but its socio-environmental impacts, exacerbated by the disasters in Mariana in 2015 and Brumadinho in 2019, call for more sustainable practices. This paper proposes the Mining Sustainability Index (ISM), a composite index that assesses the sustainability of mineral activity in 223 municipalities in Minas Gerais, selected because they received Financial Compensation for Mineral Exploration (CFEM) between 2010 and 2020. The ISM integrates three dimensions – economic, environmental, and social – with a focus on the equitable distribution of CFEM royalties, which concentrated 81% of revenue in only 27 municipalities in 2023. Inspired by the methodology of Viana (2012), the ISM uses seven indicators normalized by the min-max technique: CFEM per capita and investment in mining per capita (economic); mining area, deforestation, number of mines, and greenhouse gas emissions per capita (environmental); and Municipal Human Development Index – IDHM (social). The weighting assigns 40% to the environmental component, 30% to the economic component, and 30% to the social component, reflecting the criticality of environmental impacts in the state. The application of the ISM revealed a state average of 0.247, indicating low sustainability, with strong asymmetry: most municipalities had values below 0.3, while a few, such as São Gonçalo do Rio Abaixo (ISM above 0.5), stood out for their ability to mitigate impact.

**Keywords:** Mining Sustainability Index; Environmental Economics; Sustainable Development; Composite Indicators.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento do projeto Demanda Universal FAPEMIG: APQ-02012-22.

## 1. Introdução

A mineração é uma atividade central para a economia brasileira, especialmente em Minas Gerais, que historicamente se destaca desde o ciclo do ouro no século XVIII até a modernização promovida pela Companhia Vale do Rio Doce, em 1942. Em 2023, o estado respondeu por 44% da produção mineral do país, contribuindo com 2,5% do PIB nacional e 32% do saldo da balança comercial brasileira (ANM, 2023; IBRAM, 2024). Apesar desses benefícios econômicos, como a arrecadação de royalties via Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) e a geração de empregos, a mineração gera impactos ambientais (desmatamento, poluição) e sociais (desigualdades regionais, conflitos com comunidades) significativos, além de prejudicar outros setores da economia, como agricultura e turismo, devido à competição por recursos naturais e à degradação ambiental (Rezende, 2016; Zhou, 2023; Auty, 1993; Eggert, 2001).

A dependência econômica da mineração pode levar à "doença holandesa", em que a valorização da moeda local encarece exportações de outros setores, reduzindo sua competitividade (Sachs; Warner, 2001). Além disso, a alocação intensiva de capital e mão de obra para a mineração pode limitar o desenvolvimento de atividades econômicas diversificadas, perpetuando vulnerabilidades regionais (Tost et al., 2020).

Os rompimentos das barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidenciaram essas fragilidades e reforçaram a urgência por práticas mais sustentáveis no setor (Porto, 2016). A sustentabilidade na mineração exige um equilíbrio entre as dimensões econômica, ambiental e social, conforme propõem os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

Especificamente, o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico) destaca a importância de promover o crescimento econômico inclusivo e sustentável, com geração de empregos e reinvestimento de recursos, como os royalties da CFEM, em atividades produtivas (Tost et al., 2020). O ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 15 (Vida Terrestre) abordam a gestão sustentável de recursos naturais, redução de impactos ambientais, como desmatamento, e proteção da biodiversidade, diretamente relacionados aos desafios da mineração em Minas Gerais, onde 12% da área degradada está associada à atividade (MapBiomass, 2023). Já o ODS 10 (Redução das Desigualdades) enfatiza a equidade na distribuição de benefícios econômicos, alinhando-se à proposta do ISM de avaliar a justiça distributiva dos royalties (Viana, 2012). Esses objetivos reforçam a necessidade de práticas que integrem eficiência econômica, mitigação ambiental e bem-estar social.

Nesse contexto, índices compostos como o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e indicadores que relacionam questões ambientais, sociais e de governança (em inglês, Environmental, Social, and Governance – ESG) vêm sendo utilizados para mensurar impactos, mas ainda carecem de ferramentas metodológicas que integrem essas dimensões com foco específico na distribuição dos benefícios gerados pela atividade mineradora.

Essa lacuna metodológica se torna especialmente relevante diante do problema da forte concentração da CFEM: em 2023, apenas 27 municípios mineiros concentraram 81% da arrecadação (Leão; Rabelo, 2023). A assimetria revela que a mineração, embora lucrativa, não distribui seus ganhos de forma equitativa entre os territórios afetados, demandando instrumentos analíticos que captem essa desigualdade.

Para suprir essa limitação, este estudo propõe o Índice de Sustentabilidade na Mineração (ISM), um índice composto que avalia o grau de sustentabilidade da atividade mineral em nível municipal, considerando os impactos econômicos, ambientais e sociais, com ênfase na eficiência e justiça distributiva dos *royalties* da CFEM. Inspirado na metodologia de Viana (2012), o ISM é adaptado ao contexto mineiro, buscando captar a diversidade socioambiental e econômica entre os municípios mineradores.

A aplicação do ISM é feita em uma amostra de 223 municípios de Minas Gerais, selecionados com base em um critério objetivo: todos receberam repasses de CFEM em pelo menos um ano entre 2010 e 2020. Esse recorte, amparado na Lei n.º 13.540/2017, inclui tanto municípios com lavra direta quanto aqueles afetados por etapas secundárias da cadeia mineral (beneficiamento, transporte, disposição de rejeitos), refletindo o caráter distributivo do estudo. A figura 1 mostra a posição geográfica de cada um dos municípios selecionados.

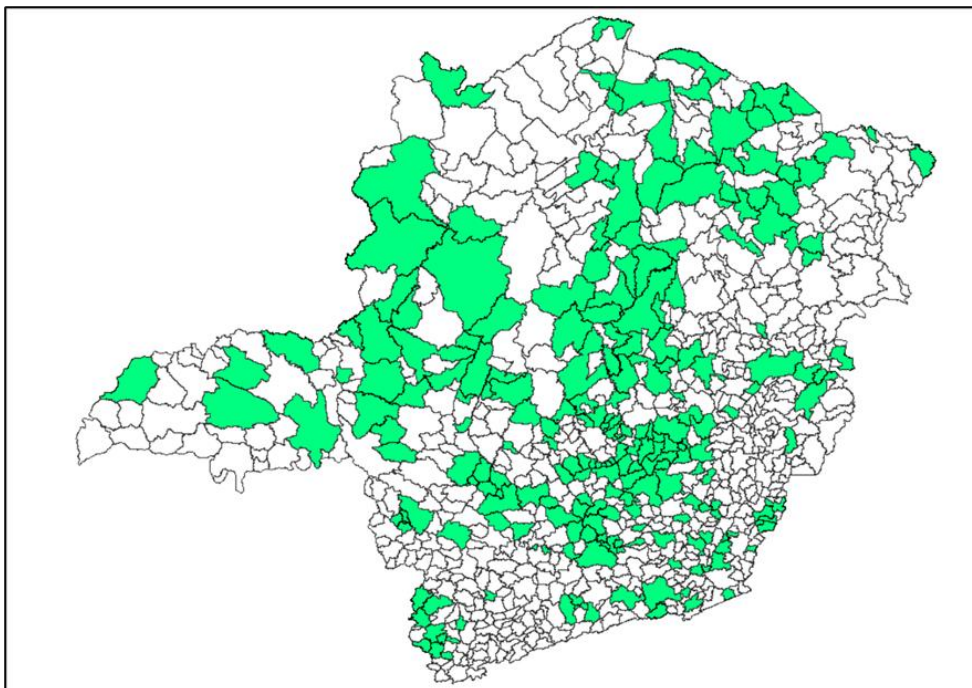


Figura 1. Distribuição geográfica dos municípios receptores do CFEM no estado de Minas Gerais no período 2010-2020  
Fonte: Elaboração própria

A partir disso, o problema de pesquisa que orienta este estudo é: como mensurar a sustentabilidade da atividade mineradora nos municípios de Minas Gerais, considerando seus impactos socioambientais e a distribuição dos benefícios econômicos, especialmente da CFEM?

