



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
***CAMPUS CHAPECÓ***  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**GRAZIELY ROSSI**

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO URBANO**  
**LOCALIZADO NO SUL DO BRASIL**

**CHAPECÓ – SC**  
**2019**

**GRAZIELY ROSSI**

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO URBANO  
LOCALIZADO NO SUL DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção de grau de  
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da  
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Me. Janaina Goerck

**CHAPECÓ – SC**

**2019**

**GRAZIELY ROSSI**

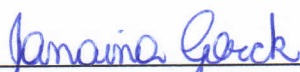
**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO  
SANITÁRIO URBANO LOCALIZADO NO SUL DO BRASIL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

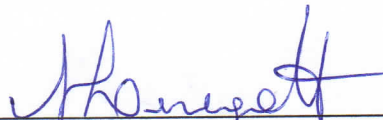
Orientadora: **Profa. Janaina Goerck**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 04 / 12 / 2019

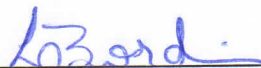
**BANCA EXAMINADORA**



\_\_\_\_\_  
**Profa. Me. Janaina Goerck - UFFS**



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Mauro Leandro Menegotto - UFFS**



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Leandro Bordin - UFFS**

# ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO URBANO LOCALIZADO NO SUL DO BRASIL

## *ESTIMATIVE OF THE BIOGAS GENERATION FROM A LANDFILL LOCATED IN SOUTH BRAZIL*

Graziely Rossi<sup>1</sup>  
Janaina Goerck<sup>2</sup>

### Resumo

O biogás é produto da digestão anaeróbia de matéria orgânica, sendo o aterro sanitário urbano um dos principais geradores deste gás. O metano é o principal componente do biogás, portanto o aproveitamento energético é uma opção que deve ser considerada, sendo para isso necessário estimar a produção do biogás em aterros sanitários de resíduos sólidos, para posterior avaliação de sua aplicabilidade prática e econômica. Os objetivos do presente trabalho foram estimar a geração de biogás em aterro sanitário urbano situado na região sul do Brasil, por meio de modelos e programas computacionais existentes e levantar alternativas e/ou formas de utilização do biogás gerado. A composição do biogás no aterro sanitário em questão foi de 50,23% de metano, 38,35% de CO<sub>2</sub>, 2,40% de O<sub>2</sub>, e 9,02% dos demais componentes (outros). Na aplicação dos modelos de estimativa de geração, obteve-se como resultado pelo modelo IPCC Waste Model (2006) um total acumulado de 5.633.207.689 m<sup>3</sup>. A geração total acumulada de biogás para o Método de Projeto foi de 2.158.542.371 m<sup>3</sup> e para o modelo LandGEM 3.371.469.805 m<sup>3</sup>. Por fim, as principais alternativas de aproveitamento do biogás são na forma de energia elétrica, energia térmica e biometano, fazendo do biogás um combustível renovável que deve ser aproveitado.

**Palavras-chaves:** Biogás. Aterro sanitário. Aproveitamento energético. Metano.

### Abstract

Biogas is the product of anaerobic digestion from organic matter, being the urban landfill one of the main generators of this gas. Methane is the major component of biogas, therefore energy use is an option that should be considered being necessary for this, to estimate biogas production in solid waste landfills, for further evaluation of its practical and economic applicability. This study aimed to estimate biogas generation from an urban landfill through existing computational models and programs and to raise alternatives and/or ways to use the generated biogas. The biogas composition from the landfill studied was 50.23% methane, 38.35% CO<sub>2</sub>, 2.40% O<sub>2</sub> and 9.02% of the other components (others). From the biogas estimation models, it was obtained an accumulated amount of 5,633,207,689 m<sup>3</sup> as a result of the IPCC Waste Model (2006). For the Design Method the amount accumulated was 2,158,542,371 m<sup>3</sup> and for the LandGEM model was 3,371,469,805 m<sup>3</sup>. Finally, the main alternatives for using biogas are in the form of electricity, thermal energy and biomethane, making the biogas a renewable fuel that should be used.

**Keywords:** Biogas. Landfill. Energy utilization. Methane.

---

<sup>1</sup> Acadêmica do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul; grazirossii@gmail.com

<sup>2</sup> Professora do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul; janainagoerck@gmail.com

## 43 INTRODUÇÃO

44 Desde que a Política Nacional de Resíduos Sólidos trouxe a obrigatoriedade para os  
45 municípios brasileiros de uma adequada gestão de resíduos, o aterro sanitário, mesmo longe  
46 de ser a solução ideal, tem sido a alternativa mais utilizada como método de disposição final  
47 ambientalmente segura no Brasil, devido seu baixo custo comparado às outras formas de  
48 destinação adequadas (ABRELPE, 2019). Logo, agregar valor à essa gestão é essencial para  
49 viabilizar o investimento e atrair o interesse da sociedade (VIEIRA *et al.*, 2015), além de  
50 aprimorar este método de disposição.

51 Um dos produtos finais da decomposição anaeróbica dos compostos biodegradáveis  
52 dos resíduos orgânicos é o biogás, composto predominantemente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido  
53 de carbono (CO<sub>2</sub>), gases apontados como agravantes do efeito estufa, mas que também  
54 apresentam alto potencial energético (ABRELPE, 2013; ICLEI, 2016). Outros gases também  
55 podem estar presentes na composição do biogás, como amônia (NH<sub>3</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), gás  
56 sulfídrico (H<sub>2</sub>S), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>), entretanto em menor quantidade. A  
57 composição e a distribuição exata do percentual de gases variam conforme os fatores: idade  
58 do aterro, composição dos resíduos dispostos, umidade, tamanho das partículas, temperatura,  
59 pH, idade dos resíduos, projeto do aterro e sua operação (BORBA, 2006; MINISTÉRIO DO  
60 MEIO AMBIENTE, 2019).

61 Assim, o biogás proveniente de aterros sanitários é uma fonte de energia desperdiçada  
62 quando não há o seu aproveitamento. Neste contexto, alguns projetos de aproveitamento  
63 energético do biogás proveniente de aterros sanitários vêm sendo realizados, trazendo além do  
64 benefício econômico, reduções nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Quando visam  
65 estes objetivos, podem se tornar projetos da ferramenta chamada Mecanismo de  
66 Desenvolvimento Limpo (MDL) que visam a redução ou que evitam a emissão de gases  
67 associados ao efeito estufa, passíveis de comercialização através dos chamados Créditos de  
68 Carbono.

69 A extração e utilização de biogás de aterros sanitários requerem previsões de emissão  
70 para garantir a viabilidade econômica do empreendimento e sua conformidade ambiental.  
71 Para esta finalidade podem ser utilizadas algumas metodologias que diferem em suas  
72 variáveis e considerações, por se tratarem principalmente de modelos internacionais. Sendo  
73 assim, há necessidade de estudá-las a fim de entendê-las e encontrar as mais adequadas à sua  
74 realidade de aplicação, além de aprimorar o conhecimento acerca deste assunto.

