

Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário

COMPARISON BETWEEN ESTIMATE METHODS OF BIOGAS GENERATION IN SANITARY LANDFILL

Luiz Gustavo Galhardo Mendes
Pedro Magalhães Sobrinho
Departamento de Energia - Campus Guaratinguetá
Universidade Estadual Paulista - UNESP

RESUMO

Produto da decomposição de material orgânico, o biogás apresenta como principais constituintes da sua composição o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), sendo este último um combustível possível de ser coletado e utilizado como fonte de energia. Existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado, desde métodos que apresentam uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposta no aterro, até métodos que considerem uma cinética de geração de biogás, função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo). Dentre as metodologias estudadas a que mais se aproxima da realidade é a de decaimento de primeira ordem por considerar por meio de parâmetros em sua equação a cinética da reação da produção do biogás ao longo do tempo. A geração de metano estimada por esse método, considerando uma população de 100.000 habitantes, obteve o seu valor máximo um ano após o fechamento das atividades no aterro, cujo valor corresponde a 2.700.000 m³ de metano. Este trabalho tem como objetivo comparar os diferentes métodos utilizados na estimativa de geração de biogás pela inserção de dados de uma população fictícia.

PALAVRAS-CHAVE

Geração de biogás. Biomassa. Aterro Sanitário. Energia

INTRODUÇÃO

A qualidade do gás de aterro (LFG – Landfill gas) depende do sistema microbiológico, do substrato (resíduo) sendo decomposto e das variáveis específicas do aterro como acesso a oxigênio para o aterro e o teor de umidade (HAM; MORTON, 1989). O LFG é tipicamente descrito como consistindo de aproximadamente 50 por cento de metano e 50 por cento de dióxido de carbono com menos de 1 por cento de outros componentes gasosos, inclusive sulfetos de hidrogênio (H₂S) e mercaptanos.

Há quatro fases de produção do LFG e elas ocorrem durante a existência do aterro. A duração de cada uma dessas fases é dependente de numerosos fatores, incluindo o tipo de resíduo, teor de umidade, nutrientes, tipos de bactérias e nível de pH.

A primeira fase, decomposição aeróbica, ocorre imediatamente depois do resíduo orgânico ter sido colocado, enquanto o oxigênio está presente nele. A decomposição aeróbica produz dióxido de carbono, água e calor. O próximo estágio é a fase anóxica, não metanogênica em que compostos ácidos e gás hidrogênio são formados enquanto há continuada produção de dióxido de carbono. A terceira fase é a instável metanogênica. Durante essa fase, a produção de dióxido de carbono começa a declinar porque a decomposição do resíduo muda da decomposição aeróbica para a decomposição anaeróbica. A decomposição anaeróbica produz calor e água, mas, diferentemente, da decomposição aeróbica, também produz metano. Durante a quarta fase, o metano é gerado na faixa entre 40 e 70 por cento do volume total (McBEAM; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

Tipicamente, o resíduo na maior parte dos aterros atingirá a fase metanogênica estabelecida dentro de menos de 2 anos após a sua decomposição. Dependendo da profundidade da massa de resíduo, e de seu teor de umidade, a fase metanogênica pode ser

alcançada tão rapidamente quanto seis meses após a disposição no solo. O LFG pode ser produzido num aterro durante numerosas décadas mantendo-se em níveis declinantes com emissões de até 100 anos após a data de disposição. A Figura 1 apresenta as fases de formação do biogás.

