

**III-313 – ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE
MONITORAMENTO E DE MODELOS DE PREVISÃO DE GERAÇÃO DE
METANO NO ATERRO SANITÁRIO DE CAIEIRAS - SP****Mauro Meirelles de Oliveira Santos⁽¹⁾**

Engenheiro Eletrônico pelo Instituto Militar de Engenharia. Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela PUC-Rio. Consultor do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação para o inventário nacional de gases de efeito estufa e na análise de projetos MDL.

Celso Romanel⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Arizona, EUA. Professor do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Ana Ghislane Pereira Van Elk⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Campina Grande. Doutora em Geotecnia Ambiental pela Universidade de Oviedo, Espanha. Professora do Departamento de Engenharia Civil da UERJ.

Endereço⁽¹⁾: Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ - CEP: 22451-900 - Brasil - e-mail: romanel@puc-rio.br

Endereço⁽²⁾: Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã – Rio de Janeiro – RJ - CEP: 20550-013 - Brasil - e-mail: ghislane@centroin.com.br

RESUMO

O propósito deste trabalho é avaliar os modelos matemáticos utilizados para a previsão da geração de metano no aterro sanitário de Caieiras, que serve ao município de São Paulo, e comparar as previsões com os resultados monitorados ao longo dos anos de operação do aterro. Cerca da metade do volume de biogás gerado em um aterro é composta por metano, a parte mais significativa pelas seguintes razões; primeiro, porque é um gás de efeito estufa; segundo, porque a sua queima, além de desejável, pode gerar energia renovável. Projetos de aterros que queimam metano podem receber incentivos financeiros – créditos de carbono – por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto. O aterro sanitário de Caieiras enquadra-se na categoria de projeto MDL, para o qual existe obrigatoriamente um documento de concepção, com as previsões de resultados, bem como documentos periódicos posteriores comprovando as metas alcançadas, todos publicados na internet e de consulta pública. Os modelos de previsão utilizados no aterro Caieiras, seus parâmetros, resultados e eficiências são apresentados, bem como as comparações em termos de eficiência obtidas com os diferentes modelos.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Geração de Metano, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Aterro Caieiras, Modelos de Previsão.

INTRODUÇÃO

Em 1992, numa reunião ocorrida na cidade do Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – conhecida também como Rio-92 – as nações do mundo reconheceram que as atividades humanas estavam aumentando as concentrações de gases responsáveis pelo efeito estufa (GEE) na atmosfera e intensificando o fenômeno do aquecimento global. Os países concordaram em trabalhar para uma solução, nascendo ali a Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC*), ou Convenção do Clima, com o objetivo fundamental de tentar reverter o processo.

O efeito estufa acontece naturalmente na atmosfera, evitando que a Terra tenha uma temperatura média cerca de 30°C menor sem ele. A vida depende desse equilíbrio de temperatura. A intensificação do efeito estufa é consequência do aumento da concentração dos gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), principalmente, e que têm sido emitidos de forma acelerada desde a revolução industrial. O uso dos combustíveis fósseis – carvão e petróleo – leva o carbono estocado durante milhões de anos para a atmosfera. Aliado a outros processos causados pelo homem, como o desflorestamento, a criação de animais, a indústria, a agricultura em larga escala, então o equilíbrio do sistema climático é colocado em risco. Há graves consequências previstas, como aumento do nível do mar, intensificação de eventos extremos, como secas,

inundações, furacões, além da mudança no padrão de temperaturas. Tais alterações afetariam não só a produção de alimentos mas também a distribuição de vetores de diversas doenças.

A cada ano a Convenção do Clima reúne os países, nas chamadas Conferências das Partes – COPs – para acertar detalhes da execução das ações necessárias para o combate ao aquecimento global. Numa delas, a de 1997 em Quioto, no Japão, foi criado o chamado Protocolo de Quioto (Kyoto Protocol, 1997), com o estabelecimento de metas de redução de gases de efeito estufa para os países industrializados. Esses países são os que devem liderar a redução de gases de efeito estufa, segundo um dos princípios fundamentais da Convenção do Clima, o das responsabilidades comuns porém diferenciadas.