75 Neste contexto, os objetivos do presente trabalho foram estimar a geração de biogás  
 76 em aterro sanitário urbano situado na região sul do Brasil, através de modelos e programas  
 77 computacionais existentes, e, levantar alternativas e/ou formas de utilização do biogás gerado.

## 78 **METODOLOGIA**

### 79 **Caracterização da área de estudo**

80 Os dados utilizados para a realização deste trabalho provêm do maior aterro sanitário  
 81 de resíduos sólidos urbanos localizado no estado do Rio Grande do Sul. O mesmo atende 124  
 82 municípios, recebendo atualmente em média cerca de 3.500 toneladas de resíduos por dia.  
 83 Com o início de sua operação no ano de 2001, conta ainda com 20 anos de estimativa de vida  
 84 útil (CRVR, 2019). A região tem clima dominante do tipo Cfa de acordo com a classificação  
 85 Köppen, sendo assim subtropical úmido, com precipitação média anual de 1342 mm e  
 86 temperatura média anual de 19,3 °C (CLIMATE-DATA, 2019).

87 O aterro sanitário possui monitoramento do biogás gerado, sendo os dados de  
 88 qualidade deste gás analisados no presente trabalho.

89

### 90 **Projeção de geração de resíduos**

91 A massa de resíduos a ser depositada no aterro sanitário ao longo de sua vida útil, foi  
 92 estimada através de projeção populacional, até o ano de 2040, em que está previsto o  
 93 fechamento deste aterro. A projeção foi realizada por meio dos modelos aritmético e  
 94 geométrico, através da aplicação de dados reais da massa de resíduos que foi depositado do  
 95 ano de 2011 ao ano de 2017 (SNIS, 2019) apresentados na Tabela 1.

96

97 Tabela 1 – Massa de resíduos depositada no aterro sanitário.

Ano	Massa de resíduo [ton/ano]
2011	874.001,9
2012	973.256,2
2013	1.247.479,9
2014	1.151.561,5
2015	1.281.975,5
2016	1.141.647,5
2017	1.085.409

98

Fonte: Adaptado de SNIS (2019).

99 O modelo aritmético resultou em uma tendência mais coerente em relação a geração  
100 de resíduos, sendo este utilizado para alimentação dos dados dos modelos de estimativa de  
101 geração de biogás.

102

### 103 Modelos de estimativa de geração de biogás

104 Os modelos estudados neste trabalho são apresentados a seguir.

105

106 *IPCC Waste Model (2006)*

107 Desenvolvido pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, o *IPCC*  
108 *Waste Model* é recomendado pela CETESB (2019). Traz em suas diretrizes atualizadas em  
109 2006 o cálculo da massa de decomposição de carbono orgânico degradável (CODm) para o  
110 montante de material residual (Equação 1):

$$111 \quad \text{DDOCmd}(t) = W(t) * \text{COD} * \text{CODf} * \text{FCM} \quad (1)$$

112 Onde:

113 DDOCmd(t): massa de carbono orgânico degradável (COD) decomposto no ano t [t]; W(t): montante de resíduo  
114 no ano t [t]; COD: carbono orgânico degradável [kg.kg<sup>-1</sup>]; CODf: fração de COD dissociada [%]; FCM: fator de  
115 correção de metano.

116

117 O montante de CODm remanescente não decomposto até o final do ano de deposição  
118 t, é dado por (Equação 2):

119

$$120 \quad \text{DDOCmrem}(t) = \text{DDOCmd}(t) * e^{-k\left(\frac{13-M}{12}\right)} \quad (2)$$

121 Sendo:

122 DDOCmrem(t): massa de COD decomposto no ano t, remanescente não decomposto no fim do ano [t]; M: mês de  
123 início da reação [meses] (= tempo de atraso + 7).

124

125 Já o montante de decomposição CODm decomposto durante o ano t está descrito pela  
126 Equação 3:

127

$$128 \quad \text{DDOCmdec}(t) = \text{DDOCmd}(t) * (1 - e^{-k\left(\frac{13-M}{12}\right)}) \quad (3)$$

129 Em que:

130 DDOCmdec(t): massa de COD depositada no ano t, decomposta durante o ano [t].

131

132 O montante de CODm acumulado no aterro, no fim do ano t (Equação 4):

133

$$134 \quad \text{DDOCma}(t) = \text{DDOCmrem}(t) + (\text{DDOCma}(t - 1) * e^{-k}) \quad (4)$$

135 Onde:

136 DDOCma(t): massa total de COD deixada não decomposta no fim do ano t [t]; DDOCma(t - 1): massa total de  
137 COD deixada não decomposta no fim do ano t-1[t].

138

139 O total acumulado de CODm decomposto no ano t (Equação 5):

140

$$141 \quad \text{DDOCmdecomp}(t) = \text{DOCmdec}(t) + (\text{DDOCma}(t-1) + (1-e^{-k})) \quad (5)$$

142 Sendo:

143 DDOCmdecomp(t): massa total de COD decomposta no ano t [t];

144

145 O montante de metano gerado ( $\text{CH}_4$ ) para COD decomposto (Equação 6):

146

$$147 \quad \text{CH}_4 = \text{DDOCmdecomp}(t) * F * \frac{16}{12} \quad (6)$$

148 Onde:

149 F: fração de metano do volume de gás gerado no aterro;  $\frac{16}{12}$ : relação de peso molecular  $\text{CH}_4 \cdot \text{C}^{-1}$ .

150

151 E finalmente, para o montante de metano emitido têm-se a Equação 7:

152

$$153 \quad Q_{\text{CH}_4} = (\text{CH}_4(t) - R) * (1 - \text{OX}) \quad (7)$$

154 Onde:

155  $Q_{\text{CH}_4}$ : montante de metano emitido [t.ano<sup>-1</sup>]; R: recuperação do metano [t.ano<sup>-1</sup>]; OX: fator de oxidação.

156

157 *Método de Projeto*

158 Esta metodologia também desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos

159 Estados Unidos (USEPA) é recomendada para aterros sanitários ainda em fase de projeto, ou

160 seja, que ainda não estão em funcionamento, pois ainda não se sabe realmente o fluxo anual

161 de resíduos. Tal método se divide em duas etapas: uma enquanto o aterro ainda está em

162 operação e outra que é após o seu fechamento (USEPA, 1997; MENDES; SOBRINHO,

163 2005).

164 A modelagem é realizada por meio das equações 8 e 9, sendo a Equação 8 utilizada

165 enquanto o aterro está em operação, com o termo de cinética  $e^{-k*c}$  constante e igual a 1, e a

166 Equação 9 após o fechamento:

167

168 a) Durante a vida útil:

$$169 \quad Q = F * R * L_0 * (1 - e^{-k*t}) \quad (8)$$

170

171 b) Após o fechamento:

$$172 \quad Q = F * R * L_0 * (e^{-k*c} - e^{-k*t}) \quad (9)$$

173 Sendo:

174 Q: metano gerado [m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>]; F: fração de metano no biogás [%]; R: quantidade média de resíduos depositados175 durante a vida útil do aterro [kg.ano<sup>-1</sup>];  $L_0$ : potencial de geração de biogás [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>]; k: constante de decaimento



176 [ano<sup>-1</sup>]; t: tempo decorrido desde a abertura do aterro [anos]; c: tempo decorrido desde o fechamento do aterro  
177 [anos].

