



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DE CASO
EM OBRAS DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**

Leticia Luar França Mendonça

Belo Horizonte

2025

Leticia Luar França Mendonça

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DE CASO
EM OBRAS DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Dr. Tiago Borges Ferreira

Belo Horizonte

2025

LETÍCIA LUAR FRANÇA MENDONÇA

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PROVENIENTES
DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DE CASO EM OBRAS DA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 11 de julho de 2025

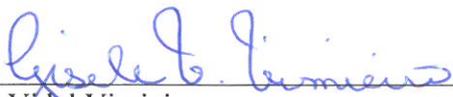
Banca examinadora:



Tiago Borges Ferreira – Presidente da Banca Examinadora
Prof. Dr. CEFET-MG – Orientador(a)



Adriana Alves Pereira Wilken
Profa. Dra. CEFET-MG



Gisele Vidal Vimieiro
Profa. Dra. CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Finalmente, chego ao fim da minha jornada no CEFET-MG. Foram anos intensos, marcados por aprendizados, desafios, momentos de desespero, alegrias e superações. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que me sustentou com força e coragem para seguir mesmo quando tudo parecia difícil. Sua presença foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Sou imensamente grata a tudo que o CEFET-MG me proporcionou: uma formação sólida, vivências inesquecíveis e até mesmo a oportunidade de realizar um intercâmbio, o que ampliou minha visão de mundo e me fez crescer como pessoa e profissional.

Agradeço profundamente aos meus pais, Sônia e Dadin, por todo o amor, apoio incondicional e incentivo nos momentos bons e, especialmente, nos difíceis — que não foram poucos. Aos meus irmãos, Bia e Mauro, que sempre estiveram ao meu lado com palavras de conforto, torcida e afeto, meu muito obrigada.

Aos meus amigos, que se tornaram parte essencial da minha vida, deixo minha eterna gratidão. “Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas” — e vocês, com certeza, se tornaram parte de mim. Obrigada pelas conversas sinceras, pelas trocas, pelas risadas e pelos surtos coletivos que nos uniram ainda mais. Levo cada um de vocês comigo.

Agradeço também à equipe da CCR, que sempre me apoiou com palavras de incentivo, compreensão e torcida constante. Em cada etapa dessa jornada, pude contar com o suporte e a confiança de todos, o que fez uma grande diferença nos momentos mais desafiadores.

Por fim, agradeço ao meu orientador, professor Tiago, por ter embarcado comigo nessa jornada com paciência, dedicação e compromisso. Obrigada por nunca desistir de mim, mesmo quando eu mesma duvidei. Seu apoio, cuidado e ensinamentos foram essenciais para a realização deste trabalho.

A todos vocês, meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

MENDONÇA, Leticia Luar França. **Avaliação das emissões de gases de efeito estufa provenientes de resíduos da construção civil: estudo de caso em obras da Região Metropolitana de Belo Horizonte. 2025** [48] Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

A construção civil é uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais e gera impactos ambientais, destacando-se a geração de resíduos sólidos e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Neste contexto, este estudo analisou as emissões de GEE associadas ao transporte e à destinação final dos resíduos da construção civil (RCC), com base em dados reais de nove obras localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte. A pesquisa possui caráter quantitativo e exploratório, utilizando como fonte de dados a plataforma NETResíduos, que permitiu o levantamento detalhado dos tipos, volumes e destinos dos resíduos gerados em nove empreendimentos de uma mesma construtora. A metodologia adotada envolveu o cálculo do índice de geração de resíduos por metro quadrado construído (t/m^2) e a estimativa das emissões de CO_2 equivalente (CO_{2eq}) com base na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), utilizando fatores de emissão extraídos do *GHG Protocol*, IPCC e literatura científica. Os resultados demonstraram que o transporte e a disposição final dos RCC são etapas críticas no inventário de emissões das obras, especialmente em razão das distâncias percorridas e da escolha do tipo de destinação (aterro sanitário ou reciclagem). Além disso, constatou-se que resíduos como papel, plástico e madeira possuem alto potencial de redução de emissões quando corretamente reciclados. O estudo reforça a importância de políticas e práticas de gestão integrada de resíduos na construção civil, destacando a necessidade de ações voltadas à redução na geração de resíduos, segregação eficiente e incentivo à reciclagem como estratégias fundamentais para mitigar os impactos climáticos do setor. Os dados obtidos contribuem para o aprimoramento de indicadores ambientais no planejamento de obras e para o desenvolvimento de inventários corporativos de emissões mais precisos e embasados tecnicamente.

Palavras-chave: GEE. Gestão de resíduos. Avaliação do ciclo de vida. Sustentabilidade.

ABSTRACT

MENDONÇA, Leticia Luar França. **Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Construction Waste: A Case Study in Construction Sites in the Metropolitan Region of Belo Horizonte. 2025.** [48] Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

The construction industry is one of the human activities that consumes the most natural resources and generates significant environmental impacts, particularly in terms of solid waste generation and greenhouse gas (GHG) emissions. In this context, this study analyzed GHG emissions associated with the transportation and final disposal of construction and demolition waste (CDW), based on real data from nine construction sites located in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil. The research has a quantitative and exploratory character, using the NETResíduos platform as the main data source, which enabled a detailed survey of the types, volumes, and destinations of waste generated in nine projects from a single construction company. The adopted methodology involved calculating the waste generation index per square meter built (t/m^2) and estimating carbon dioxide equivalent (CO_2eq) emissions based on Life Cycle Assessment (LCA), using emission factors derived from the GHG Protocol, IPCC, and scientific literature. The results showed that transportation and final disposal are critical stages in the emission inventory of construction projects, especially due to the distances traveled and the choice of destination (landfill or recycling). Furthermore, it was found that materials such as paper, plastic, and wood have a high potential for emission reduction when properly recycled. The study reinforces the importance of integrated waste management policies and practices in the construction sector, highlighting the need for actions focused on waste reduction, efficient segregation, and recycling promotion as key strategies to mitigate the sector's climate impacts. The data obtained contributes to the improvement of environmental indicators in project planning and to the development of more accurate and technically grounded corporate emission inventories.

Keywords: GHG. Waste management. Life cycle assessment. Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Resíduos Sólidos	15
3.2	Indicadores de Sustentabilidade em Obras	17
3.3	Mudanças Climáticas	18
3.3.1	<i>Dióxido de Carbono</i>	19
3.3.2	<i>Metano</i>	20
3.3.3	<i>Óxido Nitroso</i>	21
3.3.4	<i>Outros</i>	22
3.4	Mercado de Carbono	23
3.5	Resíduos e Emissões	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Coleta de Dados	26
4.2	Índice de Geração de Resíduos	26
4.3	Estimativa de Emissões	27
4.3.1	<i>Base Metodológica</i>	27
4.3.2	<i>Emissões na reciclagem</i>	27
4.3.3	<i>Emissões no aterro sanitário</i>	28
4.3.4	<i>Emissões na triagem e transbordo</i>	29
4.3.5	<i>Emissões no transporte</i>	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	Índice de Geração de Resíduos por Área Construída	33
5.2	Emissões	37
5.2.1	<i>Emissões no transporte dos resíduos</i>	37
5.2.2	<i>Emissões no destino final dos resíduos</i>	39
5.2.3	<i>Emissões Totais</i>	43
6	CONCLUSÕES	44
7	RECOMENDAÇÕES	45
8	REFERÊNCIAS	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de resíduos e densidades utilizadas	26
Tabela 2 - Fatores de emissão para reciclagem dos resíduos	28
Tabela 3 - Destino final após triagem.....	30
Tabela 4 - Distância da ATT até o destino final.....	31
Tabela 5 - Quantidade total de resíduos por tipo e destinação (toneladas) nas obras avaliadas	34
Tabela 6 - Total de resíduos gerados por obra.....	36
Tabela 7 - Índice de geração de Resíduos da Construção Civil	Erro! Indicador não definido.
Tabela 8 - Emissões de Gases de Efeito Estufa (no transporte dos resíduos, por obra e por tipo de destino (t CO ₂ eq)	37
Tabela 9 - Índice de emissão de Gases de Efeito Estufa no transporte por área construída (kg CO ₂ eq/m ²).....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10 - Emissão de GEE referente ao destino final dos resíduos (t CO ₂ eq).....	40
Tabela 11 - Emissões totais no destino final dos resíduos	42
Tabela 12 - Emissão total por obra.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV = Avaliação do Ciclo de Vida

ATT = Área de Triagem e Transbordo

BNDES = Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CH₄ = Metano

CO₂ = Dióxido de Carbono

CO₂eq = Dióxido de Carbono Equivalente

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente

GEE = Gases de Efeito Estufa

GHG Protocol = *Greenhouse Gas Protocol*

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

IEA = *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

IGES = *Institute for Global Environmental Strategies*

IPCC = *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

ISO = International Organization for Standardization

MTR = Manifesto de Transporte de Resíduos

NETResíduos = Plataforma de gestão de resíduos sólidos utilizada nas obras analisadas

N₂O = Óxido Nitroso

PNRS = Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCC = Resíduos da Construção Civil

SF₆ = Hexafluoreto de Enxofre

UNFCCC = *United Nations Framework Convention on Climate Change*

UNEP = *United Nations Environment Programme*

WWF = *World Wide Fund for Nature*

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, define o gerenciamento de resíduos sólidos como o conjunto de ações que envolvem todas as etapas, desde a coleta, transporte e transbordo até o tratamento e disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Nesse contexto, a gestão integrada de resíduos sólidos é fundamental para reduzir os impactos socioambientais decorrentes do manejo inadequado, promovendo a colaboração entre os diferentes agentes públicos e privados envolvidos, com base nos princípios da responsabilidade compartilhada e da logística reversa.