O Protocolo de Quioto também criou mecanismos para facilitar o cumprimento de tais metas, sendo um deles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – cujo objetivo é também auxiliar os países em desenvolvimento na utilização de métodos e tecnologias mais eficientes, capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em diversos tipos de projetos. Essas reduções são transformadas em “créditos de carbono” que podem ser usados pelos países industrializados para atingir suas metas. Desde 2005, quando entrou em vigor o Protocolo de Quioto, 369 projetos brasileiros de MDL foram registrados até 23/11/2014, cobrindo diversos setores de atividades. Todos os projetos MDL precisam obedecer rigorosamente diretrizes e metodologias aprovadas previamente, seja diretamente pelas COPs ou pelo Conselho Executivo do MDL, já que seus resultados, os créditos de carbono, precisam de credibilidade internacional para serem usados pelos países industrializados em suas obrigações legais de redução.

Um dos tipos de projeto MDL mais comuns é o de queima do metano (CH_4) gerado em aterros sanitários. O metano constitui cerca de 50% do gás proveniente da decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos de um aterro, gás esse chamado genericamente de biogás. Segundo o IPCC (2001), cerca de três a quatro por cento das emissões antropogênicas globais de gases de efeito estufa deve-se a emissões ocorridas em aterros.

Outro constituinte importante do biogás é o CO_2 , que também é eliminado para a atmosfera, mas por ser de origem biológica, ou seja, faz parte do ciclo normal da vida, é posteriormente retirado através da fotossíntese dos vegetais. Já o CH_4 é produto da ação humana (acúmulo de resíduos) com impacto no aquecimento global; ao ser queimado é convertido em CO_2 , reduzindo seus malefícios.

Com o MDL, abriu-se a oportunidade de melhorar as condições sanitárias da disposição dos resíduos sólidos urbanos, pela construção de aterros sanitários em substituição a lixões, com uma maior captação e oxidação do gás de efeito estufa gerando créditos de carbono que, transformados em recursos financeiros, viabilizem economicamente o empreendimento. Tal oxidação pode ser a simples queima do metano, quanto seu uso para a geração de energia elétrica.

Na concepção de um projeto MDL para redução de emissões de aterro sanitário é importante prever a quantidade de gás gerada durante a vida útil do aterro. Quanto o projeto vai gerar de biogás, quanto vai receber em troca dos créditos de carbono pela eliminação do metano, são questões importantes para a viabilidade técnica e econômica do empreendimento bem como para seu registro como projeto MDL. Uma adequada análise dessas questões é também de interesse dos países industrializados para contabilização de gases de efeito estufa em seus respectivos inventários nacionais.

As discrepâncias entre a previsão de geração e a captação efetiva de biogás dos aterros sanitários operados sob o MDL podem, em parte, ser explicadas pelo uso de diferentes modelos de previsão. Uma breve apresentação destes modelos, com a discussão de suas hipóteses básicas e práticas de aplicação, comparando os resultados previstos com os valores publicados nos relatórios de monitoramento do aterro sanitário Caieiras é o objetivo principal do presente trabalho.

FASES DE DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Christensen e Kjeldsen (1989) identificaram cinco fases para a decomposição dos resíduos sólidos em um aterro, definidas a seguir:

Fase I - fase aeróbica curta imediatamente após o depósito dos resíduos, onde a matéria orgânica facilmente degradável é decomposta aerobicamente durante a geração de dióxido de carbono.

Fase II – primeira fase anaeróbica na qual a atividade das bactérias fermentativas e acetogênicas resulta numa rápida geração de ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono e hidrogênio. O lixiviado pode conter altas concentrações de ácidos graxos, cálcio, ferro, metais pesados e amônia, esta última devido à hidrólise e fermentação de compostos proteicos. O conteúdo do nitrogênio no gás é reduzido devido à geração de dióxido de carbono e hidrogênio. O alto teor inicial de sulfato pode ser reduzido lentamente à medida que o potencial redutor cai. O sulfeto gerado pode precipitar o ferro, o manganês e os metais pesados dissolvidos na parte inicial desta fase.