### 178 *Modelo LandGEM*

180 O modelo LandGEM 3.02 (Landfill Gas Emissions Model) é um *software*  
181 desenvolvido pela USEPA, com interface do Microsoft Excel. Pode ser utilizado para estimar  
182 as emissões de gases como metano, dióxido de carbono, poluentes atmosféricos individuais,  
183 entre outros, de aterros de resíduos sólidos (USEPA, 2005).

184 A modelagem matemática utilizado na configuração do software estima a produção de  
185 gases a partir da Equação 10 (USEPA, 2005; BIANEK *et al.*, 2018):

186

$$187 \quad Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (10)$$

188 Em que:

189  $Q_{CH_4}$ : geração anual de metano no ano do cálculo (m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>); i: incremento de tempo de 1 ano; n : (ano do  
190 cálculo) – (ano inicial de deposição de resíduos); j: incremento de tempo de 0,1 anos; k: taxa de geração de  
191 metano [ano<sup>-1</sup>]; L<sub>0</sub>: capacidade potencial de geração de metano [m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>]; M<sub>i</sub>: massa de resíduos disposta no i-  
192 ésimo ano [t]; t<sub>ij</sub>: idade da j-ésima seção de M<sub>i</sub> disposta no i-ésimo ano [anos].

193

### 194 *Considerações para aplicação dos modelos*

195 Devido a atualização do modelo IPCC 2001 para o de 2006, considerou-se apenas o  
196 modelo mais atualizado (2006). Entretanto, a base da modelagem e algumas considerações do  
197 IPCC 2001 são necessárias para entendimento e aplicação do IPCC 2006 assim como dos  
198 demais métodos.

199 A metodologia do modelo matemático *do Intergovernmental Panel on Climate*  
200 *Change* (IPCC, 2001) é apresentada a seguir (Equação 11):

201

$$202 \quad Q_{CH_4} = (k * A * MSWt * MSWf * L_0 * e^{-kt} - R) * (1 - OX) \quad (11)$$

203 Sendo:

204  $Q_{CH_4}$ : metano gerado [t.ano<sup>-1</sup>]; k: constante de decaimento [ano<sup>-1</sup>]; A: fator de normalização para a soma,  $A =$   
205  $\frac{1-e^{-k}}{k}$ ; MSWt: quantidade total de resíduos sólidos urbanos gerados no ano [t.ano<sup>-1</sup>]; MSWf: fração de resíduos  
206 sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos; L<sub>0</sub>: potencial de geração de  
207 metano do resíduo [t de CH<sub>4</sub>.t de resíduo<sup>-1</sup>]; t: ano de cálculo [ano]; R: recuperação do metano [t.ano<sup>-1</sup>]; OX: fator  
208 de oxidação.

209

210 A constante de decaimento (k) varia em função da disponibilidade de nutrientes, pH,  
211 temperatura e principalmente umidade e precipitação pluviométrica da região, estes valores  
212 variam de 0,01 ano<sup>-1</sup> a 0,09 ano<sup>-1</sup>, como observado na Tabela 2 (NECKER; ROSA, 2013):

213

214

215 Tabela 2 – Valores sugeridos para k [ano<sup>-1</sup>].

Precipitação anual	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
<205 mm	0,01	0,02	0,03
>250 a <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 a <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

216 Fonte: Adaptada de IPCC (1996).

217

218 O potencial de geração de metano ( $L_0$ ) representa a produção total de metano (m<sup>3</sup> de  
 219 metano por tonelada de resíduo, ou tonelada de metano por tonelada de resíduo), a partir do  
 220 teor de carbono orgânico degradável (COD) dos resíduos. No caso dos resíduos sólidos  
 221 urbanos, o valor é estimado usando a composição dos resíduos (alimentos, papel, madeira,  
 222 têxteis e jardim) (MENDES; SOBRINHO, 2005; BIANEK *et al.*, 2018).

223 O potencial de geração de metano a partir do resíduo ( $L_0$ ) pode ser obtido pela  
 224 Equação 12:

$$225 L_0 = FCM * COD * CODf * F * \left(\frac{4}{3}\right) \quad (12)$$

226 Onde:

227  $L_0$ : potencial de geração de metano do resíduo [t de CH<sub>4</sub>.t de resíduo<sup>-1</sup>]; FCM: fator de correção de metano; COD:  
 228 carbono orgânico degradável [kg.kg<sup>-1</sup>]; CODf: fração de COD dissociada [%]; F: fração em volume de metano no  
 229 biogás; 4/3: fator de conversão de carbono em metano [kg.kg<sup>-1</sup>].

230

231 O fator de correção de metano (FCM) varia conforme o local, adotando-se os valores  
 232 apresentados na Tabela 3:

233

234 Tabela 3 – Tabela de valores para o FCM.

Tipo de local de disposição	FCM
Lixão	0,4
Aterro controlado	0,8
Aterro sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

235 Fonte: Adaptada de IPCC (1996).

236

237 O carbono orgânico degradável (COD) é um dos principais parâmetros que afetam  
 238 as emissões de CH<sub>4</sub> provenientes de resíduos sólidos. É estimado com base na composição

239 dos resíduos e suas frações de materiais (IPCC, 1996). O cálculo do COD se dá através da  
 240 Equação 13:

$$241 \quad \text{COD} = (0,40 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,40 * D) + (0,30 * E) \quad (13)$$

242 Sendo:

243 COD: carbono orgânico degradável [kg.kg<sup>-1</sup>]; A: fração de papel e papelão; B: fração de resíduos de parques e  
 244 jardins; C: fração de restos de alimentos; D: fração de tecidos; E: fração de madeira.

245

246 A fração de carbono orgânico degradável dissociada (CODf) indica a fração de carbono  
 247 que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida através da Equação 14:

248

$$249 \quad \text{CODf} = 0,014 * T + 0,28 \quad (14)$$

250 Onde:

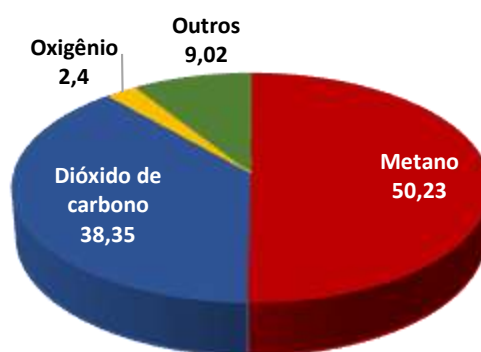
251 CODf: fração de COD dissociada; T: temperatura na zona anaeróbia [°C].

252

## 253 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 254 *Composição do biogás*

255 Com o monitoramento do sistema de biogás proveniente do aterro sanitário, a empresa  
 256 responsável pela gestão dispõe de dados como a composição dos gases, entre outros. Com os  
 257 dados do ano de 2015 disponíveis, a média mensal da composição do biogás para este ano é  
 258 apresentado no gráfico da Figura 1, a seguir:



259

260 Figura 1 – Composição do biogás do aterro sanitário [%].

261

Fonte: Adaptado CRVR, 2019.

