

8

Modelos para prognóstico da geração de metano

Com a intenção de avaliar a geração de gases que ainda podem ser gerados no AMJG, foram utilizados modelos de cinética de primeira ordem que fornecem um prognóstico da produção de metano.

Neste capítulo são apresentados os modelos utilizados para obtenção do prognóstico de biogás que é produzido com o uso de parâmetros experimentais obtidos por ensaios de digestão anaeróbica. Além disso, algumas hipóteses foram utilizadas para considerar o tempo de decomposição dos resíduos amostrados.

Para apenas um dos modelos utilizados é apresentado uma forma de retroanálise dos parâmetros k e DOC ao modelo a partir da curva de von Bertalanffy com o uso dos dados experimentais.

8.1

Modelo LandGEM (USEPA)

8.1.1

Características do modelo

O modelo desenvolvido pela agência de proteção ambiental Norte Americana (USEPA) é o LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*, Versão 3.02). Este modelo é baseado na equação que considera uma taxa de decomposição de decaimento de primeira ordem para quantificar as emissões de decomposição do RSU num aterro sanitário.

Nos anos 1990, quando o LandGEM foi desenvolvido, assumiu-se a seguinte equação de decaimento de primeira ordem:

$$\frac{dM_t}{dt} = -kM_t$$

Equação 8-1

Considerando o parâmetro k constante e integrando a equação tem-se:

$$M_t = M_o e^{-kt} \quad \text{Equação 8-2}$$

onde M_t é a massa de resíduo no instante de tempo t ; M_o é a massa de resíduo no tempo zero; t é o instante de tempo do início da decomposição anaeróbica ao instante analisado; e k é a taxa de decaimento da massa de resíduo por unidade de tempo.

Nesta primeira condição, a quantidade de gás gerado foi considerada dependente da quantidade de massa num determinado tempo.

Ao considerar uma capacidade do potencial de geração de gás a partir da massa sólida do resíduo, a Equação 8-2 foi multiplicada por L_o , passando, portanto, a ser representada por unidade volumétrica, como segue:

$$S_t = M_o L_o e^{-kt} \quad \text{Equação 8-3}$$

onde S_t é a quantidade de metano que permanece/resta para ser gerada no tempo t .

Para o cálculo do volume acumulado de gás gerado, faz-se a subtração de $M_o L_o$ da Equação 8-3, tendo-se:

$$V_t = M_o L_o (1 - e^{-kt}) \quad \text{Equação 8-4}$$

onde V_t é o volume acumulado de gás no tempo t .

Algumas considerações foram realizadas até a versão 3.02, conforme descrito no trabalho de Dillah, *et al.* (201?), que é apresentada pela equação de decaimento de primeira ordem a seguir:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k * \underline{L}_o * \frac{M_i}{10} * e^{-k*t_{ij}} \quad \text{Equação 8-5}$$

onde Q_{CH_4} é a geração de metano anual no ano a ser calculado [m^3 /ano]; i é o incremento do tempo de 1 ano; n é dado pela subtração do ano de cálculo pelo ano inicial que foi aceito a massa de resíduo; j é o incremento do tempo de 0,1 ano; k é a taxa de geração de metano [ano^{-1}]; \underline{L}_o é a capacidade de geração do potencial de metano [m^3 /Mg]; M_i é a massa de resíduo aceita no ano i [Mg]; t_{ij} é o ano da j -ésima seção de massa de resíduo aceito no ano i .

Este modelo permite calcular a estimativa das taxas de emissões total de gases, de metano, de dióxido de carbono, de compostos orgânicos não-metanos e de poluentes individuais do ar advindos de aterros de resíduos sólidos urbanos. A EPA disponibiliza o programa computacional para o cálculo, através do Software da Microsoft, o Excel.

O modelo utiliza dois parâmetros de entrada o L_0 e o k , este último quantifica quão rápido ocorre o decaimento da taxa de geração de biogás uma vez que é alcançado o pico. O pico é assumido como sendo no momento da última entrada de material no aterro ou encerramento do mesmo. O parâmetro k também é descrito através do tempo de meia-vida, dado por:

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \quad \text{Equação 8-6}$$

O tutorial do modelo está disponível no relatório EPA-600/R-05/047 (Alexander *et al.*, 2005). A versão 3,02 do modelo LandGEM traz como parâmetros *default* os valores que estão na Tabela 8-1.

Tabela 8-1 – Parâmetros *default* do modelo LandGEM

Condições para Entrada	L_0 (m ³ /Mg)	k (ano ⁻¹)
CAA convencional	170	0,05
CAA ambiente árido	170	0,02
Inventário convencional	100	0,04
Inventário ambiente árido	100	0,02
Inventário úmido (bioreator)	96	0,7
Especificado pelo usuário	-	-

Os dois primeiros valores dos parâmetros são baseados nas regulamentações federais dos EUA disposta pela CAA (*Clear Air Act*) para aterros (Alexander *et al.*, 2005). Os demais são baseados nos fatores de emissões que foram compilados pela EPA (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors: AP-42*) (Alexander *et al.*, 2005). A condição para que os aterros estejam em área áridas são referentes à precipitação inferior a 63,5 cm por ano.

Para a execução da modelagem, embora a EPA disponibilize o programa, não é permitido à alteração das células que contêm as formulações. Portanto, para que fossem realizadas as hipóteses assumidas, que serão discutidas no item 8.1.2,

foi utilizado o software Maple 13, que programa num ambiente computacional de maneira a permitiu uma montagem fácil da matriz de emissão de gases. Nesta, as colunas representam o decaimento do material que entrou em um determinado ano e as linhas são os tempos de decomposição. Após o tempo inicial (zero) de entrada no aterro, as demais colunas são defasadas em uma linha em relação à anterior. Mas, também foi desenvolvido uma planilha no Excel para a realização das modificações ao programa LandGEM.

8.1.2 Considerações para a modelagem no LandGEM

O modelo solicita, como principal dado de entrada, a massa de resíduos aterrados no tempo. Portanto, lembrando o histórico do local, entre os anos de 1978 a 1999 estimou-se que 34,5 milhões de toneladas de lixo foram depositados nesta área que compreende 200 hectares. Contudo, não há registro de todos os anos de operação. Então, os dados utilizados foram os apresentados ao CDM-ONU no *Project Design Document Form – Version 03.1*, no qual 19,3 milhões de toneladas de lixo foram aterrados, com exceção dos dados do ano de 2008 e 2009, pois foram considerados dados estimados. Para os anos de 2008 a 2012, os dados foram obtidos pela empresa que atualmente tem a concessão de operação, a Nova Gramacho. A Tabela 8-2 apresenta a quantidade de RSU depositada em cada ano.

Tabela 8-2 – Quantidade de massa disposta no aterro por ano.

Ano	Quantidade RSU
1993	1646374
1994	1669443
1995	1800209
1996	2325161
1997	2414508
1998	2390021
1999	2403311
2000	2454563
2001	2417409
2002	2473918
2003	2359715
2004	2333759
2005	2337625
2006	2474464
2007	2450064
2008	2500916
2009	2373953
2010	2533875
2011	1275471
2012	800947

Para os demais parâmetros, inicialmente foram usados os *default* apresentado pelo modelo, ou seja, L_0 e k , respectivamente iguais a $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ e $0,05/\text{ano}$. Além destes, também adotou os parâmetros apresentados por Abreu (2009), este usou os disponíveis pelo Banco Mundial, para o aproveitamento energético do AMJG, que foram $84,8 \text{ m}^3/\text{ton}$ e $0,06/\text{ano}$. Ao considerar esses dois cenários e estimando um tempo de 20 anos para o aproveitamento do biogás, o Gráfico 8-1 apresenta o prognóstico de geração de metano calculada pelo modelo LandGEM.

