LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DOS RSU NO ESTADO DE GOIÁS

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY STUDY OF BIOMETHANE PRODUCTION FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN GOIÁS STATE

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ESTADO DE GOIÁS

https://doi.org/10.56238/levv17n57-035

Data de submissão: 11/01/2026 **Data de publicação:** 11/02/2026

Diogo Appel Colvero
Doutor em Ciências e Engenharia do Ambiente
Instituição: Universidade Federal de Goias (UFG)
E-mail: diogocolvero@ufg.br

José Carlos Martins Ramalho
Doutor em Engenharia Ambiental
Instituição: Universidade de Aveiro (UA) - Portugal
E-mail: jc_ramalho@hotmail.com

Rodrigo Costa Silveira
Graduado em Engenharia Elétrica
Instituição: Secretaria-Geral de Governo do Estado de Goiás (SGG)
E-mail: rodrigo.silveira@goias.gov.br

Cássio Pereira Vieira
Especialista em Gestão da Manutenção Industrial
Instituição: Secretaria-Geral de Governo do Estado de Goiás (SGG)
E-mail: cassio.pvieira@goias.gov.br

Carlos Eduardo Corte Vieira
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de Goias (UFG)
E-mail: carlos.eduardo23@discente.ufg.br

Frank Willis Silva Sena
Graduando em Engenharia Ambiental
Instituição: Universidade Federal de Goias (UFG)
E-mail: frankwillisambiental@discente.ufg.br

Isabela Talon Lovi
Graduanda em Engenharia Ambiental
Instituição: Universidade Federal de Goias (UFG)
E-mail: isabelatalon@discente.ufg.br

RESUMO

Visando o desenvolvimento sustentável, a matriz energética deve priorizar por fontes de energia renováveis. Um exemplo é a valorização dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Diante disso, o objetivo deste estudo foi identificar a viabilidade da captação e do aproveitamento do biogás advindo da fração orgânica dos RSU para a produção de biometano em Goiás. Para isso, a partir do uso de softwares e de equações matemáticas, foram estimados os quantitativos de metano que pode ser produzido em Goiás. Na sequência, realizou-se uma análise econômica e uma avaliação do ciclo de vida (ACV) de três diferentes cenários propostos para a obtenção de biometano. Os resultados apontaram que o Cenário C0, com aterro sanitário, é o menos oneroso, mas também o que promove os maiores impactos ambientais. Já o Cenário D60, com digestão anaeróbia (DA), é o mais caro, mas o que se obtém melhores resultados ambientais. Contudo, o Cenário D18, que também é com DA e que exige menos desvios de RSU, é o mais factível de ser executado, porque é o intermediário tanto em valores econômicos quanto em resultados ambientais. Além disso, é um cenário que tem maior possibilidade de ser executado no curto/médio prazo em comparação ao Cenário D60, que exige uma grande maturidade do sistema de gestão de RSU.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Biometano. Análise Econômica. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Países em Desenvolvimento.

ABSTRACT

For sustainable development, the energy mix should prioritize renewable energy sources. One example is the recovery of municipal solid waste (MSW). Therefore, the objective of this study was to identify the feasibility of recovering and using biogas from the organic fraction of MSW for biomethane production in Goiás. Using software and mathematical equations, the study estimated the methane quantities potentially produced in Goiás. Then, it conducted an economic analysis and life cycle assessment (LCA) of three different scenarios proposed for obtaining biomethane. The results showed that Scenario 0, with sanitary landfill, is the least expensive, but also the one that causes the greatest environmental impact. Scenario D60, with anaerobic digestion (AD), is the most expensive, but the one that achieves the best environmental results. However, Scenario D18, which also uses AD and requires fewer MSW diversions, is the most feasible to implement because it is intermediate in both economic values and environmental results. In addition, it has a greater chance of being implemented in the short/medium term compared to Scenario D60, which requires a highly mature MSW management system.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW). Biomethane. Economic Analysis. Life Cycle Assessment (LCA). Developing Countries.

RESUMEN

Para lograr un desarrollo sostenible, la matriz energética debe priorizar las fuentes de energía renovables. Un ejemplo es la valorización de los residuos sólidos urbanos (RSU). Ante esto, el objetivo de este estudio fue identificar la viabilidad de la captación y el aprovechamiento del biogás procedente de la fracción orgánica de los RSU para la producción de biometano en Goiás. Para ello, se utilizaron programas informáticos y ecuaciones matemáticas para estimar las cantidades de metano que se pueden producir en Goiás. A continuación, se realizó un análisis económico y una evaluación del ciclo de vida (ACV) de tres escenarios diferentes propuestos para la obtención de biometano. Los resultados indicaron que el Escenario 0, con vertedero sanitario, es el menos costoso, pero también el que produce los mayores impactos ambientales. Por su parte, el Escenario D60, con digestión anaeróbica (DA), es el más caro, pero el que obtiene mejores resultados ambientales. Sin embargo, el Escenario D18, que también es con DA y que requiere menos desviaciones de RSU, es el más factible de ejecutar, ya que es el intermedio tanto en valores económicos como en resultados ambientales. Además, es un escenario que tiene más posibilidades de ejecutarse a corto/medio plazo en comparación con el Escenario D60, que requiere una gran madurez del sistema de gestión de RSU.

Palabras clave: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Biometano. Análisis Económico. Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Países en Desarrollo.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética, que prioriza fontes de energia renováveis e visa um desenvolvimento sustentável, tem sido uma pauta global nos últimos anos. Neste contexto, a valorização do biogás advindo de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma das alternativas para suprir as demandas energéticas e transpor os desafios ambientais. Tanto que, em 2010, o Brasil promulgou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei nº 12.305/2010), que estimula uma gestão sustentável dos RSU (BRASIL, 2010b).

Vale destacar que os RSU são os materiais provenientes de atividades domésticas e os resíduos de limpeza urbana, como a varrição e a limpeza de vias públicas (BRASIL, 2010b). A gestão desses resíduos é um desafio global, que precisa estar estruturado em um robusto arcabouço legal e que tenha sustentabilidade econômica e ambiental. Além disso, um modelo de gestão dos RSU precisa seguir o conceito de hierarquia de gestão dos resíduos (EU, 2018). Para isso, deve-se focar em uma gestão voltada para a economia circular destes resíduos, que permita que os recursos tenham seu ciclo de vida perdurando por mais tempo (Malinauskaite *et al*., 2017; Merli; Preziosi; Acampora, 2018).

Neste sentido, um modelo de gestão que valorize a fração orgânica dos RSU é um dos caminhos a serem adotados, pois tratar esta porção dos resíduos contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e ainda pode garantir um retorno financeiro para o que antes era visto apenas como passivo ambiental (IEA, 2023). Sendo que, a fração orgânica dos RSU em países em desenvolvimento, como o Brasil, representa um percentual superior a 45% dos resíduos urbanos (ABREMA, 2020).

Destaca-se que um modelo de gestão exitoso para a fração orgânica dos RSU precisa contemplar uma coleta diferenciada destes resíduos, principalmente em situações que estes materiais são gerados em grandes quantitativos e que estejam mais segregados, como é o caso das feiras de hortifrutigranjeiros e restaurantes (Lima *et al.*, 2018). Além disso, os resíduos orgânicos gerados nas residências também precisam ser recolhidos, separadamente, na fonte.

Diante disso, o objetivo do presente estudo foi identificar a viabilidade da captação e do aproveitamento do biogás advindo da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) para a produção de biometano no estado de Goiás, com foco nas regiões metropolitanas do Entorno do Distrito Federal (RME) e de Goiânia (RMG).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BIOGÁS PROVENIENTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

O setor energético global tem sido pressionado pelas demandas e ofertas de energia existentes. De um lado têm-se o crescimento populacional, a urbanização e o desenvolvimento tecnológico, ampliando a demanda por energia. Dados do *Energy Institute* (EI) apontam que, entre 2014 e 2024, a

demanda mundial por energia passou de 520,73 para 592,22 Exajoules, um crescimento de 72,5 Exajoules em dez anos. Esse dado pode parecer modesto, mas para estabelecer um grau de comparação, em 2024 a demanda estimada de energia para todo o Brasil foi de 10,71 Exajoules. Isso significa que o aumento global da demanda por energia da última década seria suficiente para suprir toda a atual demanda brasileira por sete anos (Energy Institute, 2025).

Por outro lado, há a necessidade de se ofertar uma energia que seja, preferencialmente, renovável. A matriz energética mundial ainda depende em mais de 34% das fontes fósseis, altamente emissoras de GEE. No Acordo de Paris de 2015, os Estados-Membros da Organização das Nações Unidas (ONU), definiram objetivos de redução das emissões e na mitigação da crise climática (Energy Institute, 2025).

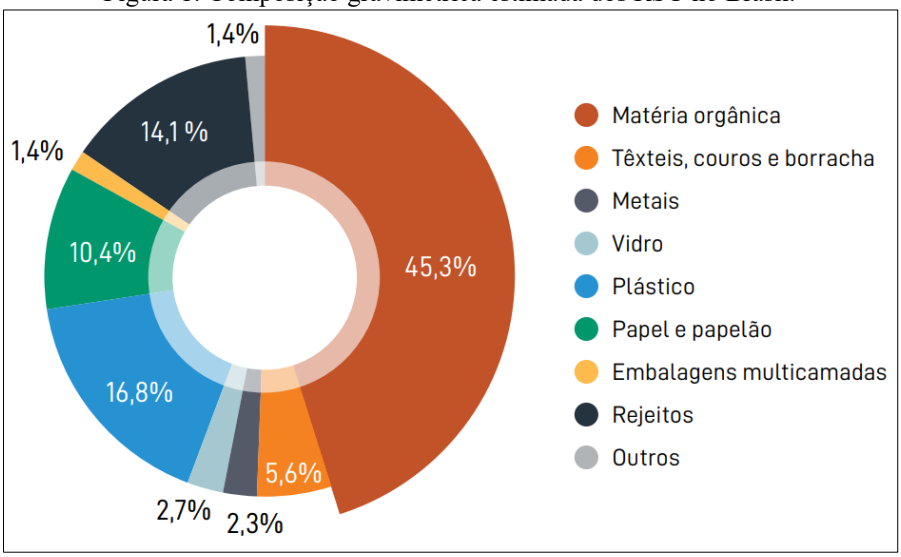
Neste cenário, fontes renováveis estão se consolidando como uma alternativa à substituição dos combustíveis fósseis e a garantia do crescimento socioeconômico. O desenvolvimento de novas tecnologias tem focado em recursos naturais como a energia eólica, solar, hidrelétrica e biomassa. Há ainda outras opções alinhadas às políticas sustentáveis, que é o caso das fontes residuais, como os RSU, o sebo animal, e o óleo de fritura usado (Tshemese *et al,* 2023).

2.2 A GESTÃO DOS RSU NO BRASIL E NO ESTADO DE GOIÁS

2.2.1 Panorama dos RSU no Brasil

A ABREMA realizou um estudo que reuniu dados de 186 municípios brasileiros, objetivando estimar a composição dos resíduos do país. Os dados obtidos apontam que, em 2020, os resíduos orgânicos eram a maior fração dos RSU, com 45,3%, do total gerado. Já os resíduos potencialmente recicláveis secos representavam 33,6% dos RSU. Os demais resíduos sólidos representam 21,1%, sendo eles: 14,1% os rejeitos, 5,6% os têxteis, couros e borrachas, e 1,4% são os outros RSU, conforme apresentado na Figura 1 (ABREMA, 2020).

Figura 1: Composição gravimétrica estimada dos RSU no Brasil.



Fonte: ABREMA (2020).

Dados da ABREMA (2024), apontam que, em 2023, foram geradas 80.957 mil toneladas de RSU no Brasil, uma geração *per capita* de 1,09 kg/hab./dia. Deste quantitativo, 94,3% foram coletados. Os 5,7% não recolhidos foram para terrenos baldios, rios e ruas dos municípios ou queimados a céu aberto (Alfaia, Costa e Campos, 2017).

Dos RSU que foram coletados no Brasil em 2023, 8,8% foram para a reciclagem, 0,4% para a compostagem, 53,2% para aterros sanitários, 7,5% para aterros controlados e 30,1% acabaram em lixões (ABREMA, 2024; SINISA, 2024).

2.2.2 Panorama dos RSU em Goiás

A partir de estudo de Colvero, Pfeiffer e Carvalho (2016), obteve-se a composição gravimétrica média dos RSU em Goiás. Os dados usados consideraram municípios de pequeno porte populacional, como Professor Jamil, que em 2022, possuía 3.649 habitantes, até Goiânia, capital goiana, com mais de 1,4 milhão de habitantes (IBGE, 2024). Essa diversidade populacional permitiu que se obtive-se um perfil gravimétrico mais aproximado da realidade de Goiás. Os resultados apontaram que 55,9% dos RSU gerados são fração orgânica, os recicláveis são 31,9% e outros tipos de resíduos representam 12,2% (Colvero; Pfeiffer; Carvalho, 2016; Colvero *et al.*, 2025).