262

263 A porção de metano corresponde a cerca da metade da composição deste biogás, sendo  
264 a maior parcela, 50,23%, resultado esperado, uma vez que o biogás, geralmente em aterros  
265 sanitários, apresenta concentrações iniciais de metano em torno de 50% (alguns meses após o  
266 aterramento), estabilizando-se em valores em torno de 60 a 65% (cerca de um a dois anos  
267 após aterramento) (ENSINAS, 2003). A parcela de CO<sub>2</sub> resultou em média de 38,35%, o  
268 oxigênio em 2,40% e os demais componentes (outros) em 9,02%.

269 A proporção de metano se assemelha à resultados em estudos realizados em diferentes  
270 aterros do Brasil, entre eles temos Brito Filho (2005), que relata, para ensaios realizados nos  
271 gases provenientes do aterro sanitário de Nova Iguaçu-RJ, valores de metano variando entre  
272 44 e 76%. Já os valores de dióxido de carbono variando entre 8 e 15%, são menores aos  
273 observados no aterro deste estudo.

274 A composição média do biogás coletado no aterro Delta, localizado na cidade de  
275 Campinas - SP, no estudo de Ensinas (2003), foi de 55,13% de CH<sub>4</sub>, 44,16% de CO<sub>2</sub> e 0,71%  
276 de H<sub>2</sub>, resultados mais próximos dos trazidos aqui. Estes distintos teores refletem a  
277 variabilidade da composição do biogás com diversos fatores como a composição do resíduo, o  
278 clima da região, e características do próprio aterro sanitário.

279

280 *Modelo IPCC Waste Model (2006)*

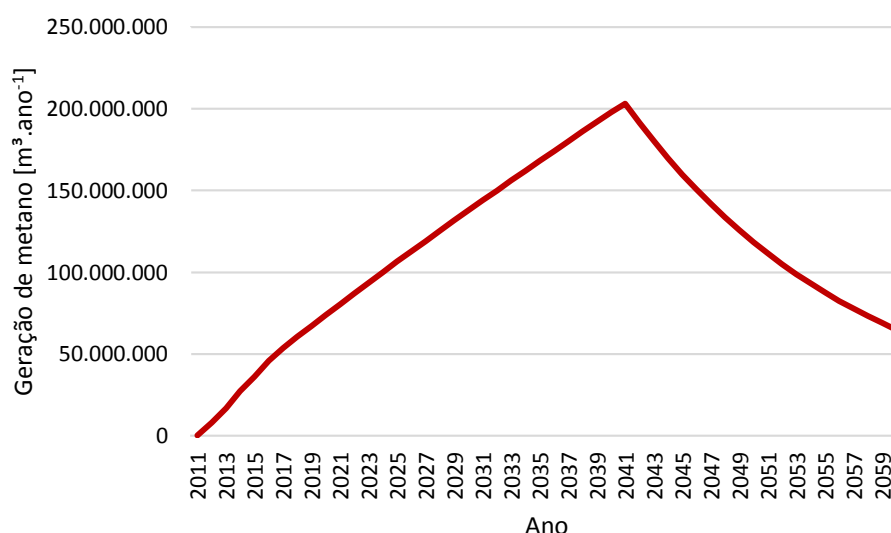
281 Para aplicação do IPCC Waste Model (2006), e demais métodos, foram utilizados os  
282 dados de massa real de resíduos dispostos e as estimadas através da projeção aritmética,  
283 considerando como primeiro ano de inventário o ano de 2011 e a interrupção de disposição de  
284 resíduos no ano de 2040, simulando o fechamento do aterro sanitário. Também, considerou-se  
285 a fração de 50% de metano no biogás, valor aproximado encontrado na análise de composição  
286 de biogás para este aterro sanitário em questão, além de ser o valor usual da fração de CH<sub>4</sub>  
287 presente em biogás de aterro sanitário (TOMAZI; MAAS, 2012).

288 Para o cálculo de carbono orgânico degradável (COD) utilizou-se a composição de  
289 resíduos urbanos do município de Porto Alegre/RS (FLECK; REICHERT, 2016), o qual tem  
290 a maior representatividade devido a maior contribuição de montante de resíduos dispostos no  
291 aterro. Com o percentual de 9,91% de papel e papelão, 61,39% de matéria orgânica e  
292 anulando as parcelas restantes, resultou no valor de COD = 0,131725 kg.kg<sup>-1</sup>. Já a fração de  
293 carbono orgânico degradável (COD<sub>f</sub>), resultou no valor de 0,77 ao ser utilizado 35 °C para a  
294 temperatura da zona anaeróbica (valor médio da faixa ótima de temperatura para a geração de  
295 metano que varia de 30 °C a 40 °C, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2019)).

296 A constante de decaimento  $k$  foi definida a partir de dados da precipitação média anual  
 297 da região, bem como da consideração de resíduos moderadamente degradáveis, sendo então  
 298 definido o valor de  $0,06 \text{ ano}^{-1}$  (Tabela 2). Para o fator de correção de metano (FCM), adotou-  
 299 se o valor 1, uma vez que se trata de aterro sanitário (Tabela 3). O fator de oxidação (OX) e  
 300 recuperação de metano (R) foram considerados nulos devido à falta de estudos para a adoção  
 301 de valor adequado.

302 O comportamento da geração de metano ao longo do tempo resultante da aplicação da  
 303 metodologia IPCC (2006) está apresentado na Figura 2, a seguir:

304



305

306 Figura 2 – Geração de metano ao longo do tempo pelo IPCC Waste Model.

307

Fonte: Autores.

308

309 O comportamento resultante é de geração crescente de metano até o ano de 2041, com  
 310 um decaimento a partir deste mesmo ano. O pico máximo de produção de metano segundo  
 311 este método ocorreu no ano de 2041, com o valor de  $203.191.439 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ . O total acumulado  
 312 do ano de 2011 ao ano de 2060 é de  $5.633.207.689 \text{ m}^3$ .