O objetivo geral é construir e aplicar o ISM para avaliar comparativamente a sustentabilidade da mineração em Minas Gerais entre 2010 e 2020. Os objetivos específicos são: i. construir o ISM com base em indicadores normalizados e agregados em três dimensões – econômica, ambiental e social; ii. analisar os impactos da mineração nos municípios selecionados; e iii. comparar o desempenho dos municípios, identificando boas práticas, padrões regionais e áreas críticas.

A contribuição desta pesquisa é dupla: responde a um problema empírico, os impactos assimétricos da mineração e a desigualdade no repasse da CFEM, e a uma lacuna metodológica, ao propor um índice focado no aspecto distributivo da sustentabilidade minerária. Alinhada aos princípios da Economia Ecológica (Cavalcanti, 2010), este estudo oferece uma ferramenta analítica para apoiar políticas públicas, orientar a alocação de recursos e promover uma mineração mais equitativa e sustentável em Minas Gerais.

Deste modo, uma discussão acerca da mineração mineira é apresentada na próxima seção. Posteriormente, o processo metodológico para contemplar os objetivos é exposto e, em consequente, os resultados são relatados, bem como uma discussão acerca de seus efeitos. Por fim, a quinta seção expõe as conclusões obtidas.

## 2. Mineração (in)Sustentável em Minas Gerais

A mineração, embora seja pilar da economia brasileira, impõe desafios significativos ao desenvolvimento sustentável, especialmente em estados como Minas Gerais, onde a atividade é intensiva. As raízes históricas da mineração em Minas Gerais remontam ao século XVIII, com o ciclo do ouro, que estruturou a economia colonial e moldou o desenvolvimento regional (Silva, 1995). A criação da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) em 1942 marcou a modernização do setor, consolidando o Brasil como um dos maiores produtores globais de minério de ferro, ouro e nióbio (IBRAM, 2024). Em 2023, a mineração contribuiu com 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, sendo Minas Gerais responsável por 44% da produção mineral brasileira, com arrecadação de R\$ 3 bilhões em Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) (ANM, 2023). Esse montante evidencia a relevância econômica do setor, que sustenta empregos e finanças públicas em diversos municípios mineiros. Contudo, a concentração da CFEM em poucos municípios, como Itabira e Conceição do Mato Dentro, que juntos responderam por 40% da arrecadação em 2023, revela

desigualdades regionais que desafiam a sustentabilidade econômica (Leão; Rabelo, 2023).

Sob a perspectiva econômica, a mineração impulsiona economias locais por meio da geração de empregos diretos e indiretos, renda e tributos. Leão e Rabelo (2023) destacam os efeitos de encadeamento do setor, como o estímulo a cadeias produtivas de transporte e serviços, mas alertam que a concentração de royalties em poucos municípios limita a diversificação econômica. Por exemplo, em 2023, 81% da CFEM foi distribuída entre apenas 27 dos 223 municípios mineiros analisados neste estudo, agravando vulnerabilidades regionais. Monteiro (2005) argumenta que a dependência de royalties, como a CFEM, expõe municípios a flutuações nos preços internacionais de minerais, como ocorreu na crise de commodities de 2014-2016, que reduziu a arrecadação em 30% em Minas Gerais.

Internacionalmente, Auty (1993) introduz o conceito de "maldição dos recursos", sugerindo que economias dependentes de recursos minerais enfrentam dificuldades para diversificar suas bases produtivas, um fenômeno conhecido como "doença holandesa" (Sachs; Warner, 2001). Esses autores apontam que a valorização da moeda local devido às exportações minerais encarece outros setores, como agricultura e turismo, comprometendo sua competitividade. Tost et al. (2020) reforçam que a sustentabilidade econômica da mineração depende do reinvestimento de royalties em políticas de longo prazo, como educação e infraestrutura, para mitigar essas vulnerabilidades.

Os impactos ambientais da mineração são amplamente documentados na literatura e representam um dos maiores desafios à sustentabilidade. Rezende (2016) destaca o desmatamento, a poluição hídrica e a degradação do solo como consequências diretas da atividade em Minas Gerais, onde 12% da área degradada em 2023 foi atribuída à mineração (MapBiomias, 2023). Os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que resultaram em 270 mortes e danos ambientais irreversíveis, como a contaminação do rio Doce e Paraopeba, evidenciam os riscos extremos do setor (Porto, 2016; Zhouri, 2023).

Internacionalmente, Lèbre et al. (2024) demonstram que a mineração em áreas protegidas amplifica emissões de gases de efeito estufa (GEE) e ameaça a biodiversidade, com impactos que persistem por décadas. Mancini e Sala (2018) propõem indicadores ambientais, como área minerada e GEE per capita, para avaliar esses impactos, uma abordagem incorporada ao ISM. A literatura também aponta conflitos pelo uso do solo, especialmente em regiões próximas a unidades de conservação, como a Serra do Gandarela, onde a mineração compete com a preservação ambiental (Farias, 2002).

Do ponto de vista social, a mineração pode agravar desigualdades e gerar tensões com comunidades locais. Zhouri (2023) argumenta que o licenciamento de grandes empreendimentos em Minas Gerais frequentemente desconsidera os direitos das comunidades atingidas, resultando em deslocamentos forçados e perda de meios de subsistência. Enríquez (2009) questiona a viabilidade de uma mineração sustentável sem mecanismos robustos de redistribuição de benefícios e inclusão social, como programas de capacitação profissional e melhoria da infraestrutura comunitária.

Mallqui, Lima e Bortoluzzi (2021) observam que, embora algumas mineradoras implementem iniciativas sociais, sua adoção em Minas Gerais é incipiente, com apenas 15% dos municípios analisados possuindo programas estruturados em 2020. Internacionalmente, Franks et al. (2014) destacam que a mineração pode exacerbar desigualdades regionais quando os benefícios econômicos não são redistribuídos de forma equitativa, um problema evidente na concentração da CFEM em Minas Gerais.

A sustentabilidade na mineração exige a integração das dimensões econômica, ambiental e social, um princípio central da Economia Ecológica. Cavalcanti (2010) argumenta que os recursos naturais são finitos e devem ser geridos com responsabilidade, priorizando o bem-estar intergeracional. A Agenda 2030 da ONU reforça esse paradigma, com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), 12 (Consumo e Produção Responsáveis), 15 (Vida Terrestre) e 10 (Redução das Desigualdades) sendo particularmente relevantes para a mineração (ONU, 2015).

Esses objetivos orientam a construção do ISM, que alinha indicadores às metas de crescimento inclusivo, gestão sustentável de recursos e equidade. Práticas de governança corporativa, como os princípios ESG (ambiental, social e governança), têm sido adotadas por mineradoras globais, como Vale, BHP e Rio Tinto, com metas de descarbonização e preservação ambiental (Moraes, 2023). Contudo, Cunha, Guedes e Earp (2019) destacam a exclusão da Vale do Índice de Sustentabilidade

Empresarial (ISE) da B3 após os desastres de Mariana e Brumadinho, evidenciando lacunas na implementação de ESG no Brasil. Instrumentos financeiros, como os títulos verdes, oferecem oportunidades para financiar práticas sustentáveis, mas sua adoção no setor mineral brasileiro ainda é limitada, com apenas 5% dos investimentos em mineração associados a financiamentos verdes em 2022 (Pinto; Stella; Moutinho, 2014). Tecnologias como blockchain e inteligência artificial também emergem como ferramentas para rastreabilidade e monitoramento de impactos, embora seu uso no Brasil seja incipiente (IMPACTSCOPE, 2023).

