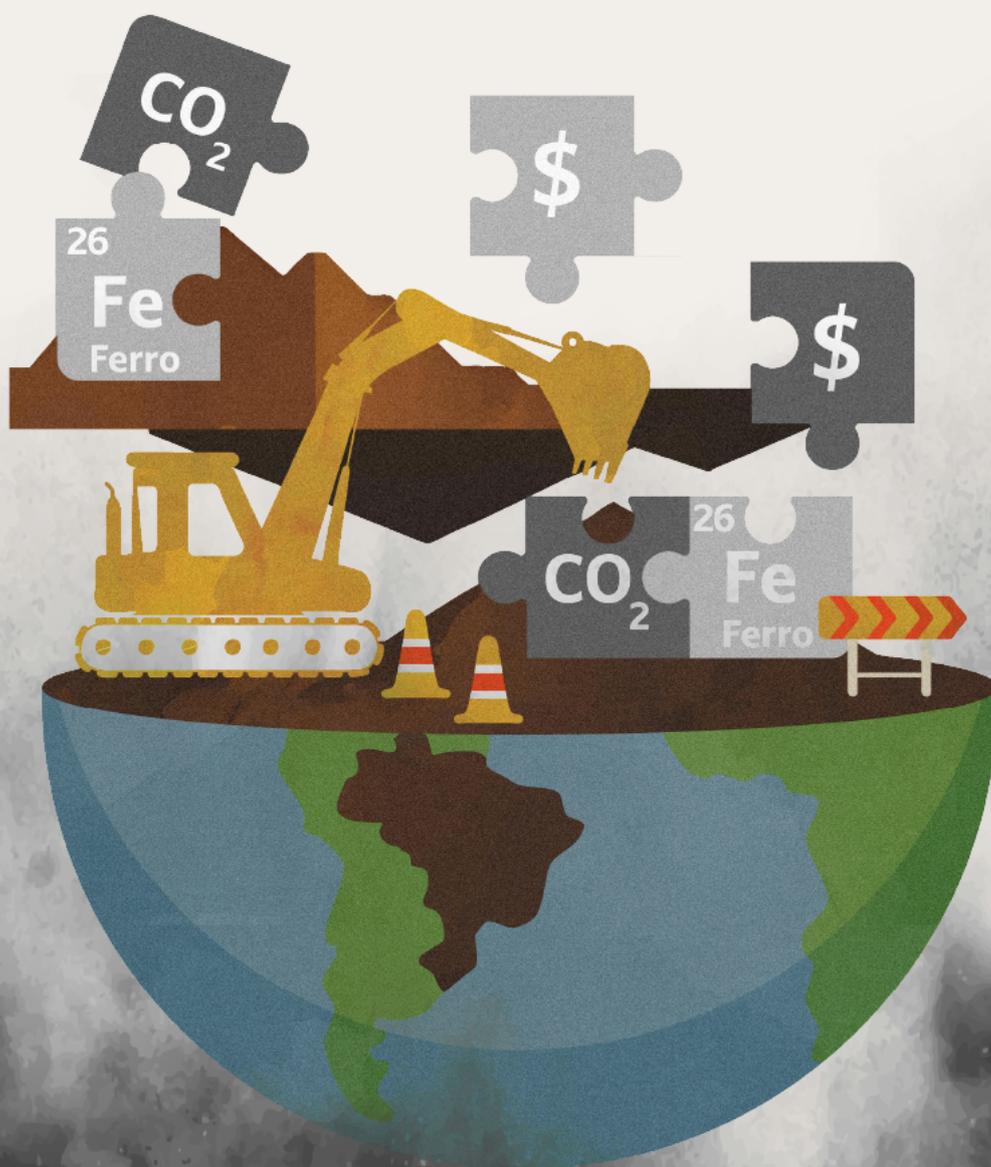


CORTINA DE FUMAÇA:

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E A MINERAÇÃO DE FERRO NO BRASIL



Bruno Milanez
Daniele Costa
Luiz Jardim Wanderley



COMITÊ NACIONAL EM
DEFESA DOS TERRITÓRIOS
FRENTE À MINERAÇÃO



IGLESIAS Y MINERÍA

CORTINA DE FUMAÇA:

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E A MINERAÇÃO DE FERRO NO BRASIL¹

Brasil, novembro de 2024.

Cortina de fumaça: emissão de gases de efeito estufa e a mineração de ferro no Brasil é uma publicação do Comitê Nacional em Defesa dos Territórios Frente à Mineração, em parceria com a Rede Igrejas e Mineração.

¹ Este texto é uma versão traduzida do estudo dos mesmos autores, que deu origem ao artigo *Life Cycle Assessment of Iron Ore in Brazil: The Importance of System Boundaries*, publicado no periódico *The Extractive Industries and Society*, em setembro de 2024.

Organizadores

Bruno Milanez

Daniele Costa

Luiz Jardim Wanderley

Comunicação

Kátia Visentainer

Diagramação e arte

Mayra Souza



Comitê Nacional em Defesa dos Territórios Frente à Mineração
(Secretaria Operativa)

FASE	Federação de Órgãos para Assistência Social e Educacional
IBASE	Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas
Inesc	Instituto de Estudos Socioeconômicos
JnT	Rede Justiça nos Trilhos
MAM	Movimento pela Soberania Popular na Mineração
PoEMAS	Grupo de Pesquisa e Extensão Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade
Sinfrajupe	Serviço Inter - Franciscano de Justiça, Paz e Ecologia

Acesso ao Comitê



emdefesadosterritorios.org



[@Comiteminerao](https://twitter.com/Comiteminerao)



[@em_defesa_dos_territorios](https://www.instagram.com/em_defesa_dos_territorios)



[@emdefesadosterritorios](https://www.facebook.com/emdefesadosterritorios)



CORTINA DE FUMAÇA:

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E A MINERAÇÃO DE FERRO NO BRASIL¹

Bruno Milanez, Daniele Costa, Luiz Jardim Wanderley

DESTAQUES:

Apesar de pesquisas internacionais incluírem as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) vinculadas à logística no cálculo das contribuições do setor mineral para as mudanças climáticas, estudos realizados no Brasil não costumam incorporar esses valores.

Quando se estimam as emissões de GEEs de *commodities* minerais, a não inclusão das emissões relacionadas à logística pode gerar resultados subestimados para a “pegada de carbono” desses produtos.

Entre 2016 e 2020 o Brasil exportou o equivalente a 60% de todo o minério de ferro extraído no país, ou aproximadamente 80% do minério de ferro beneficiado.

De acordo com nossas estimativas, operações logísticas terrestres e marítimas podem representar aproximadamente 40% da “pegada de carbono” do setor minério de ferro.

Mais estudos são necessários para aprimorar as estimativas das emissões resultantes do desmatamento indireto causado pela extração mineral, especialmente na Amazônia.

¹ Este texto é uma versão traduzida do estudo dos mesmos autores que deu origem ao artigo *Life cycle assessment of iron ore in Brazil: the importance of system boundaries*, que foi publicado no periódico *The Extractive Industries and Society*, em setembro de 2024. O artigo completo e a memória de cálculo das estimativas estão disponíveis em <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101541>.

SUMÁRIO:

1. Introdução	6
2. Limites e desafios do estudo das emissões de GEEs do setor mineral	8
3. A extração de minério de ferro e as mudanças climáticas no contexto brasileiro	10
3.1 A rede global de extração de minério de ferro	10
3.2 Minério de ferro e emissões de GEEs: uma avaliação das estimativas existentes no Brasil	11
4. Método e resultados	14
4.1 Descrição do sistema e fontes de dados	14
4.2 Resultados e discussão	17
5. Considerações finais	23
6. Anexo metodológico	25
Uso da terra	25
Extração, concentração e pelotização	26
Transporte terrestre	26
Comércio internacional	27
Referências	29

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Exportação de minério de ferro do Brasil, 2020 (dados em toneladas)	15
Figura 2. Fronteiras do sistema e balanço de massa para a produção de minério de ferro e pelotas no Brasil (média anual de 2016 a 2020)	16
Figura 3. Estimativas de emissões de CO ₂ eq para o setor de minério de ferro no Brasil	18
Tabela 1. Taxas de emissão de CO ₂ eq de 1 tonelada de concentrado e de pelotas de minério de ferro	19
Tabela 2. Principais países importadores de minério de ferro brasileiro	28

1. Introdução

O objetivo principal deste texto é discutir como estimar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), ou “pegada de carbono” para o minério de ferro extraído no Brasil. Nesse sentido, argumentamos que quando avaliamos as emissões vinculadas a setores de *commodities*, como muitos dos minerais brasileiros, as atividades logísticas podem contribuir significativamente para as mudanças climáticas. Essa situação é causada pelo fato de que as *commodities* geralmente passam por pouca transformação industrial e, ao mesmo tempo, são transportadas por longas distâncias para abastecer o mercado internacional, emitindo grande quantidade de GEEs. Como consequência dessa característica, cálculos que apenas medem as emissões da extração e da concentração de minérios podem subestimar as contribuições do produto final para as mudanças climáticas. Nós usamos o caso do minério de ferro como base de nosso estudo. Essa escolha se deve pelo fato de o minério de ferro ter um papel fundamental na balança comercial brasileira; em 2020, ele foi o segundo produto mais exportado pelo país (12,3%), ficando atrás apenas da soja (13,7%) (ITC, 2023).

