



A pegada de carbono dos resíduos sólidos da mineração de ferro: um estudo de caso no Brasil

Carbon footprint of solid waste from iron ore mining: a Brazilian case study

Lorena Drumond Barboza MORAIS^{1*}, Mariangela Garcia Praça LEITE¹

¹ Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, Brasil.

* E-mail de contato: lorenadrumondbio@gmail.com

Artigo recebido em 11 de junho de 2021, versão final aceita em 14 de março de 2022, publicado em 6 de setembro de 2023.

RESUMO: Ações para mitigação das mudanças climáticas que visem à redução das emissões de CO₂ pelos setores mais prevalentes do mercado são indispensáveis para o desenvolvimento sustentável da sociedade. A mineração de ferro é uma protagonista da economia brasileira, contudo a atividade está associada a altas emissões de CO₂ e geração Resíduos Sólidos (RS), que representam grandes desafios para o setor. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar e discutir a Pegada de Carbono do manejo de RS na Mina do Andrade, um empreendimento de mineração de ferro localizado na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (MG/BR), como instrumento para desenvolvimento de políticas de baixo carbono. Essa avaliação foi feita por meio do Método Composto das Contas Correntes (MC3), o qual possibilita a estimativa da Pegada de Carbono Corporativa (PCC) de organizações a partir de documentos fornecidos pela própria empresa. As emissões totais (PCC líquida) para o manejo de RS no empreendimento foram de 346,58 tCO₂ em 2017, 343,15 tCO₂ em 2018 e 343,44 tCO₂ em 2019. A PCC total dos Resíduos Sólidos Industriais (RSI) foi nula em todo o período, visto que as áreas de florestas contidas nos limites do empreendimento supriram demanda por sequestro de carbono gerados no manejo dos resíduos. A redução na geração de RSI e a adoção de estratégias de produção mais limpa foram os principais propulsores para a redução da emissão bruta de carbono pelo empreendimento no triênio avaliado. O uso do solo para a disposição dos estereis de mineração em pilhas gerou a maior PCC de RS do empreendimento em todo o período avaliado. Então, este estudo, pioneiro no estudo da PCC de RS da mineração de ferro, preenche parte da lacuna existente devido ao escasso número de estudos revisados por pares a respeito da Pegada de Carbono do setor.

Palavras-chave: pegada de carbono; método composto das contas correntes (MC3); mineração; resíduos de mineração.

ABSTRACT: Actions to mitigate climate change aimed at reducing CO₂ emissions by the most prevalent sectors of the market are essential for the sustainable development of society. Iron ore mining is a protagonist of the Brazilian economy; however, the activity is associated with high CO₂ emissions and Solid Waste (SW) generation, which represent major challenges for the sector. In this context, the aim of this study was to evaluate and discuss the SW management Carbon Footprint at “Mina do Andrade”, an iron ore mining company located in the northeastern region of the Iron Quadrangle region (MG/BR), as an instrument for the development of low carbon policies. This assessment was carried out using the Composite Method of Current Accounts (MC3), which allows estimating the Corporate Carbon Footprint (CCF) of organizations based on documents provided by the company itself. The total emissions (net CCF) for SW management in the company were 346.58 tCO₂ in 2017, 343.15 tCO₂ in 2018 and 343.44 tCO₂ in 2019. The total Industrial Solid Waste (ISW) CCF was zero throughout the period, as the forest areas contained within the boundaries of the company supplied the demand for carbon sequestration generated in the waste management. The reduction in ISW generation and the adoption of cleaner production strategies were the main drivers for the reduction of gross carbon emissions by the company in the three-year period under evaluation. The use of land for the disposal of waste rock in piles generated the highest SW CCF of the company in the entire evaluation period. So, this study is pioneer in the evaluation of the SW CCF of iron ore mining, and fills part of the existing gap due to the scarce number of peer-reviewed studies regarding the sector's Carbon Footprint.

Keywords: carbon footprint; compound method based on financial accounts (MC3); mining; mining waste.

1. Introdução

A utilização de energia fóssil e mudanças no uso da terra vêm desencadeando o aumento da concentração de gás carbônico (CO₂) na atmosfera (Canadell *et al.*, 2007), o que está alterando a dinâmica energética do sistema climático do planeta, ocasionando o aumento da temperatura do ar (Hansen *et al.*, 2010; Cubasch *et al.*, 2013; Dai, 2016). Tais mudanças climáticas têm o potencial para desencadear uma série de impactos negativos nos ecossistemas terrestres e aquáticos (Lindner *et al.*, 2010; Doney *et al.*, 2012), influenciando, consequentemente, os sistemas econômicos e o bem estar e saúde humana (Wheeler & Von Braun, 2013; Urry, 2015; Pecl *et al.*, 2017). Então, a busca por estratégias que visem à conciliação entre desenvolvimento socioeconômico e a manutenção da integridade ambiental tornou-se uma questão central para a sociedade moderna.

A percepção acerca da corresponsabilidade humana pelas mudanças climáticas no planeta impulsionou esforços para desenvolvimento de políticas e acordos internacionais para o clima, como o vigente Acordo de Paris (Falkner, 2016). Com o aumento da pressão de políticas externas e da conscientização da população, muitas instituições passaram a contabilizar, controlar e emitir relatórios sobre suas emissões de carbono. No Brasil, os processos industriais foram responsáveis por cerca de 5% das emissões de carbono no país entre os anos 1990 e 2019 (SEEG, 2021a), e, dentre as emissões geradas pelos processos industriais, aproximadamente 33% foram geradas pela mineração, o que corresponde a uma emissão aproximada de 677 Mi de toneladas de CO₂ nesse período (SEEG, 2021b). Então, a indústria minerária, uma das protagonistas da economia brasileira, evidencia-se como um alvo prioritário de estratégias para a mitigação dos impactos do aquecimento global no país (Farjana *et al.*, 2018).

O estado de Minas Gerais (MG) concentra grande parte da riqueza mineral do Brasil, com destaque ao minério de ferro. Em 2018, MG foi o maior produtor do minério do país, gerando uma receita de aproximadamente R\$ 36 bilhões (ANM, 2020). Esse contexto indica a importância da indústria de mineração de ferro em MG para a esfera socioeconômica nacional. Na última estimativa de emissões de gases de efeito estufa realizada para o estado de Minas Gerais, em 2014, o setor da mineração havia sido responsável pela emissão de 0,85 milhões de toneladas de CO₂, aproximadamente 39% da produção de gás carbônico pelo setor industrial no estado (FEAM, 2016a). Ainda de acordo com a FEAM (2018a; 2018b), o total de Resíduos Sólidos (RS) inventariados no setor industrial do estado de Minas Gerais, em 2017, foi de aproximadamente 600 milhões de toneladas, dentre as quais, cerca de 90% tiveram origem em atividades de mineração de minerais metálicos. Dessa forma, esse setor enfrenta grandes desafios de sistemas de governança efetivos, no âmbito da sustentabilidade, pois os riscos socioambientais da atividade minerária podem gerar impactos negativos nos ecossistemas, associados às emissões diretas e indiretas de CO₂, inclusive as derivadas do manejo de grandes volumes de RS na produção mineral (Farjana *et al.*, 2019). Sendo assim, a parceria do setor com o desenvolvimento sustentável apresenta-se como condição inadiável para sua perpetuação.