Para avaliar a sustentabilidade da mineração, índices compostos são amplamente utilizados. Viana (2012) propõe um índice com foco distributivo, integrando CFEM per capita, desmatamento e IDHM, que serviu de base para o ISM. Internacionalmente, Davalos et al. (2017) defendem a normalização de indicadores para comparações espaciais e temporais, enquanto Laurence (2011) sugere métricas de eficiência, como CFEM por área impactada. Endl et al. (2023) propõem índices específicos para minerais, mas, dada a diversidade mineral de Minas Gerais, o ISM foi projetado como uma ferramenta ampla, adaptável e com foco na distribuição equitativa dos benefícios da CFEM. Mancini e Sala (2018) influenciaram a escolha de indicadores ambientais, enquanto Tost *et al.* (2020) reforçam a necessidade de integrar múltiplas dimensões.

A literatura revisada oferece fundamentos robustos para a construção do ISM, que se diferencia por sua abordagem integrada e contextualizada. Diferentemente de índices genéricos, o ISM incorpora indicadores específicos, como CFEM per capita, área minerada e IDHM, que refletem os desafios de Minas Gerais, incluindo a concentração de royalties, os impactos ambientais intensos e a estagnação social. A próxima seção detalha a metodologia utilizada para operacionalizar o ISM em 223 municípios mineiros ao longo da década de 2010 a 2020, oferecendo uma ferramenta prática para avaliar e promover a sustentabilidade na mineração.

### 3. Metodologia

A seção descreve o processo de tratamento dos dados para análise do Índice de Sustentabilidade na Mineração (ISM), aplicado a 223 municípios de Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2020. O ISM é um índice composto, adaptado de Viana (2012), estruturado em três dimensões: Econômica, Ambiental e Social, e fundamentado na literatura sobre sustentabilidade minerária.

A pesquisa é quantitativa, de caráter descritivo e analítico, com abordagem longitudinal, utilizando dados secundários de 2010 a 2020. O horizonte temporal foi escolhido pela disponibilidade de dados consistentes e pela possibilidade de captar tendências ao longo de uma década, incluindo mudanças regulatórias, como a Lei n.º 13.540/2017, que ampliou a distribuição da CFEM para municípios impactados indiretamente pela mineração. O ISM foi construído com base em indicadores normalizados, agregados em três componentes – econômico, ambiental e social –, de acordo com Viana (2012). A análise foca no impacto distributivo da mineração, utilizando CFEM per capita como proxy para isolar os efeitos da atividade nos municípios. A metodologia de Viana (2012) foi selecionada por sua robustez em avaliar sustentabilidade multidimensional em contextos minerários, sendo adaptada para o cenário de Minas Gerais, que apresenta heterogeneidade socioeconômica e ambiental entre seus 853 municípios.

A amostra é composta por 223 municípios mineiros que receberam repasses da CFEM em pelo menos um ano do período 2010 – 2020, conforme dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2023). A escolha por esse critério garante a inclusão de municípios com vínculos diretos ou indiretos com a atividade mineral, abrangendo tanto a extração quanto o beneficiamento, transporte e disposição de rejeitos, conforme ampliado pela Lei n.º 13.540/2017. A análise focou em minerais de alto impacto econômico e ambiental, selecionados com base em sua relevância para Minas Gerais e disponibilidade de dados.

O Quadro 1 apresenta os minerais incluídos na análise, selecionados com base em sua participação na arrecadação da CFEM, na intensidade dos impactos socioambientais associados à sua exploração e na disponibilidade de dados por município. Minerais como ferro, ouro, bauxita e nióbio, por exemplo, configuram cadeias produtivas relevantes em termos de volume de extração, valor comercial e riscos ambientais – como geração de rejeitos, consumo hídrico e alterações no uso do solo. A inclusão desses minerais permite uma caracterização mais precisa do universo minerador mineiro,

preservando a diversidade de contextos regionais sem comprometer a comparabilidade dos dados.

Quadro 1 – Lista de minerais considerados na análise

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| Alumínio            | Minério lítio       |
| Bauxita             | Minério de manganês |
| Calcário            | Minério de níquel   |
| Calcário calcítico  | Minério de ouro     |
| Calcário industrial | Minério de prata    |
| Cassiterita         | Minério de tântalo  |
| Caulim              | Níquel              |
| Chumbo              | Ocre                |
| Diamante            | Ouro                |
| Diamante industrial | Pedra calcária      |
| Espodumênio         | Pirita              |
| Ferro               | Pirocloro           |
| Fosfato             | Prata               |
| Grafita             | Quartzo             |
| Hematita            | Quartzo industrial  |
| Manganês            | Tantalita           |
| Minério de alumínio | Tântalo             |
| Minério de estanho  | Zinco               |
| Minério de ferro    | Zircônio            |

Fonte: Elaboração própria

Com isso, delimita-se o recorte empírico da pesquisa, fundamentado em critérios técnicos e legais que garantem a representatividade da amostra. A próxima seção detalha os indicadores selecionados para compor o ISM, com suas respectivas justificativas teóricas e procedimentos metodológicos de cálculo e normalização.

### 3.1 Cálculo dos Indicadores e Base de Dados

O ISM foi construído com base em sete indicadores, agrupados em componentes que relacionam a economia, o meio ambiente e a sociedade. O Componente Econômico considera a CFEM per capita, variável que reflete o retorno financeiro direto da mineração por habitante. Utilizado como métrica distributiva dos royalties, conforme discutido por Moraes (2023), tal componente é exposto na Equação 1.

$$CFEM \text{ per capita} = \frac{CFEM \text{ Nominal do Município no período}}{População \text{ Total do Município no período}} \quad (1)$$

A segunda variável, Investimento em Lavra *per capita*, captura o nível de reinvestimento no setor. Nos casos em que o município recebeu CFEM, mas não apresentou valor declarado de investimento em mineração no ano analisado, foi atribuído valor zero ao indicador de investimento. Essa escolha metodológica tem caráter intencional e “punitivo”, buscando sinalizar que o município usufruiu dos *royalties* sem, contudo, reinvestir na própria atividade. Ou seja, o valor zero não indica ausência de dados, mas a ausência de investimento efetivo na mineração naquele período específico. A Equação 2 reflete a construção da variável.

$$Investimento \text{ em Lavra} = \frac{Investimento \text{ em Fase de Lavra no Município}}{População \text{ Total do Município no período}} \quad (2)$$

O Componente Ambiental considera a área de mineração, que contempla áreas ocupadas por lavra ou infraestrutura minerária, mensurada em hectares (ha), extraída do Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE/ANM). Quanto maior o CFEM por hectare, menor impacto proporcional, seguindo Viana (2012). A Equação 3 mostra como a variável é obtida.

$$\text{Área de Mineração} = \frac{\text{Área Total do Município}}{\text{Área de Mineração}} * \text{CFEM per capita} \quad (3)$$

Além disso, o desmatamento mede a degradação ambiental, em hectares desmatados por município, e foi extraído da plataforma MapBiomass. Essa variável se mostra especialmente relevante após os desastres de Mariana e Brumadinho (Porto, 2016). A variável é apresentada na Equação 4.

$$\text{Desmatamento} = \frac{\text{CFEM per capita}}{\text{Área Desmatada}} \quad (4)$$

O número de minas avalia a quantidade de minas ativas por município, proveniente do SIGMINE/ANM e indica a intensidade da exploração. CFEM elevada com menos minas sugere maior eficiência econômica e menor fragmentação territorial. A variável é apresentada na Equação 5.

$$\text{Número de Minas} = \frac{\text{CFEM per capita}}{\text{Número de minas no município}} \quad (5)$$