O debate sobre a relação entre mineração e mudanças climáticas é um tema relevante, muitas vezes deixado em segundo plano. O setor de mineração possui um papel muito importante para as mudanças climáticas devido ao seu alto consumo de energia (Irrarázabal, 2006; Liu *et al.*, 2021). As estimativas de Azadi, Northey, Ali, e Edraki (2020) indicam que, em 2018, o beneficiamento primário de minerais e metais foi responsável por cerca de 10% das emissões globais de GEEs relacionadas ao consumo de energia. As emissões de GEEs podem estar direta e indiretamente relacionadas às atividades de mineração. As emissões diretas estão associadas ao consumo de combustíveis fósseis por equipamentos como pás-carregadeiras e caminhões dentro das minas, bem como às emissões derivadas da transformação de materiais (como no caso da liberação de perfluorocarbonos pelo processo de eletrólise de alumínio). Por outro lado, as emissões indiretas podem estar ligadas, por exemplo, à geração de energia elétrica usada nas plantas de concentração de minério (Irrarázabal, 2006; Liu *et al.*, 2021).

Apesar da alta contribuição das atividades de mineração para as mudanças climáticas, a literatura internacional sobre o assunto ainda parece ser escassa e pouco transparente. Azadi *et al.* (2020) afirmam que os impactos da mineração sobre as mudanças climáticas não são totalmente contabilizados. Além disso, Odell, Bebbington, e Frey (2018) comentam que a maior parte da pesquisa sobre o tema é realizada por organizações do setor ou agências governamentais associadas a ele, portanto haveriam poucos dados disponíveis realmente independentes.

O presente estudo se propõe a estimar a “pegada de carbono” do minério de ferro extraído no Brasil, considerando, não apenas as atividades de extração e concentração, mas também as contribuições do desmatamento e da cadeia logística. Para isso, ele está organizado em quatro seções, além desta introdução. A Seção 2 discute os desafios e limitações de se calcular as emissões de GEEs do setor mineral. Em seguida, fazemos uma descrição geral do setor de minério de ferro em diferentes contextos e analisamos os dados existentes em relação às emissões de GEEs no Brasil. Na Seção 4, descrevemos nosso método de pesquisa, apresentamos os resultados e os confrontamos com estudos existentes. Por fim, destacamos as limitações de nossa pesquisa e avaliamos seus possíveis impactos. Além dessas seções, também incluímos um anexo onde descrevemos em mais detalhes nossa metodologia e as fontes de dados usadas.

2. Limites e desafios do estudo das emissões de GEEs do setor mineral

Estudos e estimativas sobre emissão de GEEs normalmente se baseiam em ferramentas de Análise de Ciclo de Vida (ACV). A ACV consiste em uma metodologia de coleta de dados e simulação que, em teoria, permitiriam avaliar distintos impactos ambientais de diferentes produtos (de Haes, 1993). O uso da ACV ganhou mais atenção a partir dos anos 1990, naquele momento novas ferramentas permitiam enxergar a responsabilidade dos fabricantes para além do seu processo produtivo e compreender como suas decisões se refletiam nos impactos causados pelo produto fabricados. A partir do entendimento de que se deveria mensurar os impactos ambientais dos produtos “do berço ao túmulo”, começaram a surgir conceitos como responsabilidade estendida do produtor, responsabilidade pós-consumo, economia circular, entre outros. Portanto, transferir o foco das análises de processos isolados para o produto como um todo tem sido aceito como a estratégia mais indicada no contexto da gestão ambiental.

A aplicação de tais ferramentas para o setor mineral, porém, ainda gera alguma discussão. Por um lado, tem havido algum otimismo, e autores como Nuss e Eckelman (2014) acreditam que seja possível medir e quantificar adequadamente os impactos ambientais, incluindo as emissões do setor. Por outro lado, outros pesquisadores identificam limitações metodológicas, que criam resultados inconsistentes. Esses problemas estão associados, por exemplo, a incertezas e à qualidade dos dados (Yellishetty, Ranjith, Tharumarajah, e Bhosale, 2009). Como consequência, os resultados podem variar de acordo com o método empregado, com o modelo de simulação adotado e com o minério estudado (Farjana, Huda, Mahmud, e Saidur, 2019).

Awuah-Offei e Adekpedjou (2011) mencionam que uma limitação dos estudos é a falta de uniformidade das unidades utilizadas, por exemplo, se o estudo trata de minério bruto ou minério beneficiado. Eles ainda argumentam que a intensidade dos impactos pode variar, a partir do contexto da extração; por exemplo, a escala e a produtividade das minas podem comprometer a comparação.

A escolha das “fronteiras de análise” também foi identificada como outro aspecto crítico dos estudos sobre os impactos da mineração. “Fronteiras de análises” são os critérios adotados que definem quais os processos que são incluídos em uma ACV (ISO, 2006). No caso do minério de ferro, por exemplo, um estudo pode

estudar os impactos apenas da extração, outro da extração e da concentração e outro ainda da extração, concentração e produção de ferro gusa. Como as fronteiras são diferentes, os resultados serão distintos. Já em 2001, Stewart (2001) mencionou inconsistências relacionadas às fronteiras das avaliações, uma vez que a definição das fronteiras poderia gerar resultados mais favoráveis aos interesses do proponente. Ela também comentou que as diferenças nos limites do sistema dificultariam a comparação de estudos distintos.

Também relacionado a questões das fronteiras de análise, Farjana *et al.* (2019) comentaram que a falta de dados adequados restringiu o desenvolvimento de estudos mais amplos. Consequentemente, a maioria dos estudos se restringiria à análise do berço ao portão (Haque, 2022), entendendo o “portão” como a saída da mina. Em outras palavras, os estudos se concentrariam apenas à extração e beneficiamento, não contemplando todo o “ciclo de vida” dos minérios. No caso do mercado de *commodities*, porém, conforme proposto neste estudo, devido à dimensão global e ao alto volume do mercado de minério, esse foco limitado poderia subestimar o impacto real do minério de ferro.

Outro problema associado ao estudo dos impactos do setor mineral diz respeito à dificuldade de acesso aos dados. Por exemplo, Awuah-Offei e Adekpedjou (2011) descreveram as informações sobre mineração dentro dos bancos de dados de ACV como caixas pretas; da mesma forma, Haque (2022) afirmou que muitas avaliações se mostram inadequadas devido à pequena disponibilidade de dados públicos. Essa questão é ainda mais complicada para estudos fora da Europa, pois os bancos de dados relativos a países periféricos, como o Brasil, são ainda bastante incompletos (de Eicker *et al.*, 2010).

Devido a esses desafios, existe ainda a necessidade da melhoria das metodologias para quantificar os impactos ambientais do setor mineral. Esse aprimoramento se faz ainda mais urgente no caso das emissões de GEEs, pois há uma expectativa de que a contribuição do setor para as emissões globais aumentará de forma significativa no futuro. De acordo com a OECD (2018), a extração e o processamento de apenas sete metais (alumínio, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) deverão ser responsáveis por 9% do total de emissões de GEEs em 2060. Como forma de contribuir para o debate, apresentamos aqui uma proposta de uma metodologia mais ampla para estimar a “pegada de carbono” do minério de ferro extraído no Brasil.

3.

A extração de minério de ferro e as mudanças climáticas no contexto brasileiro

3.1 A rede global de extração de minério de ferro

Nesta seção apresentamos brevemente as características da extração de minério de ferro na Austrália, Brasil e China, para ajudar nas avaliações que serão apresentadas na Seção 4. Em nosso trabalho, tentamos repetir a metodologia que vem sendo adotada por pesquisadores internacionais, especialmente em estudos na Austrália e na China. Por isso, conhecer o contexto desses países é importante para orientar a avaliação dos resultados encontrados em uma perspectiva comparada.

O minério de ferro é um exemplo particularmente relevante para o debate das emissões de GEEs do setor mineral devido à quantidade extraída e ao volume comercializado globalmente. De acordo com ITC (2023), em 2020, as exportações de minério de ferro atingiram 1,6 bilhão de toneladas, mais de 10 vezes a quantidade de minérios e concentrados de alumínio, o segundo metal no ranking de exportação de minério, que somou 149,0 milhões de toneladas (Mt).

A Austrália é o maior produtor e exportador de minério de ferro do mundo (Tuck, 2022). Em 2020, respondeu por 55,7% das exportações globais (ITC, 2023). Ela é um exportador relevante desde a década de 1960. O ferro australiano é extraído principalmente na região de Pilbara, que é responsável por mais de 95% da produção do país; de Pilbara, o minério de ferro é transportado por trem por distâncias que variam entre 210 e 426 km (Beresford, Pettit, e Liu, 2011). Devido ao alto grau de suas reservas, o minério é exportado com processamento mínimo, e a transformação consiste principalmente em britagem e peneiramento (Holmes, Lu, e Lu, 2022).