Fase III - segunda fase anaeróbica que começa com o lento crescimento de bactérias metanogênicas. A concentração de metano no gás aumenta, enquanto o hidrogênio, o dióxido de carbono e as concentrações de ácidos graxos voláteis diminuem. A concentração de sulfato diminui devido à continuação da redução do sulfato. A conversão dos ácidos graxos causa um aumento do pH (aumento da alcalinidade) que resulta numa diminuição da solubilidade do cálcio, do ferro, do manganês e dos metais pesados. Esses últimos são supostamente precipitados como sulfetos.

Fase IV – caracterizada por uma taxa de geração de metano bem estável, que resulta numa concentração de metano no gás de 50-65%, em volume. A elevada taxa de formação de metano mantém baixas as concentrações de ácidos graxos voláteis e hidrogênio.

Fase V - enquanto apenas o carbono orgânico mais refratário permanece nos resíduos depositados, a taxa de geração de metano é tão baixa que o nitrogênio começa a aparecer no gás de aterro novamente devido à difusão a partir da atmosfera. Zonas aeróbicas e zonas com potencial redutor elevado demais para a formação de metano aparecem nas camadas superiores do aterro.

Os modelos matemáticos mais simples que tentam representar a decomposição dos resíduos depositado em um aterro tendem a ignorar as três primeiras fases. Outros, para representação destas, incorporam um atraso na previsão da geração de emissões de metano em aterros.

MODELOS DE DECAIMENTO DE PRIMEIRA ORDEM

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC - fornece diretrizes para inventários nacionais de gases de efeito estufa (GEE), incluindo as emissões de metano da disposição de resíduos sólidos. Modelos são propostos em suas três publicações IPCC (1997), IPCC (2000) e IPCC (2006). Cada publicação tem diferentes maneiras de tratar o modelo matemático chamado de Decaimento de Primeira Ordem que considera a variação anual das emissões de metano. Esses modelos constituem os fundamentos da metodologia utilizada para estimar as emissões de linha de base de uma atividade de projeto sobre mitigação de metano dos aterros no âmbito dos projetos MDL.

Há dois parâmetros básicos para o modelo de decaimento de primeira ordem: a constante k de decaimento e o potencial de geração de metano L_0 . A constante k é baseada na meia-vida do carbono degradável no aterro, através da seguinte relação:

$$k = \ln(2) / t_{1/2} \text{ (ano}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

onde $t_{1/2}$ é a meia-vida (anos) do carbono degradável dos resíduos.

O potencial de geração de metano L_0 [$\text{t CH}_4 / \text{t}$ resíduos ou $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{t}$ resíduos] representa a quantidade de metano gerada por massa de resíduos em um tempo infinito. Esse valor é máximo em uma situação de aterro, onde os resíduos sólidos estão em condição anaeróbia, com o metano sendo emitido ao longo de muitos anos com um decaimento exponencial. Para que L_0 represente o máximo de emissão por tonelada de resíduos com massa M , a equação para a geração de metano em função do tempo t deve ser da seguinte forma, em condições ideais:

$$Q(t) = k \times M \times L_0 \times e^{-kt} \quad (2)$$

A quantidade total de metano gerada é obtida pela integração entre os tempos $t = 0$ a $t \rightarrow \infty$, ou seja:

$$\int_0^{\infty} Q(t) dt = [-M \times L_0 \times e^{-kt}]_0^{\infty} = -M \times L_0 \times e^{-k \cdot \infty} + M \times L_0 \times e^{-k \cdot 0} = M \times L_0 \quad (3)$$

As diretrizes IPCC foram criadas para orientar os cálculos dos inventários de gás de efeito estufa nacionais, mas também são usadas para aterros individuais. Países sob a UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) devem usar essas diretrizes para seus inventários, embora de maneiras diferentes: países em desenvolvimento são encorajados a usar as diretrizes IPCC (2000), que são contudo obrigatórias para os países desenvolvidos. O uso das diretrizes IPCC (2006) será obrigatório para os países desenvolvidos a partir de 2015, podendo todos os países utilizar essa metodologia caso julguem-na mais apropriada para a sua situação particular. O uso das diretrizes IPCC (1997) para as emissões é agora menos comum.