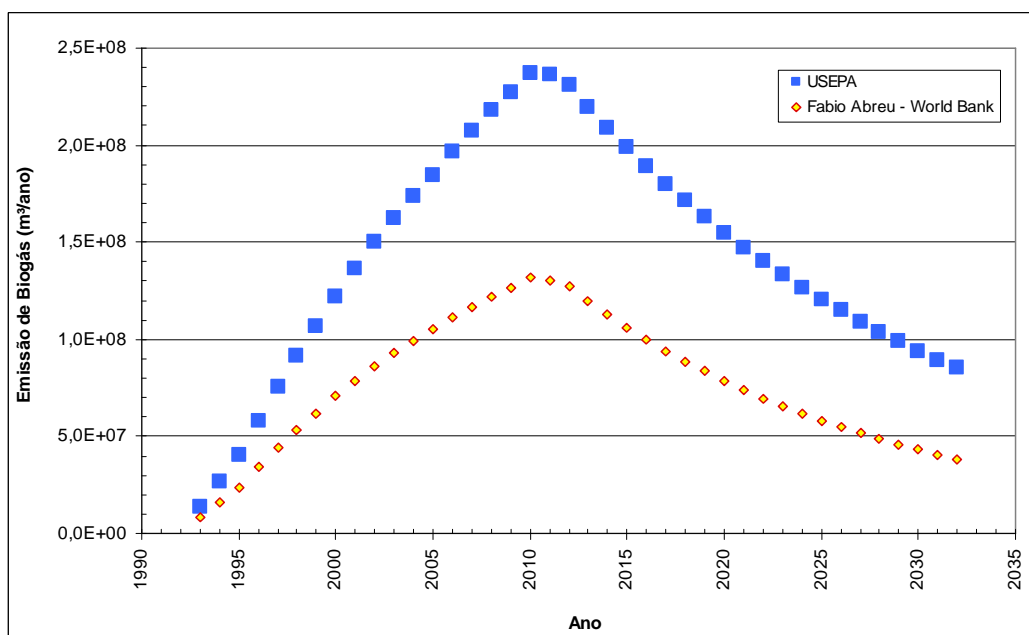


Gráfico 8-1 - Estimativa da produção de metano pelo modelo LandGEM para o AMJG com parâmetros “default” do EPA e Banco Mundial/Abreu (2009)

Ao analisar as respostas referentes às duas entradas com os diferentes parâmetros (mencionada anteriormente), uma variação significativa foi encontrada, decorrendo principalmente do valor de L_0 , e com uma pequena modificação na forma da curva durante o decaimento, promovida pela diferença no parâmetro k .

Posteriormente, os resultados do ajuste das curvas obtidas experimentalmente pelo ensaio GB_{21} serão consideradas para o uso no modelo. Como só pode ser inferida a idade dos materiais até a profundidade de 15 m, não sendo possível a identificação para os materiais com profundidade superior a 15 m, algumas hipóteses foram assumidas para a utilização dos parâmetros como L_0 e k obtidos experimentalmente.

As hipóteses levantadas neste trabalho são em relação às variações dos parâmetros com o tempo, fato citado por Dillah, *et al.* (201?) e que foi reforçado pelos resultados experimentais obtidos por Firmo (2013).

Então, a primeira estimativa da previsão do biogás foi considerar que o comportamento de todos os resíduos inseridos no aterro seriam semelhante ao do material mais novo (Furo 128C-5m), o resultado desta estimativa está tanto no Gráfico 8-2 (série unidade de k em 1/dia) como no Gráfico 8-3 (na série L_0 e k fixo).

O valor obtido de L_0 para esse ponto de amostragem, em termos de volume de biogás é praticamente idêntico ao utilizado por Abreu (2009). Assim, tomando o potencial em termos de volume de metano, o valor de L_0 passa a ser a metade do apresentado por esse autor e a quarta parte do valor *default* do modelo LandGEM.

Em relação a k , se fosse considerado apenas o valor numérico, sem levar em consideração sua unidade, o dado experimental seria 6 vezes menor, com a mesma ordem de grandeza. Porém, o valor experimental é dado pela unidade de dias^{-1} , convertendo-o para ano^{-1} este passa a ser aproximadamente 66 vezes maior. O material do furo 128C-5m apresentou um tempo de meia vida de 63 dias, indicando que este material irá produzir biogás num tempo um pouco maior que 2 meses, sendo drasticamente diferente do valor *default*, que considera o tempo de meia vida de aproximadamente 14 anos. O valor de k , do material novo, diminui consideravelmente o processo de decaimento do material orgânico, tanto que ao considerar o parâmetro k em ano^{-1} a produção de metano se reduz rapidamente em níveis praticamente nulos (Gráfico 8-2).

Ao considerar o valor de $L_{0\text{CH}_4}$ apenas para o volume de metano, o material novo (Furo 128C-5m) apresentou um valor igual a 41,66 NL CH_4/kg RSU, que é a metade do valor para o biogás. O Gráfico 8-2 apresenta a estimativa da emissão de metano adotando o valor de L_0 para o metano (41,66 NL) e o valor de k de $0,011 \text{ dias}^{-1}$ como também de $4,015 \text{ ano}^{-1}$.

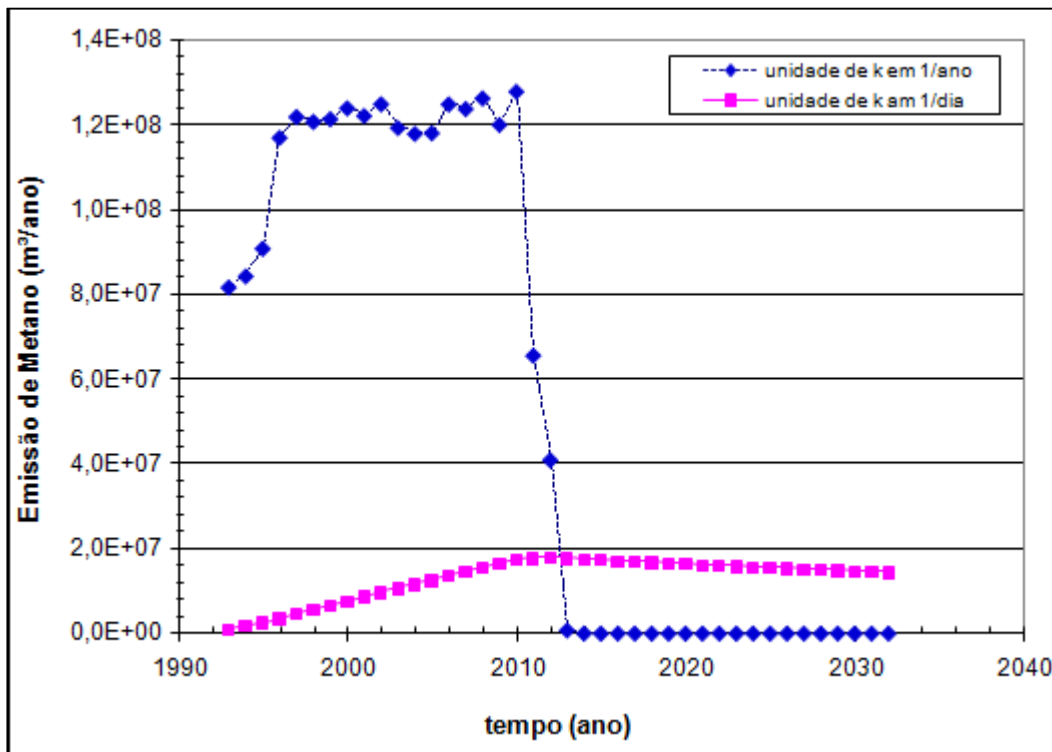


Gráfico 8-2 - Estimativa da produção de metano pelo modelo LandGEM utilizando dados do material novo (1 ano – furo 128C-5m)

O uso da unidade do parâmetro em dias^{-1} resultou num menor volume de metano até o pico de produção de gás, isso comparado com o uso da unidade em ano^{-1} . Considerando esta última unidade, o valor do pico de emissão de metano está próximo ao valor calculado com os dados apresentados por Abreu (2009).

