

## **X-031 – ESTIMATIVA DO POTENCIAL DA EMISSÃO DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS GERADOS EM MUNICÍPIOS DE GRANDE PORTE**

**Samuel Rodrigues Castro<sup>(1)</sup>**

Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (2014). Professor Adjunto da Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

**Yasmim Fernandes de Castro<sup>(2)</sup>**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

**Aline Sarmento Procópio<sup>(3)</sup>**

Doutorado em Meteorologia pela Universidade de São Paulo, Brasil (2005). Professora Associada da Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua José Lourenço Kelmer, s/n – UFJF Campus Universitário, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Bairro São Pedro – CEP: 36036-900 – Juiz de Fora – MG – Brasil - +55 (32) 2102-3419 – ramal: 204. e-mail: [samuel.castro@ufjf.edu.br](mailto:samuel.castro@ufjf.edu.br).

### **RESUMO**

A degradação biológica anaeróbia dos resíduos sólidos em aterros sanitários resulta na geração de biogás, uma mistura constituída de metano e dióxido de carbono. O metano do biogás é apontado como um dos principais fatores do efeito estufa antropogênico, fato este que vem acentuando as mudanças climáticas e se tornando um grande problema mundial. O biogás em questão possui considerável poder calorífico, permitindo o seu aproveitamento como fonte de energia, visando redução do impacto ambiental. Em virtude disso, é importante estudar a geração deste gás a partir de aterros sanitários para verificar a viabilidade de seu aproveitamento. Este estudo estimou a emissão de gases de efeito estufa a partir da geração de resíduos sólidos domiciliares para os anos de 2011 a 2016, aplicando modelos *LandGEM* (software da USEPA) e Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), e considerando a composição gravimétrica obtida para o município de grande porte. Além disso, foi determinado o total de dióxido de carbono equivalente a partir dos resultados das metodologias utilizadas, a fim de se fazer uma comparação entre os modelos. As emissões foram calculadas por ambos modelos, utilizando-se diferentes cenários, porém, as diferentes avaliações convergiram para resultados quantitativos próximos, sem apresentarem diferenças significativas a 95% de confiança. Por fim, acredita-se que a metodologia aplicada e os resultados, aqui apresentados, fornecem uma visão útil no que diz respeito às emissões GEE a partir da disposição final dos resíduos, auxiliando tomada de decisões no planejamento da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos sólidos urbanos, Gases de efeito estufa, Inventários de emissão, *GHG Protocol*.

### **INTRODUÇÃO**

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) estão presentes em qualquer sociedade, como resultado das atividades humanas. São constituídos por diversos componentes, tais como: materiais orgânicos, papel/papelão, metais, vidros, plásticos, dentre outros. Sua taxa de produção e composição física variam geograficamente, pois dependem do nível socioeconômico e cultural da população e das condições climáticas da região, além de sofrerem influências sazonais (AKINCI, 2012).

A determinação da composição e da quantidade dos resíduos permite um maior conhecimento da realidade da fonte geradora, possibilitando propostas de gerenciamento mais eficientes (VEGA, BENÍTEZ & BARRETO, 2008). Além disto, a caracterização gravimétrica subsidia a elaboração de qualquer programa ou projeto relacionado aos resíduos sólidos, sendo, portanto, um importante instrumento de gestão integrada para o município (STREB, NAGLE & TEIXEIRA, 2004).

No Brasil, o destino final mais comum para os RSU é a disposição no solo. Os números referentes à geração de RSU revelam um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país, o que demonstra uma retomada no aumento em cerca de 1% em relação a 2016. O montante coletado em 2017 foi de 71,6 milhões de toneladas, registrando um índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país, o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, consequentemente, tiveram destino impróprio (ABRELPE, 2017).

Nos locais onde os resíduos são dispostos, podem ocorrer emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo o metano ( $\text{CH}_4$ ) um componente considerável. Segundo o Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa quantidades significativas dessa substância são liberadas na atmosfera em consequência da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domésticos (RDO), no Brasil, fração majoritária, chegando a atingir valores próximos a 50% (MCTI, 2015). No ano de 2016, as emissões do setor de Resíduos no Brasil totalizaram 91,97 milhões de toneladas (Mt) de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ) (SEEG, 2018).

A produção dos GEE em aterros pode ser dividida em 4 ou 5 fases, de acordo com o autor (USEPA, 2004). De acordo com Brito Filho (2005), tais fases são assim caracterizadas:

- ✓ *Fase I* (Fase de ajuste inicial) – Inicia-se a deposição do resíduo e o acúmulo de umidade. Com a abundância de substrato e nutrientes aproveitáveis, micro-organismos aeróbios começam a degradar os resíduos, produzindo água, dióxido de carbono, ácidos orgânicos, e minerais inorgânicos. A decomposição aeróbia é mantida pelo oxigênio contido na massa de resíduo. Sendo uma fase relativamente curta, e compreender a decomposição aeróbia, algumas vezes pode estar associada à Fase II, sendo reportadas conjuntamente como Fase aeróbia.
- ✓ *Fase II* (Fase de transição) – Nesta fase o oxigênio contido no aterro começa a se esgotar e o ambiente do aterro começa a mudar de um ambiente aeróbio para um anaeróbio. Já que a quantidade de oxigênio aprisionada é limitada, esta é uma fase relativamente curta. Assim que o oxigênio é reduzido, é estabelecida uma condição redutora. Há a troca dos aceptores de elétrons do oxigênio para os nitratos e sulfatos. A redução destas últimas moléculas, sempre produzirá nitrogênio e sulfeto de hidrogênio/gás sulfídrico. Somando-se a isso, o nível de dióxido de carbono começa a aumentar causando a formação de ácido carbônico.
- ✓ *Fase III* (Fase ácida) – Nesta fase o resíduo é degradado anaerobicamente. A primeira perda é por hidrólise, na qual moléculas orgânicas maiores são convertidas em menores, e moléculas solúveis e hidrogênio são produzidos. As bactérias acidogênicas convertem então os compostos hidrolisados em ácidos orgânicos voláteis (VOAs). A biomassa disponível que cresce associada às bactérias metanogênicas, e o rápido consumo de substratos e nutrientes são uma característica predominante desta fase. O primeiro gás formado nesta fase é o dióxido de carbono.
- ✓ *Fase IV* (Fase de fermentação do metano) – Nesta fase os VOAs e o hidrogênio produzidos na fase acidogênica são convertidos a metano pelas bactérias metanogênicas. Tanto a produção de ácidos quanto a fermentação do metano ocorrem durante esta fase, contudo a fermentação do metano é predominante. As mais altas taxas de geração de gás ocorrem durante esta fase. Sulfatos e nitratos são reduzidos para sulfetos e amônia. As temperaturas dos gases caem nesta fase para valores por volta de 38 a 54°C. A produção de gás provavelmente começa a diminuir quando valores menores que o menor valor da faixa de temperatura é atingido.
- ✓ *Fase V* (Fase de maturação) – Com a maturação do aterro, o material de rápida biodegradabilidade encontra-se estabilizado (conversão total para  $\text{CH}_4$  ou  $\text{CO}_2$ ). A biodegradação é limitada pela falta de substratos facilmente biodegradados e nutrientes, logo a atividade biológica é reduzida. A taxa de produção de gás, consequentemente, também decresce. Ambos os gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  são produzidos, porém em taxas menores do que na Fase IV. Na última parte desta fase, o aterro pode retornar à condição aeróbia.