Entre os setores que mais demandam atenção no que se refere à gestão de resíduos está a construção civil, reconhecida por seu papel no desenvolvimento socioeconômico, mas também por ser responsável por uma expressiva geração de resíduos (Cunha, 2022). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2024), o Brasil produziu mais de 44 milhões de toneladas de resíduos da construção civil (RCC) em 2023.

A má gestão dos resíduos também está relacionada às mudanças climáticas, uma vez que o transporte, tratamento e disposição final desses materiais resultam na emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). De acordo com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), as mudanças climáticas podem decorrer tanto de causas naturais quanto de atividades humanas, sendo, no atual contexto, intensificadas pelas emissões provenientes de processos industriais, do uso de energia e do manejo de resíduos (WWF BRASIL, 2023).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o setor de resíduos é responsável por aproximadamente 5% das emissões globais de GEE, considerando atividades como disposição em aterros sanitários, incineração sem recuperação de energia e compostagem (IPCC, 2006). As metodologias propostas pelo IPCC, como as *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, fornecem diretrizes para mensuração, relato e verificação das emissões, sendo amplamente utilizadas por governos e instituições no desenvolvimento de inventários nacionais e setoriais.

Ferramentas como o *GHG Protocol* e a norma ISO 14064 organizam as emissões de GEE em três categorias: Escopo 1 (emissões diretas das atividades da organização), Escopo 2 (emissões indiretas associadas à energia adquirida) e Escopo 3 (outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor) (BNDES, 2022).

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe avaliar as emissões de CO₂ equivalente (CO₂eq) associadas ao transporte, tratamento e disposição final dos resíduos gerados em obras da construção civil localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

A relevância desta pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender os impactos climáticos associados à gestão dos resíduos da construção civil e de promover práticas mais sustentáveis no setor. Ao evidenciar a relação entre o manejo adequado dos RCC e a redução nas emissões de GEE, o estudo poderá contribuir com a conscientização de profissionais e gestores quanto à importância da segregação e da destinação ambientalmente adequada dos resíduos.

Diante do exposto, verifica-se que a gestão adequada dos resíduos da construção civil, aliada à mensuração das emissões de GEE, constitui um eixo fundamental para a promoção de práticas sustentáveis no setor da construção. Entretanto, apesar do crescente interesse no tema, ainda são escassos os estudos que aplicam métricas padronizadas, como a emissão de CO₂eq por metro quadrado construído (kg CO₂eq/m²), conforme proposto nesta pesquisa, o que evidencia uma lacuna relevante no conhecimento técnico-científico disponível.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as emissões de GEE associadas ao transporte e destinação final dos resíduos da construção civil, com base em obras localizadas na região metropolitana de Belo Horizonte.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar um índice de geração de RCC em função da área construída;
- Quantificar as emissões de GEE, padronizadas em CO₂eq, geradas no processo de transporte e destinação final dos resíduos da construção civil.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos

A PNRS, instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, estabelece um marco regulatório para a gestão de resíduos sólidos no Brasil. Essa política define instrumentos para o manejo ambientalmente adequado dos resíduos, sendo um dos seus principais objetivos promover a gestão integrada e compartilhada dos resíduos sólidos. Segundo o Art. 3º, inciso XVI da referida lei, considera-se resíduo sólido “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (Brasil, 2010).

Complementando a legislação, a norma técnica ABNT NBR 10004:2004 define critérios para a classificação dos resíduos sólidos com base em sua origem, composição, características e nos riscos que oferecem à saúde pública e ao meio ambiente. A norma divide os resíduos em duas grandes categorias: Classe I – Resíduos Perigosos; e Classe II – Resíduos Não Perigosos, que por sua vez se subdividem em Classe II A – Não Inertes e Classe II B – Inertes (ABNT, 2004). A classificação visa orientar a destinação final adequada de cada tipo de resíduo, garantindo segurança ambiental e sanitária.

A Instrução Normativa nº 13/2012 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) também contribui para o tema ao estabelecer a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos. Essa lista visa padronizar a linguagem técnica empregada na comunicação e gestão de informações sobre os resíduos, facilitando o controle e o monitoramento por parte dos órgãos competentes (IBAMA, 2012).

A PNRS ainda define o gerenciamento de resíduos sólidos como “o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada

de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei” (Brasil, 2010).

3.1.1 Resíduos da construção civil

O setor da construção civil possui uma cadeia produtiva ampla e interligada com diversos setores da economia, sendo um dos principais motores de geração de emprego, renda e infraestrutura. Essa atividade contribui significativamente para o desenvolvimento econômico por meio do aumento da produtividade e da oferta de obras públicas e privadas (Cunha, 2022).

Em decorrência da grande escala de suas atividades, o setor também é um dos maiores geradores de resíduos sólidos. De acordo com a PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, os RCC são definidos no Art. 13, inciso I, como “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis” (Brasil, 2010). A lei também estabelece que cabe aos geradores a responsabilidade pela correta destinação desses resíduos.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, de 5 de julho de 2002, regulamenta de forma mais detalhada o gerenciamento dos RCC, incluindo sua classificação, formas de reutilização, reciclagem e disposição final. Segundo a norma, enquadram-se como RCC os resíduos provenientes de obras, reformas e demolições, incluindo materiais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, metais, resinas, tintas, madeiras, argamassas, gesso, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, entre outros (FEAM, 2017).

Segundo dados da pesquisa Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023, estima-se que o país tenha gerado aproximadamente 44 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD) no ano de 2023, o que evidencia a magnitude do desafio enfrentado na gestão desses resíduos (ABRELPE, 2024).

A adequada destinação dos RCC é fundamental para reduzir impactos ambientais, preservar recursos naturais e evitar a sobrecarga de aterros sanitários. A gestão eficiente desses resíduos é, portanto, essencial para a sustentabilidade do setor da construção civil.

O Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) é um documento obrigatório que tem como finalidade o registro e o controle da movimentação de resíduos sólidos, desde a geração até a destinação final ambientalmente adequada. Esse instrumento possibilita a rastreabilidade dos resíduos, promovendo maior transparência e fiscalização por parte dos órgãos ambientais. Em Minas Gerais, a obrigatoriedade da emissão do MTR para obras de construção civil foi estabelecida pela Deliberação Normativa COPAM nº 232, de 25 de abril de 2019, que institui o Sistema MTR-MG, operado de forma digital (COPAM, 2019). Conforme o artigo 3º da norma, todos os empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental que gerem resíduos, inclusive os da construção civil, devem utilizar o sistema para emissão do MTR, garantindo que os resíduos sejam corretamente identificados, transportados e destinados. Essa medida visa reforçar o cumprimento da PNRS (Lei nº 12.305/2010), contribuindo para a redução do descarte irregular e para o fortalecimento da gestão integrada e compartilhada dos resíduos, além de fornecer dados consistentes para políticas públicas e inventários de emissões.

3.2 Indicadores de sustentabilidade em obras

A utilização de indicadores ambientais na construção civil tem ganhado cada vez mais relevância no contexto da sustentabilidade e da eficiência operacional. Esses indicadores permitem não apenas mensurar os impactos ambientais das atividades construtivas, mas também padronizar práticas, estabelecer metas de desempenho e apoiar a tomada de decisão baseada em evidências. Entre os indicadores mais amplamente utilizados está o índice de geração de resíduos por metro quadrado construído (t/m^2), que expressa a quantidade de resíduos gerados em função da área da edificação, possibilitando a comparação entre diferentes obras ou etapas de um mesmo empreendimento (Pinto, 1999).

No ambiente corporativo, especialmente em grandes construtoras, esse indicador é amplamente adotado por equipes de qualidade, sustentabilidade e produção, como uma ferramenta de controle operacional e melhoria contínua. O índice t/m^2 permite identificar desvios em relação ao planejamento de obra, avaliar a eficiência na utilização de materiais e detectar falhas na segregação ou nas práticas de logística de resíduos. Além disso, seu uso sistemático contribui para o cumprimento de requisitos legais e para a certificação ambiental

de edificações, como o LEED, AQUA-HQE e EDGE, que demandam o monitoramento de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da construção (GBC BRASIL, 2021).

A partir da análise desse indicador, é possível estabelecer benchmarks internos entre diferentes canteiros e empreendimentos, favorecendo a disseminação de boas práticas e o alinhamento com os objetivos de redução de impactos ambientais e de aumento da produtividade. Como observam Pinto e Gonzales (2005), o uso de indicadores de desempenho ambiental é essencial para transformar a gestão de resíduos em uma atividade estratégica, indo além do mero cumprimento normativo. Nesse sentido, o índice t/m^2 , quando combinado com outros dados como taxa de segregação, percentual de resíduos reciclados e emissões de CO_2eq , torna-se um instrumento fundamental para avançar na direção de uma construção civil mais sustentável, econômica e responsável.