2.2.2.1 Coleta, Tratamento e Disposição Final dos RSU em Goiás

Segundo dados do Relatório de Monitoramento do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), elaborado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), em 2024, o índice de atendimento da população goiana com a coleta convencional foi de 93,5% (SEMAD, 2024).

Sendo que, somente 81 municípios (32,9%) possuem coleta diferenciada de resíduos recicláveis seco e destes, 49 (19,9%) possuem central de triagem. A compostagem contempla apenas 16 municípios (6,5%) do Estado. Quanto à disposição final, 64 municípios (26%) enviam seus RSU para aterro sanitário, enquanto os demais 182 municípios (74%) encaminham estes resíduos para aterros controlados ou lixões (SEMAD, 2024). Estes dados da disposição final apontam que Goiás está em desacordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, que estabeleceu pela erradicação dos lixões (BRASIL, 2010b), conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Sistemas de gestão de RSU no estado de Goiás.

Sistemas de gestão de RSU em Goiás	Número de municípios	Percentual (%)
Coleta diferenciada de recicláveis secos	81	32,9
Central de triagem	49	19,9
Compostagem	16	6,5
Aterro Sanitário	64	26,0
Aterro Controlado ou Lixão	182	74,0

Fonte: Elaborado pelo autor com base em SEMAD (2024).

2.2.3 Tecnologias de Tratamento de RSU que geram biogás

Segundo a PNRS, a gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos deve priorizar a não geração e a redução na fonte. Após, deve-se priorizar a reutilização, a reciclagem, os tratamentos e a disposição final em aterros sanitários (BRASIL, 2010b). Uma das alternativas é aproveitar energeticamente os RSU (a partir do biogás gerado) com tecnologias que tragam benefícios econômicos, ambientais e para a saúde pública (Wang *et al*., 2025). Dentre as mais difundidas tecnologias para se obter biogás dos RSU estão a digestão anaeróbia (DA) e o aterro sanitário.

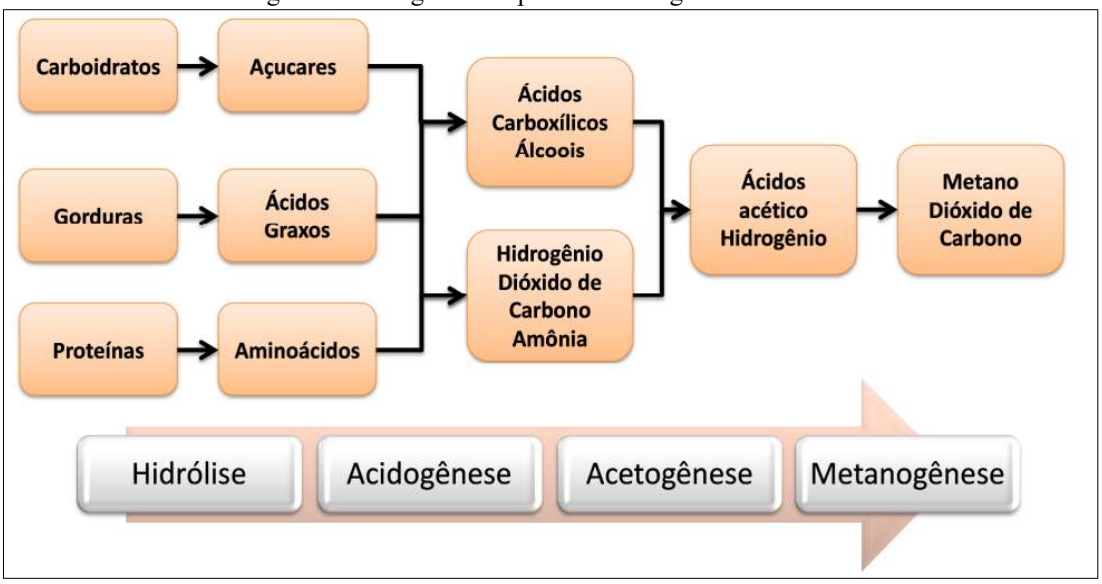
2.2.3.1 Digestão Anaeróbia:

A DA é um processo biotecnológico empregado no tratamento de resíduos orgânicos, que se desenvolve em ambientes isentos de oxigênio molecular. Nessa condição, diferentes grupos de micro-organismos atuam na decomposição e estabilização da matéria orgânica, convertendo-a em produtos finais mais simples, entre eles o biogás e o digestato. O metano apresenta elevado potencial energético e pode ser usado na geração de eletricidade, calor ou ser purificado para uso como biometano, configurando-se como uma alternativa sustentável às fontes fósseis tradicionais (Raposo *et al.* 2011).

Este processo é promovido por micro-organismos anaeróbios que, além de atuarem sem presença de oxigênio, precisa de outras condições ideais, como ter um pH neutro a levemente alcalino e temperaturas entre 35 e 55 °C (Khanal, 2008). A DA ocorre por meio das seguidas reações químicas (Figura 2): hidrólise, fermentação (acidogênese + acetogênese) e metanogênese, produzindo ao final um biogás composto entre 50% a 70% de metano, entre 20% a 40% de CO_2 e uma parcela menor de oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S).

As fases da DA são conduzidas por diferentes consórcios microbianos, responsáveis por transformar a matéria orgânica complexa em biogás (Seadi *et al.,* 2008). O metano tem alto Poder Calorífico Inferior – PCI ($48{,}25 \cdot 10^6\ J/kg$) sendo útil como combustível para veículos, turbinas a gás, produção de energia elétrica e gás doméstico (Azizi *et al.,* 2024; Ferreira *et al.*, 2013; Porto, 2024; Wang *et al*., 2025).

Figura 2: Fluxograma do processo de digestão anaeróbia.



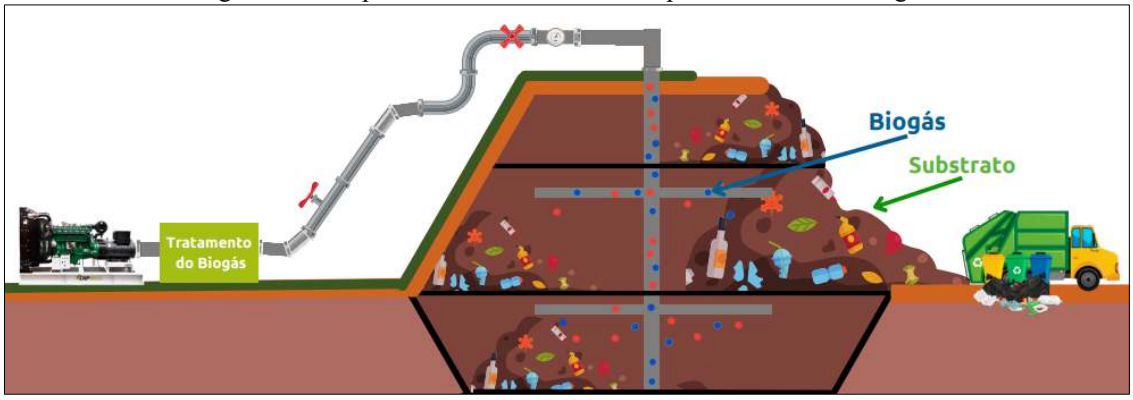
Fonte: Seadi et al. (2008) e EPE (2012).

2.2.3.2 Aterro sanitário

O aterro sanitário é uma técnica de engenharia projetada para a disposição final de resíduos sólidos no solo, de forma a causar o mínimo de impacto ambiental no solo, no ar e na água. Um aterro sanitário inclui mecanismos de controle e um planejamento técnico, para assegurar uma disposição segura e eficiente (Palaniandy, *et al*. 2022).

Vale destacar que um aterro pode ser utilizado para aproveitar o biogás gerado pelos resíduos orgânicos que são depositados (Figura 3) para a produção de energia elétrica ou para gerar biocombustíveis (Yaashikaa, *et al*. 2022).

Figura 3: Exemplo de aterro sanitário com aproveitamento do biogás.



Fonte: CHP Brasil (2017).

Sendo que há três tipos de aterros amplamente usados. Eles se diferem pela forma de decomposição do RSU e nos produtos residuais da decomposição. As principais diferenças entre cada tipo de aterro estão apresentadas na Tabela 2.

O que determina o tipo do aterro é a presença (ou não) de um sistema de aeração interna dos RSU, pois nesse sistema o oxigênio estará presente impedindo total ou parcialmente o processo de digestão anaeróbia que ocorre no interior da infraestrutura. Dessa forma, para aproveitar energeticamente o biogás, o aterro sanitário anaeróbio é a alternativa mais adequada dentre os tipos mencionados.

Tabela 2: Os 3 tipos principais de aterros sanitários e suas características.

Tipo	Ambiente interno	Geração de metano	Geração de Lixiviado	Velocidade de decomposição	Custo
Anaeróbio	Sem O_2	Alta	Alta	Lenta	Baixo
Semi-aeróbio	Parcial O_2	Média	Média-baixa	Média	Médio
Aeróbio	Com O_2	Muito baixa	Baixa	Rápida	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Wang; Wang; Hung (2021).

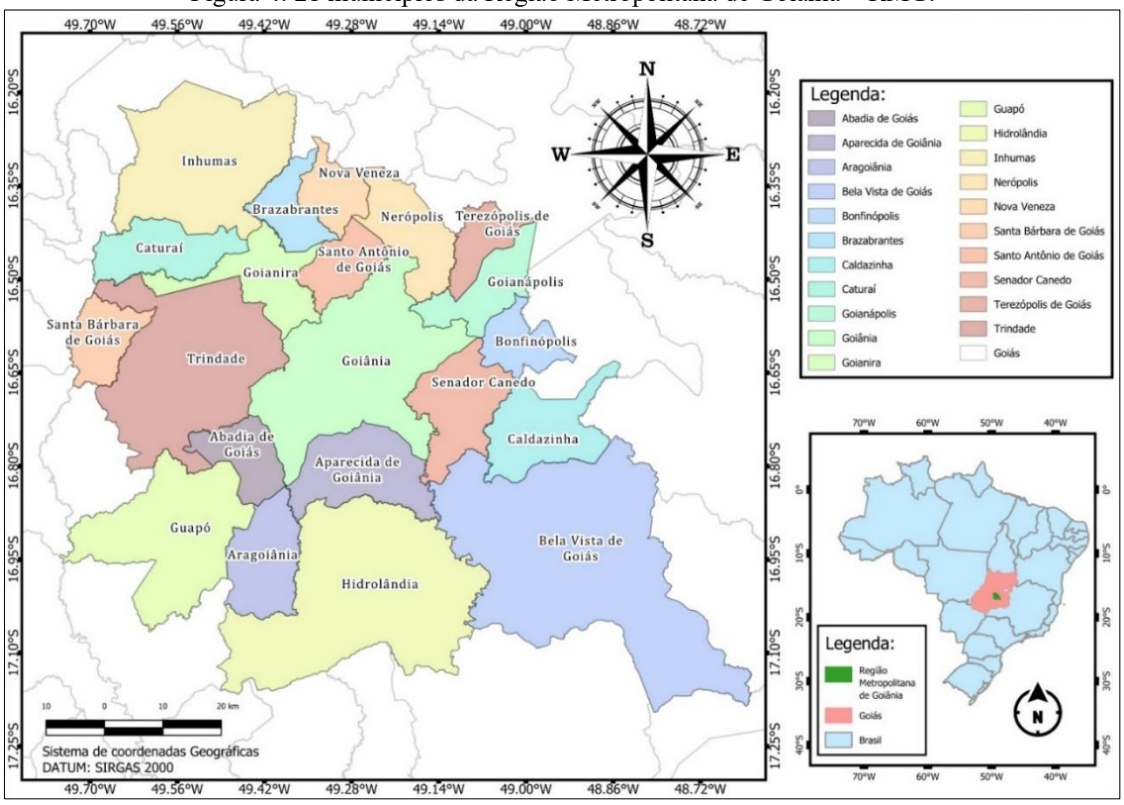
3 METODOLOGIA

3.1 ÁREAS DE ESTUDO EM GOIÁS E A GESTÃO DOS RSU

O presente estudo foi realizado nas duas principais regiões metropolitanas de Goiás: a RMG (Figura 4), que possui 21 municípios e a RME (