Outros fatores que influenciam a taxa de produção de gás em aterros incluem teor de umidade, conteúdo dos nutrientes, micro-organismos, nível de pH, temperatura, além de planos de operação e projeto específicos do local.

Segundo o IPCC (2007) o termo mudança climática refere-se à mudança no estado do clima que pode ser identificada por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, e que persiste por um período extenso, tipicamente décadas ou mais. A mudança do clima pode decorrer de processos naturais internos ou de forças externas, bem como de persistentes mudanças antropogênicas na composição da atmosfera ou no uso da terra. A geração de GEE proveniente de aterros sanitários se caracteriza como processos de origem antrópica, os quais intensificam o processo de Efeito Estufa ocasionando variações climáticas e impactos ambientais. Assim, preocupações ambientais com relação às mudanças climáticas têm se tornado relevantes, devido a esses gases, como o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

As emissões de CH<sub>4</sub> devidas à disposição final de RDO em aterros sanitários aumentam com a expansão dos serviços de coleta e com a melhora na operação de tais equipamentos. Essas emissões aumentaram continuamente nas últimas décadas e devem continuar aumentando. Projetos de geração de energia com CH<sub>4</sub> reduziram parte desse aumento (*waste-to-energy*). As Leis Federais que instituem a Política Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) constituem importantes marcos legais que estabelecem novos princípios, instrumentos e definem responsabilidades. Estas legislações, associadas a uma maior demanda da sociedade e a efetiva ação dos órgãos públicos (ambientais, de saneamento, ministério público, dentre outros), possuem o potencial de proporcionar um novo impulso para a gestão de resíduos no Brasil. Práticas indicadas na PNRS como redução na fonte, reuso, reciclagem e geração de energia com o CH<sub>4</sub>, se intensificadas nesse setor, podem contribuir na redução das emissões de GEE.

O CH<sub>4</sub> é um gás combustível capaz de ser coletado e utilizado como fonte de energia. São muitos os benefícios proporcionados ao meio ambiente devido ao aproveitamento do biogás para a geração de energia, o qual seria lançado para a atmosfera. Segundo Machado (2011), o uso da biomassa como fonte de energia renovável e sustentável permite diversificar a matriz energética, além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Assim, a geração de biogás é uma questão que tem levado a buscas por soluções que atendam não somente a sustentabilidade ambiental, mas também a perspectiva econômica. Ainda, de acordo com o autor (MACHADO, 2011), alternativas de fontes renováveis de energia têm sido objeto de pesquisas no mundo inteiro a fim de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e os impactos globais causados pela sua queima.

Os métodos de previsão de geração de gás começaram a surgir no início da década de 1970. Um modelo de geração de gás de aterro é uma ferramenta cuja função é fornecer uma estimativa do metano gerado ou do volume total de gás de aterro ao longo do tempo a partir de um volume de resíduos específico (ABRELPE, 2013). Além disso, o uso de modelos matemáticos pode auxiliar na sistematização das informações, identificação dos fenômenos envolvidos, alertar sobre detalhes não considerados previamente, realizar análises de causa e efeito e fazer previsões sobre o comportamento de um sistema real específico bem definido.

Vários modelos foram propostos para a previsão da quantidade de CH<sub>4</sub> produzida ao longo da vida útil de um aterro. Geralmente, esses modelos acabam situando-se em quatro categorias distintas: de ordem zero, de primeira ordem, multifásicos e de segunda ordem (ABRELPE, 2013).

A maioria dos projetos aplica modelos de primeira ordem, como por exemplo: *LandGEM* (USEPA, 2005), Scholl-Canyon (WORLD BANK, 2004) e Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), em suas várias versões (IPCC 1997; 2000; 2006). Em comparação com outros métodos (como os métodos de campo), os modelos teóricos apresentam vantagens, como o baixo custo e resultados rapidamente observáveis (ABRELPE, 2013). Neste trabalho foram abordadas questões relacionadas ao potencial de geração de metano a partir de resíduos sólidos domiciliares de um município de grande porte.

## OBJETIVOS

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo estimar a emissão de CH<sub>4</sub> a partir da geração de resíduos sólidos domiciliares em Juiz de Fora – MG utilizando-se modelos de primeira ordem. Ainda, como objetivos específicos, citam-se:

- ✓ Utilizar os modelos *LandGEM* e IPCC.
- ✓ Comparar estaticamente os resultados obtidos pelos modelos utilizados.

## METODOLOGIA UTILIZADA

O município de Juiz de Fora - MG, objeto do estudo, localizado na Zona da Mata Mineira tem população de 565 mil habitantes ocupando uma área de aproximadamente 1.436 km<sup>2</sup> (IBGE, 2018). Segundo a classificação climática de W. Köppen, o município possui um clima tropical de altitude, caracterizado por verões quentes e predominantemente chuvosos, e invernos secos com baixas temperaturas (CESAMA, 2010).

A gestão de resíduos é realizada pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DEMLURB), criado pela Lei nº 5.517, de 28 de novembro de 1978 e trata-se de uma entidade autárquica, dotada de personalidade jurídica e patrimônio próprio, com autonomia técnica e financeira, regendo-se pelas disposições da referida Lei (DEMLURB, 2018). Atualmente está sendo realizada a elaboração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Juiz de Fora, que se iniciou em 23 de abril de 2018, a partir da assinatura do Contrato entre a Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, por meio da Secretaria de Planejamento e Gestão (SEPLAG), e a I&T – Gestão de Resíduos. A data estimada para que o documento seja entregue é meados de 2019 (PJF, 2018).

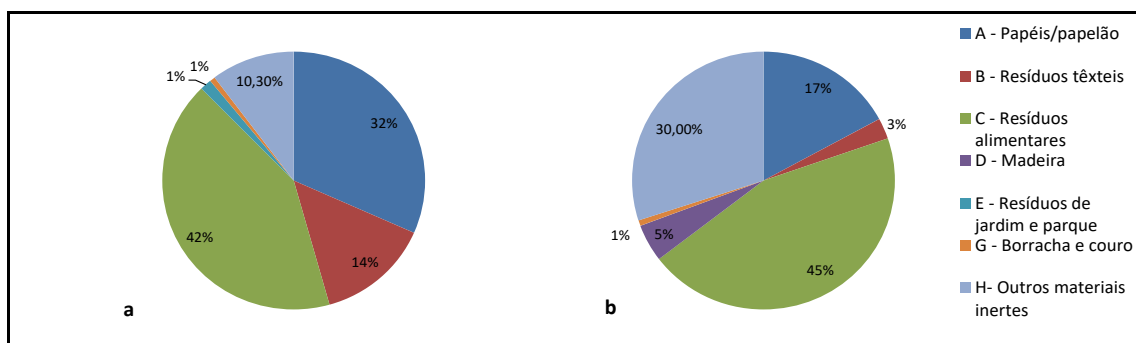
O Aterro Sanitário da nova Central de Tratamento de Resíduos – CTR, de Juiz de Fora, Figura 1, iniciou suas atividades em abril de 2010, com capacidade inicial para receber 530 toneladas de resíduos por dia enquadrados na classificação II A e II B, segundo a ABNT 10.004/2004. O empreendimento opera sob concessão com estimativa de 25 anos de vida útil e possui um sistema de recuperação energética com base na coleta e queima de biogás (DEMLURB, 2018). O aterro atualmente recebe em média 900 toneladas de RSU por dia, provenientes de 46 cidades. A operação é em forma de rampa, e nesse processo é utilizado um trator de esteira o qual faz a compactação dos resíduos na fase de operação do aterro, que, posteriormente recebem a cobertura final com argila (VITAL, 2018).