Nesse artigo, aplica-se o Método Composto das Contas Correntes (MC3) e a metodologia para estimar a Pegada de Carbono Corporativa (PCC) à Mina do Andrade, um empreendimento de mineração de ferro utilizado como estudo de caso para a estimativa e compreensão da pegada de carbono no manejo de Resíduos Sólidos (RS) em empre-

ndimentos minerários. Então, são apresentados os resultados da PCC mensal dos RS gerados na mina, compostos pelos Resíduos Sólidos Industriais (RSI) e pelos Resíduos de Mineração (RM) que se caracterizam como estéreis, para os anos de 2017, 2018 e 2019, seguindo-se a discussão de aspectos da sustentabilidade do manejo de RS. Assim, este trabalho objetivou avaliar e discutir a PCC do manejo de RS na Mina do Andrade e contribuir para discussões acerca da emissão de CO₂ em empreendimentos minerários, e em soluções sustentáveis para tal passivo ambiental.

2. *Materiais e métodos*

2.1. *Caracterização da área de estudo*

A Mina do Andrade é uma mineradora do grupo Arcelor Mittal Brasil localizada no estado de Minas Gerais/ Brasil (19°47'02,51" S/ 43°09'10,83" O), na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero. O principal minério explotado em suas jazidas é a hematita, um óxido de ferro (Fe₂O₃), que é lavrado a céu aberto e encaminhado para uma praça *Run Of Mine* (ROM), onde o beneficiamento do minério é simples e a seco, utilizando britadores e peneiras vibratórias. A Mina do Andrade possui a extensão territorial de 2696,81 ha, dos quais aproximadamente 85% é ocupado por vegetação nativa em diferentes estágios sucessionais e graus de preservação.

A partir de janeiro de 2018, a empresa passou por um processo de reestruturação da política ambiental de resíduos visando ao aumento da eficiência socioambiental do gerenciamento de RS. As principais estratégias adotadas incluem: o incentivo à reciclagem, à reutilização e à logística

reversa; a valorização de resíduos; melhor mapeamento e distribuição das lixeiras; a regularização de licenças ambientais; a regularização do plano de gerenciamento de resíduos sólidos e do plano de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde; a regularização do manifesto de transporte de resíduos e documentos afins; a regularização do plano de ação de emergência; a regularização do cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras e/ou utilizadoras de recursos ambientais e do cadastro técnico federal de atividades e instrumentos de defesa ambiental; e a diminuição dos custos com destinação de resíduos. Paralelamente, em novembro de 2018, a empresa deu início ao Projeto Itabirito (PI), o qual visava à construção de uma planta de concentração do itabirito, antes economicamente inviável, cuja obra foi concluída em dezembro de 2019. Esse projeto objetivava ao aumento da qualidade do minério produzido, gerando um impacto positivo nos custos, e aumentando a vida útil da mina.

Em todo o empreendimento são gerados Resíduos Sólidos Industriais (RSI) perigosos e não perigosos que possuem diferentes origens e processos de destinação final (Erro: Origem da referência não encontrada), e Resíduos de Mineração (RM), os estéreis, que são divididos em duas categorias: o estéril franco e o estéril compacto, que são depositados em Pilhas de Estéril (PDE). O estéril franco é composto, geralmente, por quartzitos, xistos e outros minerais não economicamente viáveis; enquanto o estéril compacto é composto por itabirito (um mineral com teor de ferro entre 50% e 55%), e era considerado estéril temporário antes de 2020. Nos anos de 2017, 2018 e 2019, o empreendimento possuía duas PDE ativas e duas PDE inativas, as quais ocupavam um total de 94,58 ha. É importante ressaltar que, ao longo dos anos estudados (2017,

2018e 2019), a área ocupada pelas quatro PDE foi constante, variando apenas o seu crescimento em altura.

2.2. O Método Composto das Contas Correntes (MC3)

Considerando que a mineração e o processamento do minério são grandes fontes de emissões de Gases Efeito Estufa (GEE), estudos que avaliem essas emissões podem contribuir para a sua redução a fim de atender a metas de mitigação de mudanças climáticas (Gan & Griffin, 2018). As emissões diretas ou indiretas de CO₂ (associadas ao consumo de energia, bens e serviços pelo empreendimento) podem ser avaliadas por meio da Pegada de Carbono (PC) orientada por Análises de Ciclo de vida (ACV) (Gan & Griffin, 2018), as quais consistem, basicamente, em inventariar os dados de consumo de recursos (bens e energias) de uma empresa e traduzi-los em emissões de CO₂.

Para este estudo, foi utilizado uma Abordagem Híbrida (AH) para a ACV, o “Método Composto das Contas Correntes” (MC3), o qual integra análises de ACV “*bottom-up*” e “*top-down*”, sendo simples para ser executado, além de apresentar resultados mais completos, incluindo informações que normalmente não seriam representadas individualmente por essas análises (Crawford *et al.*, 2018). O MC3 é um método para estimativa da Pegada de Carbono Corporativa (PCC) aplicável em todos os tipos de empresas, nas diferentes escalas, categorizado como AH, e que fornece uma avaliação mais precisa e rápida dos gases emitidos, além de seus resultados serem mais fáceis de serem entendidos (Alvarez & Rubio, 2015; Crawford *et al.*, 2018).

TABELA 1 – Resíduos Sólidos Industriais Gerados na Mina do Andrade nos anos de 2017, 2018 e 2019, classificados de acordo com a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004).

Classificação (ABNT, 2004)	Tipos de RSI
Resíduos perigosos (Classe I)	Cartuchos de impressoras e tonners de copiadora; resíduos de tintas; resíduos de solventes, lubrificantes; resíduos de óleos usados e graxas; filtros contaminados com resíduos oleosos; material contaminado com hidrocarboneto; ponta de eletrodo; luvas contaminadas com resíduo oleoso; resíduos de ambulatório; lâmpadas fluorescentes/incandescente; pilhas, baterias; serragem contaminada, solo contaminado; EPIs contaminados.
Resíduos não perigosos não inertes (Classe IIA)	Borracha; luvas, botas, uniformes não contaminados; efluente sanitário, papel higiênico; embalagem de isopor; copos descartáveis; guardanapos, palitos; sobras de alimentos; sacos de cimento; ponta de eletrodos; disco de corte; e todos os outros que não se enquadram nas classificações de RS perigosos ou perigosos inertes.
Resíduos não perigosos inertes (Classe IIB)	Madeira; papel/papelão, plástico; sucatas metálicas, latas; terra, solo; vidros; sucata de PVC; capacetes, óculos; escória de jateamento; folhas de alumínio; discos de corte e desbaste; resíduos de fios elétricos; grampos, pregos, parafusos; gesso, resíduo de escavação.