As outras hipóteses levantadas em relação à variação dos parâmetros com a idade dos resíduos foram:

1ª – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 128C-5m, que é representativo de um material que está aterrado há 1 ano, e alterando a coluna na matriz formada que corresponde a entrada da massa do material de um ano, ou seja, a entrada do ano de 2011, estendendo tal condição para o material de 2012, foi obtido o resultado apresentado na série “L_o 1 ano”, do Gráfico 8-3, com o k em dia^{-1} ;

2ª – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 131-5m, que é representativo de um material que está há 2 anos aterrado, e alterando a coluna na matriz formada que corresponde a entrada da massa do material de um ano, ou seja, a entrada do ano de 2010. Mantendo a hipótese 1, tem-se o comportamento da série “L_o 1ano2anos”;

3ª – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 134B-5m, que é representativo de um material que está há 2 anos aterrado, e diferencia-se do 131-5m principalmente pelo valor de k , e alterando a coluna na matriz formada que corresponde a entrada da massa do material de um ano, ou seja, a entrada do ano de 2010. Mantendo a hipótese 1, tem-se o comportamento da série “ L_0 1e2anos”;

4ª – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 128C-10m, que é representativo de um material que está há 3 anos aterrado, seguindo os procedimentos anteriores, tem-se o comportamento da série “ L_0 1,2e3anos”;

5ª – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 161A-5m, que é representativo de um material que está há 4 anos aterrado, seguindo os procedimentos anteriores, tem-se o comportamento da série “ L_0 1,2,3e4anos”;

Estas hipóteses assumiram que o parâmetro L_0 e k são relativos ao material ensaiado e, portanto, não haveria variação destes no tempo. Assim, as últimas colunas da matriz, que são referentes à idade ou ao ano de entrada destes resíduos, foram modificadas, alterando os valores destes parâmetros.

6ª – Assume-se que os parâmetros variam no tempo e que todo material com tempo de degradação de 1 ano apresente comportamento semelhante ao do furo 128C-5m (1ano) e estende tal condição para os materiais com 2, 3 e 4 anos, os parâmetros alterados promovem uma modificação da matriz em relação às linhas, onde o tempo é considerado pela modelagem. Portanto, são adotados os parâmetros dos materiais correspondentes a 1, 2, 3 e 4 anos no tempo “Emissões no tempo”, e para os demais tempos foram assumidos os parâmetros *default*.

Quando os valores dos ensaios foram incorporados às colunas, ou seja, quando o conjunto de hipóteses (2ª, 3ª, 4ª e 5ª hipóteses) assume que os parâmetros são representativos de cada material, as estimativas de produção de metano apresentaram pequenas reduções na parte de decaimento da curva, como apresentada no Gráfico 8-3.

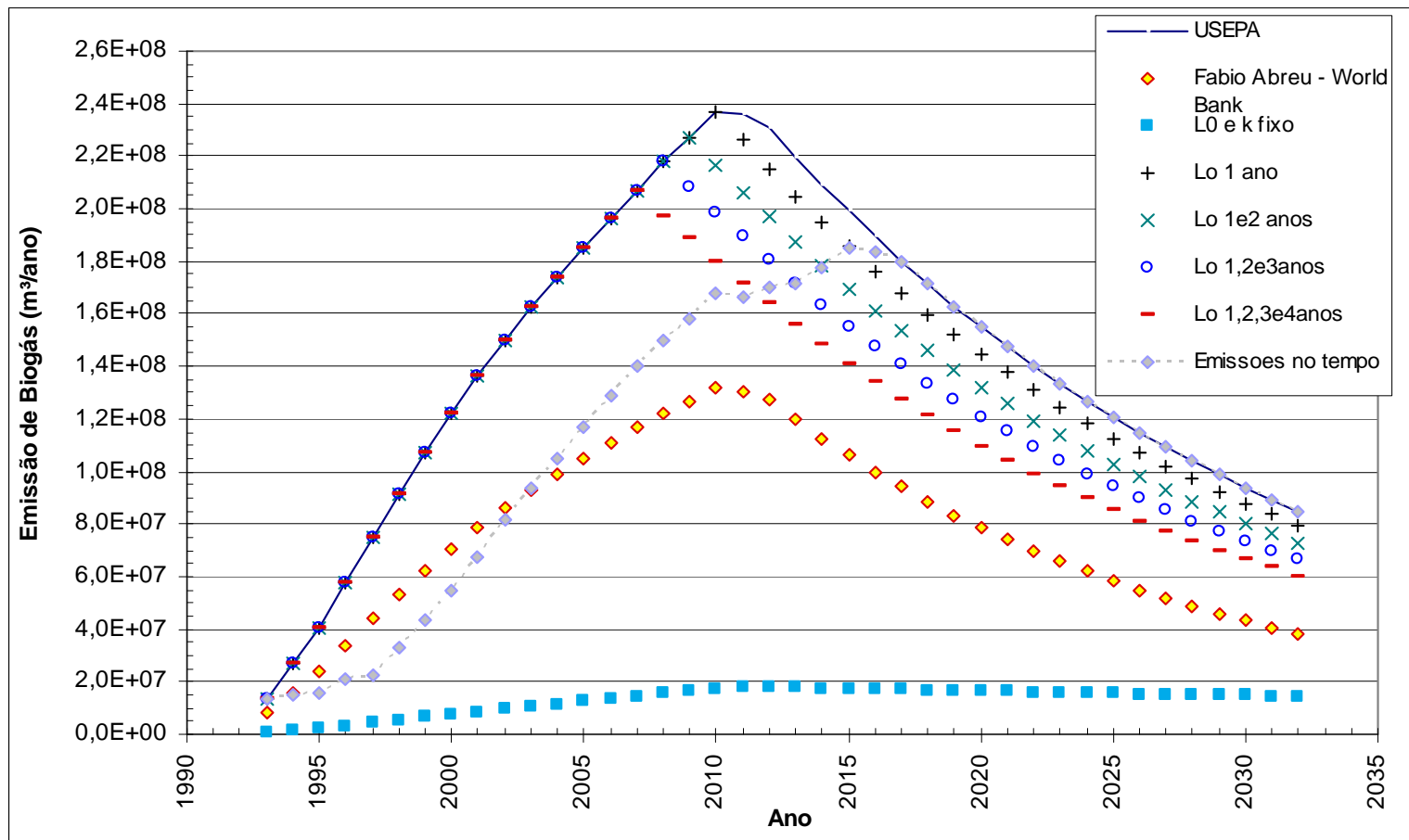


Gráfico 8-3 - Estimativa da produção de metano pelo modelo LandGEM para o AMJG com a unidade de k em dias⁻¹

Ao comparar as respostas de emissões com os parâmetros *default* da EPA, proposta pelo Banco Mundial (Abreu, 2009) e com os parâmetros do material mais novo (apresentado neste trabalho) observa-se que as maiores emissões foram resultantes dos maiores valores de L_0 assumidos. Tal resultado indica que a falta de conhecimento real deste parâmetro para o material aterrado num determinado local, aumenta os erros assumidos na previsão das emissões de gases.