**Figura 1 - Aterro Sanitário de Juiz de Fora**

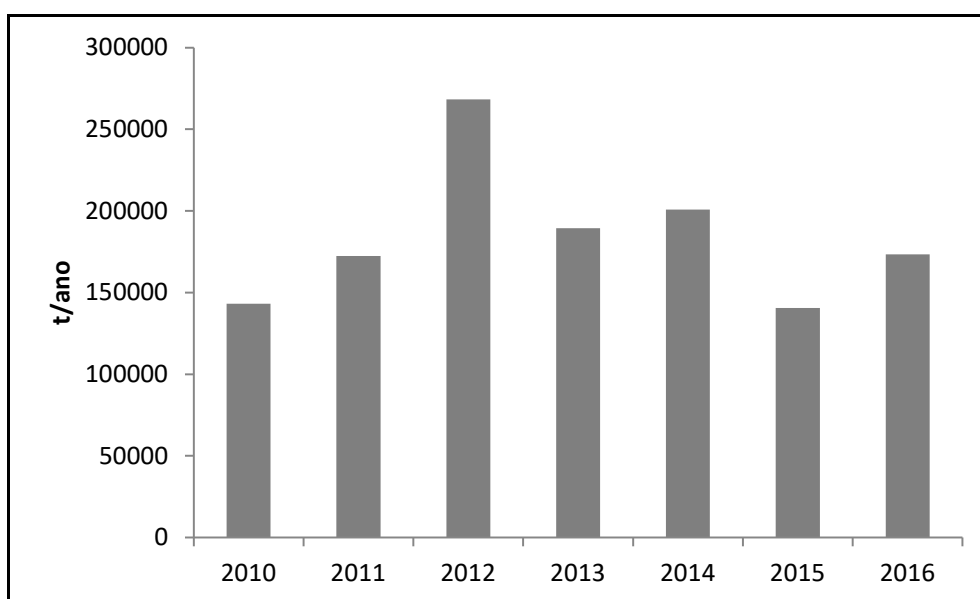
Em 2015, a DEMLURB conduziu uma análise gravimétrica dos RSU em Juiz de Fora (MENESES, 2016), utilizada nas estimativas realizadas no presente trabalho. Especificações técnicas estabelecidas no Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001), e orientações da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2015) nortearam na coleta e preparo das amostras, bem como a determinação da composição gravimétrica e densidade das amostras (MONTEIRO *et al.*, 2001). Tal metodologia também foi base para o desenvolvimento de trabalhos semelhantes em outros municípios do país (SIQUEIRA *et al.* 2016).

A partir do estudo supracitado obteve-se a caracterização gravimétrica dos RDO para as sete regiões urbanas do município de Juiz de Fora, em função das classes sociais, além de resultados médios para as frações de orgânicos, recicláveis, contaminantes e outros no ano de 2015, conforme apresentado na Figura 2(a). O IPCC (2006) apresenta uma caracterização gravimétrica média para regiões urbanas da América do Sul, cujas porcentagens sugeridas estão expostas na Figura 2(b), e serviram de base comparativa com o cenário local.



**Figura 2 - Caracterização Gravimétrica (a) Juiz de Fora (b) América do Sul**

Para a aplicação dos dois modelos em análise foram utilizados os valores da geração de RDO de Juiz de Fora, disponíveis na plataforma *Série Histórica* do Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento (SNIS, 2018), considerando-se os anos de 2011 a 2016, sendo os dados desse último ano os mais recentemente publicados. Para o ano de 2010, início da operação do aterro (em abril de 2010), utilizou-se a média das destinações fornecidas nos 6 anos fornecidas pelo SNIS, proporcionalmente aos meses em que o aterro operou. A Figura 3 contém a geração de RDO para o período referido. Para o último ano em análise, 2016, tem-se 278.183,3 toneladas de RSU coletados onde os RDO representam cerca de 60% dessa geração.



**Figura 3 - Geração de Resíduos Domiciliares em Juiz de Fora - MG**

Assim, o presente trabalho utilizou os dados coletados na estimativa de CH<sub>4</sub>, aplicando modelos matemáticos amplamente adotados e com credibilidade reconhecida.

### Estimativa de GEE

Os modelos *LandGEM* e IPCC foram utilizados neste estudo para a estimativa da geração de CH<sub>4</sub>, a partir dos resíduos sólidos domiciliares coletados a partir de 2011, ano seguinte à publicação da PNRS, instituída pela Lei 12.305/2010. Os modelos adotados têm em comum o fato de assumirem equações cinéticas de primeira ordem e considerarem parâmetros equivalentes de entrada.

#### Modelo LandGem

O *LandGEM* baseia-se em uma equação de taxa de decomposição de primeira ordem para quantificar as emissões dos gases metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, e poluentes particulados do ar



gerados a partir da decomposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, assumindo que a geração de metano está no seu auge logo após a disposição inicial dos resíduos (USEPA, 2005).

O *LandGEM* fornece uma ferramenta que consiste em uma planilha no ambiente Microsoft Office Excel, onde o usuário insere os dados de seu projeto, desenvolvida pela *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos que busca estimar as emissões de biogás. Para este modelo pode-se usar dados específicos do local para estimar as emissões ou os parâmetros padrão. O *LandGEM* contém dois conjuntos de parâmetros padrão:

- ✓ *Padrões da CAA* - são baseados em regulamentações federais para aterros sanitários estabelecidos pela Lei do Ar Limpo (CAA) e podem ser usados para determinar se um aterro sanitário está sujeito aos requisitos de controle destes regulamentos.
- ✓ *Padrões de inventário* - são baseados em fatores de emissão da Compilação de Fatores de Emissão de Poluentes do Ar (AP-42) da *Environmental Protection Agency* (EPA) e podem ser usados para gerar estimativas de emissões para uso em inventários de emissões e licenças aéreas na ausência de dados de teste específicos do local.