FONTE: Elaboração dos autores.

Doménech Quesada (2006) ressalta que a PCC é um instrumento que permite às empresas planejar estratégias para reduzir as emissões de GEE e para o combate às mudanças climáticas. Visto isso, o MC3 se mostra o método mais apropriado para alcançar o objetivo de estimar e discutir a PCC dos Resíduos Sólidos Industriais (RSI) e resíduos de Mineração – estéreis (RM) de um empreendimento de mineração de ferro em MG, como instrumento para a promoção de políticas de baixo carbono no setor.

2.2.1. A estimativa da pegada de carbono corporativa de resíduos sólidos industriais

Foram conduzidas avaliações mensais das PCC do manejo de RS da Mina do Andrade para os anos de 2017, 2018 e 2019. A estimativa da PCC da destinação final dos RSI (resíduos não perigosos e

perigosos mais comuns, incluindo as descargas em redes de saneamento), foi baseada nos conceitos e princípios de Doménech Quesada (2006) e nos padrões e sistematização do MC3 V2.0 de Doménech Quesada *et al.* (2010) e de Marañón *et al.* (2008). Conforme o MC3 V2.0, para a estimativa da PCC de RSI deve-se calcular as emissões de CO₂ que deixam de serem absorvidas pelas áreas florestadas que estão sendo demandadas para sequestro de carbono gerado pelo manejo dos resíduos. Para tanto, para a estimativa da PCC de RSI bruta foi adotado o fator de sequestro de CO₂ de 3,66 tCO₂/ha utilizados no MC3 V2.0 (Coto-Millán *et al.*, 2008), os fatores de conversão da categoria "florestas-absorção de CO₂" propostos por Marañón *et al.* (2008) (Fconflo) e o fator de produtividade para florestas brasileiras proposto pela *Global Footprint Network* (GFN) (2019) (FPflo), conforme a **equação 1**. Os fatores de conversão propostos por Marañón *et al.* (2008)

permitem a conversão da massa (em toneladas) de diversas categorias de RSI gerados em um empreendimento em áreas biologicamente produtivas (em hectares) necessários para sua destinação final. Para tal, são utilizados dados da energia e da matéria consumidas para a disposição final de cada categoria de RSI. É importante pontuar que o fator de conversão propostos por Marañón *et al.* (2008) não incluem os impactos gerados pelo transporte dos resíduos, essa pegada deve ser incluída na pegada de serviços do empreendimento gerador ou da empresa responsável pelo transporte (Marañón *et al.*, 2008).

$$PCC_i = P_i * F_{con_{fo}} * FP_{fo} * 3,66 \quad (1)$$

LEGENDA: em que P_i refere-se ao montante do RSI "i" gerado, em toneladas; $F_{con_{fo}}$ refere-se ao Fator de Conversão para áreas florestadas; e, FP_{fo} refere-se ao Fator de Produtividade de áreas florestadas.

A estimativa da PCC de RSI líquida foi feita a partir da subtração entre a PCC bruta do RSI "i" e a sua contra-pegada ($CPc_{o_{2i}}$), a qual foi determinada a partir da **equação 2**. A contra-pegada consiste basicamente nas áreas florestadas contidas nos limites do empreendimento.

$$CPc_{o_{2i}} = P_i * C_{P_i} * a_{fo} * FP_{fo} * 3,66 \quad (2)$$

LEGENDA: em que, C_{P_i} é o fator de conversão para estimativa da contra-pegada do RSI "i" proposto por Marañón *et al.* (2008); e, a_{fo} refere-se ao percentual de área florestada do empreendimento.

A PCC líquida de RSI total foi estimada a partir do somatório das PCC parciais de cada resíduo "i" conforme a **equação 3**:

$$PCC = \sum_i PCC_i \quad (3)$$

2.2.2. A estimativa da pegada de carbono corporativa de resíduos de mineração – estéreis

O MC3 V2.0 não contempla a estimativa da pegada de carbono de estéreis de mineração. Dessa forma, visando-se à obtenção de uma estimativa mais realista da PCC gerada pelo manejo de RS na Mina do Andrade, neste trabalho foi proposto e utilizado uma adaptação da metodologia de "uso do solo" do MC3 V2.0, o qual presume que a "pegada por ocupação de espaços bioprodutivos [...] terá uma pegada equivalente ao espaço ocupado (floresta, área de cultivo, pasto ou mar)" (Doménech Quesada *et al.*, 2010, p. 121). Ou seja, a PCC gerada por estéreis de mineração é equivalente ao déficit de sequestro de carbono gerado pela supressão da vegetação para a instalação das PDE. Então, a estimativa da PCC de estéreis foi realizada a partir da área ocupada pela base das pilhas de estéril e do fator de absorção de carbono (Coto-Millán *et al.*, 2008), conforme a **equação 4**:

$$PCC_{est\ é\ ril} = A * FP_{fo} * 3,66 \quad (4)$$

LEGENDA: em que A indica a área da base das pilhas de estéril.

2.2.3. Coleta e análise de dados

Os dados para a estimativa da PCC de RS na Mina do Andrade foram coletados de documentos fornecidos pela própria empresa, os quais incluem: Inventário de Resíduos Sólidos; Registro de Monitoramento de Resíduos; Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS); Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviço Saúde (PGRSS); Cadastro Ambiental Rural (CAR); e Relatório de Normas.

Os dados obtidos foram organizados de forma a facilitar o cálculo PCC, sendo que os RSI gerados na Mina do Andrade foram classificados de acordo com a metodologia do MC3 V2.0 (Marañón *et al.*, 2008; Doménech Quesada *et al.*, 2010). A classificação teve por base o tipo de gerenciamento de cada resíduo, como proposto por Marañón *et al.* (2008)¹. Posteriormente, foi desenvolvida uma planilha de cálculo no software Microsoft® Office Excel, de forma a se adaptar a folha de cálculo proposta por Doménech Quesada (2004) à realidade desse estudo de caso.