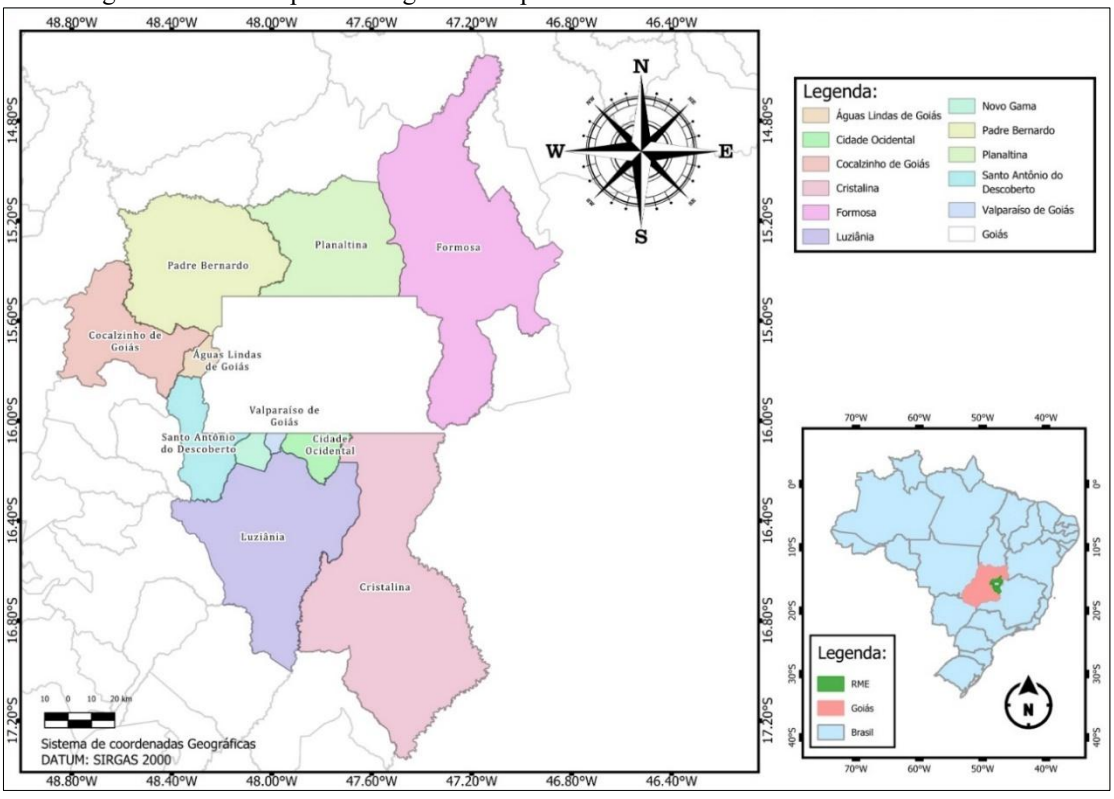
Figura 5), que possui 11 municípios (GOIÁS, 2019a; GOIÁS, 2023b). Escolheram-se estas duas regiões metropolitanas por serem os maiores aglomerados populacionais do estado.

Figura 4: 21 municípios da Região Metropolitana de Goiânia – RMG.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5: 11 municípios da Região Metropolitana do Entorno do Distrito Federal – RME.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 QUANTITATIVO POPULACIONAL E DE GERAÇÃO DE RSU EM GOIÁS

3.2.1 Estimativa populacional

Para fazer a estimativa dos quantitativos futuros de RSU que serão gerados em Goiás, fez-se a projeção populacional para os municípios goianos. Diante disso, utilizou-se a projeção da população para o estado de Goiás entre 2000 e 2070 (IBGE, 2024) para calcular os quantitativos populacionais futuros para os municípios goianos entre 2026 e 2046, ou seja, definiu-se uma vida útil de projeto de 20 anos. A estimativa populacional para 2026 é de que Goiás tenha uma população de praticamente 7,5 milhões de habitantes. Já para o ano de 2046, são estimados cerca de 8,5 milhões de habitantes no estado.

3.2.2 Estimativa da geração de RSU

Para calcular os quantitativos de RSU que são produzidos nos municípios de Goiás, utilizou-se estudo de Colvero *et al.* (2017), que fez uma avaliação da geração *per capita* de RSU no estado, para seis diferentes faixas populacionais. Assim, o quantitativo de RSU gerado por cada pessoa está atrelado ao número de habitantes em cada município. Contudo, entendeu-se que se fazia necessária uma atualização da geração *per capita* de RSU, tendo em vista que o estudo supracitado é do ano de 2017. Para isso, utilizaram-se os dados dos relatórios da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, para o ano de 2018 (com dados de 2017) e da ABREMA, para o ano de 2024. Além disso, acrescentou-se uma sétima faixa populacional de geração *per capita* de RSU para Goiás, que é a faixa com municípios com população superior a 1 milhão de habitantes (conforme estudo de Ribeiro, 2017).

Deste modo os valores de geração *per capita* de RSU, para Goiás, nas sete categorias, variaram de 0,47 kg/hab./dia (municípios de até cinco mil habitantes até 1,02 kg/hab./dia (municípios com mais de um milhão de habitantes), conforme Tabela 3.

Tabela 3: Geração per capita de RSU para os municípios goianos, para sete faixas populacionais.

População (Habitantes)	Geração per capita RSU (kg/hab./dia)
Até 5.000	0,47
5.001 a 10.000	0,51
10.001 a 20.000	0,55
20.001 a 50.000	0,61
50.001 a 100.000	0,69
100.001 a 1.000.000	0,81
Superior a 1.000.000	1,02

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em estudos de ABRELPE (2018), ABREMA (2024), Colvero et al. (2017) e Ribeiro (2017).

3.3 MODELAGEM DAS ESTIMATIVAS DE BIOGÁS DOS RSU NOS ATERROS EM GOIÁS

A metodologia adotada para calcular o potencial de metano para os municípios da RMG e da RME, a partir de um aterro sanitário compartilhado com aproveitamento energético, é a ferramenta

Landfill Gas Emissions Model (LandGEM), versão 3.02, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2005). Este *software* se trata de um modelo matemático de decaimento de primeira ordem, empregado em avaliações técnico-científicas, que permite estimar a geração de CH_4 em função da massa de RSU dispostos no aterro e em função de um determinado número de anos. Esta ferramenta contabiliza os quantitativos e as variações dos gases que são gerados nos aterros sanitários, ou seja, contabiliza o metano e outros gases emitidos em um aterro sanitário (Felca *et al.*, 2019).

A fórmula de referência do *LandGEM* é expressa a seguir, na Equação 1:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} k.L_0.M_i.e^{-k.tij} \qquad (1)$$

Em que:

- Q_{CH_4}: geração anual de metano (m^3/ano);
- k: constante de geração de metano (ano^{-1});
- L_0: capacidade potencial de geração de CH_4 (m^3/Mg);
- M_i: massa de RSU depositada no ano i;
- tij: idade da porção j do resíduo depositado no ano i.

A taxa de geração de CH_4 adotada foi k = 0,05 ano^{-1}, valor padrão usado pelo modelo, conforme condições típicas de decomposição anaeróbia em aterros sanitários para climas tropicais (Aguilera; Zuffo, 2019; Felca *et al.*, 2019). O potencial de geração de metano foi definido como L_0 = 170 m^3/Mg, conforme parâmetro usado Aguilera e Zuffo (2019) e Felca *et al.* (2019), que são estudos feitos no Brasil baseando-se na composição gravimétrica média dos RSU do país.

Considerou-se ainda uma concentração de compostos orgânicos não metânicos (NMOC) de 4.000 ppmv (partes por milhão em volume) e um teor de metano de 50% em volume no biogás gerado, conforme Felca *et al.* (2019).

3.4 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO ADVINDO DO BIOGÁS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RSU

Para estimar a fração de metano gerado durante a DA dos RSU foi utilizada a Equação 2, fundamentada nas diretrizes do IPCC (2014). Essa equação também foi adotada por Mazzonetto *et al.*, (2023) em estudo que analisou o potencial energético do RSU paulista em diferentes rotas tecnológicas. O método é empregado em modelagens de emissões e no cálculo do potencial energético de biogás, permitindo estimar a quantidade teórica de metano a partir da decomposição da matéria orgânica dos RSU.

$$Q = Pop \cdot taxa\ RSU \cdot RSUf \cdot FCM \cdot COD \cdot CODF \cdot F \cdot \frac{16}{12} \cdot 365 \qquad (2)$$

Em que:

- Q: quantidade de metano gerado por ano (m^3/ano);
- Pop: população (habitantes);
- $taxa\ RSU$: taxa de geração de resíduos sólidos urbanos por habitante, por dia (kg/hab./dia);
- $RSUf$: fração de resíduos sólidos urbanos depositada em locais de disposição de resíduos sólidos (considerando 100% dos RSU indo para a DA);
- FCM: fator de correção de metano (%);
- COD: carbono orgânico degradável no resíduo sólido urbano (%);
- $CODF$: fração de COD que realmente degrada (%);
- F: fração de CH_4 no gás de aterro (%);
- $16/12$: taxa de conversão de carbono em metano.

3.5 ESTIMATIVA DO VOLUME DE BIOMETANO, POR SISTEMA DE GESTÃO DE RSU

Conhecendo-se os mais usuais sistemas de gestão de RSU que fazem a captação do biogás para a produção de biometano (aterro sanitário e DA) e as tecnologias mais difundidas para o *upgrading* do biometano produzido, foi possível estimar a pureza média do biometano e do volume de biometano purificado, considerando as condições específicas das RMG e da RME. Escolheu-se a lavagem com água pressurizada (*Pressurized Water Scrubbing – PWS*), que se destaca como a técnica com índices de pureza média de metano superior a 96%, refletindo em volumes mais elevados de biometano purificado. A RMG e a RME apresentam, portanto, potencial para aproveitamento energético do metano gerado a partir dos RSU, sendo o processo de purificação uma etapa determinante para a viabilidade do uso desse gás como biocombustível veicular ou para injeção em rede de gás natural.

A análise comparativa entre o diesel e o biometano evidencia que, apesar de ambos apresentarem valores próximos de PCI, há diferenças relevantes no desempenho energético e de conversão. Segundo Porto (2024), o PCI do diesel é de 35,5 MJ/L, enquanto o do biometano atinge 36,67 MJ/Nm³, demonstrando um potencial energético levemente superior do combustível renovável. No entanto, a eficiência de utilização (η) difere entre os dois, sendo de aproximadamente 40% para o diesel e 30% para o biometano, em função das características termodinâmicas e do tipo de motor empregado. Assim, ao adaptar as equações de equivalência energética, é possível ponderar que a substituição do diesel por biometano requer a consideração conjunta do poder calorífico e da eficiência de conversão, de modo a refletir a energia aproveitável em aplicações veiculares ou estacionárias. Esses parâmetros são fundamentais para o cálculo da equivalência energética e para a avaliação

técnico-econômica da substituição de combustíveis fósseis por biometano, permitindo maior precisão nas estimativas de desempenho e de economia de emissões (Porto, 2024).

Sendo assim, seguir a equivalência energética por meio de uma relação explícita entre poder calorífico e eficiência de utilização, foi essencial para quantificar corretamente o volume de biometano necessário para substituir determinada quantidade de diesel. A partir do estudo de Porto (2024), a equivalência volumétrica adaptada é expressa pela Equação 3:

$$V_{Diesel} = V_{Biometano} \cdot \frac{PCI_{Biometano} \cdot \eta_{Biometano}}{PCI_{Diesel} \cdot \eta_{Diesel}} \quad (3)$$

Em que:

- V_{Diesel}: Volume de diesel, em L;
- $V_{Biometano}$: Volume de biometano, em Nm^3;
- PCI_{Diesel}: Poder calorífico inferior do biometano, em MJ/L;
- $PCI_{Biometano}$: Poder calorífico inferior do biometano, em MJ/Nm^3;
- η_{Diesel}: Eficiência de uso do diesel em motor de ignição por compressão, em %;
- $\eta_{Biometano}$: Eficiência de uso do biometano em motor de ignição por centelha, em %.

3.6 ESTIMATIVA DO QUANTITATIVO DE ÔNIBUS A BIOMETANO QUE PODERIAM SER MANTIDOS OPERANDO COM O BIOMETANO PRODUZIDO EM ATERRO SANITÁRIO OU DIGESTÃO ANAERÓBIA, NAS REGIÕES RMG E RME, NO ESTADO DE GOIÁS

No contexto contemporâneo das cidades, o uso do biometano como combustível para o transporte coletivo consolida-se como uma alternativa estratégica para a descarbonização da mobilidade urbana. Destacam-se experiências internacionais como a de Portugal, que incorporou o biocombustível à sua frota movida a GNV e a Suécia, nação pioneira no uso de biometano no transporte público, obtido a partir do tratamento de efluentes sanitários e de resíduos orgânicos (GOIÁS, 2025c).

No cenário nacional, há iniciativas que demonstram a viabilidade técnica e regulatória dessa transição. A cidade de Curitiba/PR destaca-se pela condução de testes operacionais com veículos movidos 100% a biometano, validando métricas de eficiência energética em condições reais de rodagem. Concomitantemente, o município de São Paulo/SP avançou no arcabouço legal ao instituir, por meio do Decreto nº 64.519/2025, o "Programa BioSP". Este instrumento normativo determina a incorporação progressiva de ônibus a biometano nos contratos de concessão do transporte coletivo urbano, estabelecendo um mercado de demanda para esse biocombustível na maior metrópole do país (MAET UFG, 2024).

Assim, usando-se como referência os volumes de produção de biometano projetados para as regiões RMG e RME, procedeu-se à estimativa da capacidade de abastecimento da frota nestas duas

regiões. Para a definição dos parâmetros operacionais de consumo, adotou-se como veículo-padrão o modelo Scania K 280 IB, chassi amplamente validado em operações urbanas brasileiras, como no sistema de transporte de Curitiba (Lucio; Wolf; Mello, 2024). Trata-se de um veículo de propulsão dedicada a gás que opera sob o Ciclo Otto (ignição por centelha), tecnologia que confere ao biometano desempenho similar aos motores convencionais, porém com substancial redução de emissões e ruídos (MAET UFG, 2024).