O *LandGEM* utiliza da Equação 1 para a determinação da taxa de decomposição de primeira ordem, estimando emissões durante um período de tempo:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_o \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual  $Q_{CH_4}$  é a geração anual de metano para o ano calculado (T/ano);  $i = 1$  - acréscimo por ano;  $n$  corresponde ao ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro);  $j = 0, 1$  é o acréscimo por ano;  $k$  é a taxa de geração de metano ( $\text{ano}^{-1}$ );  $L_o$  é o potencial de geração de metano ( $\text{m}^3/\text{mg}$ );  $M_i$  é igual à massa de resíduos recebidos no ano em cada seção ( $t$ );  $t_{ij}$  corresponde ao ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo com precisão de decimais).

Para o presente estudo, utilizou-se da versão 3.02 da planilha, onde a equação revisada do *LandGEM* considera a geração de metano a cada 0,1 incremento de ano, produzindo uma pequena redução na estimativa das emissões comparada à versão anterior (THOMPSON *et al.*, 2009).

Tem-se como *Passo 1* a inserção do ano de início de operação do aterro e seu ano de fechamento, sendo 2010 e 2035, respectivamente, para o aterro objeto do estudo, que apresenta 25 anos de vida útil. O *Passo 2* utiliza  $k$ , parâmetro que depende da umidade, nutrientes, pH e temperatura. O método fornece valores padrão para a determinação dessa taxa conforme o tipo de aterro sanitário (Convencional: CAA, Área árida: CAA, e Úmido: biorreator).

Outro parâmetro de entrada é  $L_o$ , que depende apenas do tipo e composição dos resíduos depositados no aterro e descreve a quantidade total de gás metano potencialmente produzida por uma tonelada métrica de resíduos à medida que decai. Quanto maior a carga orgânica contida nos resíduos, maior o valor de  $L_o$ . O *LandGem* fornece cinco valores  $L_o$  padrões de acordo com o tipo de aterro sanitário (Convencional - CAA, Área árida - CAA, e Úmido - biorreator).

Para se determinar os dois parâmetros supracitados utilizou-se o padrão CAA, já que se referem a padrões para aterros sanitários. O tipo de aterro em questão se caracteriza como convencional, desta maneira os valores para  $k$  e  $L_o$  foram  $0,05 \text{ ano}^{-1}$  e  $170 \text{ m}^3/\text{mg}$ , respectivamente. Tais valores foram estabelecidos, além dos padrões acima citados, com base em levantamento bibliográfico (COSTA *et al.*, 2016; BIANEK *et al.*, 2018).

A variação no valor de  $k$  acarreta em uma geração de biogás mais lenta ou mais rápida. No modelo em questão não se insere a caracterização gravimétrica, pois a designação pré-estabelecida para o  $L_o$  já reconhece que há uma mistura de resíduos orgânicos que podem ser decompostos e de resíduos inorgânicos sendo depositados em um aterro. Como já mencionado, maiores valores de  $L_o$  representam maior carga orgânica, justificando

também o valor adotado para  $L_0$ . Os parâmetros  $L_0$  e  $k$  são os mais importantes, pois refletem variações de acordo com local, clima e tipo de resíduos.

Em seguida, o teor de metano é determinado, sendo recomendado para o *LandGEM* que o mesmo seja mantido em um intervalo de 40% a 60%. No presente estudo, adotou-se o valor de 50% para a quantidade de metano contida no biogás, valor padrão utilizado por USEPA (2005) e IPCC (2006).

A seleção dos gases estimados é determinado no *Passo 3*, sendo selecionado o metano para os cálculos. O *Passo 4* é destinado a entrada da massa de resíduos recebidos em cada ano.

Na Tabela 1 encontram-se todos os parâmetros empregados na aplicação do modelo *LandGem*.

**Tabela 1 - Dados de Entrada *LandGem*.**

Parâmetros	Dados de Entrada
Ano de início de operação do aterro	2010
Ano de fechamento	2035
Taxa de geração de metano	0,05 (ano <sup>-1</sup> )
Potencial de geração de metano	170 (m <sup>3</sup> /mg)
Teor de metano	50%
Seleção dos gases	Metano
Entrada da massa de resíduos em cada ano	RDO – 2011 a 2016

A planilha fornece o volume total de gás do aterro e os gases selecionados no passo 3, desde o ano de abertura até o ano de encerramento. Ao final, o programa fornece tabelas com os quantitativos, além de outras inúmeras substâncias produzidas ao longo de cada ano.

Para se fazer a comparação entre os efeitos atmosféricos de vários gases de efeito estufa utiliza-se, usualmente, a métrica do potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*). O *GWP* baseia-se na importância relativa dos gases de efeito estufa, em relação ao dióxido de carbono. Para a conversão de CH<sub>4</sub> a dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2e</sub>), considera-se que uma tonelada de CH<sub>4</sub> equivale a 25 toneladas de CO<sub>2e</sub> (IPCC, 2007). Assim, para efeito comparativo utilizou-se a Equação 2 a fim de estimar o CO<sub>2e</sub> para este modelo advindo da geração de metano ( $Q_{CH_4}$ ) disponibilizado pela ferramenta, de acordo com o documento de orientação técnica do EPA (2010).

$$CO_{2e} = \sum (Q_{CH_4} \times GWP_i) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde o CO<sub>2e</sub> são as emissões em equivalentes de dióxido de carbono (t/ano),  $Q_{CH_4}$  a geração anual de metano para o ano calculado (t/ano) e o  $GWP_i$  se refere ao *GWP* do respectivo *GEE*.

#### *Modelo IPCC/GHG PROTOCOL*

A metodologia do IPCC para estimar as emissões de CH<sub>4</sub> dos resíduos sólidos é baseada no método decaimento de primeira ordem (FOD). Este método assume que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável, DOC) em resíduos decai lentamente ao longo de algumas décadas, durante as quais CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> são formados (IPCC, 2006). As diretrizes do IPCC classificam o processo de estimativa de emissões em três níveis distintos, identificados como *Tiers*, sendo:

- ✓ *Tier 1*: As estimativas dos métodos de Nível 1 são baseadas no método IPCC FOD, usando dados de atividade padrão e parâmetros padrão específicos do país.
- ✓ *Tier 2*: Os métodos de Nível 2 usam o método IPCC FOD e alguns parâmetros padrão, mas exigem dados de atividade específicos do país de boa qualidade sobre descarte de resíduos atual e histórico no aterro.
- ✓ *Tier 3*: Os métodos de Nível 3 baseiam-se no uso de dados de atividade específicos de país de boa qualidade e o uso do método FOD com parâmetros-chave desenvolvidos nacionalmente ou medição específica dos parâmetros do país. O compilador de inventário pode usar métodos específicos do país que sejam de qualidade igual ou superior ao método de Nível 3 baseado em FOD.

Considerando bem estabelecida a ferramenta IPCC para a elaboração de inventários de emissões de gases no Brasil, com a tropicalização de parâmetros específicos às características e realidades do país, o método de Nível 3, *Tier 3*, foi utilizado no presente estudo, sendo adotada a ferramenta de cálculo do modelo teórico de estimativa *GHG Protocol*.

O *GHG Protocol* é uma iniciativa originalmente desenvolvida nos Estados Unidos pelo *World Resources Institute* (WRI) em associação com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), além de ter sido resultante de parcerias com empresas, organizações não governamentais (ONGs), governo e outras conveniadas ao WRI e ao WBCSD (*GHG PROTOCOL*, 2018).