Outra hipótese assumida é que cada um dos parâmetros experimentais foram assumidos como representativos de uma determinada fase de decomposição, onde os valores das linhas da matriz foram alteradas. Assim, a modificação dos valores de L_0 e k nos primeiros anos, período em que se gera uma quantidade maior de biogás, promoveram uma redução da emissão quando comparada com o resultado *default* do modelo. Os valores de emissão próximos de $2,4 \cdot 10^8$ m³/ton passaram para $1,7 \cdot 10^8$ m³/ton de metano para o ano de 2010. O parâmetro k adotado acabou sendo o valor numérico experimental, sem a conversão deste resultado para a unidade 1/ano. Isto porque, ao assumir tal transformação, o tempo de meia-vida é tão elevado que quaisquer materiais seriam, em menos de um mês, degradados, apresentando uma queda brusca após o pico como apresentado no Gráfico 8-2.

Pelos dados experimentais foi observado uma distinção com o *default*. Ainda sim, é importante examinar as diferenças entre a cinéticas de reação experimental e *in situ*, pois os parâmetros obtidos serão distintos. Esta diferença entre os valores experimentais em pequenos reatores (ensaio GB₂₁ ou BMP), reatores de grande porte e aterro experimental foram apresentadas por Firmo (2013). Com esses resultados, um estudo para a avaliação da proporção de escala desse parâmetro cinético, para cada tipo de ensaio, deve ser avaliado.

8.2 Modelo IPCC 2006

8.2.1 Características do modelo

O modelo assumido pelo IPCC 2006 para as emissões de metano é de decaimento de primeira ordem. Este considera o CH₄ gerado como resultado da degradação do material orgânico dentro de condições anaeróbicas. Parte do CH₄ gerado é oxidado na cobertura do local de disposição de resíduo sólido ou pode ser recuperada para aproveitamento energético ou queima. Este modelo é dado pela seguinte equação:

$$Emissões_{CH_4} = \left(\sum_x CH_4 - gerado_{x,t} - R_T \right) * (1 - OX_T) \quad \text{Equação 8-7}$$

onde $Emissões_{CH_4}$ é a emissão de metano no ano T (Gg); T é o ano de registro/início; x é a categoria do resíduo ou o tipo de material; R_T é a recuperação de CH_4 no ano T (Gg); e OX_T é a fração de oxidação do CH_4 no ano T.

A fração de metano que é oxidada na camada de cobertura do aterro é dada como sendo apenas a fração de metano que não foi recuperada (IPCC, 2006).

O potencial de geração de metano (L_0) não foi descrito explicitamente no Guia do IPCC 2006, mas é dado com sendo:

$$L_0 = DDOC_m * F * \frac{16}{12} \quad \text{Equação 8-8}$$

onde $DDOC_m$ é dado como sendo:

$$DDC_m = W * DOC * DOC_f * MCF \quad \text{Equação 8-9}$$

em que $DDOC_m$ é a massa depositada de DOC (carbono orgânico degradável) que pode ser decomposta (Gg); W é a massa de resíduo depositado (Gg); DOC é a fração de carbono orgânico degradável no ano de deposição (Gg C/Gg resíduo); DOC_f é a fração de DOC que pode se decompor; MCF é o fator de correlação do metano para a decomposição aeróbia no ano de deposição; F é a fração de metano no gás gerado no aterro; e $16/12$ é a taxa de peso molecular do metano e do carbono (CH_4/C).

O DOC é definido como sendo o carbono orgânico no resíduo que está acessível para a decomposição bioquímica. O DOC da massa de resíduo pode ser estimado através de sua composição pelo peso médio do conteúdo de cada um dos componentes, por:

$$DOC = \sum_i DOC_i * W_i \quad \text{Equação 8-10}$$

onde DOC_i é a fração de carbono orgânico degradável de cada um dos constituintes dos componentes; e W_i é a massa da fração de cada um dos correspondentes componentes.

Na Tabela 8-3 estão os parâmetros *default* para o DOC (IPCC, 2006).

Tabela 8-3 – *Default* DOC – IPCC, 2006.

Componentes	Matéria seca em % para resíduo úmido	DOC em % para resíduo úmido		DOC em % para resíduo seco	
	<i>Default</i>	<i>Default</i>	Variação	<i>Default</i>	Variação
Papel/papelão	90	40	36-45	44	40-50
Têxteis	80	24	20-40	30	25-50
Res. Alimentar	40	15	8-20	38	20-50
Madeira	85	43	39-46	50	46-54
Res. Jardim	40	20	18-22	49	45-55
Fralda	40	24	18-32	60	44-80
Borracha/Couro	84	39	39	47	47
Plástico	100	-	-	-	-
Metal	100	-	-	-	-
Vidro	100	-	-	-	-
Outros, inertes	90	-	-	-	-

Na Tabela 8-4 estão apresentados os valores *default* para a composição dos resíduos, considerando o regionalismo, conforme o IPCC (2006).

Tabela 8-4 – *Default* da composição de resíduos – IPCC, 2006.

Componentes	Papel/papelão	Têxteis	Res. Alimentar	Madeira	Borracha Couro	Outros, inertes
Ásia: oriental	18,8	3,5	26,2	3,5	1,0	47,0
Ásia: centro sul	11,3	2,5	40,3	7,9	0,8	37,2
Ásia: sudeste	12,9	2,7	43,5	9,9	0,9	30,1
Ásia: ocidental e oriente médio	18,0	2,9	41,1	9,8	0,6	27,6
África: oriental	7,7	1,7	53,9	7,0	1,1	28,6
África: central	16,8	2,5	43,4	6,5	-	30,8
África: norte	16,5	2,5	51,1	2,0	-	27,9
África: sul	25,0	-	23,0	15,0	-	37,0
África: ocidental	9,8	1,0	40,4	4,4	-	44,4
Europa: oriental	21,8	4,7	30,1	7,5	1,4	34,5
Europa: norte	30,6	2,0	23,8	10,0	-	33,6
Europa: sul	17,0	-	36,9	10,6	-	35,5
Europa: ocidental	27,5	-	24,2	11,0	-	37,3
Oceania: Austrália e Nova Zelândia	30,0	-	36,0	24,0	-	10,0
Oceania: outros	6,0	-	67,5	2,5	-	24,0
América: norte	23,2	3,9	33,9	6,2	1,4	31,4
América: central	13,7	2,6	43,8	13,5	1,8	24,6
América: sul	17,1	2,6	44,9	4,7	0,7	30,0
Caribe	17,0	5,1	46,9	2,4	1,9	26,7

O MCF reflete a forma de manejo do aterro, como também os efeitos da estrutura e práticas adotadas na geração de metano. Na Tabela 8-5 estão os valores *default* de MCF para as categorias de manejo.

Tabela 8-5 – Valores *default* para o MCF – IPCC, 2006.

Tipo de Local	MCF
Manejado – aerobicamente	1,0
Manejado - anaerobicamente	0,5
Não manejado – profundidade resíduo > 5m e/ou alto nível de água	0,8
Não manejado resíduo superficial < 5m	0,4
Não categorizado na forma de manejo	0,6

Para o cálculo do metano gerado, a reação de decomposição do resíduo é assumida como sendo de primeira ordem. Assim, as equações seguintes apresentam o modelo para tal decaimento como:

$$DDOC_{m(T)} = DDOC_{m(T-1)} * e^{-kt} \quad \text{Equação 8-11}$$

onde $DDOC_{m(T)}$ é a massa de carbono orgânico degradável decomposta no tempo T; e $DDOC_{m(T-1)}$ é a massa de carbono orgânico degradável a ser decomposta no início da reação.