Em relação aos projetos MDL que tratam da geração de biogás em aterros sanitários, a ferramenta metodológica CDM Tool é obrigatória para todos os casos. É também utilizada para estimar as emissões que ocorreriam quando biomassa é deixada de ser depositada em aterros, mas processada de forma aeróbica, por incineração ou compostagem.

Neste trabalho são descritos brevemente os modelos IPCC (2000), IPCC (2006) e CDM Tool, os mais utilizados no Brasil nos últimos anos para previsão de emissões em aterros.

a) Modelo IPCC (2000)

O modelo de decaimento de primeira ordem das diretrizes IPCC (2000) é expresso por:

$$\text{CH}_4 \text{ gerado no ano } t (\text{Gg.ano}^{-1}) = \sum_x [A \times k \times \text{MSW}_T(x) \times \text{MSW}_F(x) \times L_0(x)] \times e^{-k(t-x)} \quad (4)$$

t =	ano do inventário
x =	anos para aos quais se referem os dados de entrada
$A = (1 - e^{-k}) / k$	um fator de normalização para correção do somatório em relação à integração exata
k =	constante da taxa de geração de metano (1/ano)
$\text{MSW}_T(x)$ =	total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no ano x (Gg /ano)
$\text{MSW}_F(x)$ =	fração dos resíduos sólidos urbanos dispostos no ano x
$L_0(x)$ =	potencial de geração de metano [$\text{MCF}(x) \times \text{DOC}(x) \times \text{DOC}_F \times F \times 16 / 12$ (Gg CH_4 /Gg resíduos)] onde:
$\text{MCF}(x)$ =	fator de correção do metano no ano x (fração)
$\text{DOC}(x)$ =	carbono orgânico degradável (COD) no ano x (fração) (Gg C / Gg resíduos)
DOC_F =	fração do COD que realmente se decompõe
F =	fração em volume de CH_4 no gás de aterro
16/12 =	fator de conversão de C para CH_4

Pela eq. (4) a emissão de metano a partir de resíduos dispostos no aterro no ano 1 ($x = 1$) pode ser calculada no mesmo ano 1 ($t = 1$). Neste caso, a previsão da quantidade de metano gerada é a seguinte:

$$\text{CH}_4 \text{ gerado no ano } 1 = A \times k \times \text{MSW}_T(x) \times \text{MSW}_F(x) \times L_0 \quad (5)$$

Como mencionado nas diretrizes IPCC (2006), a eq. (4) é integrada do ano t para o ano t+1, portanto não se consegue contabilizar a emissão de metano no primeiro ano. Considerando uma constante k representando uma meia-vida de 10 anos, o valor calculado pela eq. (4) seria subestimado em cerca de 7% em relação à emissão determinada com a integração exata da curva de decaimento.

Esse fato reforça a interpretação de que as emissões não devem ser calculadas no primeiro ano da disposição dos resíduos, ao contrário da prática corrente observada em inventários nacionais e atividades de projetos MD, que utilizam o modelo IPCC (2000). Para uma adequada aplicação da eq. (4) deve-se utilizar um novo fator de normalização A', recomendado pelas diretrizes IPCC (2006), com o entendimento implícito que as emissões são sempre calculadas a partir do ano após a disposição.

$$A' = \left(\frac{1}{e^{-k}} - 1 \right) / k = \frac{(e^k - 1)}{k} \quad (6)$$

Em outras palavras, uma quantidade de resíduos depositada durante o primeiro ano pode ser considerada, em média, que foi colocada no aterro de uma só vez, no meio do mesmo ano. Como também existe um atraso

típico de seis meses para o início do processo de digestão anaeróbica, a geração do metano passa então a acontecer somente a partir do início do segundo ano.

b) Modelo IPCC (2006)

As diretrizes IPCC (2006) são mais cautelosas ao tratar um fenômeno de natureza contínua por um modelo de valores discretos e também levam em conta o atraso real observado na decomposição de resíduos por bactérias metanogênicas. O modelo de decaimento de primeira ordem para estimativa das emissões de metano dos locais de disposição de resíduos sólidos ((SWDS)) é baseado em duas equações principais:

DDOC_m, a massa de COD que se degrada, acumulada nos SWDS ao final do ano t :

$$DDOCma_t = DDOCmd_t + (DDOCmd_{t-1} \times e^{-k}) \quad (7)$$

DDOC_m decomposta no final do ano t :

$$DDOCm_{decomp_t} = DDOCma_{t-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (8)$$

$t =$	ano do inventário
$DDOCma_t =$	DDOC _m acumulado no final do ano t , Gg
$DDOCma_{t-1} =$	DDOC _m acumulado no final do ano $(t-1)$, Gg
$DDOCmd_t =$	DDOC _m depositado no ano t , Gg
$DDOCm_{decomp_t} =$	DDOC _m decomposto no ano t , Gg
$k =$	constante de decaimento (ano ⁻¹)

As eq. (7) e (8) indicam uma maneira prática para cálculo do carbono que irá se decompor em um dado ano, a partir da massa de carbono disponível no final do ano anterior. As diretrizes IPCC (2006) também proporcionam várias opções para determinar os valores da constante de decaimento k e outros parâmetros que fazem parte do cálculo da massa de carbono degradável disponível para o processo anaeróbio, para cada tipo de fração de resíduo. Além disso, há a consideração de um atraso na decomposição dos resíduos, com um valor *default* de seis meses recomendado, gerando emissões somente no ano após a disposição. Soluções para atrasos menores ou maiores podem ser calculadas na planilha disponível em IPCC (2006) para integrar todos os parâmetros e informações necessárias e determinar as emissões de metano da disposição de resíduos sólidos.

c) Modelo CDM Tool

As atividades de projeto envolvendo biogás gerado nos locais de disposição de resíduos sólidos (SWDS) que buscam registro no âmbito do MDL devem usar a norma *Methodological Tool – Emissions from solid waste disposal sites* (UNFCCC, 2011), ou simplesmente *CDM Tool*, para uma avaliação prévia da quantidade de metano, medido em equivalentes de dióxido de carbono, pela seguinte equação:

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \varphi_y \times (1 - f_y) \times GWP_{CH_4} \times (1 - OX) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_{f,y} \times MCF_y \times \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-k_j(y-x)} \times (1 - e^{-k_j}) \quad (9)$$

$BE_{CH_4,SWDS,y} =$	emissões de metano da linha de base que ocorrem no ano y gerada a partir da disposição de resíduos sólidos em SWDS durante um período que termina no ano y (t CO ₂ e/ano)
$x =$	anos do período em que os resíduos são depositados em SWDS, estendendo-se desde o primeiro ano no período ($x=1$) para o ano y ($x=y$).
$y =$	ano do período de crédito em que as emissões de metano são calculadas (y é um período consecutivo de 12 meses)
$DOC_{f,y} =$	fração de carbono orgânico degradável (COD) que se decompõe nas condições específicas que ocorrem nos SWDS para o ano y (fração de peso)
$W_{j,x} =$	quantidade de resíduos sólidos tipo j depositados ou deixados de ser depositados no ano x (t)

$\phi_y =$	fator de correção para levar em conta as incertezas do modelo, para o ano y
$f_y =$	fração de metano capturada e queimada, oxidada ou utilizada de outra maneira a fim de evitar as emissões de metano para a atmosfera no ano y
$GWP_{CH_4} =$	potencial de Aquecimento Global do metano
$OX =$	fator de oxidação (refletindo a quantidade de metano do <i>SWDS</i> que é oxidada no solo ou outro material que recubra o resíduo)
$F =$	fração de metano no biogás (fração de volume)
$MCF_y =$	fator de correção do metano para o ano y
$DOC_j =$	fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo j (fração de peso)
$k_j =$	taxa de decaimento para o resíduo de tipo j (1/ano)
$j =$	tipo de resíduo depositado

A eq. (9) é usada para cálculos anuais e leva em consideração as frações constituintes do resíduo, o tratamento de cada uma das frações j independentemente uma das outras, com sua própria constante k_j e potencial de geração de metano L_{0j} . A ferramenta calcula emissões em t CO_2 (com o termo GWP_{CH_4}), leva em conta a parte de metano que é oxidada enquanto passa através da camada superficial do aterro (com a fração OX) e a fração que seria queimada na ausência da atividade de projeto (com a fração f_y). O fator MCF_y é baseado na qualidade do local de disposição no ano y , com um valor padrão $MCF = 1$ para aterros sanitários, que é o valor considerado neste trabalho.