Além de ser compatível com as metodologias de quantificação do IPCC, o *GHG Protocol* é compatível também com as normas da *International Organization for Standardization* (ISO/14064). Sua aplicação no Brasil ocorreu a partir do início do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, em 2008, acontecendo de modo adaptado ao contexto nacional. Além disso, as informações geradas podem ser aplicadas aos relatórios e questionários de iniciativas como *Carbon Disclosure Project*, Índice Bovespa de Sustentabilidade Empresarial (ISE) e *Global Reporting Initiative* (GRI).

Os métodos de cálculo das emissões de GEE variam entre as diversas fórmulas e requerem conhecimentos detalhados quanto às informações necessárias. O *GHG Protocol* Brasileiro não descreve uma fórmula específica para este tipo de quantificação, mas sim fornece uma ferramenta de cálculo, elaborada no software Excel. Trata-se de uma ferramenta que sofre atualizações anuais, utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de GEE. Está atualmente na versão 2018.1.4, que pode ser adquirida através do download pelo próprio site (*GHG PROTOCOL*, 2018). Entre os aprimoramentos periódicos que a ferramenta recebe, estão as atualizações de fatores de emissões que são baseados em publicações reconhecidas internacionalmente.

Conforme as especificações do *GHG Protocol* toda emissão de GEE deve ser calculada de acordo com o fator de emissão da atividade em estudo, cuja intensidade depende da fonte emissora. Para os resíduos sólidos, a escolha do fator fixo de emissão depende, principalmente, da composição dos resíduos gerados. Para a determinação dos fatores de emissões dos resíduos sólidos, foram utilizados os guias de inventários de emissão do IPCC (2007) e do Programa Brasileiro de *GHG Protocol*.

A estimativa dos GEE é o produto do preenchimento da planilha do Programa Brasileiro do *GHG Protocol*. Essa ferramenta é dividida em abas, posicionadas na parte inferior da planilha e identificadas pelo nome e por uma legenda de cores.

Com base nas informações levantadas, para aplicação do método deve-se avaliar em qual limite operacional o presente estudo se enquadra. A ferramenta de cálculo separa esse limite em escopos em que cada um deles trata de forma objetiva as suas relações de emissões:

- ✓ *Escopo 1*: Emissões diretas de GEE provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização;
- ✓ *Escopo 2*: Emissões indiretas de GEE de energia;
- ✓ *Escopo 3*: Outras emissões indiretas de GEE que são uma consequência das atividades da empresa, mas ocorrem em fontes que não pertencem ou não são controladas pela empresa.

Como o empreendimento em questão é um aterro sanitário, onde suas emissões são diretas e controladas pela própria empresa, desconsiderando-se as emissões indiretas que por ventura possam estar relacionadas à atividade, foram elencadas as atividades diretas (*Escopo 1*) para o cálculo. O primeiro dado de entrada inserido na ferramenta é o município em que ocorre a disposição dos resíduos (*Passo 1*), Juiz de Fora – MG; posteriormente, o próprio programa retorna à precipitação anual e temperatura anual média da localidade selecionada. Esses dados são de suma importância, pois o teor de umidade de um aterro sanitário é um elemento essencial para a decomposição anaeróbica e a geração de CH<sub>4</sub>, enquanto a temperatura atua na cinética das reações bioquímicas responsáveis pela conversão de resíduos em gases, líquidos e compostos bioestabilizados (ABRELPE, 2013).



O *Passo 2* se caracteriza como a entrada de dados de atividade da organização, onde inclui-se a quantidade de RDO depositada no aterro em t/ano para os anos de 2011 a 2016. Subsequentemente, a planilha demanda a composição gravimétrica dos resíduos (*Passo 3*) a qual é fragmentada em papéis/papelão, resíduos têxteis, alimentares, madeira, resíduos de jardim e parque, borracha e couro, fraldas e outros materiais inertes.

A composição de resíduos é um dos principais fatores que influenciam as emissões do tratamento de resíduos sólidos, uma vez que diferentes tipos de resíduos contêm diferentes quantidades de carbono orgânico degradável (*DOC*). O IPCC fornece valores padrões para o *DOC* e também fórmulas para se estimar a quantidade de carbono armazenada. A ferramenta estima o *DOC* através das equações do modelo IPCC a partir da composição dos resíduos gerados. Dados da caracterização gravimétrica de Juiz de Fora e para locais situados na América do Sul, conforme apresentado na Figura 5, foram utilizados para a estimativa do *DOC*.

O *Passo 4* é definido como a qualidade do local de disposição dos resíduos fornecendo alternativas de A até E. Como a alternativa D refere-se a Aterro Sanitário, foi a opção inserida. A partir da escolha da qualidade do local de disposição dos resíduos retornam-se os seguintes parâmetros sugeridos pelo IPCC (2006):

- ✓ Fator de correção do metano (*MCF*), que depende da forma de operação do aterro e é atribuído a cada uma das categorias: Gerenciado – anaeróbio, Gerenciado: semi aeróbio, Não gerenciado: profundo (> 5m resíduos), Não gerenciado: raso (< 5 m de resíduos) e Sem categoria;
- ✓ Fator de oxidação (*OX*), que reflete a quantidade de CH<sub>4</sub> dos resíduos sólidos que é oxidada no solo ou outro material que cobre os resíduos. O valor padrão para fator de oxidação é zero. O uso do valor da oxidação de 0,1 é justificado para os aterros sanitários cobertos e bem-controlados.

Para os parâmetros descrito anteriormente a planilha retornou o valor de *MCF* igual a 1, Gerenciado: anaeróbio; e para *OX* o valor de 0,1. Em seguida se requer a fração de metano presente no biogás (*f*); caso o aterro não possua o valor real da quantidade de metano presente no biogás deve-se utilizar o valor padrão fornecido pelo IPCC. Para este modelo também se adotou 50%, valor padrão utilizado por USEPA (2005) e IPCC (2006).

O *Passo 5* requisita a recuperação de CH<sub>4</sub> no aterro em t/ano. Como a finalidade deste estudo foi estimar-se toda emissão de metano no aterro, sem levar em consideração a recuperação, a entrada de CH<sub>4</sub> recuperado para o calculo foi igual a zero mesmo tendo que no referente município há a recuperação de metano.

Na Tabela 2 estão apresentados os dados de entrada para a metodologia do *GHG Protocol*. Verificam-se, ainda, na mesma tabela, os dados retornados pela própria ferramenta que servem para os cálculos.

**Tabela 2 - Dados de Entrada IPCC - GHG PROTOCOL**

Parâmetros	Dados de Entrada
Município	Juiz de Fora - MG
Precipitação Anual	≥1000 (mm)
Temperatura Média Anual	≤ 20 (°C)
Entrada da massa de resíduos em cada ano	RDO – 2011 a 2016
Composição Gravimétrica	
Qualidade do local de disposição dos resíduos	D - aterro sanitário
Fator de correção do metano	1
Fator de oxidação	0,1
Fração de metano	50%
Metano recuperado	0 (t/ano)

Para esta metodologia a própria ferramenta proporciona os dados diretos de emissão de CO<sub>2</sub>e.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta a estimativa de emissão de CH<sub>4</sub> para o período de 2011 a 2016, a partir do modelo *LandGem*.