O modelo considera o parâmetro k como um tempo de decaimento ou meia-vida de um determinado componente do material ou mesmo da massa do resíduo como um todo e é afetado por uma variedade grande de condicionantes que estão relacionados aos resíduos, como composição, condições climáticas, caracterização do resíduo, práticas de disposição do material entre outros (Pelt *et al.* 1998, citado por IPCC, 2006). Os valores *default* estão dispostos na Tabela 8-6 tanto para a massa do resíduo como para os seus diversos componentes.

Tabela 8-6 – *Default* de k – IPCC, 2006.

Tipo de Resíduo		Zona climática							
		Clima boreal e temperado (MAT ≤ 20 °C)				Clima tropical (MAT > 20° C)			
		Seco (MAP/PET<1)		Úmido (MAP/PET>1)		Seco (MAP<1000 mm)		Úmido (MAP≥1000 mm)	
		<i>Default</i>	<i>variação</i>	<i>Default</i>	<i>variação</i>	<i>Default</i>	<i>variação</i>	<i>Default</i>	<i>variação</i>
Lenta degradação	Papel/ têxtil	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Madeira/	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05
Mode-rada degradação	Org. putrescível/ jardim	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Rápida degradação	Res. alimentar	0,06	0,05-0,08	0,185	0,1-0,2	0,085	0,07-0,1	0,4	0,17-0,7
Resíduo como um todo (<i>bulk waste</i>)		0,05	0,04-0,06	0,09	0,08-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2

O IPCC disponibiliza, através do programa Excel da Microsoft, uma planilha eletrônica que permite o cálculo das emissões, considerando tanto o resíduo como um todo (*bulk waste*) como também para a composição do resíduo. Nesta planilha, a Equação 8-11 não foi implementada como ocorreu no modelo LandGEM, sendo realizada uma modificação para que todo ano fosse contabilizado como o ano 1. A partir de uma série de considerações foram realizadas para que o tempo fosse inserido implicitamente, como descrito pelo IPCC (2006). A seguir está transcrito esse raciocínio complementa a explicação da consideração do tempo de decaimento:

1) a quantidade de $DDOC_m$ depositada que não é decomposta ($DDOC_{mRem(T)}$) (ou a massa de resíduo depositada que não sofreu degradação ou a massa que restou de um anterior processo de degradação anterior) é dada por:

$$DDOC_{mRem(T)} = DDOC_{mD(T)} * e^{-k} \quad \text{Equação 8-12}$$

2) a quantidade depositada de $DDOC_m$ decomposta ($DDOC_{mDec(T)}$) durante o tempo de deposição T é dada por:

$$DDOC_{mDec(T)} = DDOC_{mD(T)} * (1 - e^{-k}) \quad \text{Equação 8-13}$$

3) a quantidade de $DDOC_m$ acumulada no aterro ($DDOC_{mA(T)}$) (ou massa acumulada de resíduo que não sofreu degradação) no ano T é dada por:

$$DDOC_{mA(T)} = DDOC_{mRem(T)} + DDOC_{mA(T-1)} * (e^{-k}) \quad \text{Equação 8-14}$$

Neste passo, o segundo termo do lado direito da igualdade assume o tempo T (por exemplo, o segundo ano) ano de decomposição do material que entrou no tempo T-1;

4) a quantidade total de $DDOC_m$ decomposta ($DDOC_{mDecomp(T)}$) no ano T é dada por:

$$DDOC_{mDecomp(T)} = DDOC_{mDec(T)} + DDOC_{mA(T-1)} * (1 - e^{-k}) \quad \text{Equação 8-15}$$

O segundo termo do lado direito da igualdade representa o inverso da quantidade de material acumulado que não sofreu degradação no tempo T-1, sendo, portanto, a massa de resíduo acumulado que foi decomposta e, neste momento, o tempo “implícito” é novamente considerado a partir operação exponencial;

5) A quantidade de metano gerado ($CH_4_gerado(T)$) pode ser calculado como sendo:

$$CH_4 - gerado_{(T)} = DDOC_{mDecomp(T)} * F * 16/12 \quad \text{Equação 8-16}$$

Embora o modelo disponibilize sua planilha de cálculo, não é permitida a modificação das células que consideram os cálculos, apenas as células dos dados de entrada e as células com macros. Estas modificações permitem selecionar dentro de algumas opções a localização, o clima e afins, que podem ser especificadas. Portanto, tendo as equações, os parâmetros e as adaptações necessárias para a execução da modelagem, segundo o LandGEM, foram utilizados os softwares Maple 13 e no Excel.

8.2.2

Considerações para a modelagem ao modelo IPCC

No modelo do IPCC, inicialmente foram utilizados os parâmetros *default* apresentado pelo modelo, com o parâmetro DOC_f igual a 0,5; o MCF igual a 0,8; o F igual a 0,5; e o DOC foi calculado pela Equação 8-10, utilizando os dados que estão na Tabela 8-7, oriundos do *Project Design Document Form – Version 03.1* (ONU), foi encontrando o valor de DOC igual a 0,18, sendo este muito próximo ao valor recomendado por este modelo (DOC de 0,15 a 0,16 para a América do Sul).

Tabela 8-7 – Cálculo do DOC para o Aterro de Gramacho.

Componentes	DOC _j em % para resíduo úmido	W _i em % para resíduo úmido
Papel/papelão	40	22,39
Têxteis	24	2,11
Res. Alimentar	15	49,54
Madeira	43	1,49
Res. Jardim	20	2,48
Borracha/Couro; Plástico; Metal; Vidro; Outros inertes	0	22,00

Em seguida são consideradas algumas hipótese, semelhantes às assumidas no modelo LandGEM, e mantendo o tempo de aproveitamento de biogás para 20 anos. Como este modelo considera um L_0 diferente do modelo anterior, o volume máximo de biogás obtido experimentalmente não poderá ser utilizado. Sendo assim, apenas o valor de k é considerado o obtido o de forma experimental. Para

os demais parâmetros, são adotados como sendo constantes e iguais aos anteriormente citados.

Assim, as hipóteses assumidas estão discutidas a seguir.

A primeira estimativa da previsão do metano foi considerar que todos os resíduos inseridos no aterro apresentassem comportamento semelhante ao do material mais novo (Furo 128C-5m), com o valor de k uma ordem de grandeza menor que o considerado como *default*. O resultado desta estimativa pode ser visualizada no Gráfico 8-4, na “série Novo” (Furo 1285C-5m), sendo observado uma estimativa de geração de CH_4 muito menor, mas com comportamento semelhante ao apresentado pelo modelo LandGEM.

As hipóteses consideradas em relação à variação dos parâmetros com a idade dos resíduos foram:

1^a – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 128C-5m, representativo de um material que está aterrado há 1 ano, alterando a constante k para a entrada da massa do material com idade correspondente a um ano, o resultado pode ser visualizado pela série “ k com 1 ano”, no Gráfico 8-4.

2^a – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 131-5m, representativo de um material que está aterrado há 2 anos. Procedimento idêntico à hipótese anterior foi realizado, resultando na série “ k com 1,2 anos”.

3^a – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 128C-10m, representativo de um material que está aterrado há 3 anos. Seguindo os procedimentos anteriores, tem-se o comportamento da série “ k com 1,2,3 anos”.

4^a – adotados os parâmetros resultantes do ensaio experimental do Furo 161A-5m, representativo de um material que está aterrado há 4 anos. Seguindo os procedimentos anteriores, tem-se o comportamento da série “ k com 1,2,3,4 anos”.