É importante destacar a diferença entre gás GNV e biometano. Enquanto o GNV é um combustível fóssil, o biometano é produzido a partir de fontes renováveis, como os RSU. Entretanto, ambos têm a composição química composta aproximadamente por 100% de metano. Isso demonstra que, comparado ao GNV comum, o biometano emerge como uma alternativa mais sustentável e promissora quando confrontado ao diesel fóssil, habitualmente usado em veículos do serviço de transporte público (MAET UFG, 2024).

De acordo com o relatório técnico de teste do ônibus K 280 (LUCIO; WOLF; MELLO, 2024), em operação no transporte público de Curitiba, o veículo rodou 10.159 km e consumiu 7.283,54 m³ de GNV, ou seja, um consumo médio de 0,716 m³/km (ou 1,40 km/m³) (MAET UFG, 2024). Vale destacar ainda que, segundo estudo da Rede Municipal de Transporte Coletivo (RMTC) de Goiânia, cada ônibus percorre, em média, 55 mil km por ano (GOIÂNIA, 2024). Sendo assim, considerando-se o consumo médio de combustível de cada ônibus e o quanto percorreu por ano, obteve-se um consumo anual médio de cada ônibus de 39.380 m^3/ano.

Para calcular quantidade de veículos que a produção de biometano nas regiões RMG e RME sustenta, utilizou-se a seguinte Equação 4:

$$N_{ônibus} = \frac{V_{bio}}{C_{km} \times Km_{ano}} \qquad (4)$$

Em que:

- $N_{ônibus}$: Quantitativo de veículos;
- V_{bio}: Volume de biometano produzido em cada região (m³/ano);
- C_{km}: Consumo médio do ônibus Scania K 280 (m³/km). Considerou-se o consumo médio de 0,716 m³/km (MAET UFG, 2024);
- Km_{ano}: Quilometragem média anual de um ônibus urbano, aproximadamente 55.000 km/ano (GOIÂNIA, 2024).

3.7 DETERMINAÇÃO DE CENÁRIOS E FLUXO DE CAIXA DA ANÁLISE ECONÔMICA

Para realizar um estudo da viabilidade econômica dos custos de investimento (CAPEX) e custos de operação (OPEX) de sistemas de captação de biogás dos RSU para a produção de biometano na RMG e na RME, primeiramente foram definidos cenários.

Na Tabela 4 estão apresentados os três cenários criados para comparar as diferentes tecnologias de gestão de RSU. Sendo que o foco do presente estudo foi a fração orgânica dos RSU, usada para a aproveitamento do biogás, cujo potencial de efeito estufa é 27 vezes superior ao dióxido de carbono (Smith *et al*., 2021).

Tabela 4: Cenários criados para a realização da análise econômica.

Cenários	Tecnologias	Descrição
Cenário C0	Aterro sanitário licenciado	Cenário de controle em que 100% do RSU é enviado para aterro. O biogás gerado é recuperado e convertido em biometano veicular.
Cenário D18	Digestão anaeróbia + Aterro sanitário licenciado	Cenário baseado no PLANARES, atualmente em vigor (MMA, 2020), em que 18,1% de resíduos orgânicos são coletados separadamente na fonte e enviados para a digestão anaeróbia. O restante é enviado para um aterro sanitário.
Cenário D60		Cenário baseado na proposta do PLANARES que não chegou a entrar em vigor (MMA, 2012). Considerou-se a meta intermediária de desvio de 50% de resíduos orgânicos do aterro entre 2027-2030 e de 60% a partir de 2031. Estes resíduos são provenientes da coleta seletiva enviados para a digestão anaeróbia, enquanto os restantes (indiferenciados + rejeitos) são enviados para um aterro sanitário licenciado centralizado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o Cenário C0, em que não há desvios do aterro, analisou-se o desempenho econômico e ambiental do aterro sanitário com recuperação de biogás. Apesar deste cenário descumprir as exigências da regulamentação brasileira de desvios de aterro sanitário, ainda seria melhor do que o *status quo* da gestão de RSU em Goiás. Isto porque, atualmente, 74% dos municípios goianos enviam seus RSU para lixões ou aterros controlados, ou seja, toneladas de RSU depositados de forma imprópria, sem cumprir com as especificações técnicas e legais de um sistema de disposição final.

Em relação ao Cenário D18, este cumpre os mínimos exigidos pelas metas de desvios de orgânicos do aterro, estipulados pelo PLANARES em vigor (MMA, 2020). Já o Cenário D60 é considerado próximo ao ideal, baseado na primeira proposta do PLANARES (MMA, 2012), em que a coleta seletiva de orgânicos teria de ser muito mais abrangente, pois é necessário desviar do aterro 60% de resíduos orgânicos para a DA.

3.7.1 Fluxo de Caixa

Assim como no estudo de Caibre (2013), os cálculos da análise econômica dos cenários propostas para sistemas de gestão de RSU que fazem aproveitamento do biogás, foram feitos em uma planilha em Excel. Com base CAPEX, OPEX e nas receitas obtidas com a venda de biometano, calculou-se o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo necessário para

recuperar o investimento (*payback*). Salienta-se que se considerou uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 15%.

3.8 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO BIOGÁS

Para ampliar a discussão e dar mais recursos aos tomadores de decisão, decidiu-se por fazer uma avaliação do ciclo de vida (ACV), complementando assim o presente estudo com uma análise ambiental.

Nesta seção foi abordada a vertente ambiental da produção e uso de biometano a partir da fração orgânica de RSU. Foram calculados os impactos ambientais para diferentes cenários, que serão os mesmos da análise econômica (C0, D18 e D60). Para tal, foi utilizada a metodologia de ACV, que é uma forma estabelecida para a determinação dos impactos ambientais de produtos e serviços. Além disso, essa metodologia foi apoiada pela ferramenta de *software Easetech* 2019, versão 3.4.0, da Universidade Técnica da Dinamarca – DTU (Clavreul *et al.*, 2014).

3.8.1 Definição do escopo e objetivo

Os três cenários permitiram comparar os benefícios ambientais da DA, que é uma tecnologia em que se pode aproveitar do biogás, com uma solução em que o biogás de aterro é aproveitado. Além disso, esta ACV possibilitou identificar a necessidade de se mudar rapidamente a situação atual da gestão de RSU em Goiás.

Em relação ao escopo, a RMG e a RME foram avaliadas de forma combinada. A análise contemplou todo o sistema de gestão de RSU (chamada de avaliação "*do berço ao túmulo"*). Isso significa que foi avaliada desde a geração dos resíduos dessas duas regiões (o *berço*) até à e produção de biometano através do biogás de aterro ou do biogás da digestão anaeróbia (o *túmulo*).

Estabeleceu-se a Unidade Funcional (UF), que é a unidade padrão usada para facilitar os resultados dos diferentes cenários propostos para esta ACV. Assim, optou-se pela UF de 1 (uma) tonelada de RSU, que independe do quantitativo total gerado e que permite comparar os resultados com os de outros estudos que usem usaram) a mesma UF.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 QUANTITATIVOS DE RSU GERADOS EM GOIÁS, POR REGIÃO METROPOLITANA

Com os quantitativos populacionais para cada município goiano (conforme IBGE (2024)), com as gerações *per capita* para cada município goiano (a partir do porte populacional e conforme ABRELPE (2018), ABREMA (2024), Colvero *et al.* (2017) e Ribeiro (2017)), além da fração de matéria orgânica presente nos RSU de Goiás (55,9%), calculou-se a geração de RSU para os municípios da RMG e da RME (Tabela 5).

Tabela 5: População, densidade populacional, geração per capita de RSU, para as regiões Metropolitanas de Goiânia (RMG) e do Entorno do Distrito Federal (RME), em Goiás, em 2022.

Região Metropolitana	População (habitantes)	Densidade demográfica (hab/km^2)	Geração per capita média RSU (kg/hab./dia)	Total de RSU (t/dia)	Total de Matéria Orgânica (t/dia)
RMG	2.600.936	347,69	0,90	2.341,7	1.309,0
RME	1.244.633	49,42	0,78	969,0	541,7

Legenda: RMG: Região Metropolitana de Goiânia; RME: Região Metropolitana do Entorno do Distrito Federal

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ABRELPE (2018), ABREMA (2024), Colvero et al. (2017), Colvero, Pfeiffer e Carvalho (2016), IBGE (2024) e Ribeiro (2017).

A RMG, que possui 21 municípios, concentra 37% da população goiana. Cenário que se reflete na densidade demográfica da região, que é de 347,7 habitantes/km^2, um valor 1.576% superior a densidade populacional média de Goiás, que é de 20,7 habitantes/km^2. A geração *per capita* média de RSU na RMG é de 0,90 kg/hab./dia, também superior à *per capita* média de RSU do estado, que é de 0,76 kg/hab./dia. Vale destacar que somente os municípios dessa região produzem, diariamente, mais de 2,3 mil t/dia de RSU (o equivalente a 43,6% dos RSU de Goiás). Já a RME, com 11 municípios, tem quase 15% da população goiana. A RME tem uma densidade populacional e uma geração *per capita* de RSU superiores à média do estado, com 49,4 habitantes/km^2 e 0,78 kg/hab./dia. Além disso, essa região produz 969 t/dia de RSU (18% dos RSU de Goiás).

4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO ADVINDO DO BIOGÁS DE ATERRO DE RSU EM GOIÁS

A estimativa do potencial de geração de biogás e metano a partir de RSU depositados em aterro sanitário requer a aplicação de modelos matemáticos que considerem a massa de resíduos, suas características físico-químicas e as condições climáticas locais (Browne; Allen; Murphy, 2021). Conforme mencionado anteriormente, no presente estudo, os dados foram obtidos diretamente por meio da aplicação do modelo *LandGEM* (USEPA, 2005), utilizando parâmetros ajustados à realidade dos aterros da RMG e da RME.

Na Tabela 6 são apresentados os volumes anuais estimados de metano e biogás total para os 21 municípios da RMG e para os 11 municípios da RME, no horizonte temporal de 2026 a 2046. Essas estimativas permitem identificar o potencial para conversão do biogás em biometano, assim como fundamentam as projeções energéticas coerentes com estudos recentes (Chandra; Ganguly, 2023; IEA, 2023).

A estimativa da soma total anual de metano a ser gerado na RMG é de aproximadamente 1,140x10^9 m³, enquanto que na RME é de 4,754x10^8 m³, o que representa um potencial energético expressivo, principalmente quando associado à purificação do CH_4 em biometano.

Tabela 6: Estimativas de metano e de biogás de aterro gerados pelos municípios das Regiões Metropolitanas de Goiânia (RMG) e do Entorno do Distrito Federal (RME), de 2026 a 2046.

Região Metropolitana	Biogás de aterro (m³)	Metano (m³)
RMG	2,280E+09	1,140E+09
RME	9,508E+08	4,754E+08

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO ADVINDO DO BIOGÁS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RSU

A estimativa do potencial de geração de biogás e metano a partir de RSU enviados à DA foi feita a partir da Equação 2. Obteve-se um valor médio de COD dos RSU goianos igual a 0,1446, resultado coerente com a faixa reportada por Mazzonetto *et al.,* (2023) para os RSU paulistas. O valor de fração de COD que realmente degrada (CODF) foi fixado em 0,5, já a fração de metano no biogás (F) também foi adotada como 0,5, conforme recomendação do IPCC (2006) para resíduos com alta proporção de matéria orgânica úmida. O fator de correção do metano (FCM) foi considerado igual a 1, pressupondo-se condições de degradação adequadas em aterros sanitários e biodigestores.

No entanto, a taxa de geração *per capita* de RSU diferiu entre as duas regiões analisadas, refletindo suas características socioeconômicas e populacionais. Para a RMG foi considerado o valor médio de 0,90 (kg/hab./dia) enquanto para a RME adotou-se o 0,78 (kg/hab./dia). Essa diferença indica que os habitantes da RMG geram, individualmente, cerca de 15,4% mais RSU do que os moradores da RME. Assim, a aplicação combinada desses parâmetros no modelo IPCC permite estimar o volume de metano gerado, por meio da digestão anaeróbia dos RSU, nos municípios goianos da RMG e RME.

Após a determinação da massa diária de metano gerada, fez-se a conversão para o volume de metano, conforme as condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Para essa conversão, considerou-se que 1 kg de CH_4 equivale a 1,52 m³ de CH_4 (IPCC, 2014). Assim, o volume total de metano produzido na RMG e na RME está apresentado na Tabela 7. Enquanto na RMG as estimativas apontam para uma produção de 1,509 x 10^9 m^3 de CH_4 (entre 2026 e 2046), na RME há um potencial de produção de 6,257 x 10^8 m^3/ano de CH_4 (também entre 2026 e 2046). Vale destacar que este potencial de metano disponível, tanto para a RMG quanto para a RME, representa um cenário utópico de 100% dos RSU (fração orgânica) sendo encaminhado para a DA.