A quarta variável ambiental é a representação das emissões de GEEs *per capita* (em t de CO<sub>2</sub>/hab.), obtidas da Base de Dados de Estimativa de Emissões do SEEG Municípios (2000-2019). Essas informações são utilizadas como *proxy* de impacto climático agregado. Apesar de não isolar as emissões da mineração, Mancini e Sala (2018), e Lèbre *et al.* (2024) demonstram que municípios com atividade mineral intensa tendem a ter maiores contribuições relativas para este indicador. Para 2020, os dados foram imputados pela média de 2010 a 2019, dada ausência deste ano na série histórica do SEEG. A Equação 6 demonstra como a variável foi obtida.

$$\text{GEEs} = \frac{\text{CFEM per capita}}{\text{GEEs per capita}} \quad (6)$$

O último componente do indicador proposto elucidar quanto ao bem-estar da sociedade presente na região afetada pela mineração. Para obtenção do Componente Social, utilizou-se o IDHM disponibilizado pós-censo de 2010. A falta de dados e a pouca variabilidade esperada para esse indicador durante todos os anos analisados, é uma justificativa adequada para manter esta variável. O IDHM, que varia de 0 a 1, não foi usado diretamente com seus valores absolutos (ou seja, sem escalonamento adicional) porque o ISM exige que todos os indicadores sejam normalizados para um intervalo consistente [0,1] com uma escala específica, garantindo comparabilidade com os outros indicadores econômicos e ambientais. O uso de valores absolutos do IDHM diretamente, mesmo estando em [0,1], poderia introduzir inconsistências na interpretação e agregação do ISM, devido a diferenças na distribuição e variabilidade dos indicadores. O IDHM agrega educação, saúde e renda, sendo um indicador usual de desenvolvimento humano (IBGE/PNUD, 2013). Sua replicação para 2010-2020 é justificada pela estabilidade do indicador e pela ausência de dados anuais.

Para normalizar os indicadores, foi utilizada a técnica min-max, dada pela Equação 7. A normalização para a escala 0-1 é importante para possibilitar a comparação entre indicadores de escalas tão diferentes.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

em que  $X$  representa o valor original do indicador,  $X_{min}$  o menor valor observado no conjunto de municípios e  $X_{max}$  o maior valor. O resultado da transformação situou todos os indicadores em uma escala contínua de 0 a 1, onde 1 representa o desempenho mais sustentável (ou o impacto mais positivo) e 0 o menos sustentável. Esse método preserva a proporcionalidade dos dados e permite comparações diretas entre indicadores de diferentes unidades de medida. A normalização foi aplicada inclusive ao IDHM, com o objetivo de manter a coerência metodológica com a proposta original de Viana (2012).

A metodologia proposta por Viana (2012) indica a separação dos indicadores em três componentes diferentes (Econômico, Ambiental e Social) antes do cálculo do ISM final. Tal separação possibilita a comparação entre municípios em cada esfera que compõe o índice. Cada componente é apresentado abaixo, assim como a sua forma de cálculo. O Componente Econômico (C.E.) é calculado conforme a Equação 8.

$$C.E. = \frac{\text{CFEM per capita} + \text{Investim em Lavra per capita}}{2} \quad (8)$$

O C.E. é calculado como a média entre os dois indicadores apresentados. Os indicadores receberam pesos iguais (0,5), seguindo Viana (2012) e Davalos *et al.* (2017), devido à complementaridade entre arrecadação e investimento.

O Componente Ambiental (C.A.) segue a Equação 9. Ou seja, é uma média simples entre os 4 indicadores.

$$C.A. = \frac{\text{Área de Mineração} + \text{Desmatamento} + \text{Quant.Minas} + \text{Emissões GEEs}}{4} \quad (9)$$

A Equação (9) mede a eficiência da mineração. Isso porque relaciona benefícios econômicos (CFEM per capita) a impactos ambientais.

O Componente Social (C.S.) avalia a qualidade de vida, aqui com um indicador, o IDHM. Como supracitado, devido à ausência de dados e dada a pouca variabilidade desse indicador durante os anos, foi utilizado, para todos os anos analisados, o IDHM disponibilizado pós-censo de 2010 (fixado para todos os anos da amostra).

Neste aspecto, a Equação 10 apresenta o Índice de Sustentabilidade na Mineração (ISM). O ISM, então, é resultado da ponderação dos três componentes elaborados previamente.

$$ISM = 0,3 * C.E. + 0,4 * C.A. + 0,3 * C.S. \quad (10)$$

A escolha da ponderação final do Índice de Sustentabilidade na Mineração (ISM) foi baseada em Viana (2012), que adota pesos diferenciados para refletir a relevância de dimensões em índices compostos, mas priorizou a dimensão ambiental (0,4) em razão dos impactos críticos da atividade mineral em Minas Gerais, como desmatamento (12% da área degradada associada à mineração), uso intensivo do solo e desastres socioambientais, como os de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) (MapBiomass, 2023; Zhou, 2023). A literatura internacional reforça que os impactos ambientais da mineração, como perda de biodiversidade e emissões de gases de efeito estufa, frequentemente superam os benefícios econômicos de curto prazo, justificando maior peso para essa dimensão (Tost et al., 2020; Mancini; Sala, 2018).

Além disso, a priorização ambiental alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 12 e 15), que enfatizam a gestão responsável de recursos e a proteção de ecossistemas (ONU, 2015). As dimensões econômica e social receberam peso de 0,3 cada, refletindo sua importância, mas considerando que a concentração de royalties da CFEM (81% em 27 municípios) e a estagnação do IDHM em muitos municípios mineiros indicam desafios secundários em relação aos impactos ambientais (Leão; Rabelo, 2023). Essa ponderação busca equilibrar a análise, destacando a criticidade ambiental sem negligenciar os aspectos econômicos e sociais, conforme sugerido por índices de sustentabilidade em contextos extrativistas (Moran et al., 2014).

Foram testadas versões alternativas do ISM com pesos iguais (1/3 para cada componente) e com maior peso para o componente econômico. Em todos os casos, os rankings municipais não sofreram mudanças significativas, o que atesta a robustez e estabilidade do índice. Para todos os cálculos, incluindo a normalização, agregação dos componentes e cálculo do ISM final, foi utilizado o *Microsoft Excel*.

#### 4. Resultados e Discussão

A média do ISM entre os municípios foi de 0,247, indicando um nível baixo de sustentabilidade minerária no estado ao longo da década analisada. A distribuição dos valores apresenta forte assimetria, com a maioria dos municípios concentrada abaixo de 0,3 e apenas poucos casos com desempenho superior a 0,6. Isso revela que, na maior parte dos territórios mineradores, os impactos sociais e ambientais da atividade ainda superam seus benefícios econômicos ou, quando estes existem, não são suficientemente transformados em bem-estar coletivo ou preservação ambiental.

Esse padrão confirma o que foi apontado por autores como Viana (2012) e Rezende (2016), que destacam o desequilíbrio estrutural da mineração brasileira entre os ganhos econômicos concentrados e os danos ambientais e sociais difusos. A Figura 2, que representa a distribuição do ISM médio entre os municípios, ilustra essa assimetria, reforçando a ideia de que o setor mineral opera com baixa sustentabilidade média, mas com variações territoriais significativas.