**Tabela 3 - Emissão de CH<sub>4</sub> a partir do modelo *LandGem*.**

Ano	Emissão de CH <sub>4</sub> (t/ano)
2011	793,6
2012	1.711,00
2013	3.115,00
2014	4.013,00
2015	4.931,00
2016	5.470,00

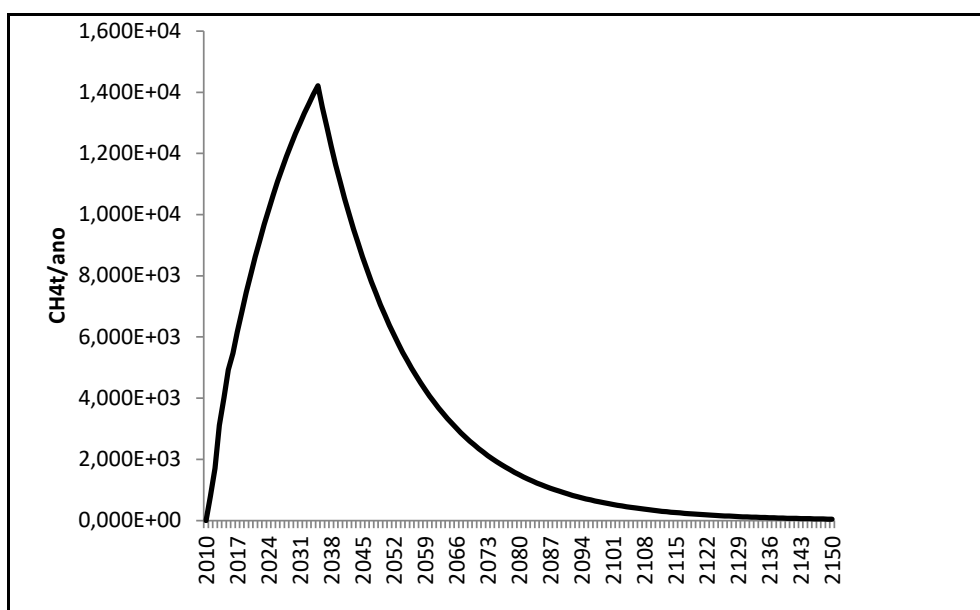
Pode-se perceber que a geração de metano é crescente, pois a cada nova tonelada depositada, mesmo sofrendo decréscimos e acréscimos ao decorrer dos anos, soma-se um novo potencial de geração de biogás, a partir da degradação anaeróbia e pelos organismos metanogênicos.

Tal padrão para a geração de metano pode ser justificado devido a disposição frequente de resíduos, pois isto contribui para que se mantenha uma umidade adequada, advinda da fração orgânica e chuvas, fator este que é essencial para a geração de gás. A água lixivia substâncias dos resíduos, que entram na fase aquosa e se tornam acessíveis aos microorganismos. O teor de nutrientes da fase aquosa é o segundo parâmetro mais importante, pois o crescimento de uma população bacteriana é essencial para a produção de gases e depende de nutrientes para o metabolismo (MCBEAN, ROVERS e FARQUHAR, 1995).

A disposição de resíduos diária também contribui para que o aterro passe por diferentes etapas do processo de decomposição, simultaneamente, em diferentes pontos dentro do maciço. Assim, conforme as fases existentes dentro de um aterro já apresentadas, o resíduo que se aterra hoje irá contribuir para a emissão de metano somente quando o aterro atingir sua fase anaeróbia e isso levará um tempo. Ressalta-se, ainda, que alguns compostos complexos têm degradação tardia, quando comparados com a fração orgânica mais simples.

Figueiredo (2012) utilizou o modelo *LandGem*, através da ferramenta na versão 3.02, para estimar a emissão de CH<sub>4</sub> proveniente dos resíduos sólidos urbanos (RSU) para o estado de Minas Gerais, proposto em quatro cenários. Para o município de Juiz de Fora os valores obtidos em cada cenário, para o ano de 2016, foram 4.699,38 t/ano, 4.960,02 t/ano, 4.396,33 t/ano e 4.376,97 respectivamente. Observa-se que a emissão de CH<sub>4</sub> apresentada na Tabela 3 para o ano de 2016 é maior que as emissões obtidas por Figueiredo (2012) fato que pode ser justificado devido as diferenças nos dados de entrada referentes aos resíduos, já que o estudo em questão baseia-se nos RDO e Figueiredo (2012) nos RSU.

A ferramenta do método *LandGem* estimou emissões de 2010 a 2150 (Figura 4) para o aterro de Juiz de Fora, fundamentado nos dados inseridos, onde pode-se observar que o pico de geração de metano coincide com o ano do encerramento do aterro considerado, 2035. Isso ocorre porque o modelo considera que no ano de encerramento da vida útil a quantidade disposta de resíduos é máxima, acarretando em um maior potencial de geração ( $L_0$ ), desconsiderando que parte desta matéria orgânica não gera mais metano, ou contribui minimamente para tal geração, em função de sua estabilização.



**Figura 4 - Projeção da emissão de CH<sub>4</sub> a partir do método *LandGem* (2010 - 2150)**

Com o fechamento é cessada a disposição de resíduos, o que explica o decaimento da geração de gás o qual é dirigido pela constante  $k$ . Os estágios anaeróbicos se tornam dominantes e assim permanecem, até que todos os compostos disponíveis tenham sido decompostos.

A Tabela 4 apresenta a estimativa da geração anual de CH<sub>4</sub> segundo metodologia estabelecida pelo IPCC (2006), utilizada pelo *GHG Protocol* considerando-se que o biogás possui 50% de metano em sua composição e 50% de dióxido de carbono, conforme já mencionado.