O Brasil é o segundo exportador mais importante de minério de ferro. Em 2020, ele foi responsável por 16% da extração global (Tuck, 2022) e 18,3% das exportações (ITC, 2023). Ao mesmo tempo, a mineração brasileira depende fortemente do mercado global. Em 2020, o Brasil extraiu 388,0 Mt (Tuck, 2022) e exportou 341,5 Mt (ITC, 2023), o que significa que 88% do total extraído no Brasil foi direcionado a consumidores internacionais.

A China é o maior importador de minério de ferro do mundo. Em 2020, respondeu por 75,3% das importações globais (ITC, 2023). Além disso, a China também extrai grande quantidade de minério ferro, cerca de 15% do total global (Tuck, 2022) em 2020. As reservas de ferro chinesas são pobres, com uma concentração média de 35,5% de ferro. Portanto, elas exigem muito processamento, o que resulta em altos custos (Holmes *et al.*, 2022). Consequentemente, devido à enorme demanda do setor siderúrgico do país, a China depende muito de fornecedores internacionais (Holmes *et al.*, 2022).

3.2 Minério de ferro e emissões de GEEs: uma avaliação das estimativas existentes no Brasil

No Brasil, as informações oficiais sobre a contribuição da mineração para as emissões de GEEs são limitadas. Existem diferentes agências públicas que fornecem dados, mas eles costumam separar as emissões por processos e agregar por minérios, o que dificulta uma avaliação por tipo de minério ao longo de seu ciclo de vida. Por outro lado, as estimativas divulgadas pelo setor privado possuem algumas restrições metodológicas.

O relatório sobre as estimativas anuais brasileiras de emissões de GEEs agrega dados de mineração sem separar minerais específicos. Em 2020, as emissões da mineração relacionadas à energia atingiram quase 4,0 bilhões de kg de CO₂ eq, o equivalente a mais de 15% de todas as emissões residenciais associadas ao consumo de energia (MCTI, 2022). Além das emissões energéticas, também há as emissões vinculadas a processos industriais, porém, os dados disponíveis consideram apenas aquelas derivadas da produção de cimento, cal, vidro e outros processos relacionados ao carbonato. Embora o MCTI (2022) publique dados para o setor de ferro e aço, nesta estimativa ele separa a contribuição das atividades extrativas, e inclui apenas os processos de transformação, que compreendem a produção de ferro-gusa e o refino de aço.

O Balanço Energético Brasileiro, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), não apresenta informações específicas para a extração de minério de ferro; ele considera o consumo de energia da mineração como um todo, junto com as atividades de pelotização. Em 2020, esses dois setores consumiram 2,1 mil toneladas equivalentes de petróleo (tep), sendo as principais fontes de energia eletricidade (47,5%), gás natural (10,5%) e óleo combustível (5,4%). Esta demanda correspondeu a 7,6% do consumo residencial de energia de todo o país. O relatório da EPE não permite a identificação do consumo apenas do minério de ferro, tampouco converte o consumo de energia em emissões de GEEs.

As informações oficiais relacionadas às emissões específicas da extração de minério de ferro no Brasil estão bastante desatualizadas. O Ministério de Minas e Energia (MME) publicou a última versão de seu “Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono” em 2013, com base em dados coletados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). O MME (2013) concluiu que, em 2008, o setor de mineração de ferro emitiu 1,5 bilhão de kg de CO₂ eq, e a taxa de emissão foi de 3,09 kg de CO₂ eq/t ROM². Considerando a produção de 350,7 Mt (65,9% Fe) em 2008 (DNPM, 2010), pode-se estimar a taxa de emissão em 4,3 kg CO₂ eq/t para o concentrado de minério de ferro. O relatório também estimou que a produção de pelotas emitiu 5,9 bilhões de kg de CO₂ eq (MME, 2013), o que poderia ser estimado em 107,7 kg de CO₂ eq/t.

No ano seguinte, o IBRAM (2014) apresentou novas estimativas para o setor de minério de ferro. Ele considerou 2011 como ano de referência e estimou as emissões totais de 1,6 bilhão de kg de CO₂ eq, incluindo emissões diretas e aquelas relacionadas à compra de eletricidade. O inventário do IBRAM limitou-se à emissão total e não estimou nenhuma taxa de emissão. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral, naquele ano, o país produziu 398,1 Mt de minério de ferro (64,7% Fe), portanto, poderíamos estimar uma taxa de emissão de 4,1 kg CO₂ eq/t. O relatório também calculou em 5,9 bilhões de kg de CO₂ eq as emissões anuais da produção de pelotas. Considerando que o Brasil produziu 62,4 Mt de pelotas, a taxa de emissão seria igual a 94,5 kg de CO₂ eq/t (DNPM, 2012).

Apesar de um crescente discurso sobre a preocupação do setor com suas emissões de GEEs, o IBRAM levou dez anos para atualizar suas estimativas. Em 2024, ele lançou um novo relatório, tendo por base o ano de 2022, que considerava as emissões referentes a decapeamento e abertura de frente de lavra (mudança do uso do solo/remoção de cobertura vegetal e uso de veículos), extração, beneficiamento (atividades de separação e obtenção de concentrado), movimentação de máquinas e transporte interno, recuperação de áreas abertas, encerramento de frente de lavra e emissões associadas à aquisição de energia elétrica. A partir dos dados obtidos junto às empresas do setor, o IBRAM estimou em 8 kg CO₂ eq/t as emissões associadas ao minério de ferro (IBRAM, 2024)³.

² Run of mine (ROM): corresponde ao material bruto extraído da mina, tal como é encaminhado pelos caminhões, caçambas ou esteiras transportadoras e antes de qualquer tipo de tratamento (U.S. Bureau of Mines, 1996).

³ Nesse sentido, é necessário fazer um breve comentário sobre as estimativas de emissões de GEE. A metodologia mais comumente usada separa as emissões em três grupos: Escopo 1, 2 e 3. As emissões de Escopo 1 são as emissões diretas associadas às operações que são de propriedade e controle de uma empresa. O Escopo 2 se refere às emissões vinculadas à energia (eletricidade, vapor, aquecimento ou resfriamento) comprada pelas empresas. Já as emissões de Escopo 3 incluem uma diversidade de emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de valor das empresas (Greenhouse Gas Protocol, 2022). O IBRAM (2024) apresenta conjuntamente dados referentes às emissões de Escopo 1 e 2, estimados em 8 kg CO₂ eq/t. Com relação ao escopo 3, ele calculou apenas os valores para “processamento de produto vendido” (categoria 10). Para o caso do minério de ferro, o valor estimado foi 1.270 kg CO₂ eq/t; porém o relatório não explicita quais processamentos seriam esses, por exemplo, se incluiriam pelotização, produção de ferro-gusa ou fabricação de aço.

Diferente do que foi feito em 2014, em sua publicação mais recente, o IBRAM não apresentou uma comparação entre os inventários realizados no passado e os números atualizados, nem discutiu, em profundidade, eventuais mudanças de metodologia. Por exemplo, no estudo de 2014 ele separou as emissões associadas à remoção de cobertura vegetal, o que não foi feito na versão atual. Da mesma forma, ele não descreveu a metodologia adotada para tal estimativa, o que dificulta uma avaliação em profundidade (IBRAM, 2014, 2024; Greenhouse Gas Protocol, 2022).

Para além da falta de clareza sobre as emissões associadas à mudança do uso do solo, outra limitação do estudo publicado em 2024 foi a não inclusão das emissões vinculadas à logística, em particular referentes ao transporte ferroviário e marítimo. Assim, este inventário, deixa de fora, as emissões de “transporte e distribuição de produtos vendidos” (categoria 9 do Escopo 3) (Greenhouse Gas Protocol, 2022; Ibram, 2024).

Como será descrito a partir da próxima seção, essa desconsideração pode levar a uma subestimação da “pegada de carbono” do minério de ferro extraído no Brasil. Em 2020, o consumo de energia das ferrovias foi equivalente a 0,5% do consumo total de energia no Brasil (EPE, 2022), e, naquele ano, o transporte de minério de ferro somou 85,3% do frete ferroviário total no Brasil (ANTT, 2021). Portanto, o transporte ferroviário, que tem diferentes mineradoras como concessionárias, é um importante contribuinte para as mudanças climáticas. Além disso, conforme mencionado anteriormente, o Brasil extrai minério de ferro principalmente para abastecer o mercado internacional, e o embarque para o exterior também contribui em grande parte para as emissões de GEE. Por esse motivo, consideramos que a não inclusão desses elementos subestima significativamente as emissões associadas ao minério de ferro e, assim, tentamos incluir tais dados em nossas estimativas, entendendo que, dessa forma, contribuimos para valores mais acurados das emissões associadas ao minério de ferro extraído no Brasil.