A eq. (9) é aqui simplificada, com as seguintes premissas: cálculo apenas do metano (com a remoção do termo GWP_{CH_4}); nenhum metano capturado (f_y igual a zero); sem oxidação pela superfície (OX igual a zero) e apenas uma fração j de resíduo contribuindo para as emissões no ano x :

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \phi_y \times (1 - e^{-k_j}) \times W_{j,x} \times \left[\frac{16}{12} \times F \times DOC_{t,y} \times DOC_j \right] \times e^{-k_j(y-x)} \quad (10)$$

O termo entre colchetes da eq. (10) representa o potencial de geração de metano L_0 , com diferentes valores para cada tipo de resíduo j , enquanto que o fator ϕ_y se refere a incertezas do modelo.

$$BE_y = \phi_y \times (1 - e^{-k}) \times W_x \times L_0 \times e^{-k(y-x)} \quad (11)$$

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE PREVISÃO

Para avaliar um modelo de previsão é necessário comparar seus resultados com as quantidades reais medidas em campo. A medição direta dos gases emanados de um aterro pode ser feita por meio de diversas técnicas indicadas por Oonk (2010): medições de amostras do solo retiradas de diversas profundidades a partir da cobertura do aterro, que fornecem informações sobre os processos de difusão e oxidação; medições usando câmaras fechadas; medições micrometeorológicas sobre um plano acima do aterro; medições através de seções / balanços de massa; medições através da pluma de um gás traçador; medições da pluma do metano, entre outras. Todas apresentam vantagens e dificuldades, podendo ser utilizadas combinadas entre si, mas requerem muito trabalho de campo bem como recursos técnicos e financeiros.

Outra abordagem é utilizar as quantidades recuperadas de metano, metodologia utilizada neste trabalho, baseando nos dados obtidos na consulta ao respectivo *Project Design Documentation – PDD* – do aterro. Conforme Oonk (2010) a quantidade de geração de metano pode ser obtida com base na eficiência da extração (η) e a quantidade capturada:

$$\text{geração de metano} = \text{metano capturado} / \eta \quad (12)$$

Um *PDD* contém as seguintes informações: tipo de queima de metano, se via *flares* ou para alimentação de geradores, início da operação do aterro, histórico ou previsão da quantidade de disposição de resíduos, composição média dos resíduos, modelo de previsão usado e seus respectivos parâmetros (por exemplo, potencial de geração de metano, constante de decaimento, fator de oxidação, fator de ajuste), eficiência de extração de biogás programada, eventuais etapas intermediárias de operação, outras informações relevantes. O uso pelo projeto de combustíveis ou eletricidade não tem sua quantidade estimada no *PDD* mas deve ser mensurada e reportada nos relatórios de monitoramento.

Um relatório de monitoramento cobre períodos consecutivos de operação do aterro, embora não haja regulamentação quanto à duração de cada período. Todos os relatórios disponíveis podem ser consultados a partir do acesso a sua história completa no website do MDL, identificando a última versão e alterações solicitadas pela Entidade Operacional Designada – EOD – autorizada pelo Conselho Executivo do MDL para verificação e aprovação dos relatórios de monitoramento. Tais relatórios podem ter alguma variação na apresentação das informações: alguns mostram dados horários, enquanto outros resultados consolidados. Valores de medição são posteriormente corrigidos pela incerteza dos instrumentos de medida; neste trabalho, apenas os resultados corrigidos foram utilizados.

Em casos onde a captação de metano não seja explícita, pode-se trabalhar com a quantidade de créditos gerada, com o cuidado de se descontar a geração de energia elétrica e acrescentar o uso de eletricidade pelo empreendimento e o fator de ajuste (desconto de linha base) para incluir quantidades associadas à queima de metano. O uso de combustíveis e de eletricidade, a geração de energia e o desconto de linha de base sempre aparecem mencionados nos relatórios de monitoramento do empreendimento.