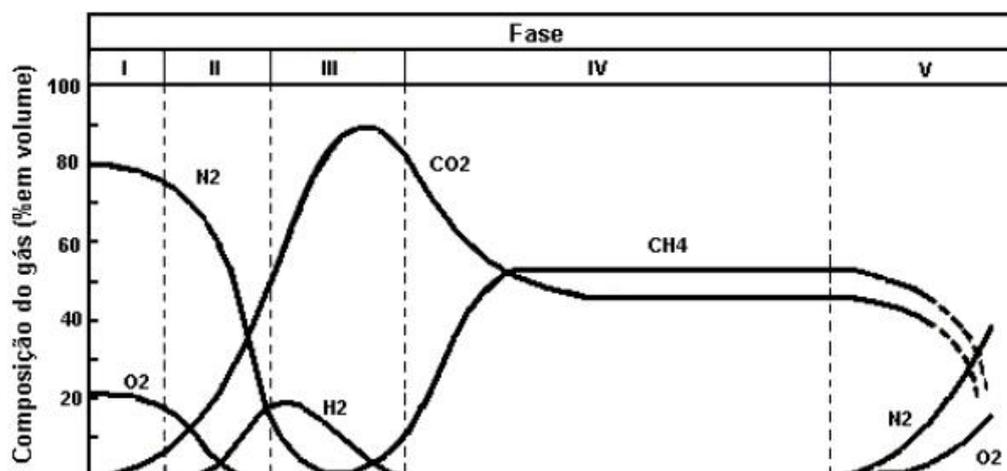


Figura 1 – Produção dos componentes do biogás em relação ao tempo
 Fonte: Lima (1985)

2. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários.

Algumas metodologias para estimativa teórica da produção de gás metano em locais de deposição de resíduos sólidos urbanos são encontradas na literatura. Esses métodos variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam. Segundo CETESB/SMA (2003), os métodos variam de uma aproximação grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico (RSD) disposta no aterro, até métodos que considerem uma cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo).

Em IPCC (1996) é apresentada uma metodologia de fácil aplicação para cálculo de emissão de metano a partir de resíduos sólidos para países ou regiões específicas. Esse método, que segue a equação (1), envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente no resíduo, calculando assim a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo disposto, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos

domésticos. São necessários dados estatísticos de população e sobre a composição dos resíduos sólidos urbanos. Caso não hajam dados disponíveis para o cálculo no país, poderão ser usados dados padronizados fornecidos pelo IPCC (International Panel on Climate Change), mas a qualidade dos resultados pode ser prejudicada. Esta equação também é conhecida como equação de inventário do IPCC (SÃO PAULO, 2003).

$$Q_{CH_4} = \frac{Pop_{urb} \cdot TaxaRSD \cdot RSDf \cdot L_0}{pCH_4} \quad (1)$$

Sendo:

QCH4: metano gerado [m³CH₄/ano]

Popurb: população urbana [habitantes]

TaxaRSD: taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano [kg de RSD/habitante . ano]

RSDf: taxa de resíduos coletados e dispostos no aterro [%]

L0: potencial de geração de metano proveniente da degradação do resíduo [kg de CH₄/ kg de RSD]

pCH₄: massa específica do metano [kg/m³]. O valor da massa específica do metano é 0,740 kg/m³ (CEGAS, 2005).

O potencial de geração de metano (L0) representa a produção total de metano (m3 de metano por tonelada de resíduo). O valor de L0 é dependente da composição do resíduo e, em particular, da fração de matéria orgânica presente. O valor de L0 é estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico. Valores típicos para esse parâmetro variam de 125 m3 de tonelada de CH4/tonelada de resíduo a 310 m3 de tonelada de CH4/tonelada de resíduo. A maior compactação do resíduo não tem efeito direto no parâmetro de L0. No entanto, a compactação e a densidade do resíduo têm um efeito direto na massa deste para um dado volume e, portanto, no potencial de quantidade de LFG que pode ser produzido durante um determinado período de tempo, bem como nas características de desempenho dos sistemas que serão necessários para coletar o LFG.

O potencial de geração de metano a partir do resíduo (L0) pode ser obtido pela metodologia apresentada em INTERNACIONAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE (1996), que segue a equação (2).

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot CODf \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad (2)$$

Sendo:

L0: potencial de geração de metano proveniente da degradação do resíduo [kg de CH4/ kg de RSD];

FCM: fator de correção de metano [%];

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

CODf: fração de COD dissociada [%];

F: fração de metano no biogás [%];

(16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH4/ kg de C].

Conforme CETESB/SMA (2003), o FCM varia em função do tipo de local. O IPCC define quatro categorias de locais: Aterros Inadequados, Aterros Controlados, Aterros Adequados (Aterro Sanitário) e Aterros Sem Classificação e para cada uma das categorias o FCM apresenta um valor diferente, como pode ser verificado na tabela 1.

Tabela 1: Valores para o FCM.

Tipo de local de disposição	FCM
Vazadouros a céu aberto (Lixão)	0,4
Aterro Controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

Fonte: IPCC (1996).