313

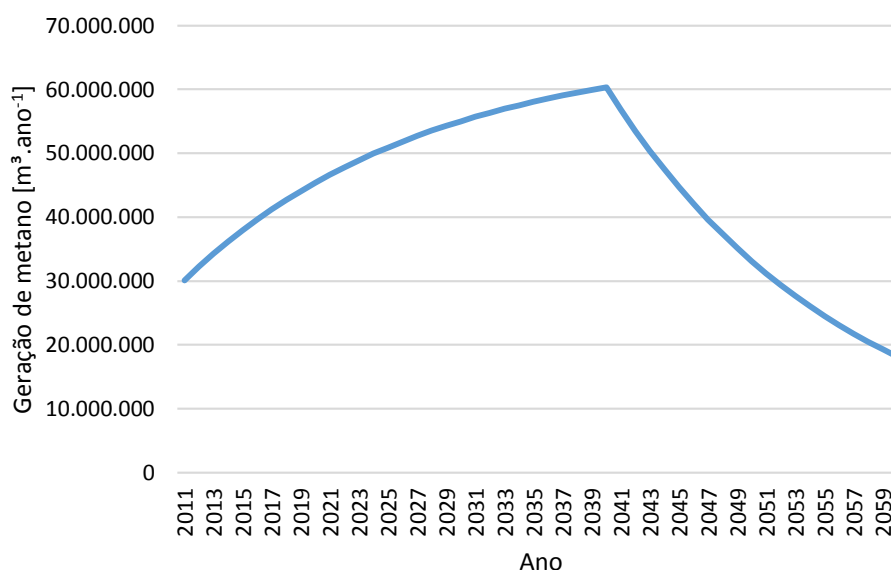
### 314 *Método de Projeto*

315 Para a aplicação deste método, considerou-se os mesmos valores de fração de metano  
 316 no biogás (50%) e constante de decaimento ( $k=0,06 \text{ ano}^{-1}$ ), bem como o cálculo do potencial  
 317 de geração de metano ( $L_0$ ) sugeridos nos modelos IPCC. Considerando o fator de correção de  
 318 metano como 1 (Tabela 2), e COD e COD<sub>f</sub> como apresentados anteriormente, chegou-se ao  
 319 resultado calculado de  $0,094334 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$  para  $L_0$ . O tempo considerados para a Equação 8,

320 representando o comportamento durante a vida útil do aterro, foram de 2011 até 2040, já a  
 321 aplicação da Equação 9, representando o fechamento do aterro, se deu do ano de 2041 ao de  
 322 2060.

323 Utilizando o valor de 1.414.815.503,34 kg.ano<sup>-1</sup> (1.414.815,5 ton.ano<sup>-1</sup>) como a média  
 324 de resíduos depositados no aterro ao longo de sua vida útil, chegamos ao comportamento da  
 325 produção de metano apresentado na Figura 3.

326



327

328 Figura 3 – Geração de metano ao longo do tempo pelo Método de Projeto.

329

Fonte: Autores.

330

331 Pode-se observar a produção de metano crescente durante o período de recebimento de  
 332 resíduos, que alcança seu valor máximo no ano de 2040, com o valor de 60.304.607 m³.ano<sup>-1</sup>.  
 333 Já o acumulado levando em consideração o período de tempo de 2011 a 2060, é de  
 334 2.158.542.371 m³.

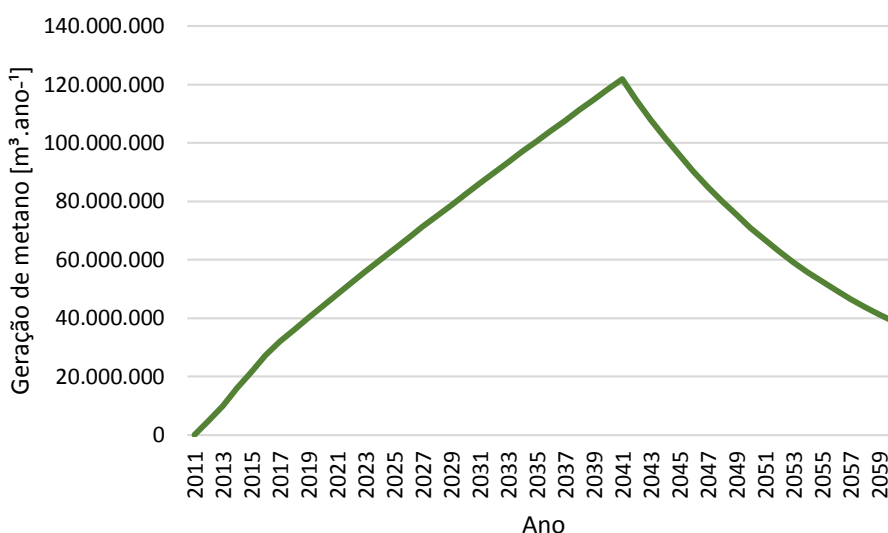
335

### 336 *Modelo LandGEM*

337 Na aplicação do modelo LandGEM, através do software, foram utilizados como dados  
 338 de entrada os mesmos valores de Lo e k calculados e sugeridos anteriormente pelos modelos  
 339 IPCC, a fim de uma melhor comparação entre todos os modelos.

340

Como resultado, tem-se o gráfico a seguir, apresentado na Figura 4:



341

342

Figura 4 – Geração de metano ao longo do tempo pelo modelo LandGEM.

343

Fonte: Autores.

344

345

346

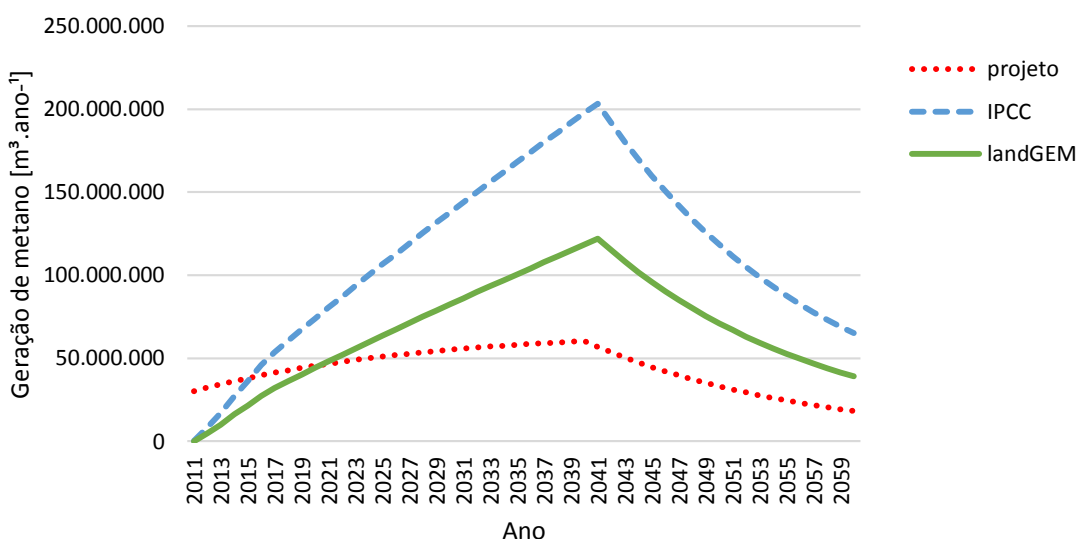
Este modelo apresenta o ano de pico em 2041, bem como o modelo do IPCC (2006),  
 346 entretanto o valor máximo de geração de metano é de 121.865.899 m³.ano<sup>-1</sup>. Para este  
 347 modelo, o total acumulado ao longo do tempo de estudo (2011 a 2060) é de 3.371.469.805 m³.

348

349

A fim de melhor comparação entre os resultados apresentados, a Figura 5 traz o  
 349 comportamento dos três modelos que melhor representaram o comportamento esperado do  
 350 biogás no aterro sanitário de resíduos sólidos do sul do Brasil:

351



352

353

Figura 5 – Geração de metano ao longo do tempo por modelo.