4.

Método e resultados

4.1 Descrição do sistema e fontes de dados

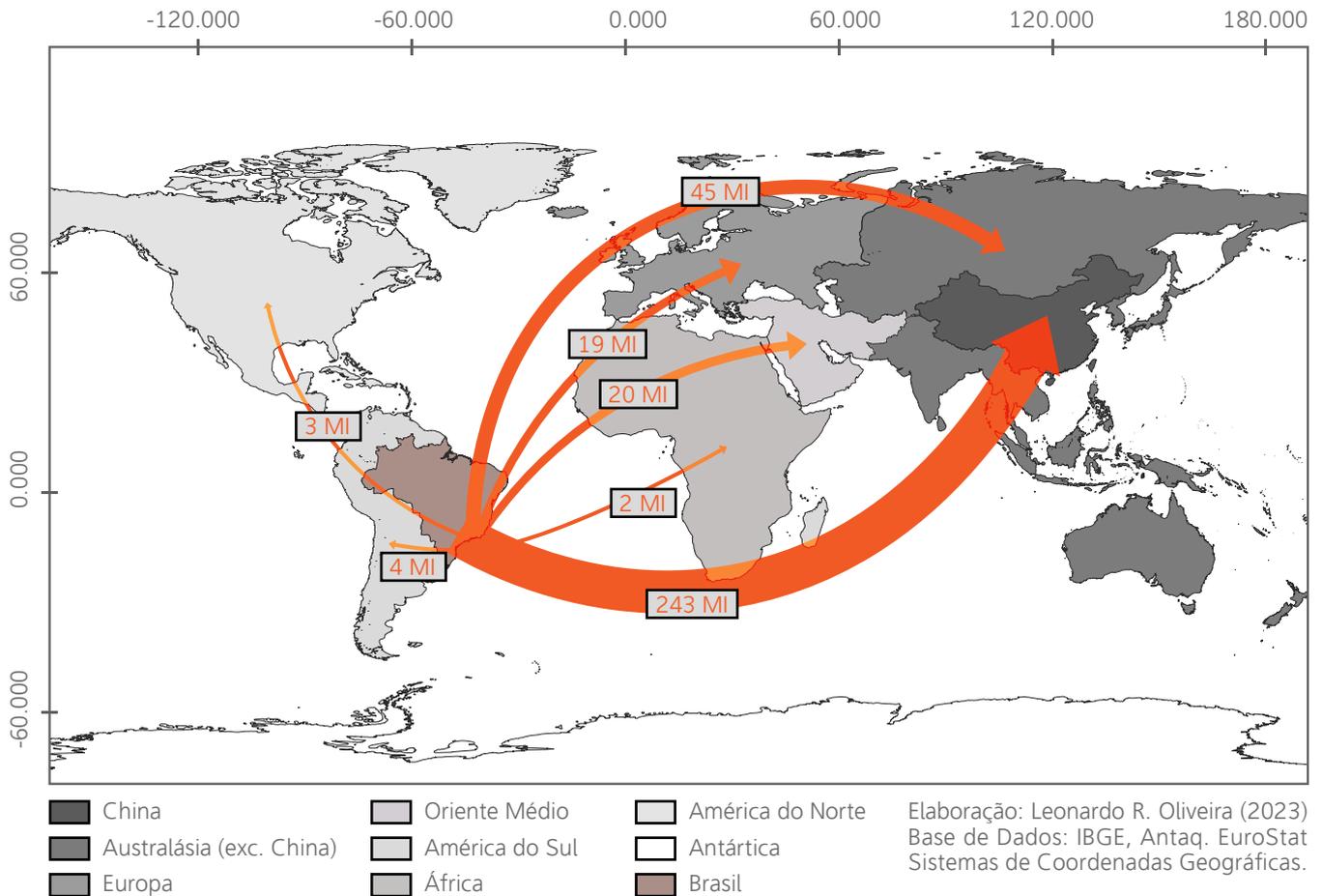
A extração de minério de ferro no Brasil é concentrada em duas regiões; em 2020, 55,2% da extração ROM veio do estado de Minas Gerais, e 43,4% do estado do Pará (ANM, 2020). Dependendo do preço do minério de ferro e de problemas operacionais, como os dois grandes desastres com barragens de rejeitos ocorridos em Minas Gerais em 2015 e 2019 (Milanez, Ali, e Puppim Oliveira, 2021), os dois estados podem trocar de posição na liderança do ranking.

Do Pará, o minério é transportado pela Estrada de Ferro Carajás (972 km) até os portos do estado do Maranhão. Em Minas Gerais, uma pequena quantidade é levada por minerodutos, e a maior parte é transportada por trem pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (905 km) ou pela MRS Logística (cerca de 480 km) até portos nos estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro (ANTT, 2023). A empresa de mineração Vale S.A. é concessionária total ou parcial das três ferrovias. Depois de chegar aos portos, alguns dos quais também são administrados por empresas de mineração, o minério é exportado para outros países (ANTT, 2020; Holmes *et al.*, 2022). Uma pequena fração do material extraído pode ser transportada por caminhões para usinas de ferro-gusa e siderúrgicas quando estão próximas às minas (Lovón-Canchumani, Lima, e Oliveira, 2015). Parte do minério de ferro é transformada em pelotas antes de ser vendida para usinas siderúrgicas no Brasil ou no exterior. As usinas de pelotização estão localizadas, principalmente, na costa, perto dos portos.

O minério de ferro e as pelotas são exportados principalmente por empresas de logística terceirizadas. No entanto, o transporte marítimo é um elemento crucial da estratégia das empresas de mineração, especialmente devido à sua importância no custo total. Em 2008, a Vale encomendou navios Valemax, que podem transportar 400.000 t de minério de ferro; eles têm o dobro da capacidade dos navios graneleiros Capesize (aprox. 180.000 t), tradicionalmente utilizados pelas mineradoras. Os navios Valemax são usados principalmente para viagens de longa distância, especialmente para a Ásia, para reduzir os custos operacionais (MESDE, 2012; Papadionysiou, 2014; Yang, 2016).

O papel do comércio internacional é fundamental para se estimar a “pegada de carbono” do minério de ferro, uma vez que, entre 2016 e 2020, o Brasil exportou o equivalente a 80% do minério beneficiado. Como ilustrado na Figura 1, esse minério abastece principalmente a Ásia, com destaque para a China.

Figura 1: Exportação de minério de ferro do Brasil, 2020 (dados em toneladas)



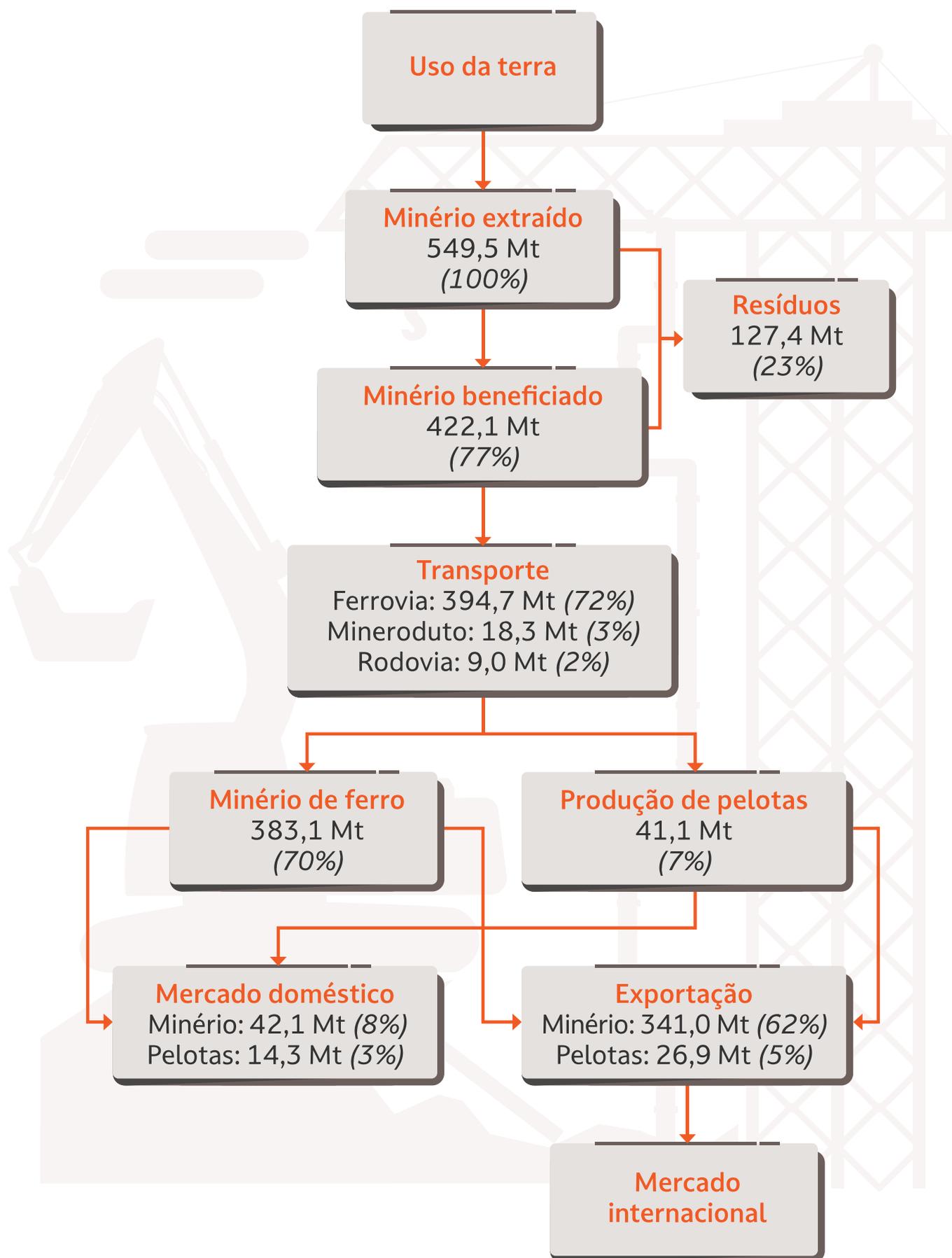
Fonte: Secex (2023)