3.3 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas referem-se a alterações de longo prazo nos padrões climáticos globais, incluindo variações na temperatura, nos regimes de precipitação, nos ventos e em outros elementos atmosféricos. De acordo com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), esse fenômeno pode ocorrer por causas naturais ou em decorrência de ações humanas. No contexto atual, as mudanças climáticas são amplamente atribuídas à influência antrópica, que altera a composição química da atmosfera global, somando-se à variabilidade climática natural observada historicamente (WWF BRASIL, 2023).

Embora eventos naturais como variações na radiação solar e oscilações orbitais da Terra contribuam para mudanças no clima ao longo dos séculos, o fator predominante nas alterações observadas nas últimas décadas tem sido a atividade humana. Desde a Revolução Industrial, o aumento da queima de combustíveis fósseis tem elevado consideravelmente a emissão de GEE, em especial o CO_2 . Nesse período, a concentração atmosférica de CO_2 subiu de cerca de 280 partes por milhão (ppm) para mais de 410 ppm, intensificando o efeito estufa e contribuindo para o aquecimento global (WWF BRASIL, 2023).

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios ambientais do século XXI, resultantes, sobretudo, do aumento das concentrações de GEE na atmosfera. O efeito estufa é responsável por manter a temperatura média do planeta próximo dos 15 °C. A emissão dos chamados gases estufa, como o CO₂, o CH₄ e o N₂O, intensificam o efeito estufa natural, contribuindo para o aumento da temperatura média global, o derretimento de calotas polares, a elevação do nível do mar e a maior frequência de eventos climáticos extremos (Nobre, 2008).

3.3.1 Dióxido de Carbono

O CO₂ é um dos principais gases de efeito estufa responsáveis pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas. Sua presença na atmosfera intensifica o efeito estufa natural, retendo o calor irradiado pela superfície terrestre e resultando no aumento da temperatura média global (IPCC, 2021). Desde a Revolução Industrial, as concentrações atmosféricas de CO₂ aumentaram significativamente devido à queima de combustíveis fósseis, desmatamento e processos industriais, tornando-se o principal fator antrópico por trás do desequilíbrio climático observado nas últimas décadas (NASA, 2023).

Esse acúmulo de CO₂ contribui diretamente para eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor, enchentes e o derretimento de geleiras, afetando ecossistemas e sociedades humanas em escala global (UNEP, 2022). A persistência do CO₂ na atmosfera — que pode durar séculos — reforça a urgência de reduzir suas emissões por meio de estratégias como a transição energética, uso de tecnologias limpas e proteção de florestas, fundamentais para mitigar os impactos das mudanças climáticas (IEA, 2022).

Além do impacto direto no aumento da temperatura global, o excesso de dióxido de carbono altera o equilíbrio químico de outros sistemas naturais, como os oceanos. O CO₂ dissolvido nos mares forma ácido carbônico, contribuindo para a acidificação dos oceanos, o que afeta negativamente a biodiversidade marinha, especialmente organismos calcificantes como corais, moluscos e algumas espécies de plâncton (Doney et al., 2009). Esses impactos comprometem cadeias alimentares, a pesca e a segurança alimentar de milhões de pessoas que dependem diretamente dos recursos marinhos (FAO, 2020).

Adicionalmente, o aumento contínuo das emissões de CO₂ dificulta o cumprimento das metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris, que visam limitar o aumento da temperatura

global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Modelos climáticos indicam que, sem reduções drásticas e imediatas nas emissões de CO₂, o mundo poderá ultrapassar esse limite nas próximas décadas, desencadeando mudanças irreversíveis nos sistemas climáticos e ecológicos (IPCC, 2021). Nesse contexto, o controle das emissões de dióxido de carbono é central para qualquer política eficaz de enfrentamento da crise climática.

3.3.2 *Metano*

O CH₄ é um gás de efeito estufa extremamente potente, com um potencial de aquecimento global mais de 80 vezes superior ao do dióxido de carbono em um período de 20 anos (IPCC, 2021). Embora sua concentração atmosférica seja menor que a do CO₂, seu impacto climático de curto prazo é significativo, tornando-o um dos principais alvos em estratégias de mitigação imediata. As principais fontes de emissão de metano incluem atividades agropecuárias, como a digestão de ruminantes e o manejo de esterco, além da extração e queima de combustíveis fósseis e da decomposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários (USEPA, 2022).

A crescente concentração de metano na atmosfera contribui de maneira decisiva para o aumento das temperaturas globais, acelerando processos como o derretimento de geleiras, o degelo do permafrost e a intensificação de eventos climáticos extremos (NASA, 2023). Além disso, o metano também afeta a qualidade do ar ao participar de reações químicas que formam o ozônio troposférico, um poluente nocivo à saúde humana e às plantações (Shindell et al., 2012). Por isso, reduzir as emissões de metano pode gerar benefícios climáticos e de saúde pública de forma relativamente rápida.

Outra característica importante do metano é seu tempo de permanência relativamente curto na atmosfera — cerca de 12 anos — o que significa que ações de controle podem produzir resultados climáticos mensuráveis em um horizonte de tempo mais imediato do que as medidas relacionadas ao CO₂ (IEA, 2021). Isso torna o metano uma prioridade em acordos internacionais como o *Global Methane Pledge*, lançado na COP26, que visa reduzir as emissões globais de CH₄ em pelo menos 30% até 2030 em relação aos níveis de 2020 (European Commission, 2021).

Portanto, o combate às emissões de metano é considerado uma das estratégias mais eficazes e custo-benefício no curto prazo para limitar o aquecimento global e evitar os efeitos mais

severos das mudanças climáticas (UNEP, 2021). Medidas como melhorias no manejo de resíduos, a contenção de vazamentos em sistemas de petróleo e gás, e mudanças na alimentação do gado são exemplos de ações viáveis com grande potencial de mitigação.

3.3.3 Óxido Nitroso

O N₂O é um gás de efeito estufa potente, com potencial de aquecimento global aproximadamente 273 vezes maior que o do dióxido de carbono em um período de 100 anos (IPCC, 2021). Apesar de sua menor concentração atmosférica, o N₂O tem um tempo de residência de cerca de 120 anos, o que o torna especialmente preocupante do ponto de vista climático. Suas principais fontes antrópicas estão ligadas ao uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura, à decomposição de resíduos orgânicos e a processos industriais como a produção de ácido nítrico (USEPA, 2022).

Além de contribuir para o aquecimento global, o N₂O também é o principal destruidor de ozônio estratosférico no século XXI, afetando a camada que protege a Terra da radiação ultravioleta (Ravishankara et al., 2009). Essa dupla ameaça — ao clima e à integridade da atmosfera — coloca o N₂O como um gás estratégico no combate às mudanças climáticas. A agricultura é responsável por cerca de 70% das emissões antropogênicas de N₂O, especialmente devido ao uso excessivo e ineficiente de fertilizantes (FAO, 2021).

Dada a estabilidade do N₂O e seu longo tempo de permanência na atmosfera, as emissões acumuladas exercem efeitos prolongados, o que exige políticas de mitigação robustas e duradouras. Tecnologias agrícolas mais eficientes, como o manejo de nutrientes com base em monitoramento e sensores, a rotação de culturas e o uso de fertilizantes de liberação controlada, são medidas viáveis para reduzir significativamente essas emissões (Smith et al., 2012). Essas abordagens, se amplamente adotadas, podem reduzir tanto as emissões de N₂O quanto melhorar a produtividade agrícola.

O controle das emissões de N₂O é, portanto, essencial não apenas para frear o aquecimento global, mas também para proteger a camada de ozônio e promover a sustentabilidade na produção de alimentos. Apesar dos avanços científicos, ainda há uma lacuna significativa entre o conhecimento técnico disponível e sua aplicação em larga escala — o que reforça a importância de políticas públicas integradas, educação agrícola e incentivos à inovação para mitigar esse poluente de longa duração (UNEP, 2021).

3.3.4 Outros Gases de Efeito Estufa

Os hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorocarbonetos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆) são gases de efeito estufa sintéticos extremamente potentes e persistentes, usados principalmente em aplicações industriais, como refrigeração, eletrônica e isolamento elétrico. Embora presentes em concentrações atmosféricas muito menores que o dióxido de carbono ou o metano, esses compostos possuem potenciais de aquecimento global (GWP) muito elevados: o HFC-134a, por exemplo, tem um GWP de 1.430; o CF₄ (um tipo de PFC), de 7.390; e o SF₆ pode chegar a um GWP de 23.500, considerando um horizonte de 100 anos (IPCC, 2021). Devido à sua longa vida atmosférica — algumas moléculas de PFCs podem durar até 50.000 anos —, esses gases acumulam-se e exercem efeitos climáticos prolongados (WMO, 2018).