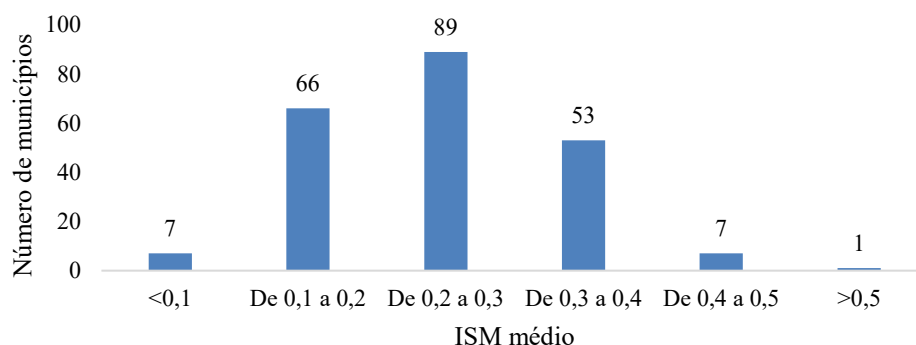


Figura 2 – Distribuição do ISM Médio por município (2010-2020)

Fonte: elaboração própria.

O gráfico da distribuição do ISM médio, apresentado na Figura 2, revela um padrão aproximadamente normal entre os municípios, concentrando a maioria dos casos em valores intermediários na escala. Apenas São Gonçalo do Rio Abaixo apresenta um ISM superior a 0,5, enquanto os demais registram, em geral, índices médios a baixos. O predomínio de ISM relativamente baixo na maior parte dos municípios é um dado que evidencia o impacto significativo predominante da atividade minerária no estado.

A análise do componente econômico do ISM revela a grande desigualdade na distribuição da CFEM per capita entre os municípios. Conforme apresentado na Figura 3, uma parcela reduzida de municípios concentra os maiores valores, enquanto a maioria apresenta arrecadação modesta ou residual. Esse dado corrobora os achados de Leão e Rabelo (2023), que apontam que apenas 27 municípios foram responsáveis por 81% da arrecadação estadual da CFEM em 2020.

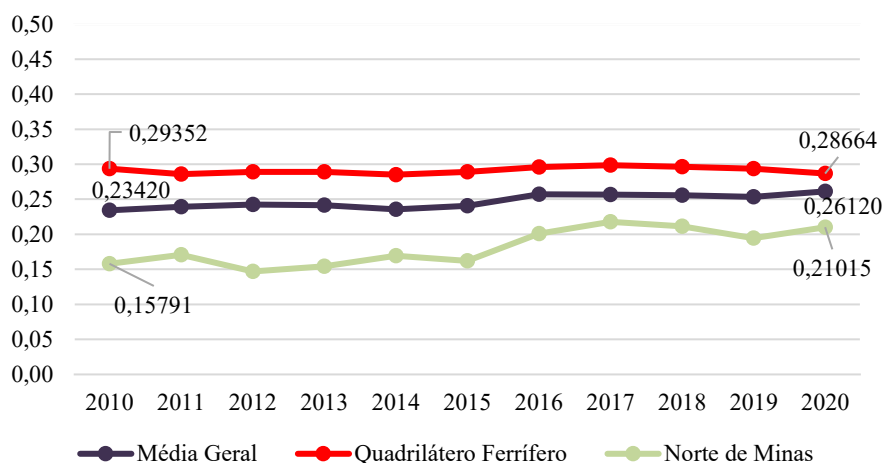


Figura 3 – Evolução do ISM Médio por Região (2010-2020)

Fonte: elaboração própria.

Além disso, a inclusão do investimento em lavra per capita como indicador complementar permite observar que muitos municípios com arrecadação significativa não reinvestiram na atividade mineral, o que comprometeu o desempenho econômico no índice. A penalização metodológica nesses casos – ao atribuir valor zero ao indicador – reforça a proposta de Viana (2012), segundo a qual a sustentabilidade econômica depende não apenas da extração, mas da capacidade local de reinvestir os recursos gerados pela mineração.

A análise temporal revela que a média geral e a do Quadrilátero Ferrífero permaneceram praticamente estáveis entre 2010 e 2020, enquanto o Norte de Minas apresentou melhora de 30%, possivelmente devido a mudanças legislativas, como a Lei n.º 13.540/2017, que alterou a distribuição da CFEM, além de maior fiscalização e práticas sustentáveis pelas mineradoras (Moraes, 2023). Essas assimetrias reforçam a necessidade de políticas distributivas, como sugerido por Tost et al. (2020), que defendem reinvestir royalties em diversificação econômica.

Esse resultado dialoga com os estudos de Mancini e Sala (2018), e de Lèbre et al. (2024), que

argumentam que os efeitos ambientais da mineração, como desmatamento, contaminação e alteração da paisagem, muitas vezes extrapolam os limites do local da lavra e impactam amplamente o território. No contexto mineiro, onde 12% da área degradada está associada à mineração (MapBiomias, 2023), essa constatação é particularmente grave.

A Figura 4 ilustra de forma mais detalhada a distribuição do ISM em relação à CFEM per capita. Observa-se que a maior parte dos municípios recebe valores comparativamente baixos de CFEM e, ao mesmo tempo, apresenta um ISM médio relativamente reduzido. Esse resultado reforça a constatação de que a atividade minerária tende a gerar impactos negativos mais expressivos do que os benefícios diretos proporcionados pelos recursos arrecadados por meio da CFEM.

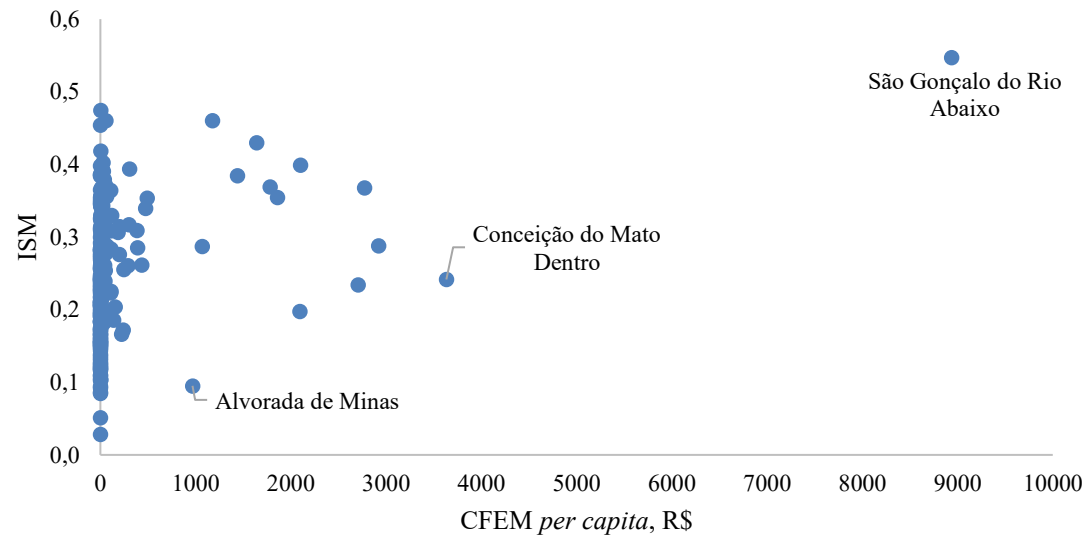


Figura 4 – Relação entre ISM Médio e CFEM per capita (2010-2020)  
Fonte: elaboração própria.

Um município chama a atenção: São Gonçalo do Rio Abaixo, que está relativamente distante dos demais municípios. Além de apresentar o maior valor da CFEM per capita média do período, apresentou também o ISM mais alto entre todos os municípios mineiros analisados. Isso acontece pela capacidade do município em mitigar os malefícios da mineração, sugerindo que o município consegue distribuir bem os benefícios, aqui representado pela distribuição dos *royalties*.

A seguir, é apresentada a Tabela 1, que detalha o ISM dos 10 melhores (*Top 10*) e piores (*Bottom 10*) municípios, apenas em termos do ISM, entre 2010 e 2020. Essa comparação deixa claro que a região norte do estado tem a situação mais preocupante entre as regiões mineiras.