Tabela 7: Estimativas de metano gerados via digestão anaeróbia pelos municípios das Regiões Metropolitanas de Goiânia (RMG) e do Entorno do Distrito Federal, de 2026 a 2046.

Ano	População (habitantes)	Q (kg /dia)	Q (m³/ano)
RMG	62.412.003	2.707.470	1,509E+09
RME	29.866.186	1.122.865	6,257E+08

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 ESTIMATIVA DO VOLUME DE BIOMETANO E A EQUIVALÊNCIA VOLUMÉTRICA COM O DIESEL FÓSSIL

A partir da definição dos parâmetros de eficiência e dos PCIs, foi possível estimar a equivalência volumétrica entre o biometano e o diesel fóssil. Sendo que as diferenças observadas entre os combustíveis, apresentadas na Tabela 8, decorrem da densidade energética e da eficiência de conversão do sistema motriz. O biometano, apesar de seu elevado poder calorífico unitário, demanda maior volume para gerar o mesmo trabalho útil. Tal análise está em conformidade com o método proposto por Porto (2024), reafirmando a importância de se considerar o poder calorífico e o rendimento do motor na avaliação da substituição de combustíveis fósseis por alternativas renováveis.

Outro ponto relevante é o fator energético, que permitiu calcular as correlações entre os volumes de diesel e de biometano, apresentadas na Tabela 8, e que tem a seguinte equivalência: 1 Nm^3 biometano corresponde a 0,77 litros de diesel. Este valor é próximo ao fator energético apontado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás (2022), que define: com 1 Nm^3 biometano se obtém 0,87 litros de diesel.

Tabela 8: Estimativa de pureza média e volume de biometano purificado a partir do metano de aterro sanitário e da DA, para a RMG e para a RME.

Região Metropolitana	Pureza média de CH_4	Volume de biometano purificado – aterro (Nm^3)	Volume de biometano purificado – DA (Nm^3)	(Aterro) Volume de diesel, em L	(DA) Volume de diesel, em L
RMG	0,961	1,096E+09	1,450E+09	8,489E+08	1,123E+09
RME	0,961	4,568E+08	6,013E+08	3,539E+08	4,659E+08

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das modelagens realizadas com o *software LandGEM*, de 2027 a 2046, obteve-se uma média de 111 m^3 de biogás/tonelada de RSU, para um cenário com aterro sanitário. Este valor está alinhado com CiBiogás (2022), que aponta um volume entre 85 e 150 m^3 de biogás/tonelada de RSU no aterro sanitário. Já para a DA este volume foi de 132 m^3 de biogás/tonelada de matéria orgânica, volume que dentro do parâmetro estabelecido pelo estudo de EPE (2008), que aponta uma correlação de 120 a 150 m^3/tonelada de fração orgânica. Fazendo-se outra correlação para a DA, o valor obtido no presente estudo é de cerca de 74 m^3 de biogás/tonelada de RSU, o que equivale a um volume de 60 a 75 m^3/tonelada de RSU, o que também está de acordo com EPE (2008).

4.5 ESTIMATIVA DO QUANTITATIVO DE ÔNIBUS QUE PODE SER ABASTECIDO ANUALMENTE COM BIOMETANO NAS REGIÕES METROPOLITANAS DE GOIÂNIA E DO ENTORNO DO DISTRITO FEDERAL

Os dados de biometano produzido e que estão apresentados na Tabela 9 foram utilizados para calcular a média de biometano produzida em 20 anos de operação de um aterro sanitário. Para a RMG

o resultado foi de $5{,}93 \times 10^7\ m^3$ de biometano a cada ano. Para a RME o resultado foi de $2{,}47 \times 10^7\ m^3$ de biometano a cada ano. Enquanto que a produção de biometano a partir da DA, para a RMG, teve um resultado de $7{,}18 \times 10^7\ m^3$ de biometano por ano. Enquanto para a RME o resultado foi de $2{,}98 \times 10^7\ m^3$ de biometano por ano. Os resultados também estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Quantidade de ônibus movidos pelo biometano produzido na RMG e RME no período de um ano.

Volume de biometano aterro na RMG (m³/ano)	Volume de biometano aterro na RME (m³/ano)	N.º de ônibus abastecidos na RMG	N.º de ônibus abastecidos na RME
5,93E+07	2,47E+07	1.506	628
Volume de biometano DA na RMG (m3/ano)	Volume de biometano DA na RME (m3/ano)	N.º de ônibus abastecidos na RMG	N.º de ônibus abastecidos na RME
7,18E+07	2,98E+07	1.824	757

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com base no potencial produtivo estimado, projeta-se que o volume de biometano gerado em aterro na RMG seria suficiente para suprir a demanda energética de aproximadamente 1.506 ônibus (modelo referencial Scania K 280, conforme Lucio, Wolf e Mello (2024)). Analogamente, na RME, a produção estimada em aterro viabilizaria o abastecimento de 628 veículos. Isso representaria um total de 2.134 veículos rodando com biometano advindo de aterro sanitário na RMG e na RME.

Já as produções médias anuais de biometano na DA, para a RMG e para a RME seriam suficientes para abastecer, anualmente 1.824 ônibus na RMG e 757 ônibus na RME (também considerando um ônibus modelo referencial Scania K 280 (Lucio; Wolf; Mello, 2024)). Isso significaria um total de 2.581 veículos rodando com biometano advindo de DA na RMG e na RME. A partir destes dados, foi possível mensurar a taxa de substituição da frota convencional.

4.5.1 Comparação do volume de diesel que é consumido pelos ônibus do transporte urbano nas regiões RMG e RME do estado de Goiás

Na RMG, o Sistema Integrado de Transportes da Rede Metropolitana de Transportes Coletivos (SIT-RMTC) tem uma frota de 1.321 ônibus, em 293 linhas.

No que tange à RME, diante da ausência de dados consolidados sobre a frota total, adotou-se como parâmetro a infraestrutura operacional, que contabiliza 376 linhas ativas. Aplicando-se a mesma razão operacional (veículos por linha) observada na RMG como premissa de cálculo, estima-se que a RME disponha de uma frota circulante de cerca de 1.700 ônibus para a cobertura dos itinerários regionais (CMTC, 2025; GOIÁS, 2025c).

A integração das frotas da RMG e da RME totaliza aproximadamente 3.021 veículos, cuja propulsão é baseada no ciclo diesel. Conforme parâmetros operacionais de referência (MAET UFG, 2024), o consumo médio de diesel de um ônibus urbano convencional é estimado em 43,5 litros a cada 100 km (ou 0,435 litros/km). Considerando uma rodagem média anual de 55 mil km por veículo

(GOIÂNIA, 2024), estima-se que a demanda individual de combustível fóssil seja de 23.925 litros de diesel/ano.

Ao projetar esse cenário sobre o potencial produtivo calculado, os 2.134 ônibus passíveis de conversão para o biometano (advindo de aterro sanitário de RSU) evitariam o consumo de cerca de 51 milhões de litros de diesel anuais. A produção de biometano a partir dos RSU de aterro, na RMG e na RME, seria suficiente para suprir a demanda energética de pouco mais de 70% da frota regional total (RMG e RME). Já os 2.581 ônibus passíveis de conversão para o biometano (advindo da DA) evitariam o consumo de cerca de 61,8 milhões de litros de diesel anuais. Essa frota de ônibus sendo abastecida com biometano da DA supriria uma demanda de 85,4% da frota regional total.

A partir da Equação 5 (ISCC, 2025) foi possível calcular a redução das emissões atmosféricas ao se realizar a substituição do diesel pelo biometano advindo dos RSU.

$$\Delta_{GEE} = E_{req}\, x\, (EF_{diesel} - EF_{biometano}) \qquad (5)$$

Em que:

Δ_{GEE} = redução de emissões (g CO_2e/ano) ao substituir o diesel fóssil pelo biometano de RSU;

E_{req} = demanda de energia do serviço usado, em MJ/ano (energia que antes era suprida por diesel). Segundo estudo Porto (2024), o PCI do diesel é de 35,5 MJ/L. Além disso, será considerado que cada veículo consome 23.925 litros de diesel/ano;

EF_{diesel} = fator de emissão do diesel (**gCO_2e/MJ). Para o presente estudo, conforme Cieplinski *et al.* (2024), considerou-se o valor de 82,23 gCO_2e/MJ** (valor considerando cadeia completa);

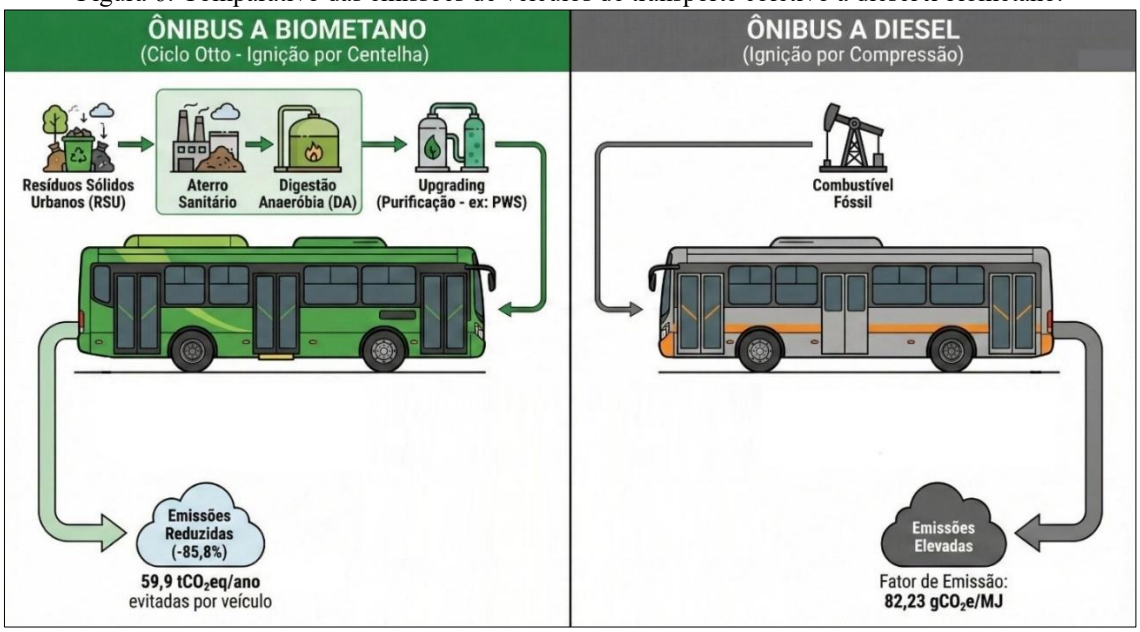
$EF_{biometano}$ = fator de emissão efetivo do biometano **(gCO_2e/MJ). Para o presente estudo, conforme Cieplinski *et al.* (2024), considerou-se o valor de 11,68 gCO_2e/MJ (valor considerando toda a cadeia do biometano – produção, upgrading, distribuição, vazamentos fugitivos – menos os créditos por metano evitado no aterro, quando o biometano passa a ser capturado e convertido em biocombustível.**

Assim:

$$\Delta_{GEE} = 59.920.760{,}6\ \frac{gCO_2e}{\text{ano}} = 59{,}9\ \frac{tCO_2e}{ano} \qquad (6)$$

Em suma, o resultado significa que a cada caminhão que deixa de rodar a diesel fóssil e passa a rodar usando biometano, são evitadas cerca de 59,9 tCO_2eq/ano. Destaca-se ainda que, considerando que o EF_{diesel} é de 82,23 **gCO_2e/MJ e o** $EF_{biometano}$ é de **11,68 gCO_2e/MJ, a substituição de um combustível fóssil por um biocombustível implica em uma redução de 85,8% nas emissões atmosféricas (Figura 6).**

Figura 6: Comparativo das emissões de veículos de transporte coletivo a diesel x biometano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 RESULTADOS DOS CENÁRIOS MODELADOS PARA A ANÁLISE ECONÔMICA DO BIOGÁS

Os principais resultados dos três cenários modelados estão apresentados a seguir:

4.6.1 Cenário C0 (Aterro Sanitário):

O Cenário C0, caracterizado pelo envio integral dos RSU para aterro com recuperação de biogás, apresentou o menor CAPEX inicial tanto em RMG quanto em RME. Contudo, a dependência exclusiva da venda de biometano de aterro limita o potencial de receita se comparado aos cenários com triagem de recicláveis. Além disso, é um cenário hipotético que serve como termo de comparação face aos outros dois cenários em que as metas do PLANARES são cumpridas.

Mesmo sem os custos CAPEX e OPEX, para que a meta de TIR de 15% seja atingida, cerca de 60% das receitas são da taxa de serviço. Ou seja, a venda de biometano de aterro não é suficiente para manter a sustentabilidade econômica desse cenário.