O aumento das emissões desses gases está fortemente ligado ao crescimento da demanda por aparelhos de ar-condicionado, sistemas de refrigeração e semicondutores, especialmente em países em desenvolvimento. Além de contribuir para o aquecimento global, alguns HFCs também substituíram substâncias que degradavam a camada de ozônio, como os clorofluorcarbonetos (CFCs), após a assinatura do Protocolo de Montreal. Para lidar com esse novo desafio, a Emenda de Kigali ao Protocolo (2016) estabeleceu metas para a redução gradual do uso de HFCs, reconhecendo seu impacto climático significativo (UNEP, 2016).

A substituição de HFCs, PFCs e SF₆ por alternativas com baixo ou zero potencial de aquecimento global tem se tornado uma prioridade em setores industriais. Tecnologias como refrigerantes naturais (CO₂, amônia e hidrocarbonetos leves), bem como melhorias nos sistemas de vedação e recuperação de gases em equipamentos elétricos e eletrônicos, são caminhos viáveis para reduzir essas emissões (IEA, 2020). No caso do SF₆, amplamente utilizado em equipamentos de alta tensão, diversas iniciativas já buscam substituí-lo por gases menos nocivos com desempenho técnico equivalente.

A eliminação progressiva desses gases de alta persistência e elevado GWP representa uma oportunidade estratégica para retardar o aquecimento global no curto e médio prazo. Segundo a *Climate and Clean Air Coalition*, a redução dos HFCs até 2050 pode evitar até 0,4 °C de aquecimento global. Assim, políticas públicas que estimulem a transição tecnológica, a recuperação e destruição segura desses gases, bem como regulamentações internacionais

mais rígidas, são essenciais para frear sua crescente contribuição às mudanças climáticas (CCAC & UNEP, 2021).

3.4 Mercado de Carbono

O mercado de carbono é um instrumento econômico voltado à redução das emissões de GEE por meio da comercialização de créditos de carbono, os quais representam uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (t CO₂eq) que deixou de ser emitida ou foi removida da atmosfera. No Brasil, embora ainda em fase de regulamentação, o tema vem ganhando destaque com a aprovação do Lei Federal nº 15.042 de 2024, que propõe a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), um mercado regulado de carbono com metas obrigatórias para determinados setores da economia (Brasil, 2024).

Paralelamente, o país já participa ativamente do mercado voluntário de carbono, onde empresas e organizações adquirem créditos para compensar suas emissões, muitas vezes ligados a projetos florestais, energéticos ou de manejo de resíduos (ICMBIO, 2022). A implementação de um mercado regulado é vista como uma oportunidade para alinhar a economia brasileira às metas de neutralidade climática assumidas no âmbito do Acordo de Paris, além de representar um estímulo à inovação tecnológica e à transição para modelos de produção mais sustentáveis (IEMA, 2022). No setor de resíduos, a valorização das emissões evitadas por meio de práticas como a reciclagem e o aproveitamento energético pode se traduzir em ativos ambientais negociáveis, incentivando economicamente a adoção de soluções ambientalmente corretas (GVces, 2021).

3.5 Resíduos e Emissões

Diversos estudos recentes têm contribuído para o avanço do conhecimento sobre a relação entre a gestão de resíduos da construção civil e as emissões de GEE. Um dos trabalhos de destaque é o de Turner, Williams e Kemp (2015), que analisaram o impacto climático de diferentes rotas de manejo de resíduos no Reino Unido, com base na pegada de carbono por tipo de material reciclado. O estudo fornece fatores de emissão específicos para materiais como concreto, madeira e gesso, com valores obtidos por meio de metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A ACV é uma metodologia reconhecida internacionalmente para mensurar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas de sua existência, desde a extração de matérias-primas, produção, uso, transporte e disposição final, até o fim de vida. Essa abordagem permite uma análise integrada dos efeitos ambientais cumulativos, considerando diferentes categorias de impacto, como emissões atmosféricas, uso de recursos naturais e geração de resíduos. Na construção civil, a aplicação da ACV tem se mostrado uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de práticas sustentáveis, possibilitando a quantificação de emissões de GEE associadas a diversas fases do ciclo de uma edificação ou de seus resíduos. A metodologia da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos Sólidos Urbanos, utilizada neste trabalho, baseia-se diretamente em princípios de ACV, o que justifica sua adoção como instrumento técnico para estimativa das emissões. De acordo com a iniciativa Life Cycle Initiative, promovida pelo PNUMA e SETAC, a ACV permite decisões mais conscientes ao avaliar não apenas impactos locais, mas também os efeitos globais das atividades humanas (UNEP/SETAC, 2023).

Outro trabalho relevante é o de Gonçalves et al. (2018), que realizaram uma avaliação abrangente das emissões de GEE em empreendimentos de infraestrutura urbana, considerando desde a fase de construção até a operação. Embora o estudo não se restrinja à gestão de resíduos, os autores destacam que a etapa de transporte e disposição final dos resíduos está entre as mais significativas no inventário de emissões das obras analisadas. Além disso, o estudo aponta para a necessidade de aprimorar a eficiência dos processos logísticos, tanto em termos de distâncias percorridas quanto da escolha dos destinos receptores, elementos que também foram tratados na presente análise.

Por fim, destaca-se o trabalho de Santos (2019), que elaborou um inventário de GEE em um canteiro de obras vertical localizado em Fortaleza, Ceará. O estudo quantificou as emissões com base nas práticas de transporte e destinação dos resíduos, utilizando indicadores absolutos como toneladas de CO₂eq por obra. A pesquisa de Santos (2019) reforça a importância de se considerar o gerenciamento de resíduos como um fator estratégico para a redução do impacto ambiental da construção civil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa possui caráter quantitativo e exploratório, com o objetivo de mensurar as emissões de GEE, expressas em CO₂eq, associadas ao gerenciamento de RCC, em diferentes obras localizadas no Brasil.

4.1 Coletas de dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos, prioritariamente, por meio da plataforma NETResíduos, um sistema de gestão voltado ao controle das etapas de transporte e destinação de resíduos em obras da construção civil. A plataforma consolida informações operacionais inseridas pelas equipes responsáveis pela gestão de resíduos nas obras. Adicionalmente, tais informações também podem ser acessadas por meio do Sistema Nacional de Manifesto de Transporte de Resíduos, regulamentado pela PNRS. No caso de Minas Gerais, o controle é realizado por meio do sistema da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), desde que a obra esteja devidamente cadastrada e autorizada para emissão e consulta dos documentos.

Neste estudo, foram analisadas nove obras pertencentes a uma construtora localizada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, com atuação predominante na construção de edifícios residenciais de médio padrão. As obras selecionadas apresentam características construtivas semelhantes, o que possibilitou uma análise mais uniforme do gerenciamento de resíduos e suas emissões associadas.

Para fins de padronização e análise, os volumes foram convertidos para toneladas (t), utilizando-se suas respectivas densidades, fornecidos pela gestora da plataforma, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de resíduos e densidades utilizadas

Resíduo	Peso específico (t/m³)
Concreto/Cerâmico	1,20
Gesso	1,00
Madeira	0,15
Metal	0,10
Resíduos sem segregação (não perigoso)	1,20
Papel	0,04
Plástico	0,04
Vidro	0,50
Não Recicláveis/Não Recuperáveis	0,15
Sacos (Cimento, Argamassa e Gesso)	0,04

Fonte: Adaptado de NETResíduos

Os resíduos contemplados foram: concreto/cerâmico, gesso, madeira, metal, resíduos sem segregação (não perigosos), papel, plástico, vidro e não recicláveis/não recuperáveis. As destinações do resíduo solo foram desconsideradas neste estudo devido à grande variabilidade de volume em função das características topográficas de cada terreno, o que poderia distorcer os resultados do índice de geração.

A seguir, foi elaborada uma matriz de quantificação, relacionando, para cada obra, as quantidades de resíduos (em toneladas) destinadas a cada tipo de área receptora (reciclagem, aterro etc.).

4.2 Índice de geração de resíduos

Para o cálculo do índice de geração de resíduos (IGR) de cada obra, foram considerados os dados de área construída, obtidos a partir do alvará da obra. O índice foi calculado pela equação 1.

$$\text{IGR (t/m}^2\text{)} = \text{massa total de RCC gerado (t)} / \text{área construída (m}^2\text{)} \quad (01)$$

Esse índice permitiu a padronização dos dados entre obras de diferentes portes e a comparação da eficiência do gerenciamento de resíduos entre os empreendimentos analisados.

4.3 Estimativas de emissões

A estimativa das emissões de GEE foi realizada com base na métrica de tonelada de resíduo por metro quadrado de área construída (t/m^2), permitindo comparações relativas entre obras distintas. As emissões foram calculadas para cada tipo de resíduo, considerando sua destinação final (reciclagem ou aterro).

4.3.1 Base metodológica

Como referência principal, foi utilizada a Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos Sólidos Urbanos, desenvolvida pelo Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2021), que adota uma abordagem baseada na ACV.

Complementarmente, foram utilizados:

- Fatores de emissão do *GHG Protocol*;
- Dados da literatura científica (artigos técnicos e acadêmicos);
- Inventários nacionais de emissões de GEE;
- Diretrizes metodológicas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006).