3. Resultados e discussão

3.1. Geração de resíduos sólidos

Na Mina do Andrade, foram geradas 468 t de RSI em 2017, 290,21 t em 2018, e 721,05 t em 2019. A partir das análises estatísticas dos montantes

de RSI gerados mensalmente, foi verificado que a geração mensal média de RSI sofreu variação temporal com significância estatística para o período ($p= 0,001$), com 2019 diferindo dos anos de 2017 e 2018, os quais não diferiram entre si, sendo que a maior média foi registrada em 2019 (Figura 1 (A)). Considerando os períodos anterior (fase 1) e simultâneo (fase 2) ao processo de expansão do empreendimento, foram geradas 721,46 t de RSI na fase 1, e, 764,48 t na fase 2, havendo diferença estatisticamente significativa entre as duas fases ($p= 0,013$) (Figura 1 (B)).

Esse contexto sugere que o aumento na geração de RSI observadas após o início da expansão do empreendimento, em novembro de 2018, e que se estende em 2019, pode estar relacionado ao estágio preparatório e de construção da nova planta de concentração de Itabirito. Afinal, como apontado por Christensen *et al.* (2019), esse processo geralmente conduz ao aumento significativo do consumo de recursos e da quantidade de resíduos gerados.

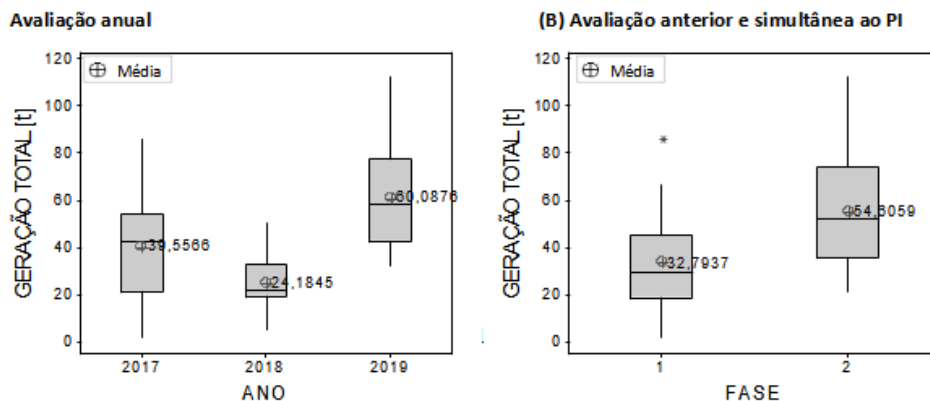


FIGURA 1 – Gráficos do tipo box-plot indicando a geração mensal de resíduos sólidos industriais na Mina do Andrade: (A) avaliação anual; e, (B) avaliação dos períodos anterior e simultânea às obras do PI.

FONTE: Elaboração dos autores.

¹ Classificação coincidente com a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004), que determina os critérios de classificação de resíduos sólidos no Brasil.

Ao longo do período avaliado, foram adotados nove tipos de destinação final para os RSI gerados no empreendimento, os quais, para fins de avaliação, foram divididos entre duas categorias de disposição: tratamentos de fim-de-tubo (incluindo disposição final em aterros) e reciclagem (incluindo a reutilização).

Em 2017, 91% do montante de resíduos gerados foram destinados a tratamentos de fim-de-tubo, enquanto 9% dos RSI foram enviados para a reciclagem. Em 2018, 46% dos resíduos gerados foram enviados para reciclagem e 54% dos resíduos gerados permaneceram recebendo tratamentos de fim-de-tubo. Em 2019, a proporção de resíduos reciclados diminuiu em relação ao ano anterior, e apenas 24% foram destinados para tal destinação, isso devido ao aumento expressivo de resíduos perigosos em relação ao ano anterior (cerca

de 400%). E, neste ano, 73% dos RS receberam tratamento de fim-de-tubo. Quanto ao período anterior e simultâneo ao PI, foi constatado que o tratamento de resíduos por técnicas de fim-de-tubo foi majoritariamente adotado das duas fases, sendo que, na fase anterior, o coprocessamento/incineração foi o tratamento mais usado, enquanto na fase de expansão do empreendimento, os outros tratamentos de fim de tubo predominaram. Esse predomínio da adoção de técnicas de fim-de-tubo para a destinação final de RSI no empreendimento mostra-se como um aspecto negativo considerando sua incompatibilidade com o desenvolvimento sustentável da Mina do Andrade. Isso porque, apesar de tais métodos terem sido aprimorados ao longo dos últimos anos, eles atuam apenas para tratar os resíduos após eles evidenciarem-se como impactos ambientais (Hilson, 2000).

TABELA 2 – Tipos de destinação final de RSI na Mina do Andrade em 2017, 2018 e 2019.

Categorias de destinação final	Tipo de destinação final	
Tratamentos de fim-de-tubo	Coprocessamento/ incineração	
	Demais tratamentos	Aterro sanitário
		Aterro industrial
		ETE
		Tratamento físico-químico
Reciclagem	Reciclagem interna	Reutilização no próprio processo produtivo
	Reciclagem externa	Reciclagem em associação
		Reutilização em processos produtivos externos
		Rerrefino de óleos usados
		Venda

FONTE: Elaboração dos autores.

3.2. PCC de Resíduos Sólidos Industriais (RSI)

A PCC líquida total associada ao manejo de RSI foi nula no triênio, pois a PCC bruta foi menor que a contra-pegada, o que ainda gerou um débito de carbono para o empreendimento. Essa “neutralidade de carbono” no manejo de RSI foi alcançada por meio da compensação pelo sequestro de carbono pelas áreas florestadas preservadas dentro dos limites do próprio empreendimento (CP_{CO2}; Figura 2) e da redução das emissões entre os anos 2017-2019 (PCC bruta; Figura 2) (Casper, 2010).

O manejo de RSI perigosos foi o que gerou a maior parte das emissões de RSI na Mina do Andrade nos três anos avaliados. Em 2017 e em

2018, 99,99% desses resíduos foram responsáveis por 99,88% das emissões em 2017, 99,09% em 2018, e 79,29% em 2019. As maiores PCC brutas de resíduos perigosos foram geradas pelo residual de CSAO em todo o triênio (TABELA 3). Os papéis/papelões e plásticos foram os RS não perigosos mais geradores de PCC brutas nos anos de 2017 e 2018, enquanto os resíduos de borracha e pneus foram os maiores geradores de PCC em 2019 (TABELA 3). Isso aconteceu porque os resíduos de pneus e borrachas, que em 2017 e 2018 eram enviados a aterros sanitários, passaram a ser destinados para o coprocessamento, o que conduziu ao aumento das emissões por tonelada de resíduo (Marañón *et al.*, 2008).