O cálculo da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) segue a equação (3) e é baseado na composição do resíduo e na quantidade de carbono **em cada componente de sua massa** (INTERNACIONAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE, 1996). Na tabela 2 são encontrados os valores de COD para as diferentes composições do resíduo.

Tabela 2: Teor de carbono orgânico degradável para cada componente presente no resíduo

Componente	Porcentagem COD (em massa)
A) papel e papelão	40
B) resíduos de parques e jardins	17
C) restos de alimentos	15
D) tecidos	40
E) madeira*	30

* excluindo a fração de lignina que se decompõe muito lentamente.

Fonte: BIRGEMER & CRUTZEN (1987)

$$COD = (0,40 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,40 \cdot D) + (0,30 \cdot E) \quad (3)$$

Sendo:

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

A: fração de papel e papelão no resíduo

B: fração de resíduos originários de parques e jardins

C: fração de restos de alimentos no resíduo

D: fração de tecidos no resíduo

E: fração de madeira no resíduo

A fração de COD dissociada (CODf), segundo Birgmer & Crutzen (1987), indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela equação (4).

$$CODf = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (4)$$

Sendo:

CODf: fração de COD dissociada [%];

T: temperatura na zona anaeróbia [°C]

Com as equações (2) e (3) determina-se respectivamente o L0 e o COD. Estes serão muito úteis para os métodos de estimativa apresentados.

Assim como o IPCC, a USEPA também desenvolveu uma equação recomendada para a elaboração de inventários conhecida como equação de Inventário da USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997a):

Tabela 3: Valores sugeridos para k

Precipitação anual	Valores para k [ano ⁻¹]		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 a < 500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 a <1000m	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: WORLD BANK (2003).

$$Q = População \cdot TaxaRSD \cdot RSDf \cdot 0,45 \cdot F \quad (5)$$

Sendo:

Q = metano gerado [m3/ano];

População = número de habitantes atendidos pelo aterro [habitantes];

Taxa RSD = taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano [kg RSD/habitantes . ano];

RSDf = taxa de resíduos coletados e dispostos no aterro [%];

0,45 = volume de biogás gerado por 1kg de resíduo sólido [m3 biogás/kg RSD];

F = fração de metano no biogás [%]

Assim como nas equações de inventário, os métodos de cinética encontrados são também da USEPA e do IPCC (CETESB/SMA, 2003), conhecidos como Método de Projeto e Método de Decaimento de Primeira Ordem.

Esses dois métodos utilizam uma constante denominada constante de decaimento (k). A constante de decaimento é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e, principalmente, umidade. Os valores sugeridos para k podem variar de 0,01 ano⁻¹ a 0,09ano⁻¹ conforme é apresentado na tabela 3.

O Método de Projeto (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997a ; INTERNATIONAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE, 1996) é recomendado para aterros sanitários ainda na fase de projeto, pois ainda não se sabe realmente qual será o fluxo anual de resíduos. De acordo com CETESB/SMA (2003), esse método se divide em duas etapas: aterro em operação e após o seu fechamento.

Enquanto o aterro está em operação, o termo de cinética e-k.c será igual a 1. Após o fechamento, esse termo de cinética deverá ser considerado. Assim, pode-se dividir essa equação em duas:

- durante a vida útil:

$$Q = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (6)$$

- após o fechamento do aterro:

$$Q = F \cdot R \cdot L_0 \cdot (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad (7)$$

Sendo:

Q = metano gerado [m³/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

R = quantidade média de resíduos assentados durante a vida útil do aterro [kg RSD/ano]

L0 = potencial de geração de biogás [m³ de biogás/kg RSD].

k = constante de decaimento [ano⁻¹].

c = tempo decorrido desde o fechamento do aterro [ano];

t = tempo decorrido desde a abertura do aterro [anos]:

O Método de Decaimento de Primeira Ordem (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997b; INTERNATIONAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE, 1996) considera a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada no ano x durante os anos posteriores. Como a cada ano novas quantidades de resíduos são depositadas, a quantidade de metano gerada em um determinado ano será igual à geração do resíduo depositado no ano T somada das gerações dos resíduos depositados nos anos anteriores, referenciadas no ano T (SÃO PAULO, 2003).

$$Q_T = F \cdot R_x \cdot k \cdot L_0 \cdot e^{-k \cdot (T-x)} \quad (8)$$

Sendo:

QT = metano gerado no ano T [m³/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

Rx = quantidade de resíduo assentado no ano x [kg];

k = constante de decaimento [ano⁻¹];

L0 = potencial de geração de biogás [m³ de biogás/kg RSD];

T = ano atual;

x = ano de deposição do resíduo

O resíduo disposto anualmente (Rx) é variável e depende de fatores como a taxa de crescimento populacional, taxa de RSD produzido por habitante ao ano e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro. A multiplicação de todos estes fatores originam os valores de Rx.