354

Fonte: Autores.

355 Todos os modelos apresentados trazem comportamentos semelhantes, com seu pico  
356 máximo de geração de biogás entre os anos de 2040 e 2041, tempo em que se estima o  
357 encerramento das atividades no aterro sanitário, de modo que a geração de biogás tende a  
358 decair devido a interrupção no abastecimento de resíduos e consequentemente de matéria  
359 orgânica.

360 O modelo apresentado pelo IPCC (2006) resultou no maior montante de todos os  
361 modelos aplicados. Este resultado pode ser superestimado para aterros em operação, como já  
362 observado em outros trabalhos realizados em aterros sanitários brasileiros (MENDES;  
363 SOBRINHO, 2005; SANTOS; ROMANEL; van ELK, 2017). Já o Método de Projeto,  
364 resultou nos menores valores e comportamento semelhante ao encontrado no trabalho de  
365 Necker e Rosa (2013) para aterro sanitário projetado para Ji-Paraná/RO. Isto pode ter  
366 ocorrido devido a aplicabilidade favorável para aterros ainda em fase de projeto além de não  
367 considerar as variações de resíduos depositados ao longo dos anos.

368 O comportamento do modelo LandGEM neste estudo é muito semelhante aos  
369 comportamentos apresentados por estudos em outras regiões do país, como exemplo do aterro  
370 sanitário do município de Três Corações em Minas Gerais (PIÑAS *et al.*, 2016) e o aterro  
371 sanitário municipal de Guarapuava no Paraná (BIANEK *et al.*, 2018). De fácil aplicação em  
372 *software*, este modelo considera o potencial de geração de metano e a constante de  
373 decaimento, além das variações da massa de deposição de resíduos ao longo dos anos. Não  
374 considera a composição dos resíduos, porém, deste modo pode ser aplicado também em casos  
375 onde não existam estas informações. Assim, foi o modelo com resultados mais satisfatórios.

376 Vale ressaltar a necessidade de avaliação dos parâmetros e considerações adotados nas  
377 aplicações dos modelos para a estimativa da geração de biogás, uma vez que estes foram  
378 desenvolvidos para regiões de clima, gravimetria de resíduos e diversas outras distinções da  
379 região sul do Brasil.

380

### 381 **Alternativas de aproveitamento do biogás**

382 O biogás, por conter um elevado teor de metano (CH<sub>4</sub>), possui diversas aplicações de  
383 caráter energético. Embora suas aplicações mais comuns são o aquecimento e a geração de  
384 eletricidade, ele pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações desenvolvidas para o  
385 gás natural, entretanto, para algumas destas aplicações o biogás deve ser tratado. (ICLEI,  
386 2009; ZANETTE, 2009).

387 As alternativas mais usuais para geração de energia elétrica a partir de biogás são  
388 através de motores a combustão interna e microturbinas. Já para a geração de energia térmica



389 existem tecnologias como os sistemas de ciclo a vapor funcionando de acordo com o Ciclo a  
390 vapor Rankine. Na prática, a geração de eletricidade com biogás corresponde a cogeração,  
391 uma vez que é capaz de gerar energia elétrica e calor, pois, a eficiência elétrica dos  
392 equipamentos disponíveis geralmente não superaram 45% da energia gerada na combustão,  
393 restando o calor residual do processo que pode também ser aproveitado (FARIA, 2010;  
394 PERECIN, 2017; PROBIOGÁS, 2010).

395 O calor na forma de vapor ou água quente, diferentemente da energia elétrica, não é  
396 facilmente transportado por grandes distâncias. Por isso, essa opção faz sentido quando há  
397 demanda por calor próxima à geração. Há experiências do uso do biogás para aquecimento de  
398 aviário e de creche para produção de leitões, queima em caldeiras, aquecimento de granjas,  
399 para secagem de grãos e de lodo de estações de tratamento de esgoto (ETEs), entre outros  
400 (ICLEI, 2009; PERECIN, 2017).

401 Outras alternativas de utilização, dentro do próprio aterro, são a iluminação a gás e o  
402 processo de evaporação do chorume. Este último, um sistema utilizado para tratamento do  
403 chorume proveniente do aterro por processo de aquecimento a partir da utilização do biogás  
404 como combustível, assim, a fração líquida é evaporada, concentrando o teor de sólidos do  
405 chorume. O vapor quente passa por sistema de purificação para que possa ser lançado à  
406 atmosfera ou, então, para ser utilizado na geração de energia térmica, como aquecimento ou  
407 refrigeração. O lodo adensado pode retornar para o aterro (ICLEI, 2009).

408 O biometano, pela definição da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e  
409 Biocombustíveis (ANP), é um biocombustível gasoso obtido a partir do processamento do  
410 biogás. Após as etapas de purificação, o biogás resulta em um combustível gasoso  
411 (biometano) com elevado teor de metano em sua composição, que reúne características que o  
412 torna intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações ou passível de ser  
413 transportado na forma de gás comprimido (ANP, 2019). Ao atingir as especificações do gás  
414 natural, o que pode ser realizado com processos de tratamento existentes, o biometano pode  
415 ser utilizado nos veículos que utilizam o gás natural veicular (GNV) ou ser injetado e  
416 distribuído na rede de gás natural (ZANETTE, 2009). A qualidade do biometano oriundo de  
417 aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto é regulamentada por meio da Resolução  
418 ANP nº 685/2017 (ANP, 2019).

419 Por fim, os créditos de carbono são certificados emitidos quando ocorre a redução de  
420 emissão GEE no âmbito do MDL, que podem ser negociados no mercado internacional,  
421 dando um valor monetário à poluição. Desta forma, países ou empreendimentos que não  
422 conseguem atingir as metas de reduções de emissões, podem comprar esses créditos de

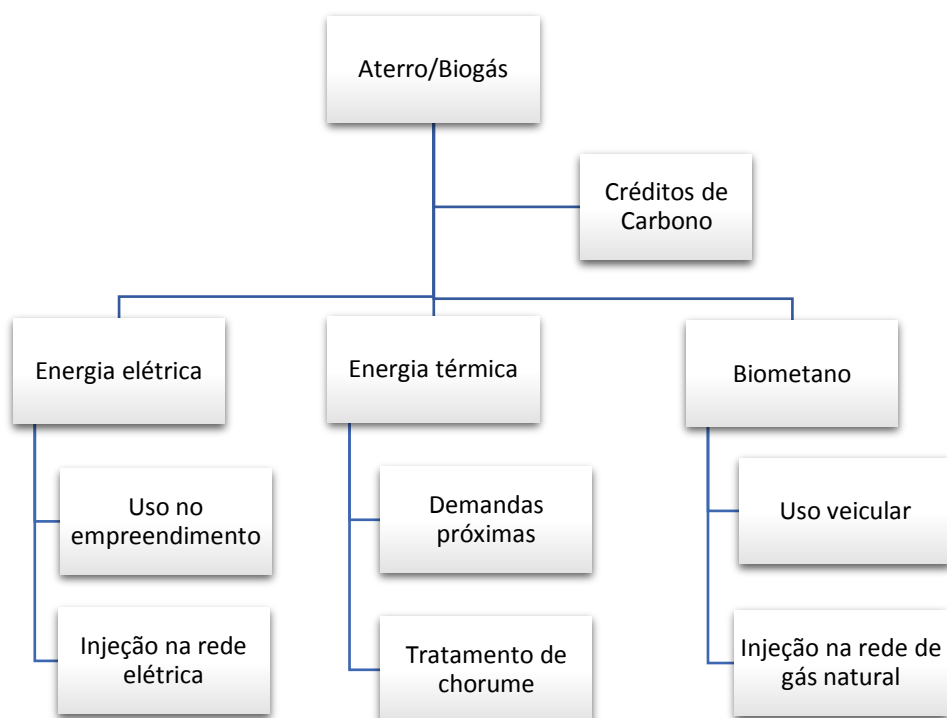
423 carbono. Por outro lado, aquelas empresas que conseguiram diminuir suas emissões abaixo  
 424 dos valores determinados, podem vir a vender o excedente no mercado nacional ou  
 425 internacional (FARIA, 2010).