PROJETO DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE BIOGÁS CAIEIRAS

O aterro Caieiras recebe resíduos do município de São Paulo desde 2002. O primeiro período de obtenção de créditos foi de 31 de março de 2006 a 30 de março de 2013, mas o projeto esteve operacional apenas a partir de 01 de fevereiro de 2007. O primeiro *PDD* foi revisto em janeiro de 2013 para correções significativas relativas às quantidades anuais depositadas. Os relatórios de monitoramento abrangem o período de 01 de fevereiro de 2007 a 30 de setembro de 2012.

A Tabela 1 mostra a série anual de disposição de resíduos no *PDD-1*, no *PDD-1_Rev*, quando se atualiza os valores de 2005 até 2012, e no *PDD-2*, quando se atualiza mais uma vez a série desde 2002 até 2012. A revisão do *PDD-1* é devida ao aumento substancial da disposição, não previsto originalmente, e que se refletia numa quantidade maior de créditos de carbono gerada pelo projeto. Nesse caso, as regras do MDL impõem justificativas e revisões do projeto.

Tabela 1 – Disposição de resíduos em Caieiras nos anos 2002 a 2013

Documento	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Resíduos (t)						
<i>PDD-1</i>	70.979	415.810	454.354	730.000	730.000	1.460.000
<i>PDD-1_Rev</i>	70.981	415.797	454.349	701.725	735.517	2.111.539
<i>PDD-2</i>	73.150	453.385	468.668	1.025.361	838.415	2.087.299

Documento	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Resíduos (t)						
<i>PDD-1</i>	1.460.000	1.460.000	1.460.000	1.460.000	1.460.000	1.460.000
<i>PDD-1_Rev</i>	2.881.103	2.580.009	3.450.052	3.283.595	3.096.657	3.158.590
<i>PDD-2</i>	2.871.149	2.582.697	3.450.356	3.283.639	3.100.029	3.162.030

Fonte: *PDD-1*, *PDD-1* revisado e *PDD-2* do projeto “Redução de emissões de gás de aterro de Caieiras”

No primeiro *PDD* foi utilizado o modelo IPCC (1997) e em sua revisão, aqui identificada por *PDD-1_Rev*, empregou-se o modelo IPCC (2000) com constante de decaimento $k = 0,08 \text{ ano}^{-1}$ e os seguintes dados adicionais que permitiram estimar o potencial de geração de metano: fração de papel, papelão e têxteis = 22,0%; fração de restos de alimentos e resíduos orgânicos = 43,0%; fração de madeiras: 2,0%; MCF = 1; $\text{DOC}_f = 0,77$; $F = 50\%$. As constantes de decaimento e potencial de geração de metano estão listadas na Tabela 2.

$$\text{DOC} = 0,4 * 22,0\% + 0,16 * 43,0\% + 0,3 * 2,0\% = 0,162$$

$$L_0 = \text{MCF} * \text{DOC} * \text{DOC}_f * F * 16/12 \text{ [t CH}_4\text{]}$$

$$L_0 = 1 * 0,162 * 0,77 * 0,5 * 16/12 / 0,0007168 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{]}$$

$$L_0 = 116 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 = 0,083 \text{ t CH}_4$$

Tabela 2 – Constante de decaimento e potencial de geração de metano no primeiro PDD-1 Rev

k (ano ⁻¹)			L_0 (m ³ CH ₄ / t resíduo)	
PDD-1 Rev	IPCC 2000	IPCC 2006	PDD-1 Rev	IPCC 2006
0,08	0,08	0,09	116,00	75,43

No segundo PDD, com base no modelo CDM Tool, os parâmetros k_j , DOC_j foram os valores *default* recomendados nas diretrizes IPCC (2006), considerando para Caieiras uma condição de clima temperado-úmido e uma composição dos resíduos baseada nos valores *default* para a América do Sul, conforme valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Frações de resíduos utilizadas no segundo PDD

PDD-2				
Madeiras e produtos de madeira	Celulose, papel e papelão	Alimentos, restos alimentares, bebidas e tabaco	Têxteis	Restos de jardins, quintais e parques
4,7%	17,1%	44,9%	2,6%	0,0%