4.3.2 Emissões na reciclagem

Para os resíduos metal, papel, plástico e não recicláveis, foram adotados os fatores de emissão constantes na ferramenta governamental (Brasil, 2021). Já para resíduos como concreto/cerâmico, gesso e madeira, foram utilizados os fatores de emissão propostos por Turner, Williams e Kemp (2015), os quais consideram os impactos específicos do processo de reciclagem segregada. Na Tabela 2 é possível observar os fatores de emissão dos resíduos.

Tabela 2 - Fatores de emissão para reciclagem dos resíduos

Resíduo	Emissão (kg CO₂eq/t resíduo)
Papel	1256,00
Vidro	483,20
Metal	64,00
Plástico	410,00
Madeira	502,00
Concreto/Cerâmico	16,00
Gesso	59,00

Fonte: Adaptado de Turner; Williams; Kemp, 2015 e IPCC (2006)

4.3.2 Emissões no aterro sanitário

As emissões associadas à disposição em aterro exigiram ajustes metodológicos, pois a Calculadora de GEE do governo utiliza médias ponderadas para o conjunto de resíduos. Neste estudo, as emissões foram calculadas por tipo de resíduo, considerando os seguintes pontos:

- Teor de carbono total e carbono fóssil dos resíduos (IPCC, 2006);
- Potencial de geração de metano (CH₄) dos resíduos biodegradáveis (IPCC, 2006);
- Eficiência média de captação de biogás nos aterros (considerado 60%) (Candiani, 2017);
- Destino do biogás (apenas queima);
- Fator de conversão de metano para CO₂eq (1 t CH₄ = 28 t CO₂eq) (IPCC, 2013).

Cabe destacar que, para a estimativa das emissões associadas à destinação final dos resíduos em aterros sanitários, foi adotado o valor de 60% de eficiência na coleta de biogás, conforme parâmetros médios recomendados pela literatura técnica e diretrizes internacionais. Além disso, considerou-se que 100% do gás coletado é direcionado à queima, não sendo discriminadas possíveis frações destinadas à geração de eletricidade ou aproveitamento como biogás. Essa simplificação metodológica se justifica pela escassez de dados específicos e atualizados sobre a eficiência real de captura e o destino do biogás nas unidades receptoras utilizadas pelas obras analisadas.

Os cálculos foram realizados em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel), utilizando fórmulas que combinam quantidade de resíduo, tipo de tratamento e fator de emissão por tonelada.

4.3.2 Emissões na triagem e transbordo

Para os resíduos encaminhados às áreas de triagem e transbordo (ATT), foi necessário realizar levantamentos adicionais junto às unidades receptoras, a fim de identificar o destino final efetivo de cada tipo de resíduo após o processo de triagem. Essas informações foram obtidas por meio de comunicação direta com as empresas responsáveis pelas áreas de ATT, já que o MTR registra apenas a saída do resíduo da obra até o seu destino, que seria a ATT, e não conta a destinação após a ATT.

Com base nas informações fornecidas, adotou-se a premissa de que 100% do conteúdo das caçambas enviadas à triagem foi posteriormente encaminhado para a destinação final informada (aterro ou reciclagem), ou seja, todo o volume triado foi considerado como efetivamente tratado conforme a rota final declarada. Essa abordagem permitiu o detalhamento das emissões associadas não apenas à coleta inicial, mas também à etapa subsequente da cadeia de destinação, respeitando o princípio adotado na ACV.

A contabilização das emissões, portanto, considerou as mesmas fórmulas e fatores de emissão utilizados para a destinação direta, diferenciando apenas a origem (via ATT). Mesmo após passarem pela triagem, alguns resíduos foram destinados a aterros sanitários conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Destino final após triagem

Resíduo	Destino Final
Concreto/Cerâmico	Aterro
Gesso	Aterro
Madeira	Reciclagem
Metal	Reciclagem
Resíduos sem segregação (não perigoso)	Aterro
Papel	Reciclagem
Plástico	Reciclagem
Não Recicláveis/Não Recuperáveis	Aterro
Sacos (Cimento, Argamassa e Gesso)	Aterro

Fonte: Elaboração Própria

4.3.2 Emissões no transporte

As emissões de GEE associadas ao transporte dos resíduos da construção civil foram estimadas com base nas distâncias percorridas (em quilômetros - km) entre os canteiros de obra e os destinos de cada carga, considerando as etapas envolvidas no trajeto.

Para obras que utilizaram áreas de triagem ou estações de transbordo, o cálculo foi realizado em duas etapas:

1. Da obra até a área de triagem.
2. Da área de triagem até o destino final dos resíduos (aterro, recicladora etc.).

Para isso, foram obtidas as rotas reais por meio de ferramentas de mapeamento (como Google Maps), e, nos casos em que o destino final não estava especificado na plataforma, foi realizado contato direto com as empresas de triagem para identificação do local efetivo de destinação final.

Como os registros de coleta disponíveis na plataforma são organizados por viagem, foi possível identificar o número de viagens realizadas até o destino final ou até a área de triagem/transbordo.

Para fins de padronização do cálculo, foi considerado que os resíduos de cada categoria (ex.: concreto, gesso, madeira etc.) foram 100% destinados ao mesmo local após a triagem, ou seja, assumiu-se que a quantidade de caçambas recebidas por tipo de resíduo corresponde à

mesma quantidade posteriormente enviada ao destino final (aterro ou recicladora). Essa simplificação permitiu estimar de forma consistente o número de viagens entre os diferentes pontos da cadeia de gestão dos resíduos, contribuindo para a avaliação das emissões de GEE relacionadas à logística do processo.

A ATT utilizada pelas obras está situada na cidade de Betim, na Região Metropolitana de Belo Horizonte. De forma similar, os resíduos recicláveis também foram encaminhados a unidades receptoras localizadas na mesma região metropolitana, distribuídas da seguinte forma:

- Metal: recicladora localizada em Betim;
- Madeira: recicladora situada no município de Contagem;
- Papel e plástico: recicladora localizada na região Noroeste de Belo Horizonte.

Após o processo de triagem, os resíduos foram encaminhados para dois tipos de destino final: um aterro sanitário situado também em Betim, para os resíduos não recicláveis, e uma recicladora localizada em Contagem.

Essas viagens foram multiplicadas pelas distâncias respectivas apresentadas na Tabela 4, a fim de calcular o total de quilômetros percorridos.

Tabela 4 - Distância da ATT até o destino final

Resíduo	Destino Final	Distância (km)
Concreto/Cerâmico	Aterro	9,3
Gesso	Aterro	8,8
Madeira	Reciclagem	7,8
Metal	Reciclagem	14,4
Resíduos sem segregação (não perigoso)	Aterro	8,8
Papel	Reciclagem	11,3
Plástico	Reciclagem	11,3
Não Recicláveis/Não Recuperáveis	Aterro	8,8
Sacos (Cimento, Argamassa e Gesso)	Aterro	8,8

Fonte: Elaboração Própria

A estimativa de emissões no transporte foi realizada com base na metodologia do *GHG Protocol*, utilizando o fator de emissão por quilômetro rodado para caminhões do tipo rígido

com capacidade entre 7,5 e 17 toneladas, movidos a óleo diesel puro. Segundo o *GHG Protocol*, esse tipo de veículo emite aproximadamente 0,5387 kg CO₂eq/km.

Com base nesse fator, as emissões de transporte foram calculadas pela seguinte fórmula (equação 2):

$$\text{Emissões (kg CO}_2\text{eq)} = \text{Distância percorrida (km)} \times \text{Fator de emissão (kg CO}_2\text{eq/km)} \quad (02)$$

O cálculo foi realizado separadamente para cada obra, conforme as rotas e os destinos identificados, permitindo estimar a contribuição do transporte no total de emissões por tipo de resíduo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os principais resultados obtidos a partir da análise dos dados de nove obras, todas localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte e com métodos construtivos semelhantes. Os dados, extraídos da plataforma NETResíduos e complementados com levantamentos adicionais, permitiram a construção de indicadores ambientais específicos para cada empreendimento. São abordados a seguir: o volume total de resíduos gerados por tipo e destinação, os índices de geração por metro quadrado construído, as emissões de GEE relacionadas à destinação e ao transporte dos resíduos, além de uma análise integrada das emissões totais por área construída ($\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$). Os resultados são discutidos à luz de estudos nacionais e internacionais, buscando identificar padrões, variações e oportunidades de melhoria na gestão de resíduos no setor da construção civil.

5.1 Índice de Geração de Resíduos por Área Construída

O primeiro resultado obtido foi a matriz de resíduos gerados, organizada por tipo de material e tipo de destinação, conforme demonstrado na Tabela 5. Essa matriz reúne as quantidades totais de resíduos gerados em cada uma das nove obras analisadas, classificadas entre as destinações possíveis: reciclagem direta e ATT. Para os resíduos encaminhados à ATT, foram também identificadas as rotas finais após a triagem, com base em informações fornecidas pelas áreas receptoras.