Tabela 1 – ISM por município e ano (*Top 10* e *Bottom 10*, 2010–2020).

| Município                 | Região               | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020    |
|---------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| São Gonçalo do Rio Abaixo | Região Metropolitana | 0,58745 | 0,59563 | 0,59382 | 0,59345 | 0,74225 | 0,55757 | 0,49261 | 0,49320 | 0,49193 | 0,49267 | 0,37972 |
| Poços de Caldas           | Sul de Minas         | 0,47365 | 0,46820 | 0,56471 | 0,46471 | 0,46433 | 0,46407 | 0,46422 | 0,46394 | 0,46432 | 0,46435 | 0,46373 |
| Itabira                   | Região Metropolitana | 0,45881 | 0,46222 | 0,45935 | 0,46052 | 0,42643 | 0,45377 | 0,49812 | 0,45030 | 0,46485 | 0,46632 | 0,46477 |
| Araxá                     | Triângulo Mineiro    | 0,44923 | 0,44895 | 0,44869 | 0,45328 | 0,44751 | 0,46644 | 0,46795 | 0,46949 | 0,47218 | 0,48153 | 0,45709 |
| Uberaba                   | Triângulo Mineiro    | 0,45154 | 0,45535 | 0,45479 | 0,45462 | 0,45284 | 0,45274 | 0,45669 | 0,45272 | 0,45348 | 0,45601 | 0,45506 |
| Nova Lima                 | Região Metropolitana | 0,42681 | 0,42289 | 0,42966 | 0,43471 | 0,42982 | 0,43407 | 0,44081 | 0,41763 | 0,47379 | 0,39670 | 0,42073 |
| Andradas                  | Sul de Minas         | 0,43193 | 0,41656 | 0,41675 | 0,42185 | 0,41680 | 0,41689 | 0,41696 | 0,41703 | 0,41700 | 0,41711 | 0,41628 |
| Pratápolis                | Sul de Minas         | 0,40900 | 0,41211 | 0,41195 | 0,41127 | 0,40764 | 0,41220 | 0,41130 | 0,41236 | 0,41332 | 0,41525 | 0,31171 |
| Tapira                    | Triângulo Mineiro    | 0,38696 | 0,37114 | 0,37375 | 0,38491 | 0,40100 | 0,46367 | 0,48408 | 0,42736 | 0,40212 | 0,35970 | 0,33688 |
| Unai                      | Noroeste de Minas    | 0,39828 | 0,40772 | 0,40783 | 0,38792 | 0,40068 | 0,39718 | 0,40642 | 0,38995 | 0,40009 | 0,38729 | 0,39560 |

|                   |                  |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Alto Rio Doce     | Zona da Mata     | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,09613 | 0,19627 |
| Juvenília         | Norte de Minas   | 0,06655 | 0,06655 | 0,06655 | 0,06655 | 0,06655 | 0,06655 | 0,06655 | 0,26796 | 0,26861 | 0,06655 | 0,06655 |
| Ubá               | Zona da Mata     | 0,08451 | 0,08451 | 0,08451 | 0,28532 | 0,08451 | 0,08451 | 0,08451 | 0,08451 | 0,08451 | 0,08451 | 0,08451 |
| Alvorada de Minas | Vale do Rio Doce | 0,04542 | 0,04542 | 0,04542 | 0,04542 | 0,04542 | 0,04542 | 0,04542 | 0,19416 | 0,16175 | 0,24970 | 0,12283 |
| Grão Mogol        | Norte de Minas   | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,07923 | 0,24525 |
| Carai             | Vale do Mucuri   | 0,03063 | 0,13313 | 0,12856 | 0,13028 | 0,12470 | 0,12703 | 0,12604 | 0,12188 | 0,03118 | 0,03063 | 0,03063 |
| Chapada do Norte  | Jequitinhonha    | 0,07289 | 0,07289 | 0,07289 | 0,07289 | 0,07289 | 0,21903 | 0,07289 | 0,07289 | 0,07289 | 0,07289 | 0,07289 |
| Comercinho        | Jequitinhonha    | 0,06761 | 0,06761 | 0,06761 | 0,06761 | 0,06761 | 0,06761 | 0,06761 | 0,25835 | 0,06761 | 0,06761 | 0,06761 |
| Fruta de Leite    | Norte de Minas   | 0,01585 | 0,01585 | 0,01585 | 0,01585 | 0,01585 | 0,20680 | 0,21454 | 0,01591 | 0,01585 | 0,01585 | 0,01585 |
| Catuji            | Vale do Mucuri   | 0,01162 | 0,01162 | 0,01162 | 0,01162 | 0,01162 | 0,01162 | 0,01162 | 0,10196 | 0,10552 | 0,01162 | 0,01162 |

Fonte: elaboração própria.

A maioria dos municípios com ISM mais baixo localiza-se próximo do Norte de Minas, com destaque para Catuji, na região do Vale do Mucuri, (média 0,02837), refletindo baixa arrecadação de CFEM e impactos ambientais severos. Aqui destaca-se, mais uma vez, São Gonçalo do Rio Abaixo, sendo, em todos os anos analisados, o município com o melhor ISM comparativamente.

Em síntese, os resultados do ISM revelam que a sustentabilidade da mineração em Minas Gerais é marcada por profundas desigualdades territoriais e setoriais, corroborando a literatura sobre os desafios da atividade extrativista (Leão; Rabelo, 2023; Rezende, 2016). A média estadual do ISM, de 0,247, indica um desempenho predominantemente baixo, com a maioria dos 223 municípios analisados (2010-2020) apresentando valores inferiores a 0,3, especialmente na dimensão ambiental, onde indicadores como desmatamento (12% da área degradada associada à mineração) e emissões de gases de efeito estufa (GEE) *per capita* revelam impactos críticos (MapBiomass, 2023; Tost *et al.*, 2020).

Municípios como São Gonçalo do Rio Abaixo, com ISM acima de 0,5, destacam-se por práticas que equilibram reinvestimento de *royalties* da CFEM e mitigação ambiental, mas representam exceções em um cenário de assimetrias. A concentração de 81% da CFEM em apenas 27 municípios em 2023 reforça a "maldição dos recursos" descrita por Auty (1993), onde benefícios econômicos se concentram, enquanto impactos negativos se dispersam, limitando a diversificação econômica e perpetuando vulnerabilidades (Sachs; Warner, 2001).

A dimensão ambiental do ISM, com peso de 40%, reflete a gravidade dos danos ecológicos, como os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que resultaram em perdas humanas e danos ambientais de longa duração (Zhour, 2023; Porto, 2016). Tost *et al.* (2020) argumentam que os custos ambientais da mineração, como perda de biodiversidade e poluição hídrica, frequentemente superam os ganhos econômicos de curto prazo, exigindo políticas de restauração e regulamentação mais rigorosa.

A robustez do índice foi testada por meio de simulações com diferentes ponderações entre os componentes. Os resultados indicaram forte estabilidade nos *rankings* obtidos, o que sugere que o ISM é uma ferramenta metodológica válida para subsidiar políticas públicas e decisões de planejamento territorial em regiões mineradoras. Conforme apresentado na Tabela 2, com pesos iguais para as 3 dimensões, percebe-se que o *ranking* dos 10 melhores e piores em desempenho do ISM foi mantido.