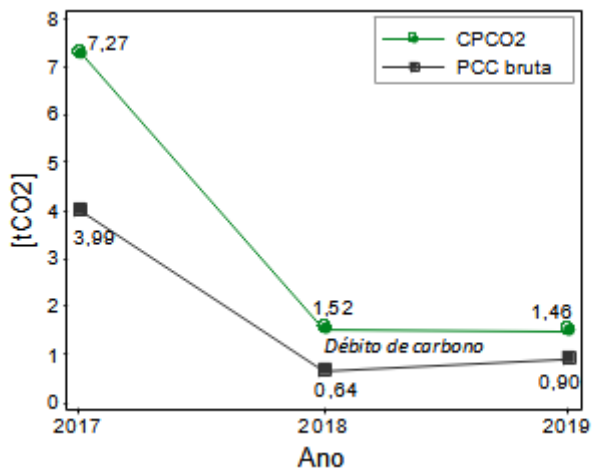


FIGURA 2 – Gráfico de linhas indicando a evolução da CP_{CO2} e da PCC bruta de RS na Mina do Andrade nos anos de 2017, 2018 e 2019.

FONTE: Elaboração dos autores.

TABELA 3 – Pegada de Carbono Corporativa de RSI da Mina do Andrade no triênio 2017-2019: PCC bruta e PCC líquida.

Tipo de Resíduo Sólido Industrial		2017		2018		2019	
		PCC bruta [tCO ₂]	PCC líquida [tCO ₂]	PCC bruta [tCO ₂]	PCC líquida [tCO ₂]	PCC bruta [tCO ₂]	PCC líquida [tCO ₂]
Não perigosos	Resíduos não recicláveis	0,0006	-0,1226	0,0006	-0,1226	0,0007	-0,1509
	Papel/papelão e plástico	0,0037	-0,0231	0,0048	-0,2031	0,0275	-0,5808
	Resíduos de borracha e pneus	0,0002	-0,0433	0,0003	-0,0633	0,1578	-0,1001
Perigosos	Material contaminado por óleo/graxa	0,0022	-0,0009	0,0325	-0,0134	0,1572	-0,0998
	Óleo lubrificante	0,0021	-0,0870	0,0000	-0,0004	0,0000	-0,0004
	Residual de CSAO	3,9830	-2,9563	0,6003	-0,4455	0,5497	0,5083
	Residual de banheiro e fossa séptica	0,0004	-0,0506	0,0002	-0,0289	0,0009	-0,1213
	RSI perigosos menos gerados	0,0000	0,0000	0,0008	-0,0030	0,0028	-0,0139
TOTAL		3,9923	-3,2838	0,6396	-0,8803	0,8966	-0,5589

FONTE: Elaboração dos autores.

Entre os anos final e inicial deste estudo, a demanda por áreas bioprodutivas sequestradoras de carbono para o manejo dos RSI gerados no empreendimento diminuiu em aproximadamente de 78%; e, quando comparadas as fases anterior e simultânea às obras do PI, houve a queda de 80% nesse consumo. No ano de 2017 foi registrada a maior PCC bruta de RSI do triênio avaliado, enquanto 2018 registrou o menor valor (Figura 3 (A)), sendo que houve variação temporal com significância estatística para a emissão de carbono entre os anos avaliados ($p=0,000$; Figura 3 (A)), em que 2017 e 2018 diferiram entre si e 2019 não se diferiu dos demais anos. Analisando-se os períodos anterior (fase 1) e simultâneo ao processo de expansão do empreendimento (fase 2), foi verificada que a PCC bruta de RSI não foi significativamente diferente entre as duas fases ($p=0,638$; Figura 3 (B)).

Em 2017, para o manejo de cada quilograma de RSI gerado no empreendimento, foram emitidas

aproximadamente $8,45 \times 10^{-5}$ toneladas de CO₂, em 2018 foram emitidas cerca de $1,55 \times 10^{-5}$ tCO₂ por quilograma de RSI gerado, enquanto, em 2019, foi registrada a menor emissão de CO₂ por quilograma que RSI, totalizando $1,47 \times 10^{-5}$ tCO₂ emitidas.

Essa diminuição do impacto ambiental, quando associadas ao aumento da geração de RSI (Figura 1), pode estar associada à permanência de ações corretivas aos impactos gerados pelos resíduos em prol de estratégias preventivas da produção mais limpa (P+L) (Giannetti & Almeida, 2006). Afinal, a partir da reestruturação na política ambiental de manejo de RS na Mina do Andrade, parte das ações empregadas no empreendimento entraram em concordância com princípios da P+L (não geração, minimização ou reciclagem de resíduos), enquanto, a maior parte dos resíduos gerados permanece tratada por medidas corretivas de fim-de-tubo.

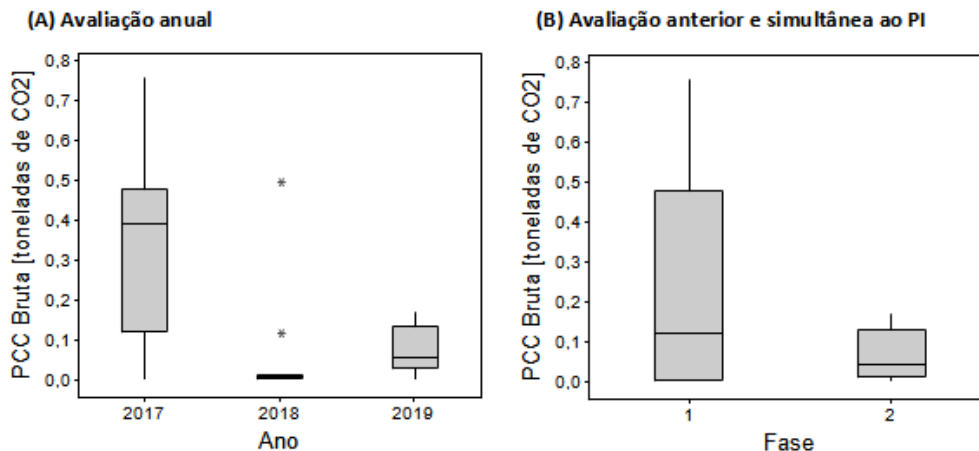


FIGURA 3 – Gráficos do tipo box-plot indicando a PCC bruta de RSI perigosos na Mina do Andrade: (A) avaliação anual; e, (B) avaliação dos períodos anterior e simultânea às obras do PI.

FONTE: Elaboração dos autores.

Assim como observado na Mina do Andrade, a maior parte dos RS gerados pelo setor de mineração de minerais metálicos em MG, avaliados nos últimos anos pela FEAM, foi destinado a tratamentos de fim-de-tubo (FEAM, 2018a, 2017, 2016b, 2015, 2014). Tal conjuntura mostra-se como um grande desafio para a promoção do desenvolvimento sustentável no setor, pois, como apontado por Marañón *et al.* (2008), esse tipo de destinação de RS gera grandes emissões de CO₂ e não são compatíveis com o desenvolvimento sustentável do setor (Hilson, 2000).