**Tabela 4 Projeção da emissão de CH<sub>4</sub> pelo aterro de Juiz de Fora a partir do método IPCC-GHG PROTOCOL**

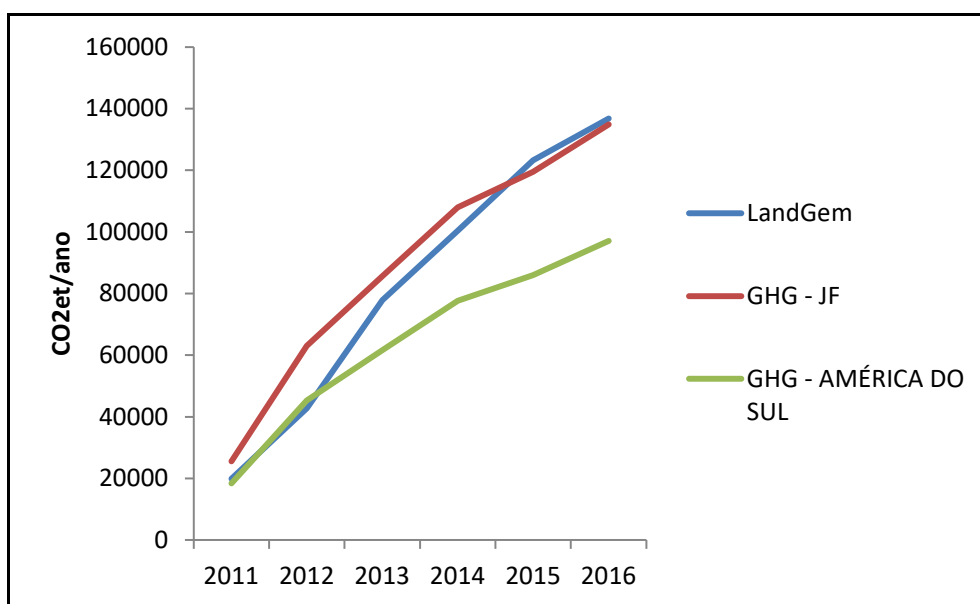
Ano	Emissão de CH <sub>4</sub> (t/ano) (considerando dados locais)	Emissão de CH <sub>4</sub> (t/ano) (considerando parâmetros da América do Sul)
2011	1.020,49	733,921
2012	2.521,07	1.813,11
2013	3.425,40	2.463,49
2014	4.320,11	3.106,95
2015	4.780,75	3.438,23
2016	5.396,41	3.881,00

Com a aplicação deste modelo observa-se que a emissão de metano também é crescente, convergindo com os resultados obtidos pelo primeiro método. Pode-se verificar através desta metodologia que a composição de resíduo é um dos fatores de maior relevância na avaliação do potencial de geração de gás de um local devido às variações nos valores de geração de metano estabelecidas, quando se utiliza parâmetros locais ou parâmetros para América do Sul.

A composição gravimétrica estabelecida pelo IPPC (2006) para localidades na América do Sul apresenta uma fração maior de orgânico (45%) do que a composição gravimétrica de Juiz de Fora (42%), logo pode-se perceber a importância das demais frações, pois ainda sim, mesmo tendo uma fração maior de orgânico, o método aplicado com base nessa caracterização não possui maior geração de metano. Acontecimento este que pode ser devido à menor fração de inertes existentes na caracterização de Juiz de Fora, já que a fração inerte, tal como cinza, solo, metais, plásticos e outros materiais não sofrem decomposição. Materiais inertes como os

sacos plásticos isolam a matéria orgânica da umidade e temperaturas internas no aterro, que reduzem a velocidade da reação química fazendo com que o aterro produza  $\text{CH}_4$  em níveis inferiores aos do máximo teórico (ABRELPE, 2013). Alguns resíduos que não sofrem decomposição, como a madeira, que não são inertes, mas se decompõem lentamente, na prática não contribuíram de forma considerável para a geração de gás. A caracterização gravimétrica de Juiz de Fora considera frações para resíduos de jardins e parques, que segundo Martins (1980), possui potencial energético. Logo essa fração também contribui para uma maior emissão de  $\text{CH}_4$  quando comparada com a estabelecida pelo IPPC (2006) para localidades na América do Sul.

Para avaliar as duas metodologias empregadas nesse trabalho, foi feita uma análise comparativa dos resultados encontrados para a geração de metano. Apresenta-se na Figura 5 o gráfico das emissões de dióxido de carbono equivalente.



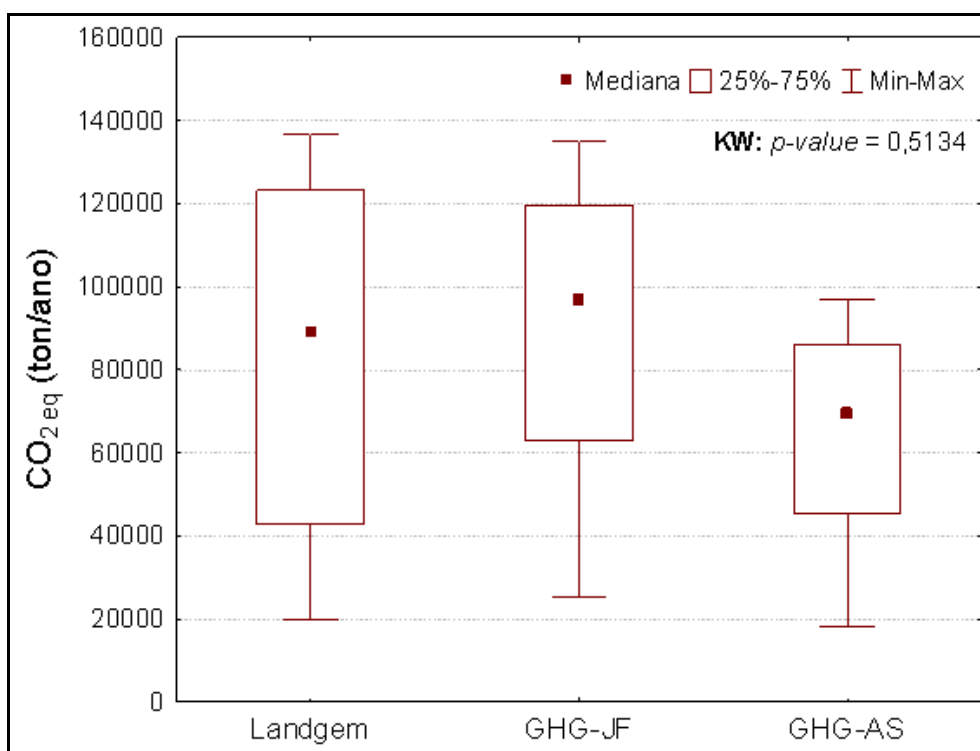
**Figura 5 - Emissão de  $\text{CO}_2\text{e}$  a partir de cada método**

Através da avaliação dos resultados encontrados, pode-se observar que os valores para a emissão de dióxido de carbono equivalente convergem na mesma ordem de grandeza entre as metodologias e a caracterização gravimétrica é de suma importância para as análises.

O modelo *LandGem* não introduz essa caracterização, mas seu  $L_0$  foi estabelecido com base em caracterizações gravimétricas, logo percebe-se que este fator é uma limitação para o método em questão, considerando que o Brasil apresenta uma fração de orgânicos mais elevada do que os demais.

Dessa forma pode-se relatar que não existe uma equação simples ou constante de taxa de geração de GEE em aterros que possa descrever adequadamente a decomposição dos resíduos sólidos devido à existência de muitos tipos de materiais que sofrem decomposição, mas sim determinar qual modelo existente se enquadra com a individualidade do local. No ano de 2010, as emissões de  $\text{CO}_2\text{e}$  no estado de Minas Gerais devidas ao aterramento de resíduo sólido foram de 3.200.000 t/ano (MCTI, 2015).