Este estudo realiza uma atribuição das emissões ao longo do ciclo de vida e tem como unidade funcional 1 t de concentrado de minério de ferro e 1 t de pelotas, incluindo o transporte até o primeiro consumidor. As fronteiras de análise são consideradas como sendo do berço ao portão, assumindo o “portão do consumidor”, ou seja, as siderúrgicas nacionais e internacionais. Para refletir esse sistema, os processos de mineração de minério de ferro foram divididos nos seguintes estágios:

- Mudança no uso da terra: desmatamento
- Mineração: desmonte, carregamento e transporte
- Processamento: trituração, moagem, peneiramento e classificação
- Pelotização: espessamento, filtragem, secagem
- Transporte terrestre: ferroviário, rodoviário e por dutos
- Exportação

A Figura 2 resume as fronteiras do sistema e o balanço de massa de minério de ferro e pelotas com base na média anual referente ao período entre 2016 a 2020. Para a produção de pelotas, assumiu-se que 0,948 tonelada de minério de ferro produz 1 tonelada de pelotas (Lovón-Canchumani *et al.*, 2015).

Figura 2: Fronteiras do sistema e balanço de massa para a produção de minério de ferro e pelotas no Brasil (média anual de 2016 a 2020)



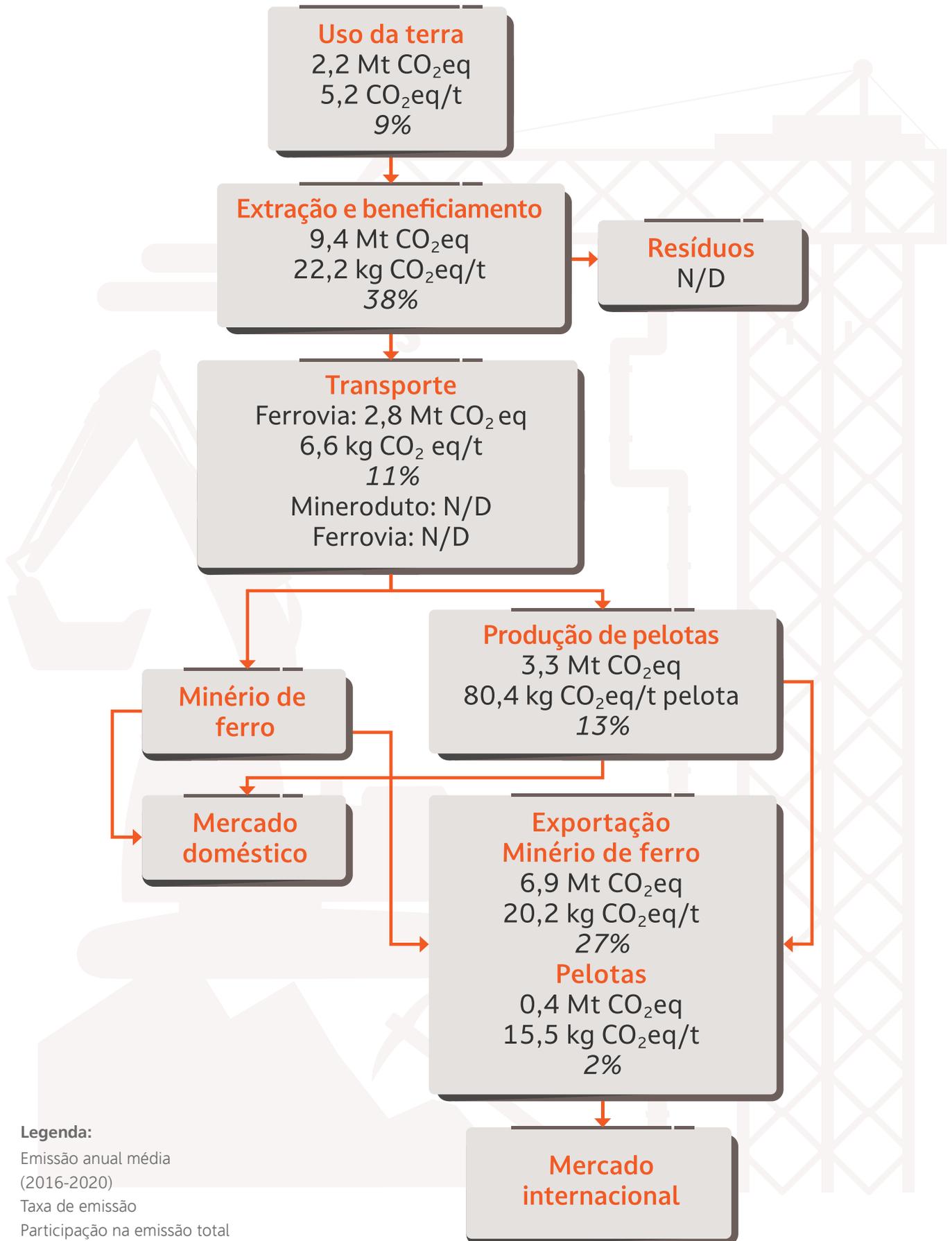
Fonte: Os autores a partir de dados fornecidos pela ANM, ANTT, SECEX, vários anos.

O estudo se baseou em dados secundários obtidos em bancos de dados públicos mantidos por órgãos federais, como a Agência Nacional de Mineração (ANM), a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e a Secretaria de Comércio Exterior (SECEX). Para garantir a comparabilidade das diferentes fontes, o intervalo de dados refere-se ao período de 2016 a 2020. Houve dificuldades consideráveis para encontrar referências confiáveis atualizadas e relativas a todo o Brasil sobre a emissão de GEEs para a extração e concentração de minérios, bem como para a pelletização. Para essas atividades, baseamos nossas estimativas no banco de dados Ecoinvent versão 3.8 (Wernet *et al.*, 2016), usando o software Activity Browser (Steubing, de Koning, Haas, e Mutel, 2020).

4.2 Resultados e discussão

Os resultados do estudo são resumidos na Figura 3. Ela mostra as estimativas para cada estágio, considerando as emissões anuais para o período 2016-2020, a taxa de emissão e a participação de cada atividade nas emissões totais. Os dados foram estimados para 1 t de minério de ferro concentrado, exceto a pelletização e o transporte de pelotas, que se referem a 1 t de pelotas.

Figura 3: Estimativas de emissões de CO₂ eq para o setor de minério de ferro no Brasil



Fonte: Ver Anexo metodológico.

Os dados apresentados na Figura 3 mostram a importância de se incluir as atividades logísticas nas estimativas do setor de minério de ferro. Em nosso caso, o transporte terrestre e o transporte marítimo transoceânico são responsáveis, juntos, por 40% do total de emissões. A pesquisa também indica a importância das emissões relacionadas à mudança no uso da terra. Conforme indicado acima, o desmatamento pode ser responsável por quase 10% da emissão total do setor do minério de ferro. Na Tabela 1, estimamos as taxas de emissão relacionadas a 1 t de concentrado de minério de ferro e 1 t de pelotas.

Tabela 1: Taxas de emissão de CO₂ eq de 1 tonelada de concentrado e de pelotas de minério de ferro

Atividade	Concentrado de minério de ferro	Pelotas
Uso da terra	5,2	4,9
Extração e concentração	22,2	21,0
Transporte	6,6	6,3
Pelotização	0	80,4
Exportação	20,2	15,5
Total	54,2	128,1

Fonte: Ver anexo metodológico

Observação: Todos os valores estão em kg CO₂ eq/t.