A equação (9) fornece a emissão de metano gerado pelo resíduo que degrada anaerobicamente após a disposição no aterro; como exemplificado pela figura 2.

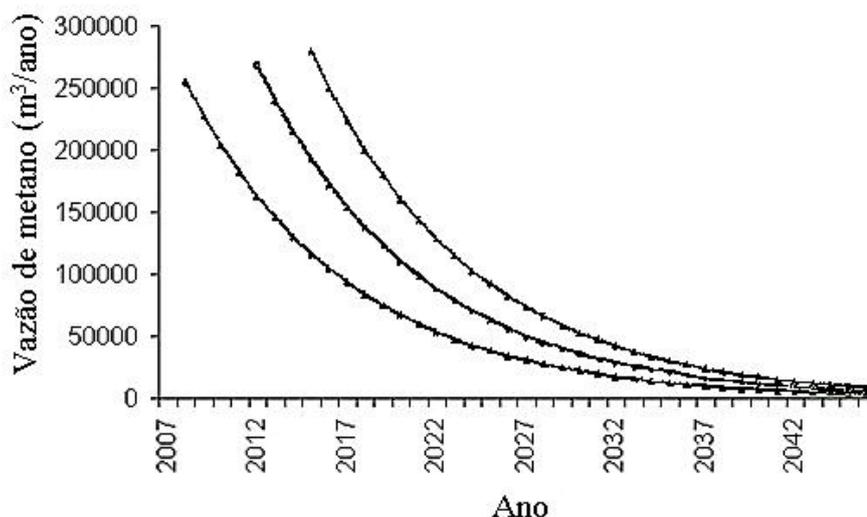


Figura 2 –geração de metano pelo resíduo.

A estimativa de soma das vazões (?QT) de metano é dada pela equação 9, que representa a soma das vazões de metano correspondentes às quantidades de resíduo depositadas no aterro ano a ano.

$$\sum Q_T = F \cdot k \cdot L_0 \cdot \sum R_x \cdot e^{-k \cdot (T-x)} \quad (9)$$

Portanto, esta estimativa é feita ano a ano, obtendo-se:

?QT = estimativa da soma das vazões de metano no ano considerado [m³CH₄/ano]

se assim a emissão de metano do aterro durante a vida útil e pelos anos seguintes ao fechamento.

Com o objetivo de demonstrar o comportamento gráfico de cada uma das equações apresentadas acima foram estimados dados para uma população fictícia a fim de exemplificar também os cálculos.

Tabela 4: Dados fictícios para a estimativa da geração de metano

Ano de abertura do aterro	1
Ano de fechamento do aterro	20
Tempo que o aterro permanece fechado gerando biogás	20 anos
População atendida pelo aterro	100.000 habitantes
Taxa de crescimento populacional	1,38% ao ano
Taxa de geração de resíduos "per capita" diária	0,5 kg RSD/hab dia
Taxa de resíduos coletados que são depositados em aterro	88%
Constante de decaimento (k)	0,125/ano
Potencial de geração de biogás	0,25 m ³ de biogás/kg RSD
Temperatura de digestão anaeróbia	50°C
Fator de conversão de metano (FCM)	1,0 (aterro sanitário)
Fração de metano no biogás	50%