4.6.2 Cenários D18 e D60 (Digestão Anaeróbia):

- Cenário D18: O cenário D18 representa o primeiro passo em direção ao cumprimento das metas estipuladas pelo PLANARES. Ao desviar 18,1% dos orgânicos para DA, houve um aumento no CAPEX e OPEX, em comparação ao Cenário C0, de 34% a 39% do CAPEX e de 46% a 64% do OPEX (no ano de 2030, para a RMG e para a RME, respectivamente – Tabela 10). No entanto, apesar dos custos maiores, a DA proporciona uma produção de biogás mais acelerada e controlada, e permite receitas adicionais com a venda de recicláveis, demonstrando que o

ganho em eficiência energética e venda de materiais pode compensar os custos operacionais elevados.

- Cenário D60: O cenário D60 cumpre as metas do PLANARES a longo prazo. A meta de desvio de 60% exigiu uma reestruturação logística profunda, restando ao aterro majoritariamente os rejeitos não recuperáveis. Embora maximize a recuperação ambiental e a vida útil do aterro, os custos logísticos de transporte e triagem são expressivamente maiores pois é necessário garantir que 60% da matéria orgânica cheguem à DA com baixo nível de contaminantes. Em relação a RMG, o CAPEX do D60 aumenta 119% e 57%, comparados aos Cenários C0 e D18, respectivamente. Para a RME esses valores foram de 89% e 40%, respectivamente. Sobre o OPEX, houve um aumento na RMG de 180% e 88%, respectivamente. Para a RME, os aumentos foram de 204% e 90% comparados com os Cenários C0 e D18, respectivamente (Tabela 10). Em suma, o Cenário D60 é o mais complexo e o mais caro entre os três cenários modelados, mas é o que gera a maior receita comparado aos Cenários C0 e D18.

Um resultado comum a todos os cenários foi a necessidade de implementação de uma taxa de serviço a ser cobrada do cidadão para garantir o equilíbrio econômico-financeiro. Observou-se que, sem a cobrança dessa taxa, as receitas advindas da venda de biometano e recicláveis não seriam suficientes para cobrir o OPEX e remunerar o capital investido, especialmente na RME, que possui menor escala. Para viabilizar o Cenário D18 na RMG, por exemplo, seria necessária uma taxa média de R$ 51,65 por habitante/ano, evidenciando que a sustentabilidade econômica do saneamento depende de um modelo híbrido de receitas (taxa de serviço + venda de biometano + recicláveis).

Tabela 10: Resultados financeiros dos Cenários C0, D18 e D60.

	Ano i	2026 0	2030 4	2031 5	2036 10	2040 14	2041 15	2046 20
		Milhões R$						
Cenário C0 – RMG	CAPEX	301,49	-	-	87,25	-	-	-
	OPEX	-	187,75	189,3	196,33	200,73	201,68	205,49
	Receitas totais	-	172,99	189,44	262,7	311,5	322,49	370,99
Cenário C0 – RME	CAPEX	151,1	-	-	36,53	-	-	-
	OPEX	-	88,84	89,57	92,79	94,86	95,31	97,1
	Receitas totais	-	85,24	92,24	123,34	144,07	148,74	169,3
Cenário D18 – RMG	CAPEX	420,54	-	-	80,29	-	-	-
	OPEX	-	273,25	275,42	285,19	291,34	292,67	298
	Receitas totais	-	280,29	294,86	359,7	402,76	412,43	454,82
Cenário D18 – RME	CAPEX	202,96	-	-	33,61	-	-	-
	OPEX	-	146,41	142,21	147,24	150,46	151,16	148,6
	Receitas totais	-	150,86	153,72	181,94	200,68	204,88	219,74
Cenário D60 – RMG	CAPEX	661,41	-	-	69,16	-	-	-
	OPEX	-	514,78	535,18	552,86	564,15	566,57	576,33
	Receitas totais	-	554,67	593,38	644,01	677,3	684,69	716,35
Cenário D60 – RME	CAPEX	286,04	-	-	28,95	-	-	-
	OPEX	-	275,07	273,37	282,78	288,8	290,1	281,38
	Receitas totais	-	291,92	301,45	324,67	339,91	343,28	347,66

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.6.3 Análise de Sensibilidade

Uma análise importante é o impacto financeiro em se aumentar o imposto de renda (IR) de 15% para 25%, revelando situações opostas para cada tecnologia adotada, que possuem diferentes respectivas da estrutura de financiamento.

Como as receitas nos cenários modelados são mais baixas que os custos de CAPEX e de OPEX, o foco foi obter uma TIR de 15% e um VPL líquido nulo. Isso só é possível com a taxa de serviço prevista ao cidadão (Tabela 11).

Tabela 11: Efeito do aumento do Imposto de Renda de 15% para 25% na Taxa Interna de Retorno (em %), no payback (em anos) do investimento e no Valor Presente Líquido (em Milhões de Reais).

Cenários	RMG	RME
	Imposto de Renda a 15%►25%	Imposto de Renda a 15%►25%
C0 (base) Sem desvios	TIR: 15% VPL: 0 Payback: 15,1 anos►15,0 anos	TIR:15% VPL: 0 Payback: 14,9 anos►14,8 anos
D18 (digestão anaeróbia) Desvios 18,1% orgân. 25% recicláveis	TIR: 15% VPL: 0 Payback: 14,5 anos►14,4 anos	TIR:15% VPL: 0 Payback: 14,4 anos►14,2 anos
D60 (digestão anaeróbia) Desvios 50/60% org. 60/65% recicláveis	TIR: 15% VPL: 0 Payback: 13,4 anos►13,3 anos	TIR: 15% VPL: 0 Payback: 13,4 anos►13,2 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação às taxas de serviço, para uma TIR de 15% na RMG, por exemplo, ao se elevar o IR de 15% para 25%, para o Cenário C0 há um acréscimo médio de 4,2% na taxa de serviço. No Cenário D18 este aumento é de 4,1%, enquanto que no Cenário D60 esta taxa aumenta, em média, cerca de 2,7% (Tabela 12).

Tabela 12: Taxa de serviço cobrada aos cidadãos da Região Metropolitana de Goiânia, antes e depois do aumento em 10% do Imposto de Renda. Valores em Reais (R$) por habitante por ano e por domicílio por mês (1 domicílio = 2,75 habitantes), corrigidos monetariamente.

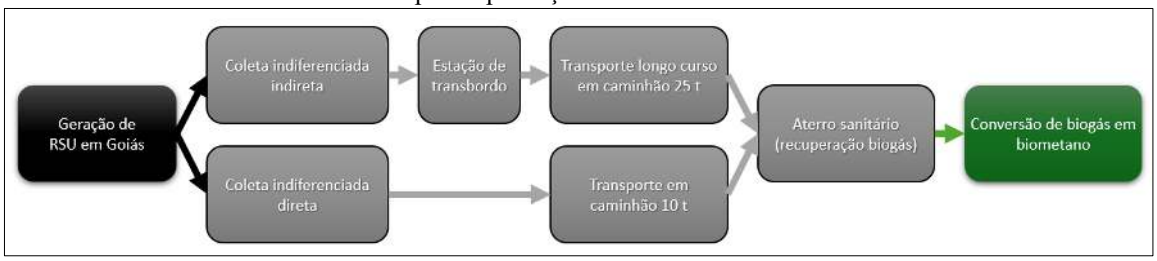
RMG: Imposto de Renda a 15%►25%						
	Cenário C0		Cenário D18		Cenário D60	
Ano	R$/hab./ano	R$/dom./mês	R$/hab./ano	R$/dom./mês	R$/hab./ano	R$/dom./mês
1	36,38►37,91	9,81►10,22	51,73►53,86	13,95►14,52	115,19►118,28	31,06►31,89
10	36,38►37,91	9,81►10,22	51,62►53,75	13,92►14,49	118,27►121,45	31,89►32,74
20	36,40►37,93	9,81►10,23	51,57►53,69	13,90►14,48	117,87►121,04	31,78►32,63

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 RESULTADOS AMBIENTAIS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO BIOMETANO DOS RSU EM GOIÁS

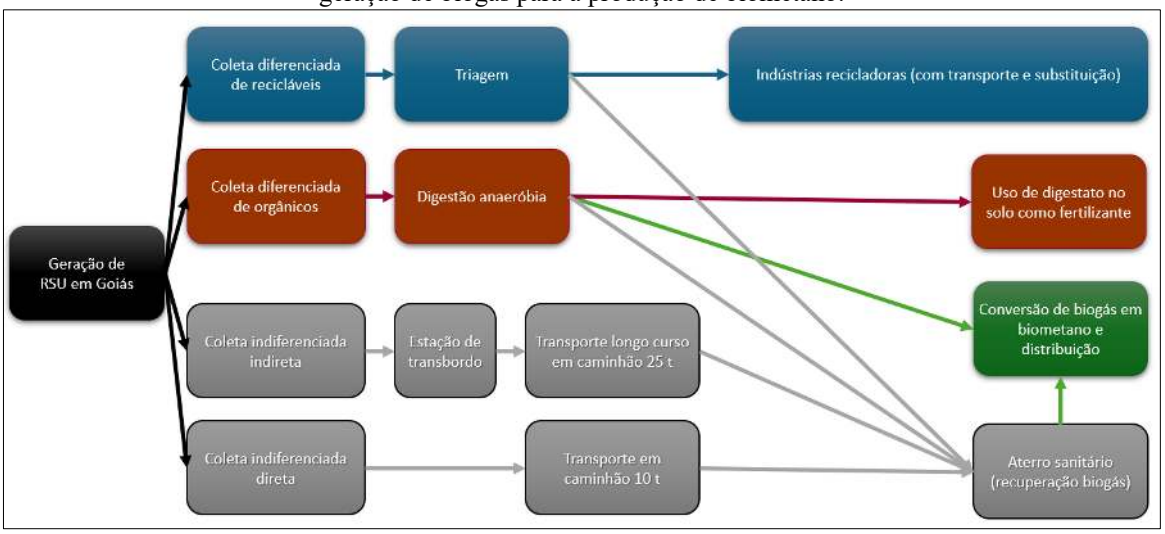
Os Cenários C0, D18 e D60, modelados no *software* de ACV *Easetech*, estão apresentados nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7: Modelagem do Cenário C0, que conta com aterro sanitário como principal tecnologia para a geração de biogás para a produção de biometano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8: Modelagem dos Cenários D18 e D60, que contam com digestão anaeróbia como principal tecnologia para a geração de biogás para a produção de biometano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.1 Interpretação e resultados da ACV

Segundo Reichert e Mendes (2014), os resultados positivos da ACV indicam os impactos ambientais globais. Já os resultados negativos são as economias ambientais líquidas. Os resultados das 12 categorias de impacto são apresentados na Figura 9.

Em relação à categoria das alterações climáticas (Figura 9a – *Climate change*), que é afetada por GEE, fica evidente que o maior responsável pelos impactos é o aterro sanitário. Por um lado, isto mostra a necessidade urgente de cessar a disposição imprópria de RSU em Goiás, pois a liberação de GEE para a atmosfera é total nos lixões, já que não há medida de contenção do biogás. Contudo, os aterros sanitários ainda liberam GEE. Assim, torna-se imperativo o desvio de resíduos orgânicos do aterro para tecnologias de tratamento, como a DA, que isola o resíduo por completo da atmosfera.

Já no Cenário D60, que foi modelado com 60% de desvio de orgânicos, o impacto da DA é 30% do impacto ambiental do aterro, e é praticamente todo anulado pelos benefícios ambientais da purificação do biogás, com sua consequente substituição de combustíveis fósseis por biometano. Outro fator prevalente no desempenho ambiental favorável dos cenários D18 e D60 é a reciclagem, pois retira parte do impacto ambiental do aterro, e ainda proporciona poupanças ambientais decorrentes da substituição de matérias-primas virgens por materiais reciclados. Além disso, a logística é o que menos afeta o sistema na questão ambiental, de modo que o aumento na coleta seletiva acaba por ter um impacto irrisório nos Cenários com DA (D18 e D60).

No que diz respeito à acidificação terrestre (Figura 9b – *Terrestrial acidification*), os resultados são precisamente ao contrário do que aconteceu na categoria de impacto anterior. É a DA que afeta esta categoria através da formação de dióxido de enxofre para a atmosfera durante o estágio de acidogênese que, combinado com a água das chuvas, gera ácido sulfúrico. Isto provoca o fenômeno conhecido como “chuvas ácidas”, que irá causar a acidificação dos solos. Além disso, a precipitação também contribui para a lixiviação de componentes alcalinos, como cálcio e magnésio, que contrabalanceiam a acidez do solo para camadas inferiores e lençóis freáticos. Consequentemente, a acidificação do solo piora a produtividade, pois limita a ação de micro-organismos do solo que tem a função de decompor a matéria orgânica.

Quanto à eutrofização da água doce (Figura 9c – *Freshwater eutrophication*), nos cenários com DA ocorrem as maiores poupanças ambientais. O uso do digestato nos solos substitui os fertilizantes químicos que contém fósforo, nutriente que favorece a proliferação de algas. Assim, são reduzidos problemas relacionados com a eutrofização pelas algas, que consomem o oxigênio da água, asfixiam os peixes e tornam as águas turvas.