Conforme discutido na Seção 2 há muitos desafios no desenvolvimento de estudos sobre as emissões de GEEs para o setor de mineração, e enfrentamos a maioria deles nesta pesquisa. Essas limitações criam dificuldades na comparação de resultados de diferentes trabalhos. No entanto, resumimos aqui alguns estudos existentes para colocar nossa pesquisa em perspectiva.

Poucos autores tentaram avaliar as emissões de GEEs do setor de minério de ferro no Brasil. Por exemplo, Lovón-Canchumani *et al.* (2015) estudaram vários impactos ambientais da produção de 1 t de pelotas. A pesquisa baseou-se em dados da Samarco Mineração, em 2013. Os autores consideraram as atividades de mineração, concentração e pelletização. Eles consideraram os impactos até as pelotas chegarem ao porto para exportação. Neste caso, as emissões logísticas foram baixas porque a Samarco usa dutos, e não ferrovias, para transportar seu minério de Minas Gerais para as usinas de pelletização no Espírito Santo. Do ponto

de vista das emissões de GEEs, os autores verificaram que as atividades mais relevantes eram a concentração de minério (30%), eletricidade (18%) e mineração (11%). Embora seja um estudo relevante, o trabalho se limitou a ver a participação relativa das atividades e não estimou a quantidade de GEEs emitidos.

Em outro trabalho, Ferreira e Leite (2015) tentaram avaliar os impactos ambientais do minério de ferro no Brasil; nesse caso, eles identificaram os impactos em termos absolutos. Os autores também usaram dados primários da Samarco Mineração, além de outras informações secundárias. Sua unidade de análise era 1 t de concentrado de minério de ferro “no portão”. As atividades envolvidas incluíam extração, concentração e sistemas de suporte (incluíam transporte de pessoas e gerenciamento de resíduos). Ao debater a mudança climática, os autores concluíram que a produção de 1 t de concentrado de minério de ferro liberaria 13,3 kg de CO₂ eq; eles associam as emissões de GEEs principalmente ao consumo de eletricidade na usina de concentração (31,5%), moagem (17,0%) e aos sistemas de suporte (8,9%). Apesar da semelhança na definição de fronteiras, os resultados apresentados por Ferreira e Leite (2015) para extração e processamento de minério são mais altos do que os encontrados pelo MME (2013) e pelo IBRAM (2014, 2024), que foram apresentados na Seção 3.2.

Nossas estimativas para as atividades de extração e concentração exclusivamente foram maiores que os números do IBRAM (2014, 2024) e de Ferreira e Leite (2015). Essa avaliação pode sugerir algumas limitações em nossas suposições, possivelmente associadas ao teor do minério usado em nossas análises. No entanto, a adoção dos fatores de emissão desses trabalhos apenas fortaleceria nosso argumento, uma vez que aumentaria ainda mais a importância relativa das atividades de logísticas⁴.

Além dessas pesquisas que analisam especificamente o Brasil, outros estudos tentaram estimar a emissão de GEEs da extração de minério de ferro com base em dados de países específicos, como Austrália e China. Em grande medida, nossa pesquisa foi inspirada nesses trabalhos, uma vez que buscavam estimar as emissões ao longo de todo o ciclo de vida do produto e não considerando apenas alguns processos específicos.

Haque (2022) desenvolveu um estudo bastante detalhado sobre o consumo de energia e as emissões de GEEs do minério de ferro na Austrália. Ele atualizou e expandiu uma pesquisa anterior (Norgate e Haque, 2010) com base principalmente em dados primários e informações da literatura. Ele definiu uma unidade funcional como 1 t de minério de ferro “pronto para carregamento em navio”. Isso seria equivalente a 1 t de concentrado de minério, mas, como mencionado anteriormente, devido ao alto grau das reservas australianas, a maior parte do minério exige menos transformação do que o extraído em Minas Gerais. O autor incluiu em seu estudo os impactos de perfuração e detonação, carregamento e transporte, britagem e peneiramento, empilhamento e

recuperação, transporte ferroviário e operações portuárias. A longa distância entre as minas e os portos na Austrália justifica a inclusão do transporte ferroviário. Ele estima as emissões em 11,9 kg de CO₂ eq/t e associa as emissões principalmente ao carregamento e ao transporte (50,5%), à britagem e ao peneiramento (21,0%) e ao transporte ferroviário (10,9%). Usando dados de 2011, o autor conclui que a emissão anual da mineração e do processamento de minério de ferro foi equivalente a 5,8 bilhões de kg de CO₂ eq.

Na segunda parte de seu artigo, Haque (2022) apresenta alguns cenários relacionados ao transporte marítimo internacional. Ele estima a contribuição de diferentes atividades, considerando os portos chineses como o “portão”. Nessa análise, as emissões de GEEs relacionadas ao transporte marítimo de minério de ferro foram equivalentes a 56,9% de todas as emissões, quase sete vezes as emissões de “carregamento e transporte”, que foram os principais contribuintes em sua primeira avaliação. Esses dados indicam a relevância do transporte marítimo internacional e como a definição do escopo pode alterar consideravelmente os resultados de uma pesquisa.

Outro estudo bastante abrangente foi desenvolvido por Gan e Griffin (2018) para avaliar as emissões de GEEs da extração de minério de ferro na China. Sua unidade funcional foi 1 t de concentrado de minério de ferro entregue na usina siderúrgica. Os autores incluíram em sua análise a mineração a céu aberto e subterrânea, o processamento de minério, o transporte ferroviário e os processos de aglomeração (pelotização e sinterização). Diferentemente de estudos anteriores, eles estimaram as emissões da decomposição da biomassa substituída pelas minas e a redução da produtividade fotossintética durante a vida útil das minas. Os dados foram coletados da literatura científica e de relatórios governamentais. Os autores apresentaram três cenários diferentes, que presumiram diferentes fontes de consumo de energia.

O estudo concluiu que a mineração a céu aberto emitiria entre 35 e 39 kg de CO₂ eq/t, dependendo do cenário. As atividades mais significativas foram o carregamento e o transporte (67%), seguidos pela remoção da vegetação e do solo (24%). Ao adicionar a concentração de minério, as emissões aumentaram para 100 a 120 kg de CO₂ eq/t. A inclusão de transporte e aglomeração fez com que a taxa de emissão chegasse a 270 - 280 kg CO₂ eq/t. As emissões de sinterização foram estimadas em 200 - 280 kg de CO₂ eq/t, e a contribuição da pelotização foi avaliada em 25 - 30 kg de CO₂ eq/t.

Ao olharmos para estudos internacionais, vemos que eles tendem a ser mais abrangentes do que os realizados no Brasil. Ao invés de olhar apenas para as atividades de extração e concentração, eles já incluem logística e uso do solo. Tais experiências reforçam nosso argumento de que tais atividades devem também ser incluídas nos estudos realizados no Brasil.

Além disso, os estudos existentes mostram que o contexto local - por exemplo, teor do minério, distribuição espacial das minas, infraestrutura logística, fontes de energia etc. - provavelmente resulta em diferenças consideráveis nas emissões de minério de ferro em países distintos. Por conta de tais diferenças, qualquer comparação de valores com outros países deve ser feita com cuidado. Quando comparados com o trabalho de Haque (2022), nossos resultados de extração e concentração são mais altos. Por outro lado, nossos dados são consideravelmente mais baixos do que os apresentados por Gan e Griffin (2018). Até certo ponto, esse resultado era esperado, principalmente devido às diferenças nos graus de minério de ferro nos três países, porém não devem ser tomados como conclusivos, pois outros ajustes metodológicos podem ser necessários.

5.

Considerações finais

Ao longo deste texto, argumentamos que, ao avaliar as emissões de *commodities* minerais, quase sempre voltadas para a exportação, a metodologia “do berço ao portão” deve considerar o “portão do consumidor” em vez do “portão da mina”. Em outras palavras, ao se tentar medir a “pegada de carbono” de um produto, baseado nos princípios da ACV, deve-se mover o foco das análises para além do “processo”, considerando os impactos que vão além daqueles que ocorrem “dentro dos muros” das empresas. Nesse sentido, com essa pesquisa tentamos adaptar metodologicamente os dados sobre a “pegada de carbono” do minério de ferro extraído no Brasil a partir de padrões adotados internacionalmente.

Historicamente, os dados oficiais e as pesquisas acadêmicas no Brasil sobre emissões de GEEs vinculadas ao minério de ferro têm se limitado às etapas de extração e concentração. Essa definição restrita dos limites do sistema pode resultar na subestimação da real intensidade de emissões do minério extraído no país. Ao adotar propostas metodológicas descritas pela literatura internacional e incorporar emissões relacionadas à logística, nossos resultados divergem consideravelmente de estudos anteriores. Dessa forma, propomos a necessidade de ampliar os debates sobre como aprimorar as estimativas das emissões associadas aos minérios no país.

Além disso, nossa pesquisa também sugere a necessidade de estudos mais detalhados sobre as emissões vinculadas ao desmatamento e à mudança do uso do solo decorrentes pelos projetos minerais. Nossas estimativas apenas para essas emissões corresponderam a cerca de 65% da intensidade total de emissões estimadas pelo IBRAM (2024). O Instituto, todavia, não descreve a metodologia adotada em suas estimativas, o que impediu uma comparação de resultados.