A redução da PCC bruta a partir da implementação de novas políticas de gestão de resíduos, em janeiro de 2018, corrobora com as assertivas trazidas por Hodgkinson & Smith (2018) que sugerem que a adoção de tecnologias de P+L para minimizar a geração de resíduos, para reutilizá-los e para reciclá-los também são estratégias de mitigação das mudanças climáticas via descarbonização das

cadeias produtiva de minério. A não geração de RSI isenta o empreendimento das emissões derivadas do manejo do poluente, não acumulando PCC de RSI no produto final. O mesmo acontece com a reutilização de subprodutos no próprio processo produtivo, a qual é uma destinação que permite uma aplicação benéfica do resíduo (Lottermoser, 2011). A reutilização interna isenta a empresa das emissões geradas pelo manejo do resíduo, o qual deve ser contabilizado na pegada de materiais da empresa. Essas vantagens foram claramente visualizadas neste estudo, a partir da reutilização de resíduos de madeira dentro do próprio empreendimento. A reutilização de subprodutos em processos produtivos externos também contribui pra a anulação da PCC do RSI da Mina do Andrade. A doação e/ou venda do subproduto para outro empreendimento transfere a responsabilidade da destinação de tal material para o comprador/ receptor. Assim, ao incorporar o produto em seu processo produtivo, a pegada as-

sociada a ele é computada na pegada de materiais do receptor, isentando o gerador de tal impacto. Por exemplo, ao leiloar as pilhas e baterias usadas e doar os resíduos orgânicos, a responsabilidade da destinação final desses resíduos passa a ser do comprador ou receptor, assim como a pegada associada ao manejo desses RS, que serão considerados inputs do novo sistema (*outsourcing*).

Diferentemente dessas estratégias de P+L, a reciclagem externa de papéis, papelões e plásticos acumulou para o empreendimento a produção de carbono associada ao processo de extração de componentes reutilizáveis ou transformação desses resíduos em produtos (Figura 4 (A)). Em 2017, a reciclagem de resíduos emitiu cerca de 0,10% das emissões de CO₂ para o manejo de RSI, enquanto para 2017 e 2018, esses valores foram de aproximadamente 0,75% e 3,10%, ou seja, a maior parte das emissões originou-se em tratamentos de fim-de-tubo (99,90% em 2017, 99,25% em 2018 e 96,90% em 2019) (Figura 4).

Os principais RSI destinados a tratamentos de fim-de-tubo incluem os resíduos não recicláveis (Figura 5 (A)), enviados para aterro sanitário, resíduos de pneus e borrachas (Figura 5 (B)), enviados para aterro industrial em 2017 e 2018 e coprocessados em 2019, material contaminado por óleo/graxa (Figura 5 (C)), enviados para aterro industrial em 2017 e em 2018 e coprocessados em 2019, óleos lubrificantes usados (Figura 5 (D)), que foram valorizados, residual de Caixa Separadora de Água e Óleo (CSAO) (Figura 5 (E)), coprocessados em 2017 e 2018 e destinados a tratamento físico-químico em 2019, residual de banheiro e fossa séptica (Figura 5 (F)), enviados para uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Juntos, esses RSI correspondem a mais de 99,99% das emissões geradas pelos resíduos destinados a tratamentos de fim-de-tubo no empreendimento nos três anos avaliados. Os demais resíduos incluem as lâmpadas queimadas, sucata metálica contaminada por resíduos perigosos e resíduos de serviço de saúde, os quais geraram menos de 0,01% das emissões no triênio.

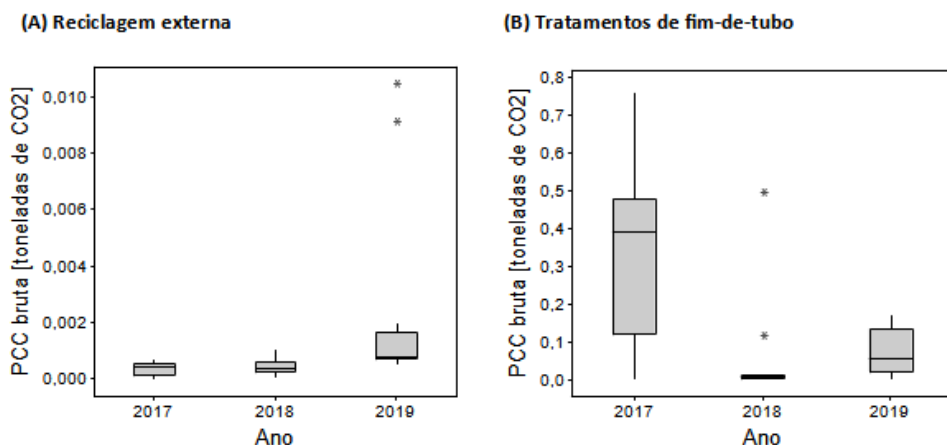


FIGURA 4 – Gráficos do tipo box-plot indicando a PCC bruta de RSI na Mina do Andrade no triênio avaliado. (A) Pelos resíduos reciclados fora do empreendimento; e, (B) Por tratamentos de fim-de-tubo.

FONTE: Elaboração dos próprios autores.