A quarta e a quinta categorias de impacto (Figura 9d – *Photochemical oxidant formation: ecosystem quality* e Figura 9e – *Photochemical oxidant formation: human health*) são referentes à formação fotoquímica de oxidantes, que afetam tanto a qualidade dos ecossistemas como à saúde

humana. Os oxidantes são os “radicais livres”, átomos ou moléculas instáveis que facilmente reagem por possuírem um elétron livre na camada externa. Por esta razão, danificam lipídios e proteínas (incluindo o DNA), causando envelhecimento dos seres vivos, podendo ser combatidos por antioxidantes que atrasam o seu efeito nocivo. No caso do objeto de estudo, a logística é a maior causadora de impactos, seguida da DA, devido às emissões de NOx. A reciclagem e o uso do biometano acabam por compensar esses impactos, pois evitam a emissão de NOx, além de compostos orgânicos voláteis. Desta forma, para esta categoria de impacto, o Cenário C0 é o pior de todos, não por poluírem mais, mas por se deixar de reciclar.

Na categoria de impacto referente à escassez de recursos minerais (Figura 9f – *Mineral Resource Scarcity*), é evidente que os cenários com reciclagem proporcionam poupanças ambientais ao reutilizar recursos naturais que deixam de ser extraídos do ambiente. Já na questão dos aterros sanitários, o consumo de recursos naturais está associado à extração de argila usada na construção do aterro e não propriamente no fato de emissões decorrentes da operação do aterro. Ainda assim, os valores desta categoria de impacto são muito pequenos comparados com as restantes.

Já no que diz respeito à depleção da camada de ozônio (Figura 9g – *Ozone Depletion*), ao contrário de outras situações em que o aterro teve os piores resultados, foi no Cenário D60, com mais resíduo orgânico a ser tratado por DA, que os impactos ambientais foram mais elevados. Isto se deve, essencialmente, ao processo de pós-compostagem do digestato e não à digestão anaeróbia propriamente dita. Sendo que a principal substância responsável pelos impactos é o N_2O (óxido nitroso), que tem um potencial de efeito de estufa e também deteriora a camada de ozônio.

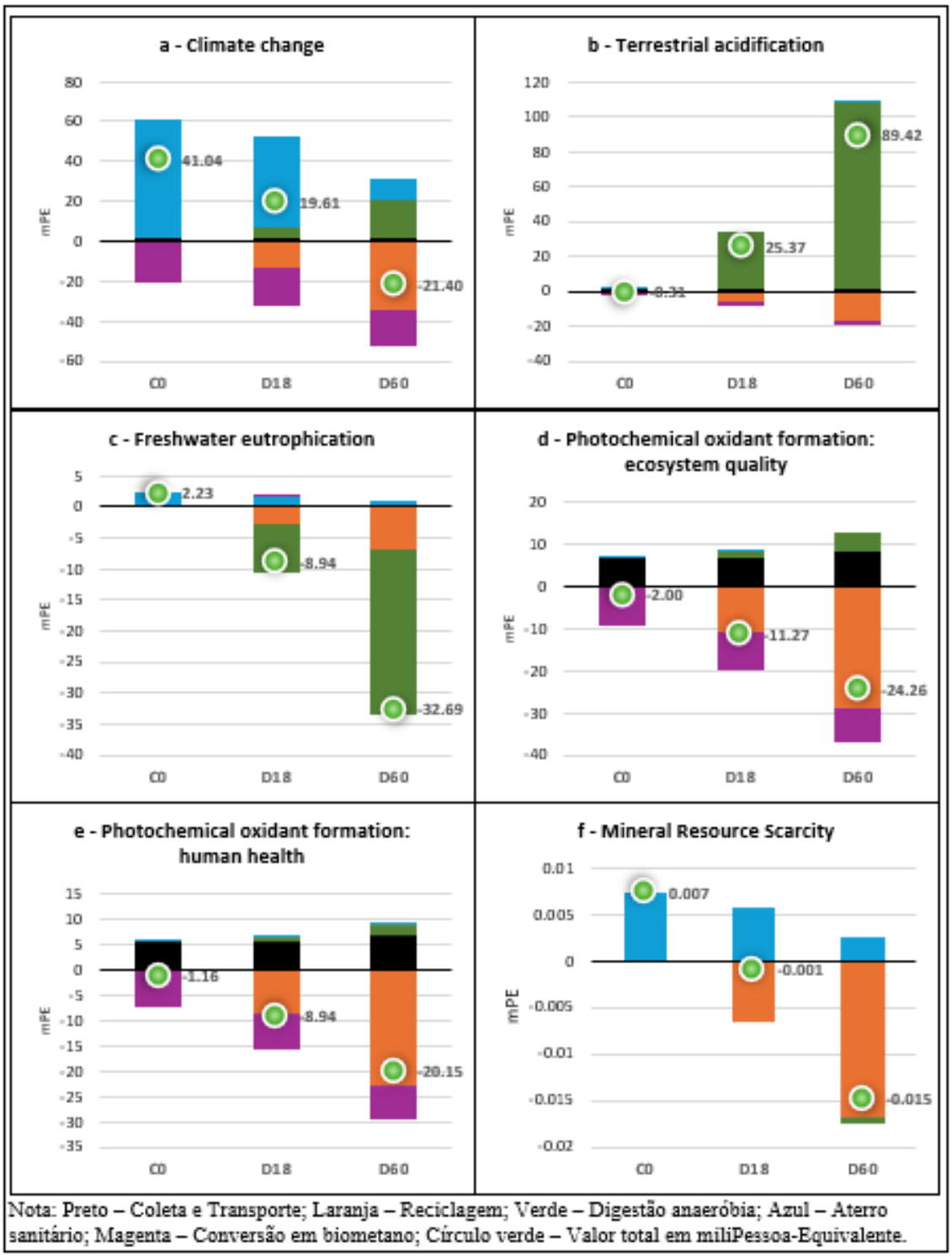
Quanto à ecotoxicidade terrestre (Figura 9h – *Terrestrial eco-toxicity*), os impactos ambientais são irrisórios em comparação com as poupanças ambientais da reciclagem nos Cenários D18 e D60. Portanto, a reciclagem é sempre um tratamento com poucos impactos para meio ambiente, já que evita a emissão de cobre (Cu), de cromo (Cr) e de zinco (Zn) (considerados metais pesados) para o ar.

A categoria de impacto relativa aos danos aos ecossistemas das águas doces (Figura 9i – *Freshwater eco-toxicity*) é particularmente afetada pelo lixiviado do aterro sanitário e seu respectivo tratamento. Os causadores destes impactos são essencialmente os iónes de metais, como o zinco, o arsênico (As), que é altamente tóxico, o níquel (Ni), o cobre e os sais de bário (Ba), também tóxicos. Estes tipos de substâncias podem surgir nos aterros sanitários quando certos produtos, como o vidro, o plástico, os eletrônicos e as pilhas são para lá encaminhados, ao invés de seguirem para o fluxo específico e adequado da reciclagem. Assim sendo, o Cenário C0 teve impactos elevados no aterro.

Na categoria de impacto referente aos efeitos cancerígenos no ser humano (Figura 9j –*Human toxicity: cancer*), o aterro causou impactos modestos devido ao tratamento do lixiviado e à própria operação do aterro, sobretudo pelas emissões de arsênio, cromo VI e dioxinas nas águas superficiais. Sendo que nos cenários com reciclagem, D18 e D60, houve importantes poupanças ambientais

relacionadas com a reciclagem de metais ferrosos e de polietileno de baixa densidade, em que se dá a circularidade desses elementos cancerígenos. Já nos efeitos tóxicos não cancerígenos à saúde humana (Figura 9k – *Human toxicity: non-cancer*), a DA teve um impacto bastante superior ao do aterro, em percentual. Porém, em termos absolutos, ainda foi o aterro que teve maiores impactos, se compararmos esta categoria e com a anterior (toxicidade humana: cancerígenos).

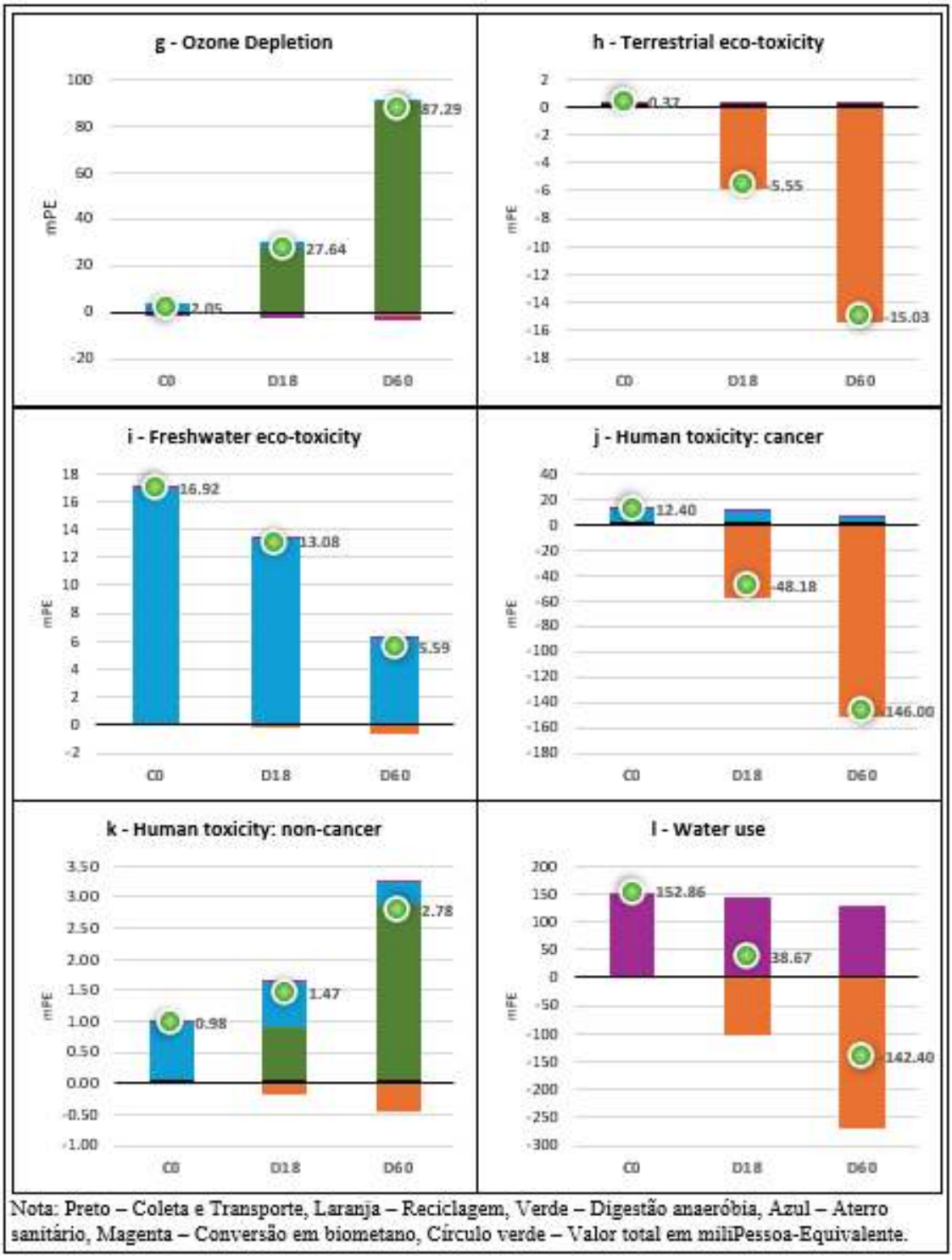
Figura 9: Resultados da Avaliação de Ciclo de Vida.



Nota: Preto – Coleta e Transporte; Laranja – Reciclagem; Verde – Digestão anaeróbia; Azul – Aterro sanitário; Magenta – Conversão em biometano; Círculo verde – Valor total em miliPessoa-Equivalente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 (continuação): Resultados da Avaliação de Ciclo de Vida.



Nota: Preto – Coleta e Transporte, Laranja – Reciclagem, Verde – Digestão anaeróbia, Azul – Aterro sanitário, Magenta – Conversão em biometano, Círculo verde – Valor total em miliPessoa-Equivalente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na última categoria de uso da água (Figura 9l – *Water use*), os consumos são iguais para todos os cenários, pois todos têm o tratamento de biometano em que o biogás é lavado com água. A diferença nos impactos está na reciclagem, que promove poupanças ambientais associadas à reciclagem de alumínio, pois a extração da alumina tem um consumo de água com impactos ambientais muito elevados.

5 CONCLUSÃO

Na análise econômica, feita para os três cenários modelados, verificou-se que o CAPEX é mais caro no cenário em que há maior desvio de RSU, ou seja, no Cenário D60 (que tem DA). Os custos de investimento do Cenário C0 é 53% a 56% (para a RME e RMG, respectivamente) o valor do Cenário D60. Enquanto que o Cenário D18 (com valores intermediários), custa entre 71% e 72% (para a RME e RMG, respectivamente) do custo total de investimento do Cenário D60. O OPEX também é mais oneroso no Cenário D60. O Cenário C0 tem valores entre 32% a 36% (para a RME e RMG, respectivamente) dos custos de operação do Cenário D60. Já o Cenário D18 custa 53% (para a RME e para a RMG) dos custos de operação do Cenário D60. Vale destacar que, atingir a meta de desvios de RSU do Cenário D60 é um alvo muito ambicioso.