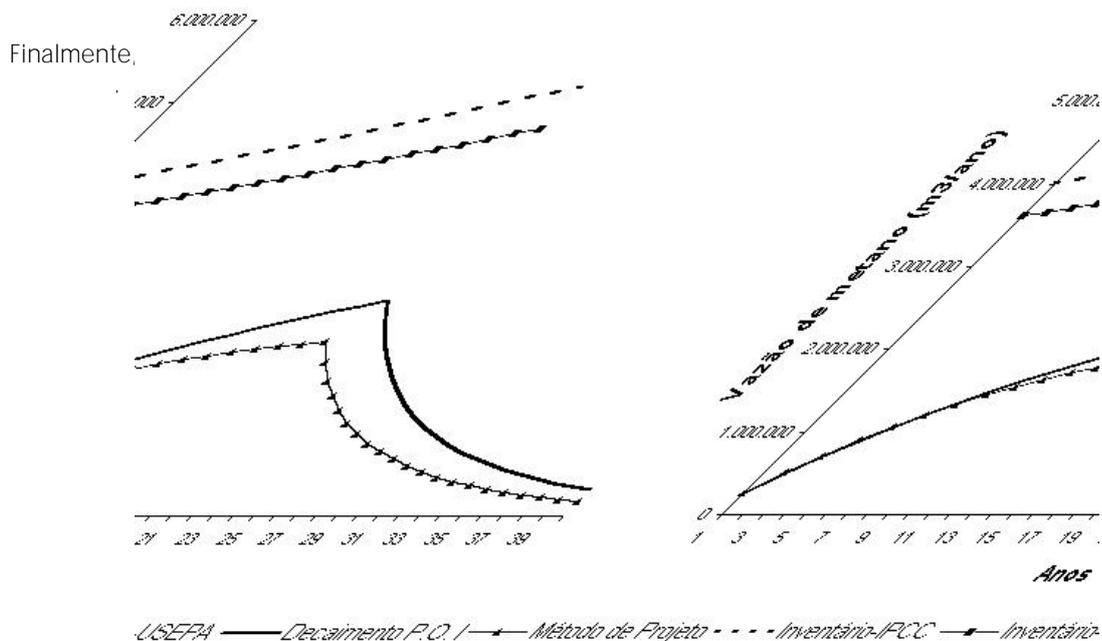


Figura 3 – Gráfico das equações apresentadas

Avaliando o gráfico acima, verificamos que há uma grande discrepância entre os valores de vazão de metano para cada método. Foram obtidos os seguintes valores: 2.100.000 m³ de CH₄ no método de projeto, 2.700.000 m³ de CH₄ no método de decaimento, 4.700.000 m³ de CH₄ no método de inventário-USEPA e 5.200.000 m³ de CH₄ para o método de inventário do IPCC. Os métodos de inventário (IPCC e USEPA) apresentados acima são uma aproximação grosseira, pois calculam o biogás gerado em função de dados do censo populacional, taxa de resíduos coletada e condições do local de disposição dos resíduos. Sabe-se que a generalização dos locais de disposição e da taxa de coleta de resíduos implicam grandes erros na estimativa apresentada. Entretanto, o principal fator que conduz a não utilização desses métodos para o projeto de um aterro é que as metodologias de inventário não levam em consideração a cinética de geração do biogás pelos resíduos. Isso fica evidenciado no final da operação do aterro. Pode-se observar que não há geração de biogás após o ano vinte (data de fechamento do aterro). Isto produz uma situação irreal, pois o resíduo continuará a se decompor e, conseqüentemente, gerará mais biogás.

O método de projeto apresentou o menor valor de produção de metano. Esse é um método mais próximo da situação real em relação ao método anterior por considerar a cinética de geração de biogás ao longo do tempo de vida do aterro. Entretanto, esse método não é o mais adequado por considerar que a geração de resíduos no período de operação do aterro deverá ter um valor constante ao longo dos anos. Portanto, o método mais adequado para quantificar a geração de biogás em aterros sanitários é o de primeira ordem, pois além de considerar a cinética de geração de biogás em toda a vida útil do aterro permite trabalhar com quantidades variáveis de resíduos dispostas no mesmo.

CONCLUSÕES

A avaliação das metodologias de geração de biogás não devem se basear apenas nas quantidades de metano geradas e, sim, nos diversos fatores existentes e erros presentes nos parâmetros que permitem a obtenção de valores pelas equações.

No Brasil, por exemplo, sabe-se que as condições referentes aos aspectos de gerenciamento de resíduos sólidos ainda são precárias e não permitem a obtenção de dados confiáveis, podendo dessa forma induzir ao erro no que diz respeito a levantamentos de geração de biogás, especificamente em aterros sanitários.