426 A queima sem aproveitamento energético também é uma opção, pois projetos com  
 427 esta finalidade são reconhecidos pelo MDL ao evitar emissões. A queima simples é uma  
 428 opção para locais em que a produção de biogás é muito baixa, ou com fração de metano  
 429 pequena, tornando inviável o aproveitamento energético. Independentemente da utilização  
 430 energética escolhida para o biogás, recomenda-se a instalação de *flares*, uma vez que, em caso  
 431 de falha no sistema de geração de energia ou outro tipo de aproveitamento, evita-se a emissão  
 432 de metano para a atmosfera e a consequente perda de créditos de carbono (ICLEI, 2009).

433 O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2019) traz as  
 434 orientações e os procedimentos para a submissão de projetos e a obtenção da Carta de  
 435 aprovação para projetos do MDL no Brasil, os quais devem apresentar benefícios reais,  
 436 mensuráveis e de longo prazo e devem reduzir as emissões de GEE.

437 Em síntese, as principais alternativas de aproveitamento e formas de utilização do  
 438 biogás oriundo de aterro sanitário estão esquematizadas na Figura 6, a seguir:

439



440

441

Figura 6 – Síntese das alternativas de usos do biogás.

442

Fonte: Autores.

443

444 Diante destas alternativas de utilização do biogás, fica evidente que o não  
445 aproveitamento deste combustível é um desperdício energético. Esse desperdício é destacado  
446 pela parceria da Associação Brasileira de Biogás (ABiogás) com a Associação Brasileira de  
447 Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), ao realizarem um estudo  
448 focado em aterros sanitários e divulgar a geração de resíduos sólidos urbanos, sua destinação  
449 final e o potencial de produção energética desperdiçado no Brasil.

450 Os dados mostram que o Brasil destinou mais de 42 milhões de toneladas de resíduos  
451 sólidos para aterros sanitários em 2018, sendo captados 4,2 bilhões de Nm<sup>3</sup> de biogás. Porém,  
452 apenas 9% deste potencial foi utilizado para geração de eletricidade (751 GWh) e menos de  
453 2% produziu 35 milhões de Nm<sup>3</sup> de biometano. Em 2018, a maioria dos aterros sanitários  
454 brasileiros queimou o biogás captado, assim, o país deixou de gerar 7.230 GWh de  
455 eletricidade que poderiam ter fornecido energia renovável para quase 24 milhões de  
456 residências ou produzido biometano suficiente para substituir mais de 2 milhões de litros de  
457 diesel (ABRELPE, 2019; ABIOGÁS, 2019). Neste contexto, a sugestão de alternativa de  
458 aproveitamento do biogás gerado neste aterro sanitário em questão, é o aproveitamento na  
459 forma de energia elétrica, devido ao seu alto potencial de geração de biogás em uma região do  
460 país onde há grande demanda por esta energia. Destaca-se a necessidade da avaliação prática  
461 e econômica desta e demais alternativas.

462 Embora algumas destas alternativas de aproveitamento do biogás apresentadas ainda  
463 não estejam tecnicamente adequadas ou viáveis para implantação em grande escala, é preciso  
464 um esforço conjunto de empreendedores, governos e sociedade no sentido de desenvolver  
465 novas tecnologias com custos acessíveis, a fim de potencializar a utilização do biogás e evitar  
466 o atual desperdício energético (ICLEI, 2009).

467

## 468 CONCLUSÕES

469 O biogás é um combustível renovável que deve ser aproveitado. Para que seja possível  
470 esse aproveitamento, é necessário estimar a produção do biogás em aterros sanitários de  
471 resíduos sólidos, para então avaliar sua aplicabilidade prática e econômica. Este trabalho  
472 considerou as particularidades da região sul do Brasil na aplicação de modelos internacionais  
473 para a estimativa de geração de biogás.

474 De forma geral, os modelos apresentaram comportamento semelhante, isto é, geração  
475 crescente durante o tempo de funcionamento e recebimento de resíduos, e decrescente após o  
476 fechamento. O modelo IPCC *Waste Model* (2006) apresentou o maior total acumulado do ano

477 de 2011 ao ano de 2060, sendo de 5.633.207.689 m<sup>3</sup>. Para o mesmo período, a geração total  
478 acumulada de biogás para o Método de Projeto foi de 2.158.542.371 m<sup>3</sup> e para o modelo  
479 LandGEM 3.371.469.805 m<sup>3</sup>. O modelo que se destaca mais aplicável ao aterro sanitário em  
480 operação estudado e com os resultados considerados mais satisfatórios é o modelo LandGEM.  
481 Estes resultados refletem o grande potencial de geração de biogás no aterro sanitário em  
482 questão, devido à grande quantidade de matéria orgânica recebida e características do clima,  
483 que propiciam a digestão anaeróbia e conseqüentemente a geração de biogás.

484 Por fim, conclui-se que encontra-se no biogás uma alternativa energética menos  
485 danosa ao meio ambiente e à saúde humana, onde ao implementar um projeto de  
486 aproveitamento, têm-se benefícios como a utilização de grandes quantidades de resíduos para  
487 obtenção de energia, a redução de emissões de gases para atmosfera e ganhos econômicos  
488 como a comercialização dos créditos de carbono, além de uma oportunidade de diversificar a  
489 matriz energética do país, diminuindo a dependência pelos combustíveis fósseis.

490

#### 491 **Sugestões para estudos futuros**

- 492 • Analisar os dados dos modelos gerados com os dados de medição reais e realizar a  
493 calibração dos modelos a fim de obter-se os parâmetros reais para alimentação dos  
494 modelos e escolha do modelo que melhor reproduz o comportamento real;
- 495 • Analisar a equivalência energética do biogás.

496

#### 497 **AGRADECIMENTOS**

498 À minha mãe Nadir, por todo amor e amparo durante toda a minha vida. Aos meus  
499 amigos e familiares por todo o apoio, em especial à Graziela, minha companheira nesta  
500 caminhada. Aos professores que me ajudaram a crescer durante o curso, principalmente à  
501 professora Janaina pela paciência e orientação neste trabalho.