Conforme mencionado na seção 2, um dos grandes obstáculos de se realizar pesquisas dessa natureza é a dificuldade de acesso aos dados. A realização deste estudo enfrentou muitos desafios, em particular referentes às emissões das atividades de extração e concentração. Se as bases de informações que o setor utiliza para seus cálculos fossem de acesso aberto, seria possível realizar estimativas independentes com maior precisão. Ainda, algumas das estimativas apresentadas no presente trabalho só foram possíveis devido à hegemonia do minério de ferro no setor extrativo do Brasil e à decorrente existência de alguns dados públicos para esse segmento. Portanto, uma maior transparência do setor é ainda mais necessária para permitir a realização de pesquisas semelhantes sobre outros minerais.

Em termos gerais, entendemos que a principal contribuição desta pesquisa é metodológica. Devido a todas as dificuldades descritas ao longo do trabalho, não é possível afirmar que encontramos “o valor correto” da “pegada de carbono” do minério de ferro extraído no Brasil. Ao contrário, entendemos que nossa maior contribuição diz respeito a “como” estimar esse valor.

Com o Brasil sediando a COP30 em 2025, é provável que diferentes setores intensivos em energia, como a mineração, sejam cada vez mais pressionados a apresentar dados sobre suas emissões de GEEs. Nossa pesquisa se baseia nas experiências internacionais e sugere a necessidade de estudos mais abrangentes do que aqueles que estão sendo realizados até o momento. Esperamos que ela sirva de inspiração para que outros pesquisadores, e o próprio setor, sigam esse caminho de forma a apresentar uma melhor estimativa do impacto da mineração para as mudanças climáticas.

6.

Anexo metodológico

Para a realização deste estudo, uma série de pressupostos tiveram que ser assumidos. Além disso, foram consultadas diferentes fontes de informação, bases de dados, bem como, artigos técnicos e científicos. Para não fatigar os leitores, os detalhes metodológicos da pesquisa não foram incluídos no corpo do texto. Por outro lado, optamos por apresentar essa informação no presente anexo, para permitir que outros pesquisadores conheçam nossa metodologia, se apropriem dela e venham a melhorá-la. Os dados são organizados por atividade avaliada, especificamente: uso da terra; extração, concentração e pelotização; transporte terrestre; e comércio internacional.

Uso da terra

As ligações entre mineração, desmatamento e emissão de GEEs estão bem documentadas na literatura. Liu *et al.* (2021) destacam que a expansão da mineração em áreas florestais leva à perda de árvores e ao aumento das emissões. Grantham *et al.* (2021) identificaram que as concessões de extração mineral ameaçam 11% das áreas florestais intactas do mundo. Os autores também observaram que o Brasil responde por 60% do total de áreas ameaçadas. Também com relação ao Brasil, Giljum *et al.* (2022) mencionaram que as atividades de mineração podem levar ao desmatamento até 50 km além dos limites da concessão. Na mesma linha, Sonter *et al.* (2017) estimaram que o desmatamento induzido pela mineração na Amazônia pode chegar a 12 vezes o tamanho dos polígonos explorados. Os autores argumentam que esse alto nível de impacto resulta de atividades de apoio, como logística e descarte de resíduos, e efeitos indiretos, como o deslocamento de agricultores e a expansão urbana.

Para estimar as emissões associadas ao desmatamento, usamos duas fontes de dados principais. Com relação ao tamanho das áreas, adotamos os números do Projeto Mapbiomas (2023), que, com base em imagens de satélite, estima as áreas desmatadas diretamente associadas à mineração. Os procedimentos para essas avaliações foram descritos por Souza Jr *et al.* (2020).

Seguindo a proposta de Sonter *et al.* (2017), para a Região Amazônica, multiplicamos por 12 a área diretamente associada às lavras pelo Projeto Mapbiomas (2023). Isso foi feito para incluir o desmatamento induzido por projetos de mineração. No entanto, para outros biomas, apenas o desmatamento direto foi considerado. Essa decisão foi baseada na falta de informações sobre o desmatamento indireto fora da Amazônia. Além disso, considerando a rede urbana de Minas Gerais, assumimos que o desmatamento induzido pela mineração neste estado seja menor do que na Região Amazônica.

Para estimar a quantidade de emissões de carbono associadas ao desmatamento, seguimos os procedimentos descritos por Gan e Griffin (2018) e incluímos as emissões relacionadas ao estoque de carbono da vegetação e à perda de produção primária líquida. As emissões associadas ao estoque de carbono referem-se aos GEEs gerados pelo desmatamento e foram estimadas com base na variação anual da área florestal entre 2016 e 2020. A produção primária líquida, por sua vez, está associada à quantidade líquida de carbono que as florestas capturam da atmosfera por meio da fotossíntese. A inclusão dessa variável baseia-se no pressuposto de que, depois que uma área é desmatada, ela deixa de capturar carbono. Para estimar a perda de produção primária líquida, aplicamos coeficientes de incremento de carbono de florestas virgens a toda a área desmatada, de acordo com biomas específicos (Amazônia, Cerrado e Caatinga). As emissões foram baseadas em Shimbo *et al.* (2022), que descreveram os procedimentos metodológicos para o Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa.

Extração, concentração e pelletização

Apesar de existirem inúmeras estatísticas públicas sobre o setor de minério de ferro, elas pouco informam sobre as emissões de GEEs do setor. Entre os dados regularmente publicados podem ser listados a quantidade de minério extraído e processado e a quantidade de pelotas produzidas. Há alguns dados antigos sobre emissões de anos específicos, conforme descrito na Seção 3.2, mas não há detalhes disponíveis sobre eficiência energética ou emissões relativas a atividades específicas. Quanto aos trabalhos acadêmicos, eles tendem a focar em dados e apenas uma empresa, o que dificulta uma generalização. Diante dessa falta de dados, para estimar as emissões de GEEs por extração e processamento, ajustamos as informações do banco de dados Ecoinvent para o contexto brasileiro, considerando a matriz energética e a qualidade do diesel usado no país.

As mesmas dificuldades e limitações foram encontradas para as estimativas das emissões associadas à pelletização. Nesse caso, também adaptamos as informações do Ecoinvent para a realidade brasileira.

Transporte terrestre

Como descrito na Seção 4.1, no Brasil o minério de ferro é transportado principalmente por ferrovia. A ANTT (2021) publica relatórios periódicos nos quais apresenta, para todas as empresas ferroviárias em operação, informações como carga total, carga de produtos específicos (por exemplo, minério de ferro, carvão, fertilizantes, açúcar, soja etc.) e consumo médio de combustível. Essas informações foram usadas para estimar o consumo de combustível relacionado ao transporte de minério de ferro por ferrovia e as emissões foram calculadas com base nos dados do Programa Brasileiro do GHG Protocol (FGVces, 2023).

Durante o período analisado, cerca de 4% do minério de ferro foi transportado por minerodutos. Duas empresas, Anglo American e Samarco, utilizam esse sistema logístico. Entretanto, devido ao rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em dezembro de 2015, a Samarco interrompeu sua operação no ano seguinte, retomando a extração somente em 2020. Portanto, os números referentes ao transporte por mineroduto referem-se principalmente à Anglo American (Anglo American, 2023; Samarco, 2023). Essas informações foram usadas principalmente para alimentar o balanço de massa, já que as emissões de GEEs do transporte por mineroduto foram consideradas extremamente baixas e não incluídas em nossas estimativas.

Por fim, não há dados agregados sobre o transporte rodoviário de minério de ferro. Embora ele seja incomum, existe para alguns casos específicos. Apesar de termos estimado a quantidade de minério transportada por caminhões, não incluímos sua contribuição para as emissões de GEEs devido à falta de dados consistentes, em especial sobre a distância percorrida. Devido à essa decisão, pode-se assumir que as emissões por transporte terrestre provavelmente são ainda maiores do que aquelas apresentadas.

Comércio internacional

Entre 2016 e 2020, o Brasil exportou minério de ferro para mais de 200 países. Para estimar as distâncias de transporte, organizamos os dados de acordo com as diferentes regiões do mundo (Ásia, Europa, Oriente Médio, América do Sul, América do Norte, América Central e Oceania) e consideramos a distância média ponderada para os países que somavam mais de 50% do mercado em cada região em 2020. Utilizamos os dados fornecidos por Bertoli, Goujon, e Santoni (2016), que consideram as distâncias entre os portos relevantes considerando o caminho mais curto entre eles. Os números dos países representativos, sua participação no comércio regional e suas respectivas distâncias são apresentados na Tabela 1. Depois de definir a distância média ponderada, consideramos a proporção de minério de ferro e pelotas exportadas para cada região para estimar a taxa média de emissão de GEEs.