Os métodos de inventário podem ser considerados adequados apenas para um estudo grosseiro de geração de biogás em aterros, ficando assim mais apropriados para a obtenção de dados para regiões e ou países. Todos os métodos apresentados necessitam de informações que podem conter erros. Projetos que consideram a recuperação energética do biogás necessitam de um levantamento preliminar da quantidade de gás gerada. Esses estudos permitem verificar a viabilidade do projeto e a definir qual a melhor tecnologia que deverá ser utilizada. Outro fator importante é a estimativa de geração de créditos de carbono prevista no protocolo de Kyoto, pois o gás metano é considerado um gás de efeito estufa e quando deixa de ser lançado na atmosfera por meio da recuperação energética, permite a obtenção de dividendos ao local em que se aplica o projeto. Entretanto, a estimativa de geração de biogás pelas metodologias não substitui as necessárias atividades práticas comprovadas em testes realizados "in loco".

Para uma avaliação mais detalhada da geração de metano em aterros sanitários recomenda-se métodos que levem em consideração a geração de biogás ao longo dos anos, por meio de uma aproximação da cinética de decomposição do resíduo.

Enfim, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas que definam uma equação com validade em todo o território nacional. Enquanto isso não acontece, é aconselhada a utilização de equações existentes da literatura americana uma vez que, naquele país, foram implantados centenas de projetos com sucesso.

ABSTRACT

The decomposition of organic material generates; the biogas which presents as main representative of its composition carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), this last one being a fuel collected and used as source of energy. Different methods exist to calculate the amount of methane generated, from methods which

present a rude approach, considering only the amount of domestic solid residue disposed in the landfill, as far as methods which consider a kinetics of biogas generation, function of three important types of parameters (local climatic conditions, concentration of nutrients in the soil and composition of the residue). To evaluate the methods of estimate of biogas generation in sanitary landfill, to apply a mathematical model based on a fictitious population, to discuss the applied estimates in each method and to obtain a conclusion to this respect they are objective of this work. From among studied methodologies the one which most approximated the reality was the first order decay by considering parameters in its equation the kinetic reaction of biogas production along the time. The methane generation estimated from this method, considering a population of 100,000 inhabitants obtained maximum value one year later of closing activities in the landfill, which value corresponds to 2,700,000 m³ of methane. The objective of this work is to compare the different methods used in the estimation of biogas generation by insertion of data from a fictitious population.

KEY-WORDS

Biogas generation. Biomass. Sanitary landfill. Energy

REFERÊNCIAS

BIRGEMER, H.G.; CRUTZEN, P.J. The production of methane from solid wastes. *Journal of geophysical research*, Washington, D.C., v. 92, n. D2, p.2181-2187, 1987

CEGAS – Companhia de Gás do Ceará. Site: < www.cegas.com.br/gasna>. Acesso em: 07/09/2007

SÃO PAULO (Estado).Secretaria do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 – aterros. São Paulo, 2003.349 p.

HAM, R. K.; MORTON A. B. Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity in Sanitary Landfilling: process, technology and environmental impact .New York: Academic Press, 1999.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual, Vol.3, 1996. Disponível no site: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>. Acesso em: 20/06/07

LIMA, L.Q.M., Método de Biodegradabilidade para Determinar a Produção de Metano no Aterro de Santa Bárbara, na Cidade de Campinas. CPFL, CAMPINAS, NOVEMBRO DE 1985.

MCBEAN, E.A.;ROVERS, F.A.; AND FARQUHAR, G.J. Solid Waste Landfill Engineering and Design. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Characterization of landfill sites in Brazil for landfill gas recovery – Business focus series. Washington D.C., United States Agency International Development; Office of Energy and Technology Center for Environment; Bureau for Global Programs, Field Support and research, 1997. USEPA 1

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Energy Project Landfill Gas Utilization Software (E-PLUS) User´s Manual; EPA-30-B-97-006, 1997. USEPA 2

WORLD BANK. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean. 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA: World Bank, 2003.125p.

Luiz Gustavo Galhardo Mendes
Rua: Frei Niceto Laura Pedro Werner, 95
Parque das Alamedas - Guaratinguetá - SP
CEP- 12517-270
e-mail: gugalhardo@yahoo.com.br

TRAMITAÇÃO

Artigo recebido em: 25/08/2007
Aceito para publicação em: 07/11/2007