#### 502 **REFERÊNCIAS**

503 ABIOGAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS. 2019. Disponível em:  
504 <https://abiogas.org.br/>. Acesso em: 10 nov. 2019.

505

506 ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**, 2019. Disponível em:  
507 <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 17 nov. 2019.

508

509 ABRELPE. **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação**  
510 **de Resíduos Sólidos**, 2013. Disponível em:

- 511 <http://www.ecodesenvolvimento.org/biblioteca/documentos/atlas-brasileiro-de-emisso303es->  
512 [de-gee-e-potencial](http://www.ecodesenvolvimento.org/biblioteca/documentos/atlas-brasileiro-de-emisso303es-). Acesso em: 25 maio 2019.
- 513  
514 ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E  
515 BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biometano**. 2019. Disponível em:  
516 <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biometano>. Acesso em 10 nov. 2019.
- 517  
518 BIANEK, J. *et al.* Comparação entre metodologias USEPA e IPCC para estimativa teórica de  
519 produção de biogás em aterro municipal. **BIOFIX Scientific Journal**. v. 3, n. 1, p. 34-40,  
520 2018.
- 521  
522 BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários:**  
523 Estudo de caso. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) – Curso de  
524 Pós-graduação em engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.
- 525  
526 BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos  
527 Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília,  
528 DF: Presidência da República, 2010. Disponível em:  
529 [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 20 abr.  
530 2019.
- 531  
532 BRITO FILHO, L, F. **Estudo de Gases em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2005.  
533 Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em  
534 engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.
- 535  
536 CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás**. 2019.  
537 Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 16 abr. 2019.
- 538  
539 CLIMA-DATA.ORG. **Clima Minas do Leão**. 2019. Disponível em: [https://pt.climate-](https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/minas-do-leao-313478/)  
540 [data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/minas-do-leao-313478/](https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/minas-do-leao-313478/). Acesso em: 7 set.  
541 2019.
- 542  
543 CRVR – COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS. 2019.  
544 Disponível em: <http://crvr.com.br/>. Acesso em: 16 abr. 2019.
- 545  
546 ENSINAS, A. V. **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas –**  
547 **SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-graduação em  
548 engenharia. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.
- 549  
550 FARIA, M. **Biogás produzido em aterros sanitários – Aspectos ambientais e**  
551 **aproveitamento do potencial energético**. 2017. Monografia (Especialização em Gestão  
552 Ambiental e Negócios no Setor Energético) – Instituto de Eletrotécnica e Energia da  
553 Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- 554  
555 FLECK, E.; REICHERT, G. A. **Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos**  
556 **domiciliares de Porto Alegre – 2014/2015**. In: 10ª Simpósio Internacional de Qualidade  
557 Ambiental. Porto Alegre, 2016.
- 558

- 559 ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento de biogás:**  
560 volume 1 – Aterros sanitários. São Paulo, 2009. Disponível em:  
561 [http://www.resol.com.br/cartilha12/manual\\_iclei\\_brazil.pdf](http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf). Acesso em: 15 jul. 2019.  
562
- 563 ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Emissões de GEE do setor de resíduos.** Set.  
564 2016. Disponível em: [http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-13-](http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-13-RelatoriosSEEG-Residuos.pdf)  
565 [RelatoriosSEEG-Residuos.pdf](http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-13-RelatoriosSEEG-Residuos.pdf). Acesso em: 12 maio 2019.  
566
- 567 IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice**  
568 **guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.** 2001.  
569 Disponível em: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/5\\_Waste.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/5_Waste.pdf). Acesso em:  
570 10 set. 2019.  
571
- 572 IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for**  
573 **National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual**, v. 3, 1996.  
574
- 575 IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Solid waste**  
576 **disposal. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, v. 5, p. 1-40, 2006.  
577
- 578 MENDES, L. G. G; SOBRINHO, P. M. Métodos de estimativa de geração de biogás em  
579 aterro sanitário. **Revista ciências exatas**. Taubaté, v. 11, n. 2, p 71-76, 2005.  
580
- 581 MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento Energético do Biogás em Aterro**  
582 **Sanitário**. Brasil, 2019. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/cidades-](http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario)  
583 [sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-](http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario)  
584 [energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario](http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario). Acesso em: 16 abr. 2019.  
585
- 586 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Obter**  
587 **carta de aprovação para projeto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).**  
588 Brasil, 2019. Disponível em: [https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/paginas/Obter-](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/paginas/Obter-carta-de-aprovacao-para-projetos-do-Mecanismo-de-Desenvolvimento-Limpo-MDL.html)  
589 [carta-de-aprovacao-para-projetos-do-Mecanismo-de-Desenvolvimento-Limpo-MDL.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/paginas/Obter-carta-de-aprovacao-para-projetos-do-Mecanismo-de-Desenvolvimento-Limpo-MDL.html).  
590 Acesso em: 20 nov. 2019.  
591
- 592 NECKER, H. S.; ROSA, A. L. D. Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro  
593 sanitário de Ji-Paraná – RO. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia**  
594 **Ambiental – REGET/UFSM**. Santa Maria, V. 17, n. 17, p. 3416-3424, Dez. 2013.  
595
- 596 PERECIN, D. **Comparação entre as estratégias de aproveitamento energético do biogás:**  
597 **geração de energia elétrica versus produção de biometano.** Dissertação (Mestrado em  
598 Ciências) - Programa de Pós-graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da  
599 Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.  
600
- 601 PIÑAS, J. A. V. *et al.* Aterros sanitários para a geração de energia elétrica a partir da  
602 produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb).  
603 **Revista Brasileira de Estudos de População**. Rio de Janeiro, v.33, n.1, p.175-188, jan./abr.  
604 2016.  
605
- 606 PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização.** 2010. Disponível em:  
607 [http://web-resol.org/cartilhas/giz\\_-\\_guia\\_pratico\\_do\\_biogas\\_final.pdf](http://web-resol.org/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf). Acesso em: 20 nov.  
608 2019.

- 609 SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; van ELK. A. G. H. P. Análise da eficiência de modelos de  
610 decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros  
611 sanitários brasileiros. **Eng Sanit Ambient**, v.22 n.6, p. 1151-1162, 2017.  
612
- 613 SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Série  
614 histórica. Disponível em: <http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 2 set. 2019.  
615
- 616 TOMAZI, R. L.; MAAS, G. C. B. **Potencial de geração de metano do aterro sanitário de**  
617 **Marau – RS**. Monografia - Pós-graduação em Mudanças Climáticas, Projetos Sustentáveis e  
618 Mercado de Carbono. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.  
619
- 620 USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Emissions Model**  
621 **(LandGEM) Version 3.02 User's Guide**, 2005.  
622
- 623 VIEIRA, G. E. G. *et al.* Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão.  
624 **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 101-220, jul./dez. 2015.  
625
- 626 ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Dissertação  
627 (Mestrado) – Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
628 Rio de Janeiro, 2009.