Tabela 5 - Quantidade total de resíduos por tipo e destinação (toneladas) nas obras avaliadas

Obra	Triagem e Transbordo (ATT) (t)								Reciclagem (t)				
	Concreto/ Cerâmico	Gesso	Madeira	Metal	Não Recicláveis/Não Recuperáveis	Papel	Plástico	Resíduos sem segregação (não perigoso)	Sacos (Cimento, Argamassa e Gesso)	Madeira	Metal	Papel	Plástico
	Aterro	Aterro	Reciclagem	Reciclagem	Aterro	Reciclagem	Reciclagem	Aterro	Aterro				
A1	302,48	10,00	23,25	0,70	11,34	1,32	-	19,88	1,20	-	2,25	0,59	-
A2	361,77	86,00	19,50	-	-	1,68	0,23	7,46	-	-	-	1,69	0,76
A3	186,06	89,27	14,50	2,88	2,06	2,47	1,07	62,14	2,20	4,44	15,28	3,06	0,35
A4	810,00	-	5,96	-	-	1,40	-	41,14	-	41,7	5,06	2	1,08
A5	444,50	97,76	15,75	3,40	-	0,80	0,80	71,82	-	4,2	1,3	0,72	0,51
A6	1641,00	195,50	101,19	6,32	75,42	-	-	-	-	98,79	9,83	6,57	1,9
A7	355,93	149,87	44,00	7,49	-	4,71	1,58	456,64	-	6	3	1,68	0,73
A8	572,59	5,00	34,31	1,51	1,61	8,69	0,52	76,38	-	6,75	5,07	3,11	0,63
A9	1705,20	194,46	0,04	4,57	3,75	4,81	0,51	26,90	0,50	20,097	0,35	2,05	0,5968

Fonte: Elaboração própria

Essa tabela permite uma leitura integrada dos volumes gerados por categoria de resíduo, facilitando a avaliação do desempenho de cada obra em termos de segregação e destinação adequada. Esse levantamento inicial foi essencial para que os próximos indicadores pudessem ser calculados, como o índice de geração de resíduos (t/m^2) e as emissões

Embora as obras analisadas não possam ser diretamente comparadas entre si — em razão das diferenças em gerenciamento de resíduos, possuir demolição ou não, logística de descarte —, o gráfico permite identificar tendências relacionadas à segregação dos resíduos na origem.

É possível observar que, em algumas obras, uma fração significativa do total enviado à ATT corresponde a resíduos sem segregação. Esse padrão indica ineficiência na separação dos materiais no momento da geração, o que compromete o aproveitamento posterior em recicladoras e aumenta as chances de envio ao aterro sanitário. A presença elevada de resíduos misturados, ou com segregação deficiente, dificulta a recuperação de frações recicláveis como papel, plástico e metais, mesmo quando esses resíduos estão potencialmente presentes no volume triado.

Segundo Almeida et al. (2020), a segregação na fonte é o principal fator determinante para o sucesso da reciclagem de RCC, sendo mais eficiente, econômica e ambientalmente vantajosa do que a separação realizada a jusante, em centros de triagem. O estudo também aponta que resíduos misturados têm menor valor comercial e menor taxa de reaproveitamento, o que corrobora com os achados deste trabalho.

A Tabela 6 apresenta os quantitativos totais de resíduos gerados de cada obra.

Tabela 6 - Total de resíduos gerados por obra

Obra	Total de resíduos destinados por área receptora		Total de resíduos destinados
	Triagem e Transbordo	Reciclagem	
	Toneladas		
A1	370,18	2,84	373,02
A2	476,64	2,45	479,09
A3	362,65	23,13	385,78
A4	858,50	49,84	908,34
A5	634,83	6,73	641,56
A6	2019,43	117,09	2136,52
A7	1020,22	11,41	1031,63
A8	700,61	15,56	716,17
A9	1940,74	23,0938	1963,83

Fonte: Elaboração própria

É importante destacar que cada obra possui uma área construída distinta, o que impacta diretamente no volume total de resíduos gerado. Por esse motivo, nas análises seguintes, os dados foram padronizados por metro quadrado construído, conforme apresentado na Tabela 7, permitindo a comparação proporcional entre os empreendimentos.

Tabela 7 - Índice de geração de Resíduos da Construção Civil

Obra	Total de resíduos destinados	Área construída	Índice de geração
	Toneladas	m ²	t/m ²
A1	373,02	14242	0,03
A2	479,09	11040	0,04
A3	385,78	14461	0,03
A4	908,34	14305	0,06
A5	641,56	8513	0,08
A6	2136,52	47774	0,04
A7	1031,63	26916	0,04
A8	716,17	1364	0,05
A9	1963,83	30335	0,06

Fonte: Elaboração própria

Apesar da padronização nos métodos construtivos — caracterizada por empreendimentos residenciais verticais de médio e grande porte, com tecnologia similar de execução e materiais construtivos padronizados —, observou-se variação significativa entre os índices de geração de resíduos das obras. O valor oscilou de 0,03 t/m² a 0,08 t/m², refletindo que diversos fatores influenciam na geração de resíduos, como: tipo e volume

de demolições, a gestão de resíduos no canteiro, a logística de armazenamento, a capacitação da equipe e a segregação na origem. Assim, embora as obras pertençam à mesma construtora, não é possível estabelecer uma relação direta e padronizada entre todas elas. Cada empreendimento apresentou características operacionais próprias que influenciaram diretamente os resultados.

5.2 Emissões de gases de efeito estufa

5.2.1 Emissões no transporte dos resíduos

A Tabela 8 apresenta os resultados referentes às emissões de GEE provenientes do transporte dos resíduos. Para esse cálculo, foi realizado o levantamento da distância (em km) entre cada obra e sua respectiva área receptora, considerando tanto os trajetos diretos para reciclagem ou aterro, quanto os casos em que houve passagem pela ATT.

Com base nas distâncias e no número de viagens realizadas por tipo de resíduo, foi calculado a quilometragem total rodada para cada rota. A partir disso, aplicou-se o fator de emissão do *GHG Protocol* para caminhões rígidos a diesel (0,5387 kg CO₂eq/km), permitindo a estimativa da emissão gerada em cada trajeto.

Tabela 8 - Emissões de Gases de Efeito Estufa no transporte dos resíduos, por obra e por tipo de destino (t CO₂eq)

Obra	Reciclagem (t CO ₂ eq)				Triagem e transbordo (t CO ₂ eq)	
	Papel	Plástico	Metal	Madeira	Área de triagem	Destino Final
A1	0,0036	0,0036	0,0109	-	0,0159	0,7752
A2	0,0446	0,0595	0,0388	-	1,7990	0,6544
A3	0,0708	0,0551	0,1569	0,3446	2,3463	0,5952
A4	0,1327	0,1207	0,0509	0,2360	0,6261	0,9732
A5	0,0165	0,0247	0,0197	0,0222	1,8900	0,8451
A6	0,1826	0,1035	0,0541	0,2990	4,4700	2,6200
A7	0,0681	0,0558	0,0394	0,0120	3,8735	1,7170
A8	0,0830	0,0830	0,0754	0,0302	3,1924	1,1880
A9	0,007	0,0038	0,001	0,0092	0,1638	1,5200

Fonte: Elaboração própria

Dando continuidade à análise, determinou-se o impacto específico da etapa de transporte dos resíduos sobre as emissões totais de GEE nas obras analisadas. Para isso, foi calculado o índice de emissão no transporte (kg CO₂eq/m²), que considera o volume de resíduos transportados, o número de viagens realizadas e a distância percorrida até os destinos

intermediários ou finais, proporcional à área construída de cada empreendimento. Essa abordagem permite avaliar, de forma padronizada, o desempenho ambiental de cada obra em relação à logística de destinação dos resíduos. A Tabela 9 apresenta os valores obtidos para cada uma das nove obras.

Tabela 9 - Índice de emissão de Gases de Efeito Estufa no transporte por área construída (kg CO₂eq/m²)

Obra	Emissão t CO ₂ eq		Emissão Total		Área Construída	Índice de Emissão
	Triagem e transbordo	Reciclagem	t CO ₂ eq	kg CO ₂ eq	m ²	kg CO ₂ eq/m ²
A1	0,7911	0,0181	0,8092	809,2	14242	0,0568
A2	2,4534	0,1429	2,5963	2596,3	11040	0,2352
A3	2,9415	0,6274	3,5689	3568,9	14461	0,2468
A4	1,5993	0,5403	2,1396	2139,6	14305	0,1496
A5	2,7351	0,0831	2,8182	2818,2	8513	0,3311
A6	7,0900	0,6392	7,7292	7729,2	47774	0,1618
A7	5,5905	0,1753	5,7658	5765,8	26916	0,2142
A8	4,3804	0,2716	4,6520	4652	13645	0,3409
A9	1,6838	0,0210	1,7048	1704,8	30335	0,0562

Fonte: Elaboração própria

Quanto às emissões geradas no transporte, os valores variaram entre 0,0568 e 0,3409 kg CO₂eq /m² (Tabela 9), sendo a obra A8 a que apresentou a maior emissão relativa. Esse valor elevado pode estar associado a distâncias maiores percorridas até as áreas de triagem e destino final, além de um número significativo de viagens.

Os resultados encontrados neste estudo reforçam que o transporte dos resíduos tem papel relevante no total de emissões de GEE geradas por uma obra. Em especial, nas obras em que os resíduos passaram por ATT, houve a necessidade de dois deslocamentos consecutivos, o que aumentou substancialmente a quilometragem rodada e, conseqüentemente, as emissões. Esse resultado é coerente com o estudo realizado por Silva et al. (2021), que avaliou a gestão de RCC na região da Amazônia e concluiu que o transporte representa uma fração expressiva das emissões totais do ciclo de vida dos RCC.