Tabela 2 – ISM por município e ano – pesos iguais (*Top 10 e Bottom 10, 2010–2020*).

| Município                 | Região               | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020    |
|---------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| São Gonçalo do Rio Abaixo | Região Metropolitana | 0,56598 | 0,57273 | 0,57124 | 0,57093 | 0,73494 | 0,55925 | 0,48774 | 0,48823 | 0,48718 | 0,48779 | 0,37806 |
| Poços de Cladas           | Sul de Minas         | 0,46465 | 0,46014 | 0,53869 | 0,45617 | 0,45574 | 0,45552 | 0,45566 | 0,45539 | 0,45573 | 0,45575 | 0,45520 |
| Araxá                     | Triângulo Mineiro    | 0,44141 | 0,44113 | 0,44089 | 0,44470 | 0,44075 | 0,45891 | 0,46016 | 0,46379 | 0,46577 | 0,47504 | 0,45047 |
| Itabira                   | Região Metropolitana | 0,44936 | 0,45206 | 0,44917 | 0,45158 | 0,42279 | 0,44638 | 0,48685 | 0,44193 | 0,45515 | 0,45792 | 0,45464 |
| Nova Lima                 | Região Metropolitana | 0,44184 | 0,43791 | 0,44511 | 0,45024 | 0,44643 | 0,45001 | 0,45730 | 0,43650 | 0,49507 | 0,41612 | 0,43855 |
| Uberaba                   | Triângulo Mineiro    | 0,44311 | 0,44625 | 0,44580 | 0,44565 | 0,44419 | 0,44410 | 0,44736 | 0,44409 | 0,44471 | 0,44680 | 0,44602 |
| Andradas                  | Sul de Minas         | 0,41590 | 0,40325 | 0,40341 | 0,40760 | 0,40343 | 0,40361 | 0,40356 | 0,40360 | 0,40363 | 0,40385 | 0,40299 |
| Pratápolis                | Sul de Minas         | 0,39568 | 0,39818 | 0,39801 | 0,39740 | 0,39442 | 0,39819 | 0,39746 | 0,39841 | 0,39926 | 0,40090 | 0,31546 |
| Unai                      | Noroeste de Minas    | 0,38872 | 0,39652 | 0,39660 | 0,38017 | 0,39070 | 0,38781 | 0,39544 | 0,38185 | 0,39021 | 0,37965 | 0,38650 |
| Tapira                    | Triângulo Mineiro    | 0,36766 | 0,35184 | 0,35434 | 0,36471 | 0,38506 | 0,44270 | 0,46275 | 0,41003 | 0,38239 | 0,34203 | 0,32309 |
| Alto do Rio Doce          | Zona da Mata         | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,10574 | 0,18836 |
| Ubá                       | Zona da Mata         | 0,38872 | 0,39652 | 0,39660 | 0,38017 | 0,39070 | 0,38781 | 0,39544 | 0,38185 | 0,39021 | 0,37965 | 0,38650 |
| Juvenília                 | Norte de Minas       | 0,07320 | 0,07320 | 0,07320 | 0,07320 | 0,07320 | 0,07320 | 0,07320 | 0,23952 | 0,23992 | 0,07320 | 0,07320 |
| Grão Mogol                | Norte de Minas       | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,08715 | 0,22412 |
| Alvorada de Minas         | Vale do Rio Doce     | 0,04996 | 0,04996 | 0,04996 | 0,04996 | 0,04996 | 0,04996 | 0,04996 | 0,18089 | 0,14956 | 0,24190 | 0,11412 |
| Chapada do Norte          | Jequitinhonha        | 0,08018 | 0,08018 | 0,08018 | 0,08018 | 0,08018 | 0,20075 | 0,08018 | 0,08018 | 0,08018 | 0,08018 | 0,08018 |
| Comercinho                | Jequitinhonha        | 0,07437 | 0,07437 | 0,07437 | 0,07437 | 0,07437 | 0,07437 | 0,07437 | 0,23173 | 0,07437 | 0,07437 | 0,07437 |
| Carai                     | Vale do Mucuri       | 0,03370 | 0,11826 | 0,11449 | 0,11590 | 0,11130 | 0,11323 | 0,11241 | 0,10898 | 0,03414 | 0,03370 | 0,03370 |
| Fruta de Leite            | Norte de Minas       | 0,01743 | 0,01743 | 0,01743 | 0,01743 | 0,01743 | 0,17497 | 0,18141 | 0,01748 | 0,01743 | 0,01743 | 0,01743 |
| Catuji                    | Vale do Mucuri       | 0,01278 | 0,01278 | 0,01278 | 0,01278 | 0,01278 | 0,01278 | 0,01278 | 0,08732 | 0,09025 | 0,01278 | 0,01278 |

Fonte: elaboração própria.

Mancini e Sala (2018) reforçam que indicadores como área minerada e GEE *per capita*, usados no ISM, são essenciais para monitorar impactos e orientar políticas públicas. A dimensão social, avaliada pelo IDHM, revela estagnação em muitos municípios, com apenas 20% apresentando avanços significativos em educação, saúde e renda entre 2010 e 2020 (IBGE/PNUD, 2013). Franks et al. (2014) destacam que a mineração pode exacerbar desigualdades quando os benefícios não são redistribuídos, um problema evidente na concentração da CFEM e na ausência de programas comunitários robustos, como observado por Mallqui, Lima e Bortoluzzi (2021).

Esses achados reforçam a necessidade de políticas públicas redistributivas e estratégias locais que ampliem o retorno social e mitiguem os impactos ecológicos, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 8, 10, 12 e 15) da Agenda 2030 (ONU, 2015). A Lei nº 13.540/2017, que ampliou a distribuição da CFEM, resultou em melhorias de até 30% no ISM no Norte de Minas, mas seus efeitos ainda são limitados pela falta de reinvestimento em diversificação econômica (Leão; Rabelo, 2023). Viana (2012) sugere que índices compostos, como o ISM, podem orientar políticas baseadas em evidências, identificando municípios com melhores práticas para replicação, como incentivos fiscais para restauração ambiental ou programas de capacitação comunitária.

Internacionalmente, Moran et al. (2014) defendem que ferramentas como o ISM permitem monitorar o impacto de políticas ao longo do tempo, avaliando se medidas como regulamentações ambientais ou redistribuição de *royalties* melhoram a sustentabilidade municipal. Assim, o ISM oferece um instrumento robusto para gestores públicos, promovendo uma mineração mais justa e sustentável.

## 5. Resultados e Discussão

Este trabalho teve como objetivo construir e aplicar o ISM em 223 municípios de Minas Gerais que receberam CFEM entre 2010 e 2020. O ISM, desenvolvido a partir das dimensões econômica,

ambiental e social, permitiu avaliar de forma integrada o desempenho territorial da mineração em termos de sustentabilidade, com foco distributivo.

Os resultados demonstraram que, embora a atividade mineradora seja responsável por significativa geração de receita pública em determinados municípios, sua sustentabilidade permanece limitada. O ISM médio de 0,247 evidencia que a maior parte dos municípios apresenta baixo equilíbrio entre os benefícios econômicos da mineração e seus custos sociais e ambientais. A dimensão ambiental, em especial, foi a mais crítica, revelando pressões territoriais como desmatamento, degradação do solo e emissões de gases de efeito estufa. A dimensão econômica, por sua vez, revelou forte concentração de recursos da CFEM, além da ausência recorrente de reinvestimento produtivo. Já a dimensão social mostrou que os ganhos econômicos da mineração não são automaticamente traduzidos em melhorias no bem-estar da população.

A análise evidenciou padrão desigual de distribuição da sustentabilidade, com poucos municípios, como São Gonçalo do Rio Abaixo, alcançando altos valores do ISM, enquanto a maioria apresenta resultados modestos. Esse desequilíbrio reforça a importância de se pensar a mineração em escala regional, não apenas como atividade econômica isolada, mas como fenômeno que demanda governança articulada, redistribuição de receitas e mitigação de impactos cumulativos.

Este estudo apresenta algumas limitações. A principal refere-se à disponibilidade e qualidade das bases de dados. O uso de dados do IBRAM sobre investimentos, embora necessário, deve ser interpretado com cautela, visto tratar-se de uma fonte setorial com possível viés de interesse. Também merece destaque o uso do IDHM fixo (2010), imposto pela ausência de séries anuais, e da imputação da média para as emissões de GEEs em 2020, devido à descontinuidade dos dados durante a pandemia de Covid-19. Além disso, o uso de GEEs per capita como proxy ambiental não permite isolar os efeitos da mineração de outras atividades econômicas.