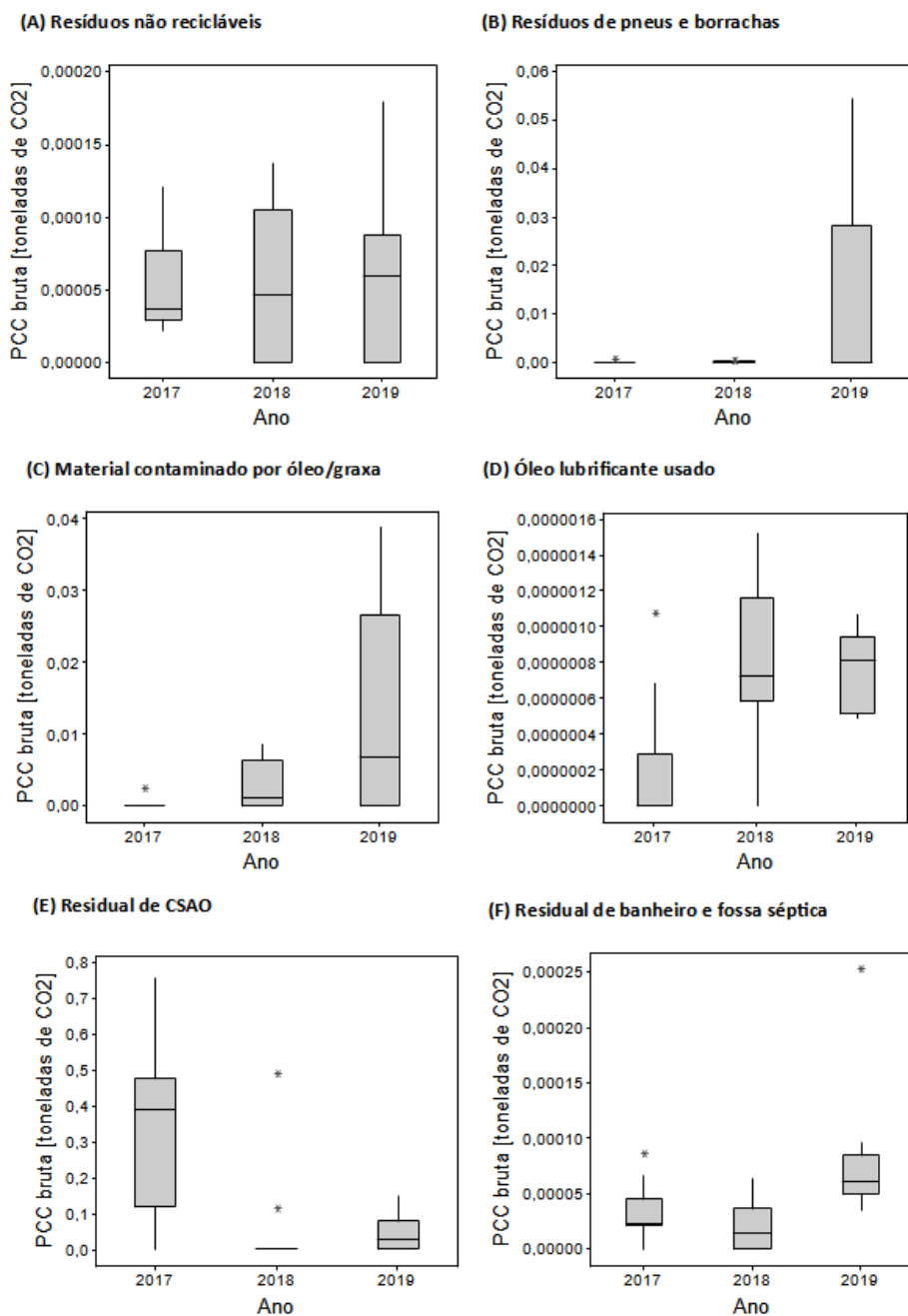


FIGURA 5 – Gráficos do tipo box-plot indicando a PCC bruta de RSI destinados a tratamentos de fim-de-tubo na Mina do Andrade no triênio avaliado: (A-F) Resíduos Sólidos tratados por técnicas de fim-de-tubo.

FONTE: Elaboração dos próprios autores.

A adoção de estratégias da P+L mostrou-se efetiva para a redução e mesmo neutralidade das emissões de carbono geradas pelo manejo de RSI na Mina do Andrade. Doménech Quesada (2006) sugere, ainda, a aquisição de áreas bioprodutivas como meio de incrementar a CP, minimizando, assim, a pegada de carbono do empreendimento, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Tal sumidouro de carbono pode permitir, ainda, que as empresas participem do mercado de carbono e melhorem sua responsabilidade social corporativa (Doménech Quesada, 2006). Doménech Quesada (2006) explica que a adoção da PCC em ampla escala permitiria que o setor privado contribuísse para a conservação de ecossistemas, ao mesmo tempo que melhoraria seu desempenho ambiental. A estratégia proposta por Doménech Quesada (2006) é considerada especialmente importante no contexto da Mina do Andrade, considerando que o empreendimento está inserido em uma grande extensão contínua de Mata Atlântica ainda conservada.

3.3. PCC de Resíduos de Mineração - Estéreis (RM)

Diferentemente da PCC líquida dos RSI gerados no empreendimento, a PCC de estéreis de mineração total foi de 342,51 tCO₂ por ano. Então, a disposição de estéreis de mineração em pilhas gerou a maior parte (aproximadamente 99%) da PCC bruta de RS do empreendimento no período avaliado. É importante ressaltar que o uso da terra pela mineração tende a ser maior na mineração a céu aberto em áreas montanhosas, como no caso da Mina do Andrade, configurando um desafio para o desenvolvimento sustentável do empreendimento

e do setor, já que mudanças no uso da terra para essa atividade são inevitáveis (Murakami *et al.*, 2020). Sendo assim, mostra-se urgente a adoção de estratégias de redução da PCC gerada pelo uso da terra gerada por pilhas de estéreis em empreendimentos com essas características, como a Mina do Andrade, visando à redução dos impactos ecológicos gerados pelo setor. Lottermoser (2011) propõe o reprocessamento de estéreis de mineração como possível solução sustentável para o manejo de RM, de forma que a concentração do itabirito no empreendimento, a partir de 2020, mostra-se uma saída sustentável para amenizar os impactos desse RM. Contudo, como apontado por Gan & Griffin (2018), o processamento de minérios de ferro com menor teor podem conduzir a maiores emissões de GEE quando comparados a minérios mais puros, de forma que o empreendimento deve concentrar esforços em reduzir o aumento das emissões de CO₂ ao longo de todo o processo de concentração do itabirito. Lottermoser (2011) aponta, ainda, outras opções para reabilitação de RM, as quais incluem: preenchimento de cava; inclusão em barragens, estradas, pavimentações, fundações e construção civil; soterramento de resíduos em aterros; substrato para revegetação de áreas degradadas; componente de asfalto, cimento e concreto. Todas essas opções podem ser consideradas como destinação sustentável para o estéril franco produzido na Mina do Andrade, a depender das características mineralógicas, geoquímicas e geotécnicas do resíduo (Lottermoser, 2011).

4. Considerações finais

Este trabalho preencheu parte da lacuna existente sobre emissões de carbono para o manejo de

Resíduos Sólidos (RS) em empreendimentos minerários, considerando o baixo número de estudos revisados por pares sobre a Pegada de Carbono da mineração. Então, de forma pioneira, a Pegada de Carbono Corporativa (PCC) gerada pelo manejo de Resíduos Sólidos Industriais (RSI) e de Resíduos de Mineração – estéreis (RM) de uma mineradora de ferro foi estimada, avaliada e discutida. A PCC associada a RSI foi estimada como nula em todo o período avaliado. Isso porque, apesar de a geração total de CO₂ ter sido positiva, a grande extensão de áreas florestadas pertencentes ao empreendimento é capaz de suprir essa demanda e ainda gerar crédito de carbono para o empreendimento. Contudo, o mesmo não ocorreu para os RM, os quais geraram déficit de carbono para o empreendimento no período avaliado. Os resultados deste trabalho destacaram que a adoção de tecnologias de fim-de-tubo e a supressão da vegetação para disposição de estéreis são aspectos críticos da PCC do manejo de RS na Mina do Andrade, fornecendo uma base analítica para futuras ações e políticas de baixo carbono. Assim, este trabalho contribui para evidenciar as métricas que permitam melhor manejar e controlar os impactos gerados pela mineração e por conseguinte contribuir para a busca do desenvolvimento sustentável no setor minerário

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 10004:2004* - resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

Alvarez, S.; Rubio, A. Compound method based on financial accounts versus process-based analysis in product carbon footprint: a comparison using wood pallets. *Ecol. Indic.* 49, 88-94, 2015. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.005

ANM – Agência Nacional de Mineração. *Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas - ano base 2018, 2020*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>>. Acesso em: mai. 2020.