Adicionalmente, destaca-se que uma segregação mais eficiente dos resíduos ainda no canteiro poderia reduzir a necessidade de envio para ATT, pois muitos resíduos já poderiam ser destinados diretamente a áreas de reciclagem ou disposição final adequada. Essa melhoria no processo não só contribuiria para a redução das emissões associadas ao

transporte, como também poderia gerar economia, uma vez que caçambas de resíduos não segregados tendem a ter custo mais elevado por tonelada destinada

Portanto, a escolha e a localização das áreas receptoras dos resíduos configuram-se como fatores determinantes para a redução das emissões associadas ao transporte, influenciando diretamente o desempenho ambiental das obras. Conforme ressaltado por Gonçalves et al. (2018), a logística de resíduos desempenha um papel central na quantificação do impacto ambiental de empreendimentos urbanos. Nesse sentido, a análise das emissões decorrentes do transporte, realizada neste trabalho, contribui para evidenciar a importância de práticas logísticas mais eficientes como estratégia de mitigação dos impactos ambientais no setor da construção civil.

5.2.2 Emissões no destino final dos resíduos

De forma complementar, as emissões de GEE relativos à destinação final dos RCC foram determinadas, sendo apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Emissão de GEE referente ao destino final dos resíduos (t CO₂eq)

Obra	Triagem e Transbordo (ATT) (t CO ₂ eq)								Reciclagem (t CO ₂ eq)				
	Concreto/Cerâmico	Gesso	Madeira	Metal	Não Recicláveis/Não Recuperáveis	Papel	Plástico	Resíduos sem segregação (não perigoso)	Sacos (Cimento, Argamassa e Gesso)	Madeira	Metal	Papel	Plástico
	Aterro	Aterro	Reciclagem	Reciclagem	Aterro	Reciclagem	Reciclagem	Aterro	Aterro				
A1	1,0000	0,0332	11,7000	0,0448	0,0376	1,7000	-	0,0660	0,0161	-	0,1440	0,7410	-
A2	1,1986	0,2855	11,6715	-	-	2,1101	-	0,0248	-	-	-	2,1226	0,3116
A3	0,6176	0,2963	7,2790	0,1843	0,0068	3,1023	0,4387	0,2063	0,0518	-	0,9779	3,8434	0,1435
A4	2,6887	-	2,9919	-	-	1,7584	-	0,1366	-	20,9334	0,3238	2,5120	0,4428
A5	1,4754	0,3245	7,9065	0,2176	-	1,0048	0,3280	0,2384	-	2,1084	0,0832	0,9043	0,2091
A6	5,4470	0,6489	50,7974	0,4045	0,2503	-	-	-	-	49,5926	0,6291	8,2519	0,7790
A7	1,1815	0,4975	22,0880	0,4794	-	5,9158	0,6478	1,5757	-	3,0120	0,1920	2,1101	0,2993
A8	1,9000	0,1958	17,2000	0,1000	0,0053	10,9000	0,2000	0,2535	-	3,4000	0,3000	3,9000	0,3000
A9	5,6601	0,6455	0,0201	0,2925	0,0124	6,0414	0,2091	0,0893	0,0017	10,0887	0,0224	2,5748	0,2447

Fonte: Elaboração própria

Conforme é possível observar na Tabela 10, os resíduos que mais contribuíram para as emissões nas etapas de triagem e transbordo e reciclagem foram a madeira e o papel. No caso da madeira, as emissões variaram significativamente entre as obras, oscilando entre 0,0201 e 50,79 t CO₂eq.

Entre os diversos resíduos gerados na construção civil, o gesso e os sacos de cimento destacam-se por apresentarem desafios significativos à reciclagem. O gesso, apesar de tecnicamente reciclável, requer altos níveis de pureza e segregação na origem, sendo sensível à contaminação por tintas, cimento ou madeira, o que inviabiliza sua reutilização em muitos casos (Silva et al., 2020). Além disso, a ausência de infraestrutura específica para a reciclagem de gesso em grande parte do território nacional faz com que esse resíduo, mesmo quando separado, seja frequentemente destinado a aterros, contrariando os princípios da gestão integrada de resíduos sólidos (Lopes; Paliari; Kawakami, 2020). Situação semelhante ocorre com os sacos de cimento, que, por conterem resíduos pulverulentos e serem compostos por camadas de papel e plástico contaminadas, têm sua reciclagem economicamente inviável na maioria dos casos, sendo também destinados como rejeito (Pinto et al., 2005).

Em contrapartida, obras com maior índice de reciclagem apresentaram menor emissão específica de GEE por metro quadrado, demonstrando a eficiência ambiental das práticas de segregação e reaproveitamento. Esse resultado é reforçado por Ferreira et al. (2022), que, ao comparar diferentes cenários de gerenciamento de resíduos (aterro, reciclagem e incineração), identificaram a reciclagem como a alternativa mais eficiente na redução das emissões de gases de efeito estufa e no consumo energético — confirmando que o tipo de destinação final exerce influência direta sobre o desempenho ambiental da obra.

Embora as obras A4 e A9 apresentem índices semelhantes de geração de resíduos (em t/m²) (Tabela 07), suas emissões totais diferem significativamente, o que sugere que a segregação e a escolha da área receptora exercem influência direta e independente do volume gerado.

A Tabela 11 apresenta as emissões totais de GEE associadas às etapas de triagem/transbordo e reciclagem, expressas em toneladas de CO₂ equivalente, bem como o índice de emissão final (kg CO₂eq/m²), considerando a área construída de cada obra. Os dados demonstram que a etapa de reciclagem, embora represente emissões próprias, é significativamente menos

impactante do que o processo de triagem e transbordo, além de permitir emissões evitadas. A obra A6 registrou a maior emissão total (116,80 t CO₂eq), com um índice final de 2,44 kg CO₂eq/m², resultado do alto volume de resíduos gerados. Em contraste, a obra A9 apresentou o menor índice (0,85 kg CO₂eq/m²), mesmo com uma área construída considerável, o que indica um melhor desempenho na gestão dos resíduos. Destaca-se ainda a obra A8, que atingiu o maior índice proporcional de emissões (2,83 kg CO₂eq/m²), possivelmente devido à maior dependência da triagem e menor reaproveitamento direto em comparação com outras obras. Esses resultados reforçam que ações diretas no canteiro de obras, como a segregação na origem e o encaminhamento para reciclagem efetiva, são determinantes para minimizar a pegada de carbono no setor da construção civil.

Tabela 11 - Emissões totais no destino final dos resíduos

Obra	Emissão total (t CO ₂ eq)		Total		Área construída m ²	Índice de emissão kg CO ₂ eq/m ²
	Triagem e transbordo	Reciclagem	t CO ₂ eq	kg CO ₂ eq		
A1	14,60	0,89	15,48	15483	14242	1,09
A2	15,29	2,43	17,72	17725	11040	1,61
A3	12,18	7,19	19,38	19377	14461	1,34
A4	7,58	24,21	31,79	31788	14305	2,22
A5	11,50	3,31	14,80	14800	8513	1,74
A6	57,55	59,25	116,80	116801	47774	2,44
A7	32,39	5,61	38,00	37999	26916	1,41
A8	209,29	8,01	217,30	217296	13645	15,92
A9	12,97	12,93	25,90	25903	30335	0,85

Fonte: Elaboração própria

Para a estimativa das emissões associadas à disposição final dos resíduos em aterros sanitários, foi adotada uma simplificação metodológica quanto à eficiência real de captura e ao destino do biogás gerado nas unidades receptoras. Embora essa suposição possa ter exercido alguma influência pontual sobre os valores absolutos de emissão calculados, entende-se que ela não compromete a consistência das análises comparativas entre as diferentes obras, visto que os mesmos critérios foram aplicados de forma uniforme a todos os empreendimentos analisados.

5.2.3 Emissões Totais

Com o objetivo de consolidar os dados e fornecer uma visão integrada do impacto ambiental de cada empreendimento, foi calculado o índice total de emissões de GEE por metro quadrado construído ($\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$), considerando a soma das emissões geradas nas etapas de transporte e destinação final dos resíduos. Esse indicador representa de forma mais abrangente a pegada de carbono associada à gestão dos resíduos da construção civil. A Tabela 12 apresenta os valores consolidados de emissão total por obra, oferecendo subsídios para avaliar como fatores como segregação, escolha de áreas receptoras e volume de resíduos gerados influenciam no impacto ambiental final.