As hipóteses (da 1^a a 4^a) assumem que o parâmetro k é representativo de cada material ensaiado e, portanto, não haveria variação de seu valor no tempo. A última hipótese que foi assumida considera o parâmetro k variando no tempo como:

5^a – Se todo material após 1 ano de degradação apresentasse comportamento semelhante ao do furo 128C-5m (1ano) e de forma análoga estende-se tal condição para os materiais com idade de 2, 3 e 4 anos para os respectivos valores obtidos empiricamente. Com seus parâmetros modificados para o tempo correspondente, e considerando os demais anos com *k default*, então o comportamento é o apresentado pela série “Emissões no tempo” no Gráfico 8-4.

O uso do *k* correspondente ao material mais novo apresentou um maior pico de produção de gás, contudo após este máximo o decaimento é muito mais acentuado que os demais, no qual após 3 anos a geração é praticamente nula.

Considera-se os valores recomendados para os parâmetros do modelo, este apresenta o segundo maior pico de produção e o que apresenta maiores valores pós pico. Pelo uso da 1^a a 4^a hipótese, não existe muita variação do valor de pico, por existir a ocorrência de todos os demais pontos. Mas, a condição pós pico apresenta uma diminuição proporcional ao aumento do número de modificações do parâmetro *k* para os últimos anos de deposição dos resíduos, variando entre 32.688 (pela 4^a hipótese) contra 55.733 (*default* IPCC) ton. de CH₄ emitido para o ano de 2015. Para o ano de 2025 as estimativas variaram de cerca de 6.000 a 10.000 ton de CH₄ emitido. Observa-se que logo após o último aporte de material ao aterro a variação de gás é maior, sendo menor depois de um tempo maior de decomposição. Assim, os erros de prognósticos de emissões são maiores para condições próximas ao máximo de geração, diminuindo com o tempo.

Por fim, ao considerar o parâmetro *k* variando com o ano, para o período de 1 a 4 anos, como descrito na 5^a hipótese, é observado a maior variação no pico de emissão. A variação de 110.570 a 69.600 ton. de CH₄ emitido, com o parâmetro *default* e com o ajuste do parâmetro apresentado pela 5^a hipótese, respectivamente. A diminuição do pico de produção esta condizente com o que é esperado, pois nos primeiros anos o resíduo é capaz de produzir maior quantidade de gás e alterações do parâmetro cinético influenciam sua taxa de decomposição.

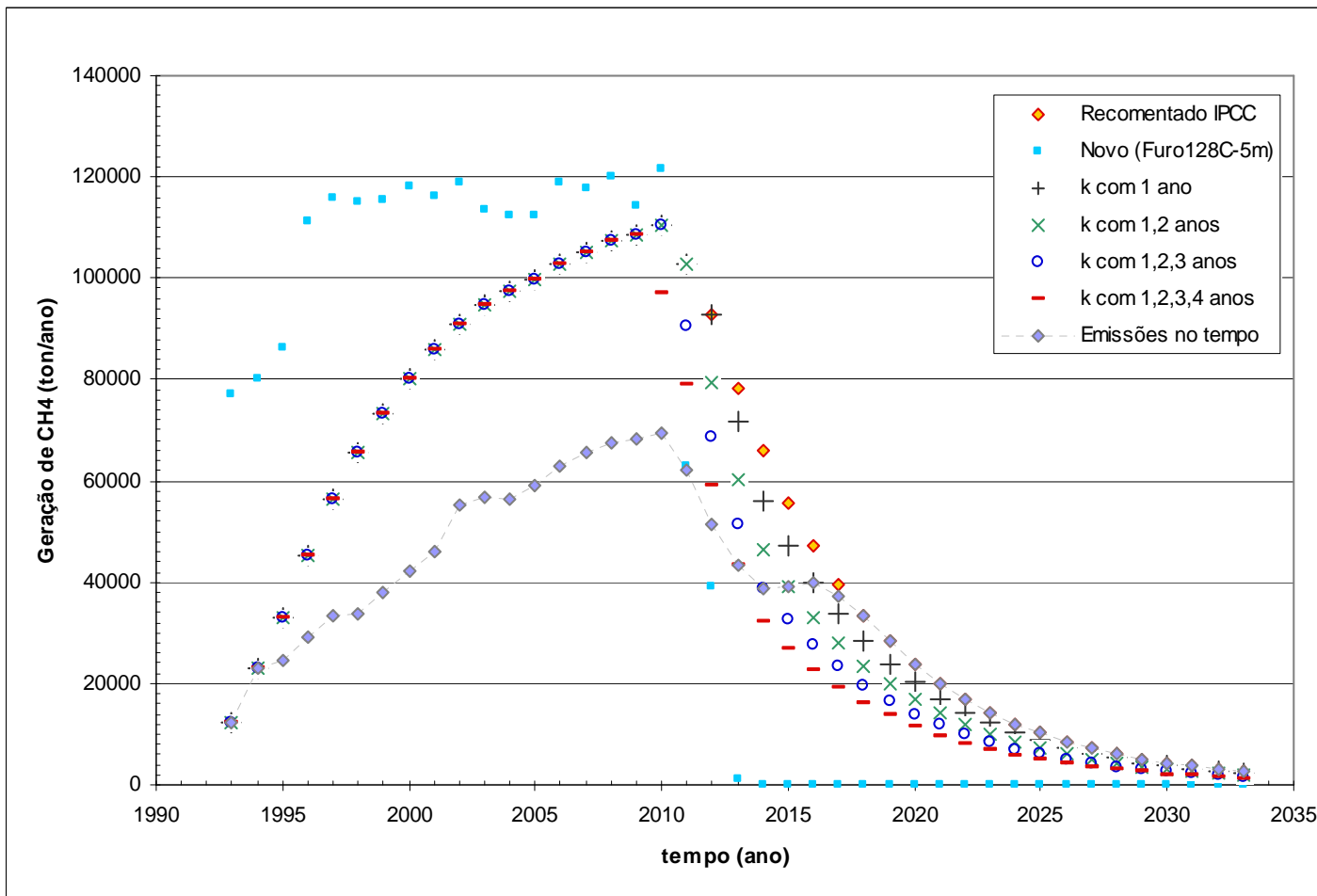


Gráfico 8-4 - Estimativa da produção de metano pelo modelo IPCC para AMJG

Este modelo, por considerar um modelo de decaimento de primeira ordem, igualmente como o modelo LandGEM, também adota o parâmetro k , que é responsável pela taxa de decaimento do material em decomposição. Contudo, o valor de L_0 leva em consideração algumas características do resíduo, sendo sua unidade dada em Gg (massa), diferentemente do modelo da EPA, que é dado em m^3/Mg (vazão). Comparando em termos numéricos, o valor de L_0 do IPCC, desconsiderando a massa depositada (W) o valor será igual ao k do LandGEM. Assim, o valor do modelo LandGEM resulta sempre numa estimativa de geração de metano maior do que o IPCC.

8.3 Retroanálise da geração de Metano

Uma nova possibilidade de interpretação dos dados experimentais para a previsão de metano é usar não somente o valor de k , mas também o valor de DOC. Para tal, foi realizado uma retroanálise, obtendo o valor de DOC através do ajuste dos dados do ensaio.

A retroanálise da geração de metano foi conduzida de forma a avaliar qual seria a proporção de DOC existente no material coletado.

Para a retroanálise foram assumidas algumas considerações, tais como:

1^a.: considerar a massa de entrada utilizada para os ensaios de potencial bioquímico de metano (GB_{21}), em que a quantidade média de massa orgânica foi de 50 gramas.

2^a.: em relação aos parâmetros de entrada ao modelo IPCC. Os parâmetros DOC_f , MCF e F foram considerados de iguais valores aos recomendados pelo IPCC, sendo iguais a, respectivamente, 0,5, 0,8 e 0,5.