Canadell, J. G.; Le Quere, C.; Raupach, M. R.; Field, C. B.; Buitenhuis, E. T.; Ciais, P.; Conway, T. J.; Gillett, N. P.; Houghton, R. A.; Marland, G. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 18866-18870, 2007. doi: 10.1073/pnas.0702737104

Casper, J. K. *Greenhouse gases: worldwide impacts*. Nova Iorque: Infobase Publishing, 2010.

Christensen, T. H.; Zelinskaya, E. V.; Starostina, V. U. Life cycle assessment of mining and processing product life cycle assessment of mining and processing production. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6, 681-685, 2019.

Coto-Millán, P.; Doménech Quesada, J. L.; Mateo Mantecón, I. Corporate ecological footprint: new conversion factors. *Research Letters in Ecology*, 1-4, 2008. doi: 10.1155/2008/415934

Crawford, R. H.; Bontinck, P. A.; Stephan, A.; Wiedmann, T.; Yu, M. Hybrid life cycle inventory methods – a review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1273-1288, 2018. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.176

Cubasch, U.; Wuebbles, D.; Chen, D.; Facchini, M. C. C.; Frame, D.; Mahowald, N.; J.-G. Introduction. In: Stocker T. F. D.; Qin G.-K.; Plattner M.; Tignor S. K.; Allen J.; Boschung A.; Nauels Y.; Xia V.; Bex P. M. Midgley (Orgs.). *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Nova Iorque: Cambridge University Press, p. 121-140, 2013.

Dai, A. Future warming patterns linked to today's climate variability. *Scientific Reports*, 6, 6-11, 2016. doi: 10.1038/srep19110

Doménech Quesada, J. L. Huella ecológica portuaria y desarrollo sustentable. *Puertos*, 114, 26-31, 2004.

- Doménech Quesada, J. L. Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa. In: *Anais de encontros sobre desarrollo sostenible y población*. Málaga, 6 a 24 de jul., 2006.
- Doménech Quesada, J. L.; Carballo-Penela, A.; Jiménez Herrero, L.; De la Cruz Leiva, J. L. Estándares 2010, huella de carbono MC3. In: *Anais de Congreso Nacional del Medio Ambiente - CONAMA*. Madri, 24 de nov., 2010.
- Doney, S. C.; Ruckelshaus, M.; Emmett Duffy, J.; Barry, J. P.; Chan, F.; English, C. A.; Galindo, H. M.; Grebmeier, J. M.; Hollowed, A. B.; Knowlton, N.; Polovina, J.; Rabalais, N. N.; Sydeman, W. J.; Talley, L. D. Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11-37, 2012. doi: 10.1146/annurev-marine-041911-111611
- Falkner, R. The Paris agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92, 1107-1125, 2016. doi: 10.1111/1468-2346.12708
- Farjana, S. H.; Huda, N.; Mahmud, M. A. P. Life-cycle environmental impact assessment of mineral industries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 351, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/351/1/012016
- Farjana, S. H.; Huda, N.; Parvez Mahmud, M. A.; Saidur, R. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1200-1217, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.264
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de resíduos sólidos da mineração ano base 2013*. Belo Horizonte, 2014.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de resíduos sólidos da mineração ano base 2014*. Belo Horizonte, 2015.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Estimativas de emissões de gases de efeito estufa do estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2016a.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de resíduos sólidos da mineração ano base 2015*. Belo Horizonte, 2016b.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de resíduos sólidos da mineração ano base 2016*. Belo Horizonte, 2017.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração: ano base 2017*. Belo Horizonte, 2018a.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de resíduos sólidos industriais ano base 2017*. Belo Horizonte, 2018b.
- Gan, Y.; Griffin, W. M. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China - uncertainty and trends. *Resource Policy*, 58, 90-96., 2018. doi: 10.1016/j.resourpol.2018.03.015
- GFN - Global Footprint Network. *Fatores de produtividade no Brasil em 2019*. 2019. Disponível em: <<https://data.world/footprint/calculation-factors-national-footprint-accounts-2019/workspace/file?filename=Yield+Factors.csv>>. Acesso em: ago. 2020.
- Giannetti, B. F.; Almeida, C. M. V. B. *Ecologia industrial - conceitos, ferramentas e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 1. ed., 2006.
- Hansen, J.; Ruedy, R.; Sato, M.; Lo, K. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*. 48, 1-29, 2010. doi: <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- Hilson, G. Pollution prevention and cleaner production in the mining industry: an analysis of current issues. *Journal of Cleaner Production*, 8, 119-126, 2000. doi: 10.1016/S0959-6526(99)00320-0
- Hodgkinson, J. H.; Smith, M. H. Climate change and sustainability as drivers for the next mining and metals boom: the need for climate-smart mining and recycling. *Resource Policy*, 0-1, 2018. doi: 10.1016/j.resourpol.2018.05.016
- Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S.; Kremer, A.; Barbati, A.; Garcia-Gonzalo, J.; Seidl, R.; Delzon, S.; Corona, P.; Kolström, M.; Lexer, M. J.; Marchetti, M. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259, 698-709, 2010. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.023
- Lottermoser, B. G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements*, 405-410, 2011. doi: 10.2113/gselements.7.6.405

-
- Marañón, E.; Iregui, G.; Doménech, J. L.; Fernández-Nava, Y.; González, M. Propuesta de índices de conversión para la obtención de la huella de los residuos y los vertidos. *Oidles*, 1, 1-24, 2008.
- Murakami, S.; Takasu, T.; Islam, K.; Yamasue, E.; Adachi, T. Ecological footprint and total material requirement as environmental indicators of mining activities: case studies of copper mines. *Environmental Sustainability Indicators*, 8, 100082, 2020. doi: 10.1016/j.indic.2020.100082
- Pecl, G. T., et al. Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355, 2017. doi: 10.1126/science.aai9214
- SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases Efeito Estufa. *Total emissions - Brazil*. 2021a. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#>. Acesso em: abr. 2021.
- SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases Efeito Estufa. *Emissions by sector*. 2021b. Disponível em: <<http://plataforma.seeg.eco.br/sectors/processos-industriais>>. Acesso em: abr. 2021.
- Urry, J. Climate change and society. In: Michie, J.; Cooper, C. L. (Orgs). *Why the social sciences matter*. Londres: Palgrave Macmillan, p. 45-59, 2015. doi: 10.1057/9781137269928_4
- Wheeler, T., Von Braun, J. Climate change impacts on global food security. *Science*, 341, 508-513, 2013. doi: 10.1126/science.1239402