Tabela 2: Principais países importadores de minério de ferro brasileiro

Região	Principais países importadores	% das importações dentro da região	Distância do Brasil (km)
Ásia	China	85%	21.462
Europa	Países Baixos	32%	10.110
	Turquia	23%	12.045
Oriente Médio	Oman	54%	14.682
	Bahrein	44%	16.771
América do Sul	Argentina	73%	2.690
América do Norte	Estados Unidos	55%	9.777
	Canadá	45%	9.373
África	Egito	69%	12.755
América Central e Caribe	Trinidad e Tobago	82%	6.122
Oceania	Austrália	100%	17.774

Fonte: Adaptado de Bertoli *et al.* (2016); Secex (2023).

Além da distância, outras variáveis precisaram ser consideradas. Entre os parâmetros mais relevantes, incluímos o material sendo transportado, o tamanho do navio, e a eficiência de carbono do sistema de transporte, seguindo as orientações de Azadi *et al.* (2020). Nesta pesquisa, presumimos que as empresas de mineração poderiam usar navios Capesize ou Valemax e as emissões foram estimadas com base na literatura especializada (Lucena, 2018). Presumimos que os Valemax somente transportariam minério de ferro (e não pelotas) e que realizariam apenas viagens entre o Brasil e a China; a carga restante de minério de ferro seria transportada por navios Capesize. Com relação ao transporte de pelotas, assumimos apenas o uso de navios Capesize.

Referências

Anglo American. (2023). Reports library. Acessado em: Nov 09, 2023, Disponível em: <https://www.angloamerican.com/investors/annual-reporting/reports-library/report-2023>

ANM. (2020). *Anuário Mineral Brasileiro 2020. Ano base 2019 Principais substâncias metálicas*. Brasília: Agência Nacional de Mineração.

ANTT. (2020). *Relatório de anual de atividades - exercício 2019*. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres.

ANTT. (2021, 25 Jan). Tabelas Excel. *Agência Nacional de Transporte Terrestres*. Acessado em: 18 Feb 2023, Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/arquivos-tabelas-excel>

ANTT. (2023, Aug 21). Transporte de Carga - Origem Destino- 2006 - julho 2023. Acessado em, Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/arquivos-tabelas-excel>

Awuah-Offei, K., e Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 82-89.

Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H., e Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 13(2), 100-104.

Beresford, A., Pettit, S., e Liu, Y. (2011). Multimodal supply chains: iron ore from Australia to China. *Supply Chain Management: An International Journal*, 16(1), 32-42.

Bertoli, S., Goujon, M., e Santoni, O. (2016). The CERDI-seadistance database, *Études et Documents*, nº 7, CERDI. Acessado em, Disponível em: <https://ferdi.fr/en/indicators/the-cerdi-seadistance-database>

de Eicker, M. O., Hischer, R., Kulay, L. A., Lehmann, M., Zah, R., e Hurni, H. (2010). The applicability of non-local LCI data for LCA. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(3), 192-199.

de Haes, H. A. U. (1993). Applications of life cycle assessment: expectations, drawbacks and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 1(3-4), 131-137.

DNPM. (2010). *Sumário Mineral 2009*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia.

DNPM. (2012). *Sumário Mineral 2012*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia.

EPE. (2022). *Brazilian Energy Balance*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia.

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. P., e Saidur, R. (2019). A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1200-1217.

Ferreira, H., e Leite, M. G. P. (2015). A Life Cycle Assessment study of iron ore mining. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1081-1091.

FGVces. (2023). Programa Brasileiro GHG Protocol. Version 2023.0.3. Acessado em, Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>

Gan, Y., e Griffin, W. M. (2018). Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China—Uncertainty and trends. *Resources Policy*, 58, 90-96.

Giljum, S., Maus, V., Kuschnig, N., Luckeneder, S., Tost, M., Sonter, L. J., e Bebbington, A. J. (2022). A pantropical assessment of deforestation caused by industrial mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(38), e2118273119.

Grantham, H. S., Tibaldeschi, P., Izquierdo, P., Mo, K., Patterson, D. J., Rainey, H., . . . Jones, K. R. (2021). The emerging threat of extractives sector to intact forest landscapes. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 692338.

Greenhouse Gas Protocol. (2022, Jun). Scope 3 Frequently Asked Questions. Acessado em: May 24, 2024, Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Scope%203%20Detailed%20FAQ.pdf>

Haque, N. (2022). Life cycle assessment of iron ore mining and processing. In L. Lu (Ed.), *Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability* (pp. 691-710). Pullenvale (Brisbane): Elsevier.

Holmes, R. J., Lu, Y., e Lu, L. (2022). Introduction: overview of the global iron ore industry. In L. Lu (Ed.), *Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability* (pp. 1-56). Pullenvale (Brisbane): Elsevier.

IBRAM. (2014). *II Inventário de gases efeito estufa do setor mineral*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.

IBRAM. (2024). *Inventário de emissões de gases de efeito estufa do setor mineral 2024. Ano base 2022*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.

Irarrázabal, R. (2006). Mining and climate change: towards a strategy for the industry. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 24(3), 403-422.

ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Geneva: International Organisation for Standardisation.

ITC. (2023). Trade Map. *International Trade Centre*. Acessado em: 25 Feb, Disponível em: <https://www.trademap.org>

Liu, L.-y., Ji, H.-g., Lü, X.-f., Wang, T., Zhi, S., Pei, F., e Quan, D.-l. (2021). Mitigation of greenhouse gases released from mining activities: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 513-521.

Lovón-Canchumani, G. A., Lima, F. M. R. S., e Oliveira, P. P. (2015). *Avaliação do Ciclo de Vida na mineração: estudo da produção de minério de ferro*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral.

Lucena, A. F. P. (2018). *Sustainable freight transport in support of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. In: UNCTAD Multiyear Expert Meeting on Transport, Trade Logistics and Trade Facilitation, Geneva.

MCTI. (2022). Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene). Resultados da 6a Edição das Estimativas MCTI (1990-2020). *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações*. 6th. Acessado em: May 24, 2024, Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene>

MESDE. (2012). *CO2 Information for transport services: Application of Article L. 1431-3 of the French transport code*. Paris: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Milanez, B., Ali, S. H., e Puppim Oliveira, J. A. (2021). Mapping industrial disaster recovery: lessons from mining dam failures in Brazil. *The extractive industries and society*, 8(2), 100900.

MME. (2013). Plano setorial de mitigação e de adaptação à mudança do clima na mineração. Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (Plano MBC). Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Norgate, T., e Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 266-274.

Nuss, P., e Eckelman, M. J. (2014). *Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis*. *PloS one*, 9(7), e101298.

Odell, S. D., Bebbington, A., e Frey, K. E. (2018). Mining and climate change: A review and framework for analysis. *The extractive industries and society*, 5(1), 201-214.

OECD. (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic drivers and environmental consequences*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

Papadionysiou, S. (2014). *Analysis of the economics of Valemax vessels*. (M.Sc.), Norwegian School of Economics, Bergen.

Projeto Mapbiomas. (2023). Mining (Collection 8) da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Acessado em: Nov 20, 2023, Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/estatisticas/>

Samarco. (2023). Relatórios de sustentabilidade. Acessado em: Nov 09, 2023, Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>

Secex. (2023). Comex Stat. *Secretaria de Comércio Exterior, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços*. Acessado em: Nov 09, 2023, Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>

Shimbo, J., Souza, E., Silva, C., Zimbres, B., Alencar, A., Jr., A. B., . . . Azevedo, T. (2022). *Nota Metodológica SEEG 9 Setor Mudança de Uso da Terra e Florestas (Versão 4)*. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM); Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa.

Sonter, L. J., Herrera, D., Barrett, D. J., Galford, G. L., Moran, C. J., e Soares-Filho, B. S. (2017). *Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon*. *Nature communications*, 8(1), 1013.

Souza Jr, C. M., Z. Shimbo, J., Rosa, M. R., Parente, L. L., A. Alencar, A., Rudorff, B. F., . . . Souza-Filho, P. W. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735.

Steubing, B., de Koning, D., Haas, A., e Mutel, C. L. (2020). The Activity Browser—An open source LCA software building on top of the brightway framework. *Software Impacts*, 3, 100012.

Stewart, M. (2001). *MMSD Life Cycle Assessment Workshop: The application of Life Cycle Assessment to mining, minerals and metals*. Sydney: Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD) Project, International Institute for Environment and Development.

Tuck, C. C. (2022). *Iron ore*. In *USGS (Ed.), Mineral Commodity Summaries*. Reston: U.S. Geological Survey.

U.S. Bureau of Mines. (1996). *Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms*. Washington: U.S. Bureau of Mines.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., e Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218-1230.

Yang, Y. (2016). *Economic analysis on the 400K DWT VLOC*. (M.Sc.), World Maritime University, Shanghai.

Yellishetty, M., Ranjith, P. G., Tharumarajah, A., e Bhosale, S. (2009). Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 257-267.



COMITÊ NACIONAL EM
DEFESA DOS TERRITÓRIOS
FRENTE À MINERAÇÃO



Apoio:

CAFOD
Just one world