Trabalhos futuros poderão aprofundar a abordagem metodológica proposta. Dentre as possibilidades, encontram-se as seguintes: (i) atualizar o ISM com dados mais recentes (2021 em diante), considerando os impactos da pandemia e mudanças regulatórias; (ii) estender o índice a outros estados brasileiros ou ao território nacional, permitindo comparações inter-regionais; (iii) incorporar novas variáveis, como indicadores de governança pública, participação social e uso dos recursos oriundos da CFEM; (iv) conduzir estudos qualitativos complementares, investigando em profundidade as estratégias de gestão em municípios com alto e baixo desempenho no ISM; e (v) analisar longitudinalmente os efeitos da mineração sobre indicadores de longo prazo, como mobilidade social e saúde pública.

Ao contribuir para mensurar e compreender os efeitos territoriais da mineração em Minas Gerais, o ISM se mostra uma ferramenta acessível, transparente e reproduzível para pesquisadores, gestores públicos e instituições de controle social. Em contextos marcados por escassez fiscal, conflitos socioambientais e assimetrias territoriais, instrumentos como este são fundamentais para promover uma mineração mais justa, eficiente e sustentável.

A comparação entre municípios, possibilitada pelo ISM, permite identificar aqueles com melhores práticas, como São Gonçalo do Rio Abaixo, que alcançou ISM acima de 0,5, para replicação em outros municípios com baixos índices, como os do Norte de Minas (média de 0,247). Essa abordagem fomenta políticas públicas baseadas em evidências, como incentivos fiscais para reinvestimento de royalties da CFEM em diversificação econômica ou programas de restauração ambiental, alinhados aos ODS 8 e 15 (ONU, 2015).

Além disso, o ISM pode ser usado para avaliar o impacto de políticas públicas ao longo do tempo, monitorando se um município melhora seu desempenho em sustentabilidade após a implementação de medidas, como as previstas na Lei nº 13.540/2017, que ampliou a distribuição da CFEM (Leão; Rabelo, 2023). Assim, este estudo contribui ao propor uma adaptação empírica do ISM para o contexto mineiro, utilizando indicadores atualizados e recorte municipal, oferecendo um instrumento robusto para formulação, monitoramento e avaliação de políticas públicas que promovam equidade territorial e sustentabilidade na mineração (Moran *et al.*, 2014).

## Referências bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Mineração em números**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/mineracao-em-numeros>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- AUTY, R. M. *Sustaining development in mineral economies: the resource curse thesis*. London: Routledge, 1993.
- BHP. *Environmental, Social and Governance (ESG) and Sustainability*. 2023. Disponível em: <https://www.bhp.com/investors/esg-sustainability>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- CAVALCANTI, Clóvis. Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 53-67, 2010.
- CLIMATE BONDS INITIATIVE. *Climate Bonds Standard: Globally recognised, Paris-aligned certification of debt instruments, entities and assets using robust, science-based methodologies*. 2024. Disponível em: <https://www.climatebonds.net/files/documents/publications/Global-State-of-the-Market-Report-2023.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- CUNHA, Ana Maria Botelho Marinho; GUEDES, Gilse Barbosa; EARP, Márcia Viana de Sá. **Mineração, desenvolvimento sustentável e o mercado de investimento socialmente responsável (ISR): um estudo sobre a participação da Vale no Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE)**. *Série Estudos e Documentos – CETEM*, n. 46, 46 p., 2019.
- EGGERT, R. G. *Mining and economic sustainability: national economies and local communities*. Colorado: Colorado School of Mines, 2001. (Working Paper, n. 19).
- ENRÍQUEZ, Maria Amélia Rodrigues da Silva. Mineração e desenvolvimento sustentável: é possível conciliar? **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, v. 12, p. 51-66, 2009.
- FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. *Mineração e meio ambiente no Brasil*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002. 42 p.
- FRANKS, D. M.; DAVIS, R.; BEBBINGTON, A. J.; ALI, S. H.; KEMP, D.; SCURRAH, M. *Conflict translates environmental and social risk into business costs. Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 21, p. 7576-7581, 2014.
- IMPACTSCOPE. *ImpactScope Explores the Intersection of AI, Blockchain and Sustainability*. 2023. Disponível em: <https://impactscope.com/news/impactscope-explores-the-intersection-of-ai-blockchain-and-sustainability/>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Em 2023, mineração repete faturamento do ano anterior e pretende ampliar investimentos até 2028**. 2023. Disponível em: <https://ibram.org.br/release/em-2023-mineracao-repete-faturamento-do-ano-anterior-e-pretende-ampliar-investimentos-ate-2028/>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- LAURENCE, D. *Establishing a Sustainable Mining Operation: An Overview. Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 5, p. 455-462, 2011.
- LEÃO, Rafael; RABELO, Rodrigo. **A extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2023. 88 p. (Texto para Discussão, n. 2950).
- MALLQUI, A.; DE LIMA, E. P.; BORTOLUZZI, S. C. *Mining Sustainability Practices in Latin America*. In: LEAL FILHO, W.; TORTATO, U.; FRANKENBERGER, F. (Org.). *Integrating Social Responsibility and Sustainable Development*. Cham: Springer, 2021. p. 195-210.
- MANCINI, L.; SALA, S. *Social Impact Assessment in the Mining Sector: Review and Comparison of Indicators Frameworks. Resources Policy*, v. 57, p. 175-184, 2018.
- MAPBIOMAS. **Coleção 8: Mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil, 1985-2023**. São Paulo: MapBiomass, 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- MONTEIRO, Maurílio de Abreu. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 187-207, 2005.
- MORAIS, Gerson José Oliveira. **Análise dos relatórios de sustentabilidade de empresas de mineração, através dos indicadores de ESG**. 2023. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

MORAN, C. J.; FRANKS, D. M.; SONTER, L. J. *Using the multiple capitals framework to connect indicators of regional cumulative impacts of mining and pastoralism in the Murray-Darling Basin, Australia*. **Resources Policy**, v. 39, p. 65-76, 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Resolução adotada pela Assembleia Geral em 25 de setembro de 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.

PINTO, Erika; STELLA, Osvaldo; MOUTINHO, Paulo. **Finanças verdes: cenário brasileiro**. **CEBRI**, v. 2, 28 p., 2014.

PORTO, Marcelo Firpo de Souza. A tragédia da mineração e do desenvolvimento no Brasil: desafios para a saúde coletiva. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 10, p. 1-3, 2016.

REZENDE, Vanessa Leite. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 3, p. 375-384, 2016.

RIO TINTO. **Our Sustainability Approach**. 2023. Disponível em: <https://www.riotinto.com/en/sustainability/our-approach>. Acesso em: 13 jun. 2025.

SACHS, J. D.; WARNER, A. M. *The curse of natural resources*. **European Economic Review**, v. 45, n. 4-6, p. 827-838, 2001.

SILVA, Olintho Pereira da. A mineração em Minas Gerais: passado, presente e futuro. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 77-86, 1995.

TOST, M.; HITCH, M.; CHANDURKAR, V.; MOSER, P.; FEIEL, S. *The State of Environmental Sustainability Considerations in Mining*. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, 2018.

VIANA, M. **Avaliando Minas: Índice de Sustentabilidade na Mineração (ISM)**. 2012. 372f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ZHOURI, Andréa. Crise como criticidade e cronicidade: a recorrência dos desastres da mineração em Minas Gerais. **Horizontes Antropológicos**, Porto Alegre, v. 29, n. 66, p. 1-31, 2023.