Com o objetivo de se comparar-se os métodos e os diferentes cenários quanto à tendência central dos dados, adotou-se o teste não paramétrico *Kruskal Wallis* (SIDIA, 2007). Ele é usado para testar a hipótese nula de que todas as populações possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos duas das populações possuem funções de distribuição diferentes. A Figura 6 nos fornece o resultado da aplicação deste teste, fundamentado nos dados de emissão gerados pelos diferentes modelos e cenários (Juiz de Fora e América do Sul) para a série temporal avaliada (2011 – 2016). Não foi possível evidenciar diferenças significativas entre as estimativas de emissões de gases ( $\text{CO}_2\text{e}$ ), nas diferentes condições, a 95% de confiança.



**Figura 6 - Resultado de comparações entre os modelos - *Kruskal Wallis*.**

Valores medianos estimados pelos modelos *LandGem* e *GHG*, para o município de Juiz de Fora, apresentaram valores superiores a 85.000 e 95.000 toneladas por ano, respectivamente, uma diferença não considerada significativa com base na análise estatística. Tal fato ratifica as observações já mencionadas que, independentemente do modelo, os resultados estimados para o cenário objeto do estudo tendem à previsão de valores significativamente próximos. Análises anteriores indicam que Juiz de Fora, com base na gravimetria específica dos resíduos destinados ao aterro sanitário, tem tendência de estimativa de emissões superiores ao cenário da América do Sul, fato também corroborado pela representação gráfica dos valores medianos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o estudo entende-se que as modelagens são necessárias para entender o processo de emissões de GEE, onde o setor de destinação de RSU é um dos principais contribuintes no Brasil, o que foi evidenciado no último Inventário Nacional das Emissões de Gases de Efeito Estufa (MCTI, 2015). As emissões foram calculadas por ambos modelos, utilizando-se diferentes cenários, porém, as diferentes avaliações convergiram para resultados quantitativos próximos, sem apresentarem diferenças significativas a 95% confiança. Para que haja um menor impacto sob o ponto de vista dessas emissões de GEE, é necessário gerar as condições para o desenvolvimento de projetos de mitigação. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi um mecanismo que incentivou efetivamente a formulação e o desenvolvimento de projetos de mitigação e redução de emissões em aterros sanitários no país, visando diminuir os impactos ambientais. Por fim, por conta das estimativas calculadas, bem como as análises feitas ao longo do corpo textual deste trabalho, acredita-se que os dados, aqui apresentados, fornecem uma visão útil no que diz respeito às emissões GEE a partir da disposição final dos resíduos, auxiliando tomada de decisões no planejamento da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Atlas brasileiro de emissões de gases de efeito estufa e potencial energético na destinação de resíduos sólidos. São Paulo, 2013.
2. ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo, 2017.
3. AKINCI, G.; GUVEN, E. D.; GOK, G. *Evaluation of waste management options and resource conservation potentials according to the waste characteristics and household income: A case study in Aegean Region, Turkey*. Resources, Conservation and Recycling, 2012.
4. BIANEK, J., SCHIRMER, W. N., CABRAL, A. R., MAYER, C. L. D., EURICH, P. H. M. e MARTINS, E. H. Comparação Entre Metodologias USEPA e IPCC para Estimativa Teórica de Produção de Biogás em Aterro Municipal. *Biofix Scientific Journal*, 2018.
5. BORBA, S. M. P. Análise De Modelos De Geração De Gases Em Aterros Sanitários: Estudo De Caso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
6. BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos que altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF
7. BRASIL. Presidência da República. Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF
8. BRASIL. MCTI, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, 2015. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF
9. CESAMA, Companhia de Saneamento Municipal (2010). Hidrografia em Juiz de Fora.
10. COSTA, A. M. C. D., CONSTANTE, A. M. G., RIBEIRO, M. M., HONORIO, N. S. e OLIVEIRA, N. M. Dimensionamento de Diferentes Cenários na Destinação de Resíduos Sólidos no Aterro Sanitário – CPGRS1. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 2016.
11. DEMLURB, Departamento Municipal de Limpeza Urbana. DEMLURB, 2010. Disponível em: <<http://www.demlurb.pjf.mg.gov.br/>>. Acesso em Setembro de 2018.
12. EPA, *Environmental Protection Agency*. *Landfill Gas Emissions Model*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/>> Acesso em Setembro de 2018.
13. FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente. Geração per capita, peso específico e composição gravimétrica dos RSU nos municípios de Minas Gerais. 2015.
14. FIGUEIREDO, C. J. Estimativa de Produção de Biogás e Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
15. FIRMO, A. L. B. Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
16. FILHO, LUIZ FERNANDES DE BRITO. Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. XV, 222 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2005
17. GHG PROTOCOL. Programa Brasileiro GHG PROTOCOL. Disponível: <https://www.ghgprotocolbrasil.com.br/> Acesso em: Outubro de 2018
18. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE Cidades. IBGE, 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora>>. Acesso em: Outubro de 2018.
19. IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>. Acesso em Outubro de 2018.
20. IPCC (2007). *Climate change 2007: Mitigation*. In B. Metz, et al. (Eds.) *Contr. Working Group III to the 4th Assess Report of the IPCC*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
21. MACHADO, L. L. N. Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
22. MARTINS, H. Madeira como fonte de Energia. In Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais / CETEC. Uso da Madeira para Fins Energéticos. Belo Horizonte; 1980.

23. MCBEAN, Edward; A. ROVERS, Frank; J. FARQUHAR, Grahame. *Solid Waste Landfill: Engineering And Design*. Pretice Hall PTR, 1995. 521 p.
24. MENESES, O. R. Análise estatística da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos do município de Juiz de Fora-MG com base no perfil socioeconômico. Juiz de Fora, 2016
25. MONTEIRO, J. H. P. et al. (2001) Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 200 p.
26. PJF, Prefeitura de Juiz de Fora. 2018. Disponível em: < <https://www.pjf.mg.gov.br/> >
27. SNIS, Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Coleta de Resíduos Sólidos, 2018.
28. SEEG, Sistema Nacional de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Emissões do Setor de Resíduos, 2018.
29. SIDIA, M. C. J. Bioestatística Princípios e Aplicações. Editora artmes, 2007.
30. SIQUEIRA, H. E. et al. (2016) Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Nova Ponte (MG), Revista DAE, v. 64, p. 39-52.
31. STREB, C. S.; NAGLE, E. C. & TEIXEIRA, E. N. (2004) Caracterização do resíduo sólido doméstico: metodologia para avaliação do potencial de minimização. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 29, 2004, San Juan. Anais... San Juan: AIDIS.
32. THOMPSON, S.; SAWYER, J.; BONAM, R.; VALDIVIA, J. E. *Building a better methane generation model: validating models with methane recovery rates from Canadian landfills*. Waste Management, v. 29, n. 7, p. 2085–2091, 2009. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/wasman](http://www.elsevier.com/locate/wasman)>.
33. USEPA, United States Environmental Protection Agency. *First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills (EPA-600/R-05/072)*. Washington, 2005. 66 p.
34. VEGA, C. A.; BENÍTEZ, S. O.; BARRETO, M. E. R. (2008) *Solid waste characterization and recycling potential for a university campus*, Waste Management, v. 28, p. S21-S26.
35. VITAL. Vital Engenharia Ambiental. Disponível : <<http://www.vitalambiental.com.br/>> Acesso em Setembro, 2018.