Tabela 12 - Emissão total por obra

Obra	Transporte	Destinação	Índice de emissão Total
	kg CO ₂ eq/m ²		
A1	0,0568	1,09	1,14
A2	0,2352	1,61	1,84
A3	0,2468	1,19	1,43
A4	0,1496	2,22	2,37
A5	0,3311	1,74	2,07
A6	0,1618	2,44	2,61
A7	0,2142	1,41	1,63
A8	0,3409	2,83	3,17
A9	0,0562	0,85	0,91

Fonte: Elaboração própria

A emissão total por metro quadrado, somando transporte e destinação, variou de 0,91 a 3,17 $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$, consolidando a obra A8 como a de maior emissão entre as analisadas. Embora estudos como Santos (2019) tenham abordado o tema das emissões em canteiros, ainda são raros os que aplicam a métrica padronizada por metro quadrado construída ($\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$), como proposto no presente estudo.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao transporte e à destinação final dos resíduos da construção civil, com base em dados reais obtidos em nove obras localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Para isso, foram determinados dois indicadores principais: o índice de geração de resíduos por metro quadrado construído (t/m^2) e o índice de emissões de GEE padronizado em CO_2 equivalente por metro quadrado ($kg CO_2eq/m^2$).

Os resultados demonstraram que, mesmo entre obras com método construtivo padronizado e perfil técnico semelhante, houve grande variação nos índices de geração e nas emissões totais. Esse comportamento reforça o entendimento de que cada obra possui características operacionais e de gerenciamento próprias, influenciadas por fatores como a logística de manejo de resíduos, o nível de segregação na origem, a distância até os destinos e a existência (ou não) de alternativas viáveis para reciclagem.

As emissões relacionadas à destinação final apresentaram impacto significativo nos resultados, sobretudo para obras com alto volume de resíduos não segregados ou sem rotas viáveis de reaproveitamento, como no caso de gesso e sacos de cimento, argamassa e gesso. Já as emissões no transporte se mostraram especialmente relevantes nas obras que utilizaram áreas de triagem e transbordo, pois envolvem dois deslocamentos consecutivos (obra → triagem → destino final), ampliando a quilometragem total percorrida.

A consolidação das emissões em $kg CO_2eq/m^2$ permitiu uma comparação mais clara entre empreendimentos de diferentes portes e resultou em índices que variaram entre 0,86 a 2,85 $kg CO_2eq/m^2$, evidenciando a possibilidade de se utilizar esse indicador como ferramenta de diagnóstico ambiental no setor da construção civil.

Portanto, conclui-se que o estudo atendeu plenamente aos objetivos propostos e oferece uma contribuição original e aplicável ao setor, ao propor um modelo de quantificação das emissões de GEE que pode ser replicado, adaptado e aprimorado em diferentes contextos da construção civil brasileira.

7 RECOMENDAÇÕES

Para aprimorar os resultados obtidos neste estudo, recomenda-se a realização de pesquisas complementares com acompanhamento direto de campo ao longo de todas as etapas da obra. Isso permitiria uma avaliação mais precisa sobre a eficácia do gerenciamento de resíduos, a aderência à segregação na fonte, os métodos construtivos adotados, bem como a fidedignidade dos dados registrados em sistemas digitais como o NETResíduos. A presença de profissionais técnicos monitorando o canteiro também possibilitaria verificar se todos os resíduos gerados estão, de fato, sendo registrados, além de identificar eventuais perdas, reutilizações internas ou descarte informal. Esse tipo de estudo aprofundado traria evidências mais robustas para validar os indicadores de geração e emissões e contribuiria para a formulação de estratégias mais eficazes de mitigação ambiental no setor da construção civil.

8 REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 10004: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABRELPE, 2024. Disponível em: <https://abrelpe.org.br>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ALMEIDA, L. A. T. de; SOUZA, A. L. R.; SILVA, C. E. S. Segregação na origem como estratégia de valorização dos resíduos da construção civil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 161–168, 2020.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Inventário de emissões de gases de efeito estufa – Escopos 1, 2 e 3. Rio de Janeiro: BNDES, 2022. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 3 jun. 2025.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Protocolo GHG: guia para elaboração de inventários. Brasília: BNDES, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Manual da calculadora de emissões de GEE para resíduos: ferramenta de cálculo de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no manejo de resíduos sólidos urbanos – metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 27 jan 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 27 de fevereiro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) *Diário do Executivo*, Belo Horizonte, MG, 28 fev. 2024.

CANDIANI, G. Gerenciamento de resíduos da construção civil e seus impactos ambientais. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 45–52, 2017.

CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION; UNEP. **Cooling emissions and policy synthesis report**. Paris: United Nations Environment Programme, 2021.

CUNHA, L. O. da. Gestão de resíduos da construção civil: desafios e oportunidades para a sustentabilidade. **Revista Sustentare**, v. 4, n. 2, p. 45–62, 2022.

CURTY, Thaís Neves. Logística reversa para os sacos de cimento no Brasil: uma revisão sistemática. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Instituto Federal do Espírito Santo, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4738>. Acesso em: 27 mai. 2025.

DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM nº 232, de 27 de junho de 2019. Estabelece critérios para a caracterização e classificação de resíduos. Minas Gerais: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2019.

DONEY, S. C.; FABRY, V. J.; FEELY, R. A.; KLEYPAS, J. A. Ocean acidification: the other CO₂ problem. **Annual Review of Marine Science**, v. 1, p. 169–192, 2009.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Nitrous oxide emissions from agriculture. Roma: FAO, 2021.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2020: sustainability in action. Roma: FAO, 2020.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Manual de gerenciamento de resíduos da construção civil. Belo Horizonte: FEAM, 2017.

FERREIRA, M. Evaluating the energy consumption and greenhouse gas emissions from managing municipal, construction, and demolition solid waste. **Science of the Total Environment**, 2022.

GBC BRASIL – Green Building Council Brasil. **Construção sustentável e economia circular**. São Paulo: GBC, 2021.

GONÇALVES, H. M. R.; AMORIM, M. C. C. T.; RODRIGUES, A. C.; ZANGUIR, C. A.; MARQUES, R. C. Avaliação das emissões de gases de efeito estufa em empreendimentos de infraestrutura urbana. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 721–728, out./dez. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/YkG7YjbKDGHcVVxPHBk58Hr>. Acesso em: 25 jul. 2025. GVces – Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas. Guia de elaboração de inventários de emissões de GEE. São Paulo: FGV-EAESP, 2021.

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Relatório de gestão ambiental 2022. Brasília: ICMBio, 2022.

IEA – International Energy Agency. Global energy review: CO₂ emissions in 2022. Paris: IEA, 2022.

IEA – International Energy Agency. The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning. Paris: IEA, 2020.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. Inventário de emissões por setor no Brasil. São Paulo: IEMA, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Japan: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>. Acesso em: 2 jun. 2025.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Genebra: IPCC, 2021.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LOPES, L. F.; PALIARI, J. C.; KAWAKAMI, C. A. O gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil: desafios e soluções. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 134–147, 2020.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Manual da Calculadora de Emissões de GEE para Resíduos: ferramenta de cálculo de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no manejo de resíduos sólidos urbanos – metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Brasília: MMA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 1 jun. 2025.

NASA. Climate change: how do we know? Disponível em: <https://climate.nasa.gov/evidence/>. Acesso em: 2025.

PINTO, T. P. **Gerenciamento ambiental de resíduos da construção civil: uma abordagem para cidades de pequeno porte**. São Paulo: IPT, 1999.

PINTO, T. P.; GONZALES, M. H. Reciclagem de resíduos da construção: uma visão sobre o setor no Brasil. **Revista Ambiente Construído**, v. 5, n. 2, p. 7–22, 2005.

RAVISHANKARA, A. R.; DANIEL, J. S.; PORTMANN, R. W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, v. 326, n. 5949, p. 123–125, 2009.

SANTOS, L. C. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em canteiro de obra vertical em Fortaleza–CE**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SHINDELL, D. T.; SCHMIDT, G. A.; MILLER, R. L.; KUJIPER, M. J.; SMITH, K. R.; CLARKE, L.; PARRY, M. L.; CANZIANI, O.; SCHLESINGER, W. H. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, v. 335, n. 6065, p. 183–189, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1210026>.

SILVA, C. E. S.; OLIVEIRA, M. L.; BARBOSA, A. C. M. Avaliação do desempenho ambiental na gestão de resíduos da construção na Amazônia. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 11, n. 1, p. 97–110, 2021.

SKANSKA; OMSORGSBYGG. GHG emission calculation from construction phase of Lia barnehage. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/249985583.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2025.

SMITH, P.; BUSTAMANTE, M.; AHLGREN, S.; AHRENS, R.; CLARK, H.; FAIRCLOUGH, M.; FOLLETT, R.; HERVEY, E.; MASERA, O.; MÜLLER, C.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHNEIDER, U. A.; TUBIELLO, F. N.; YAN, X. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In: EDENHOFER, O. et al. (ed.). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genebra: IPCC, 2014. p. 811–922. **TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S.** Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 186–197, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.026>.

UNEP – United Nations Environment Programme. Emissions gap report 2021. Nairobi: UNEP, 2021.

UNEP – United Nations Environment Programme. Emissions gap report 2022. Nairobi: UNEP, 2022.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. The Paris Agreement. Bonn: UNFCCC, 2015.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? Disponível em: <https://unfccc.int>. Acesso em: 3 jun. 2025.

WMO – World Meteorological Organization. Greenhouse gas bulletin: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017. Genebra: WMO, 2018.

WWF BRASIL. Mudanças climáticas. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima. Acesso em: 2 jun. 2025.