Para complementar a análise econômica, fez-se uma ACV para os três cenários modelados. Das 12 categorias de impacto avaliadas, em nove os melhores resultados ambientais foram no Cenário D60. Na Categoria de impacto *Climate Change*, enquanto que no Cenário C0 o resultado estimado obtido foi de 41 mPe, para o Cenário D60 obteve-se um valor de -21,40 mPe. Estes valores significam que o Cenário C0 tem emissões ao meio ambiente, enquanto que no Cenário D60 se obtém economias ambientais líquidas. Sendo que, para esta categoria de impacto, o aterro sanitário é o maior responsável pelos impactos ambientais, enquanto que a conversão do biogás em biometano e a reciclagem evitam emissões ao meio ambiente.

Destaca-se ainda, que é seguro afirmar que os resultados da ACV apontam que a DA gera resultados ambientais superiores para o aproveitamento do biometano quando comparada com o aterro. Além disso, associar a reciclagem faz com que o sistema de gestão de RSU tenha um melhor desempenho do ponto de vista ambiental, devido às poupanças ambientais. Contudo, assim como na análise econômica, o Cenário D60 exige um modelo de gestão de RSU bastante consolidado, pois o percentual de desvios de resíduos orgânicos e de resíduos recicláveis teria que ser muito elevado, assim como exigiria uma elevada eficiência dos processos. Deste modo, o Cenário D18, com metas intermediárias de desvios de RSU, tanto tecnicamente, quanto economicamente e ambientalmente, parece ser o mais exequível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e à Secretaria-Geral de Governo (SGG) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018. São Paulo/SP, 2018.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. ABREMA, São Paulo/SP, 2020.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024. São Paulo/SP: Abrema, 2024.

AGUILERA, J. G., ZUFFO, A. M. Ensaios nas Ciências Agrárias e Ambientais 5. Ponta Grossa/PR, Atena Editora, v. 5, 22 p., 2019.

ALFAIA, R. G. de S. M., COSTA, A. M., CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. Waste Management & Research, 2017. 0734242X1773537. https://doi.org/10.1177/0734242X17735375

AZIZI, S. M. M., HAFFIEZ, N., MOSTAFA, A., HUSSAIN, A., ABDALLAH, M., AL-MAMUN, A., BHATNAGAR, A., DHAR, B. R. Low and high temperature thermal hydrolysis pretreatment for anaerobic digestion of sludge: Process evaluation and fate of emerging pollutants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 200, p. 114453, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114453.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília/DF, 2010b.

BROWNE, J. D.; ALLEN, E.; MURPHY, J. D. Assessing the variability in biomethane production from organic municipal solid waste. Renewable Energy, v. 172, p. 1309-1319, 2021.

CAIBRE, D. I. Análise da viabilidade econômica do processo de pirólise para tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos: estudo de caso aplicado a uma cidade de médio porte. 2013. 159 p. Universidade de Passo Fundo (UPF) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo/RS, 2013.

CHANDRA, S.; GANGULY, R. Assessment of landfill gases by LandGEM and energy recovery potential from municipal solid waste of Kanpur city, India. Heliyon, [S. l.], v. 9, e15187, 2023.

CHP Brasil. Biogás: recuperação energética em aterros sanitários. Rio de Janeiro/RJ, 2017. Disponível em: < https://chpbrasil.com.br/solucoes/biogas-recuperacao-energetica-em-aterros-sanitarios>. Acesso em 23 nov. 2025.

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis. Panorama do biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022 – Foz do Iguaçu/PR, 20 p., 2022.

CIEPLINSKI, A.; REBOUÇAS, A. B; YADAV, A.; ARAÚJO, C. Descarbonização da frota de coleta de resíduos sólidos em São Paulo. Working paper. ICCT – The International Council on Clean Transportation (ID 2024). 25 p., 2024.

CLAVREUL, J., BAUMEISTER, H., CHRISTENSEN, T. H., DAMGAARD, A. An environmental assessment system for environmental technologies. Environmental Modelling & Software, 60, 18–30, 2014. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.06.007

CMTC – COMPANHIA METROPOLITANA DE TRANSPORTES COLETIVOS. Sobre a RMTC. Goiânia, 2025.

COLVERO, D. A., GOMES, A. P. D., TARELHO, L. A. da C., MATOS, M. A. A. de. Municipal solid waste in Goiás (Brazil): current scenario and projections for the future. Journal of Sedimentary Environments, 2(3), 236–249, 2017. https://doi.org/10.12957/jse.2017. 31131

COLVERO, D. A., PFEIFFER, S. C., CARVALHO, E. H. de. Materiais recicláveis provindos dos resíduos urbanos: caso de estudo para o estado de Goiás, Brasil. In P. J. Ramísio, G. A. Lopes, L. M. C. Pinto, F. Leite, M. J. Rosa (Eds.), A Engenharia Sanitária nas Cidades do Futuro: Livro de Comunicações do 17.o Encontro de Engenharia Sanitária e Ambiental/ENASB (pp. 713–720), 2016. Lisboa/Portugal.

COLVERO, D. A., PFEIFFER, S. C., RAMALHO, J. C. M, NASCIMENTO, A. A. do. Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada à Gestão de Resíduos Urbanos num Município do Brasil. Revista Águas & Resíduos, 11p., 2025. doi: 10.22181/aer.2025.0204

ENERGY INSTITUTE. Statistical Review of World Energy. Energy Institute, Londres/UK, 2025. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 08 set. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. Nota técnica DEN 06/08 – Avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS. Rio de Janeiro/RJ, 73 p., 2008.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2012: Ano-base 2011. Rio de Janeiro/RJ: EPE, 2012.

EU – EUROPEAN UNION. European Parliament and of the Council. Directive 2018/851/EC of 30 may 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. 2018.

FELCA, A. T. A., GLORIA, R. F., BARROS, R. M., ALVES, A. P. Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário por meio de duas metodologias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2019, Belo Horizonte: ABES, 2019.

FERREIRA, L. C., SOUZA, T. S. O., POLANCO, F. F., ELVIRA, S. I. P. Thermal steam Explosion pretreatment to enhance anaerobic biodegradability of the solid fraction of pig manure. Bioresource Technology, v. 152, p 393-398, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.11.050.

GOIÂNIA, Prefeitura Municipal. PlanmobGyn: Plano de Mobilidade Urbana de Goiânia. 1ª edição 2024-2033. Comissão Executiva do Plano Diretor. Goiânia, 439 p., 2024. Disponível em: Plano de Mobilidade Urbana de Goiânia Acessado em: 10 de dez. 2025.

GOIÁS. Lei Complementar nº 149, de 15 de maio de 2019: Altera a Lei Complementar nº 139, de 22 de janeiro de 2018, que dispõe sobre a Região Metropolitana de Goiânia, o Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Goiânia, cria o Instituto de Planejamento Metropolitano e dá outras providências. Governo do Estado de Goiás - Secretaria de Estado da Casa Civil, Goiânia/GO 2p., 2019a.

GOIÁS. Lei Complementar nº 182, de 22 de maio de 2023: Institui as Microrregiões de Saneamento Básico – MSBs, suas respectivas estruturas de governança, e altera a Lei Complementar nº 139, de 22 de janeiro de 2018, que dispõe sobre a Região Metropolitana de Goiânia, o Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Goiânia. Estado de Goiás. 17p. 2023b.

GOIÁS. Relatório de Viabilidade Técnico-Econômica do Sistema Integrado de Transporte da RMTC – SIT-RMTC. Goiânia: Governo do Estado de Goiás, 2025c.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Goiás - Panorama. 2024. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/panorama. Acesso em: 16 ago. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for a Sustainable Recovery. Paris: IEA, 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Geneva: IPCC, 2006.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/CBO9781107415416.

ISCC – International Sustainability & Carbon Certification. ISCC EU 205 Greenhouse Gas Emissions - Version 4.2. 165 p., 2025.

KHANAL, S. K. Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications. Hoboken, Wiley-Blackwell, 2008. 320 p. DOI: 10.1002/9780813804545. ISBN 9780813823461.

LIMA, P. D. M., COLVERO, D. A., GOMES, A. P., WENZEL, H., SCHALCH, V., CIMPANB, C. Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. Waste Management, (78), 857–870, 2018. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.007

LUCIO, C. F.; WOLF, A. P.; MELLO, R. B. Relatório Técnico: Teste Operacional do Veículo Scania K280IB GNV. Curitiba/PR, 2024.

MAET UFG. MUT – MOBILIDADE URBANA E TRÂNSITO. Goiânia/GO, 2024. ISSN: 2594-6226.

MALINAUSKAITE, J., JOUHARA, H., CZAJCZNSKA, D., STANCHEV, P., KATOU, E., ROSTKOWSKI, P., THORNE, R. J., COLÓN, J., PONSÁ, S., AL-MANSOUR, F., ANGUILANO, L., Krzyżyńska, R., López, I. C., Vlasopoulos, A., Spencer, N. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. Energy 141, 2013–2044. 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128

MAZZONETTO, A. W.; VIEIRA, D. D. S.; MIILLER, L.; HARDER, M. N. C. Potencial energético do resíduo sólido urbano paulista – comparação entre processos anaeróbio e térmico. Bioenergia em Revista: Diálogos, v. 13, n. 2, p. 56-76, jul./dez. 2023.

MERLI, R., PREZIOSI, M., ACAMPORA, A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. J. Clean. Prod. 178, 703–722, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2012.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2020.

PALANIANDY, P. AZIZ, H.A. WANG, L.K. TERLECKY, P.M. HUNG, Y.T. Sanitary Landfill Types and Design. Solid Waste Engineering and Management. Handbook of Environmental Engineering, Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-89336-1_8.

PORTO, M. A. Análise econômica da viabilidade de substituição de diesel por biometano. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) — Universidade Estadual de Campinas, 2024.

RAPOSO, F.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; DE LA RUBIA, M. A.; BORJA, R.; BÉLINE, F.; CAVINATO, C.; DEMIRER, G.; FERNÁNDEZ, B.; FERNÁNDEZ-POLANCO, M.; FRIGON, J. C.; GANESH, R.; KAPARAJU, P.; KOUBOVA, J.; MÉNDEZ, R.; MENIN, G.; PEENE, A.; SCHERER, P.; TORRIJOS, M.; UELLENDAHL, H.; WIERINCK, I.; DE WILDE, V. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international inter-laboratory study. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, v. 86, n. 8, p. 1088-1098, 2011. DOI: 10.1002/jctb.2622.

REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. Engenharia Sanitária e Ambiental, 19(3), 301–313, 2014. https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000001145

RIBEIRO, J. D. Panorama dos resíduos sólidos urbanos na região metropolitana de Goiânia. Monografia do Curso de Graduação de Engenharia Ambiental e Sanitária da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA/UFG). Goiânia/GO, 96 p., 2017.

SEADI, T. A.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. Biogas Handbook. Esbjerg: University of Southern Denmark, 2008. DOI: 10.13140/RG.2.1.2584.4722.

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Relatório de Monitoramento do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS). Relatório n.º 3/2024 SEMAD/ GEARE-21325 Gerência de Instrumento e Apoio a Política de Resíduos Sólidos. Goiânia/GO, 37 p., 2024.

SINISA – Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico. Relatório de Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos. SINISA 2024 – Ano de referência 2023. Brasília/DF, 48 p., 2024.

SMITH, C.; NICHOLS, Z.; ARMOUR, K.; COLLINS, W.; FORSTER, P.; MEINSHAUSEN, M.; PALMER, M.; WATANABE, M. 7SM - The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity (Supplementary Material). [sine loco]: [sine nomine], 2021.

TSHEMESE, Z.; DEENADAYALU, N.; LINGANISO, L. Z.; CHETTY, M. An overview of biogás production from anaerobic digestion and the possibility of using sugarcane wastewater anda municipal solid waste in South African context. Applied System Innovation, 6(1), 13, 2023. https://doi.org/10.3390/asi6010013.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02: User's Guide. Washington, DC, 2005.

WANG, C., QIAO, H., YAN, R., LIU, X., DENG, L., CHE, D. Thermodynamic and economic evaluation of a novel waste-to-energy system combining biogas power generation and sewage sludge pyrolysis. Energy Conversion and Management, v. 327, p. 119531, 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119531.

WANG, L. K.; WANG, M., S.; HUNG, Y. Solid Waste Engineering and Management. Switzerland: Springer, 2021.

YAASHIKAA, P., R.; KUMAR, P., S.; NHUNG, T., C.; HEMAVATHY, R., V.; JAWAHAR, M., J.; NESHAANTHINI, J., P.; RANGASAMY, G. A review on landfill system for municipal solid wastes: insight into leachate, gas emissions, environmental and economic analysis. Chemosphere, v. 309, p. 136-627, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136627.