A retroanálise foi realizada através da curva de geração de gás obtida pelos parâmetros resultantes do ajuste da equação de von Bertalanffy aos dados experimentais, como explicado no item 4.3, apresentado na Tabela 7-13. Assim, usando os dados de ajuste à equação de von Bertalanffy tem-se o Gráfico 8-5, que é a representação da curva de volume de metano acumulado no tempo para o material de 5 m do furo 128C.

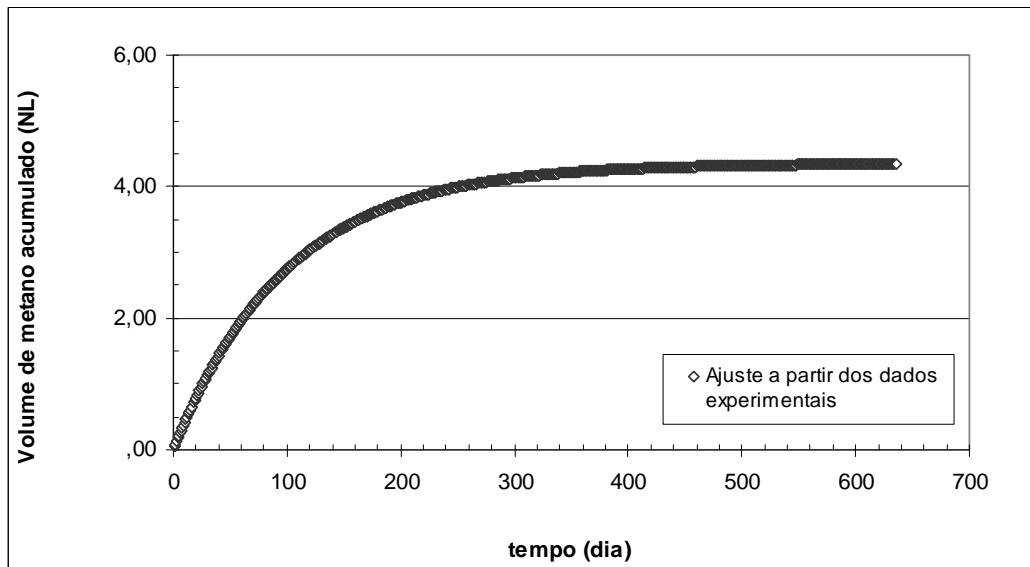


Gráfico 8-5– Volume de metano acumulado obtido a partir dos parâmetros de ajuste da eq. de von Bertalanffy aos dados experimentais

Após a obtenção da curva apresentada acima, os dados de volume de metano acumulado são convertidos de volume (NL) para massa (g), assumindo que a densidade específica do metano é de 0,717 g/L, já que a unidade de saída do modelo é dado em massa.

Em seguida, a partir da equação do modelo IPCC, dois parâmetros foram retroanalisados, sendo os demais considerados constantes (os parâmetros fixados são: DOC_f igual a 0,5; o MCF igual a 0,8; o F igual a 0,5), com exceção do parâmetro W que, neste momento, foi considerado como sendo a massa média da fração orgânica utilizada para a realização do ensaio GB₂₁. Os parâmetros retroanalisados são: o k e o DOC.

Portanto, ao transformar ambos os resultados na mesma unidade, o valor de k e DOC foram testados a fim de sobrepor as curvas.

O Gráfico 8-6 apresenta o resultado da retroanálise pela sobreposição das curvas usando os dados do ajuste as curvas experimentais (na Tabela 7-13) e do modelo IPCC com os parâmetros k e DOC retroanalisados.

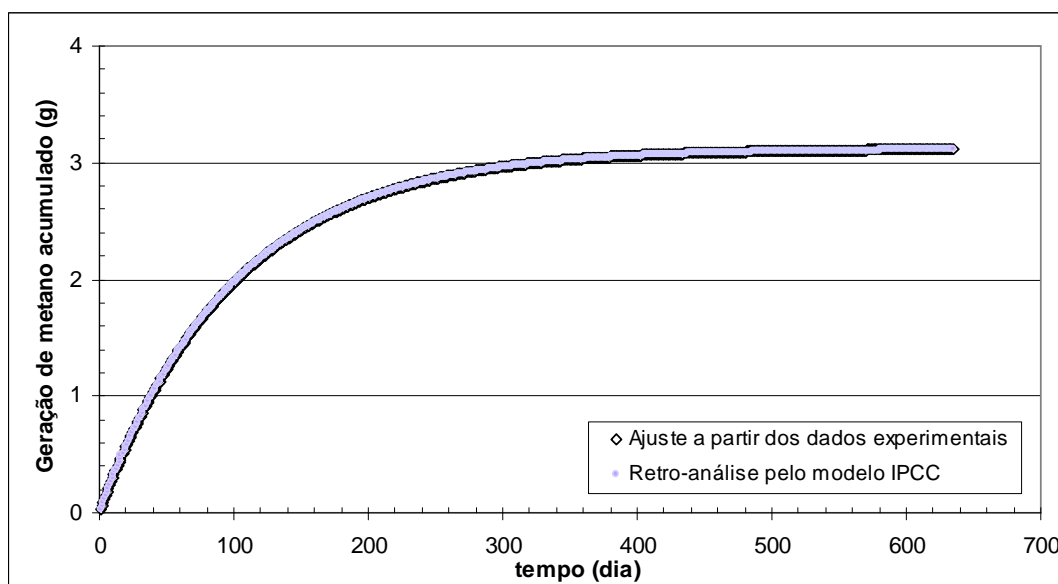


Gráfico 8-6 – Retroanálise para o modelo IPCC para o material do furo 128C-5m

Como o parâmetro k está relacionado à forma da curva, então este foi idêntico ao obtido pelo ajuste dos dados experimentais (na Tabela 7-13). Já os dados retroanalizados do parâmetro DOC estão apresentados na Tabela 8-7.

Tabela 8-8 – Retroanálise do valor de DOC para o modelo IPCC

Furo	Prof.	k_{IPCC} ajuste (1/dia)	DOC_{aj}
128C	5 m	0,011	0,00235
	10 m	0,123	0,00300
	15 m	0,031	0,0009
131	5 m	0,125	0,0014
	10 m	-	-
	15 m	0,011	0,0012
	20 m	-	-
	25 m	0,028	0,0004
134B	30 m	0	0
	5 m	0,091	0,001
	5 m	0,1	0,00028
161	10 m	0,083	0,0005
	15 m	0,046	0,00012
	20 m	-	-

Os valores de DOC encontrados pela retroanálise foram inferiores ao recomendado por esse modelo. O valor *default* de DCO é superior em duas a três ordens de grandeza, o que resulta num valor de geração de metano muito superior ao obtido experimentalmente.

Ao considerar o valor de DOC_{aj} obtido pela retroanálise é possível a partir deste estimar o potencial máximo de geração de metano para uma região de influência da área de coleta do material amostrado. Portanto, considera-se o raio

de influência entre os drenos de 50 m e o peso específico do RSU, calcula-se a massa de resíduo que tem correspondência com a amostra ensaiada. Como não foi possível determinar *in situ* os valores de peso específico, foram considerados tanto o valor máximo quanto o mínimo que estão disponíveis na literatura, sendo estes: $0,91 \text{ kg/m}^3$, calculado pela equação apresentada por Azevedo *et al.* (2003), citado por Nascimento (2007), que considera a variação do peso específico com a idade do RSU, e $10,02 \text{ kg/m}^3$, apresentado por Costa Leite *et al.* (1979) para um resíduo com 6 anos de idade retido do AMJG.

A massa de resíduo da área de influência dos poços de drenagem é de: 35,73 ton (para o peso específico mínimo) e 393,48 ton (para o peso específico máximo). Ao considerar a maior quantidade de massa e assumindo três cenários a serem considerados no modelo IPCC, tais como: 1) os dados *default* (k igual a 0,17 e DOC igual a 0,18); 2) o DOC_{aj} e o k na unidade de 1/dia; e 3) DOC_{aj} e o k na unidade de 1/ano, tem-se, para o material mais novo, de menos de 1 ano, retirado do furo 128C-5m a comportamento apresentado no Gráfico 8.7.

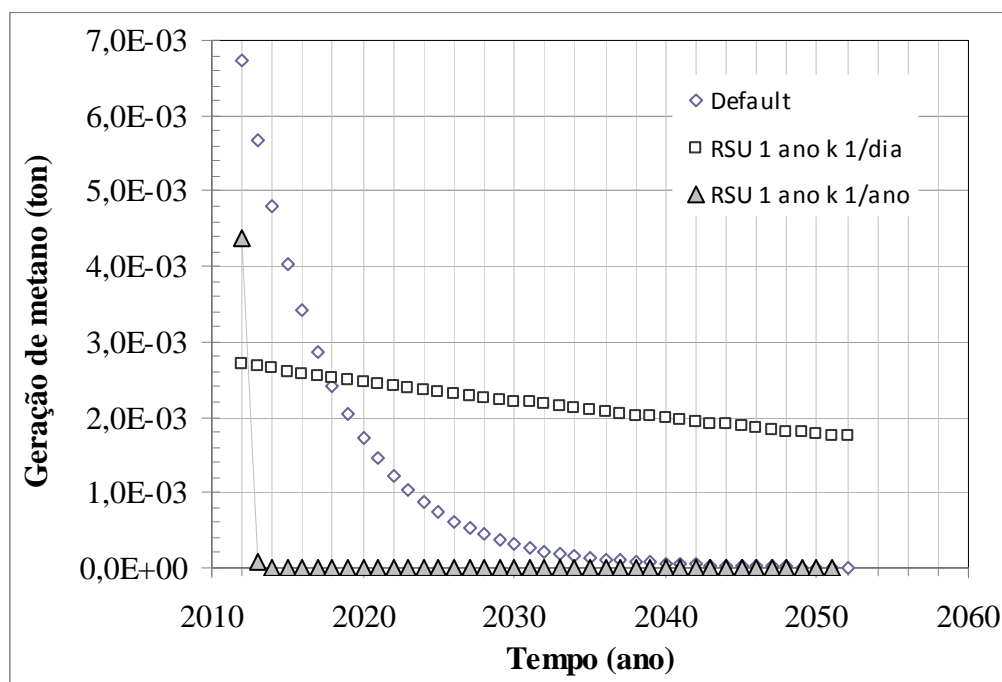


Gráfico 8-7– Estimativa de geração de metano pelo modelo IPCC usando o parâmetro retroanalizado do Furo 128C-5m

No Gráfico 8-7, o valor no tempo zero para a série que considerou a unidade de k 1/ano não foi apresentado, pois por ser muito superior ($0,24 \text{ ton}$) aos demais não permitiria ser possível a visualização das formas das curvas apresentadas. Em

relação aos demais tempos, a série que utilizou os valores dos parâmetros *default* apresentou-se superior até o oitavo ano (2018), após a geração de metano apresentou-se menor do que a série que considerou o valor retroanalísado (DOC_{aj}) e o parâmetro k (na unidade 1/dia). Se o parâmetro k for considerado por ano, o tempo de meia-vida correspondente é igual a 63 dias, assim, o tempo de conversão dessa quantidade de material ocorre após 4 ano, como observado no Gráfico 8-7

Para a estimativa da geração de metano pelo modelo IPCC com o parâmetro DOC_{aj} e o cinético k , foi realizado o mesmo procedimento descrito anteriormente, para cada um dos pontos amostrados e com resultados experimentais do ensaio do potencial de produção de biogás, com exceção do ponto à 30 m de profundidade do furo 131, por não ter apresentado nenhuma quantidade de gás, e do à 20 m do furo 161A, por ter apresentado parâmetros de ajustes inconsistentes.

Após a estimativa da geração de metano pelos pontos de amostragem, o Gráfico 8-8 apresenta a soma de todas as gerações, considerando que a entrada de todas as massas foi efetuada numa mesma data.

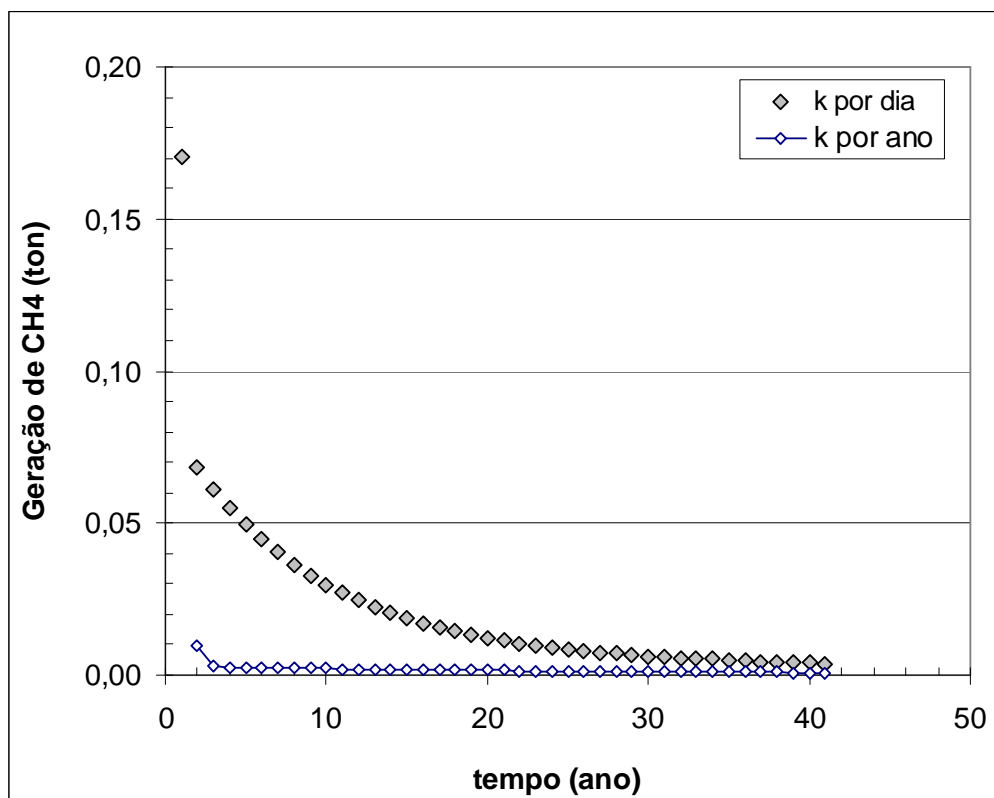


Gráfico 8-8 – Estimativa de geração de metano pelo modelo IPCC usando o parâmetro retroanalísado dos pontos ensaiados

Essa estimativa corresponde ao potencial máximo de metano que pode ser gerado a partir dos 8 pontos ensaiados experimentalmente. Para uma avaliação do prognóstico da quantia de gás que ainda pode ser produzido no AMJG, seria necessário a medição em campo de quanto de gás já foi gerado por estes pontos, a fim de estimar quanto falta a ser gerado. Como tais dados não estão disponíveis, torna-se mais trabalhoso de ser definido a quantidade de gás que ainda pode ser gerada a partir dos dados e condições observados por essa tese.