As quantidades de metano extraídas no aterro Caieiras foram compiladas dos relatórios de monitoramento finais, que cobrem meses ininterruptos de fevereiro de 2007 até setembro de 2012 (Santos, 2014). Como os modelos estimam valores de geração de metano para os anos-calendário, o primeiro mês de 2007 foi considerado igual ao mês de fevereiro de 2007 e os três últimos de 2012 foram feitos iguais ao mês de setembro de 2012. Estas alterações feitas para completar os anos-calendário podem ser vistas com alguma reserva quando da análise dos resultados finais. A Tabela 4 apresenta os valores mensais das reduções na linha de base de metano em CO₂e e os valores de metano efetivamente oxidados, sem o desconto, enquanto a Tabela 5 sumariza as quantidades totais no período monitorado de 6 anos.

Com as quantidades anuais de metano extraídas compiladas dos relatórios de monitoramento e a estimativa de previsão de cada modelo empregado, as eficiências anuais foram calculadas para cada ano (eq. 12), e apresentadas na Tabela 6, em termos de valores anuais máximos, mínimos e médios para os modelos IPCC (2000), IPCC (2006) e CDM Tool.

Tabela 4 – Dados de reduções na linha de base por período, em CO₂e, para Caieiras

Ano	Mês	Reduções na linha de base	Linha de base	Metano oxidado	
		t CO ₂ e		t CO ₂ e	t CH ₄
2007	Jan	Para completar o ano		145,04	
	Fev	2.436,65	20%	3.045,81	145,04
	Mar	7.287,94	20%	9.109,92	433,81
	Abr	7.397,27	20%	9.246,59	440,31
	Mai	10.357,88	20%	12.947,35	616,54
	Jun	10.870,38	20%	13.587,98	647,05
	Jul	16.134,75	20%	20.168,44	960,40
	Ago	18.167,10	20%	22.708,88	1.081,38
	Set	14.603,32	20%	18.254,14	869,24
	Out	15.829,74	20%	19.787,18	942,25
	Nov	14.557,06	20%	18.196,32	866,49
	Dez	19.126,54	20%	23.908,18	1.138,48
Total		136.768,63		170.960,79	8.286,03
2008	Jan	25.075,10	20%	31.343,87	1.492,57
	Fev	14.531,67	20%	18.164,58	864,98

	Mar	27.126,88	20%	33.908,60	1.614,70
	Abr	30.207,00	20%	37.758,75	1.798,04
	Mai	30.426,29	20%	38.032,86	1.811,09
	Jun	32.690,16	20%	40.862,70	1.945,84
	Jul	33.703,78	20%	42.129,73	2.006,18
	Ago	32.723,25	20%	40.904,06	1.947,81
	Set	33.007,30	20%	41.259,12	1.964,72
	Out	21.697,45	20%	27.121,82	1.291,52
	Nov	11.247,89	20%	14.059,87	669,52
	Dez	71.521,00	20%	89.401,25	4.257,20
	Total	363.957,77		454.947,21	21.664,15
2009	Jan	37.182,98	20%	46.478,72	2.213,27
	Fev	34.993,90	20%	43.742,37	2.082,97
	Mar	38.191,30	20%	47.739,13	2.273,29
	Abr	36.460,47	20%	45.575,58	2.170,27
	Mai	42.092,90	20%	52.616,13	2.505,53
	Jun	42.434,78	20%	53.043,48	2.525,88
	Jul	42.406,85	20%	53.008,57	2.524,22
	Ago	44.472,67	20%	55.590,83	2.647,18
	Set	42.241,58	20%	52.801,98	2.514,38
	Out	49.284,02	20%	61.605,02	2.933,57
	Nov	49.690,20	20%	62.112,75	2.957,75
	Dez	50.900,72	20%	63.625,91	3.029,81
	Total	510.352,38		637.940,47	30.378,12
2010	Jan	50.712,99	20%	63.391,24	3.018,63
	Fev	45.812,60	20%	57.265,75	2.726,94
	Mar	45.758,93	20%	57.198,66	2.723,75
	Abr	50.105,04	20%	62.631,31	2.982,44
	Mai	51.053,69	20%	63.817,11	3.038,91
	Jun	48.920,17	20%	61.150,21	2.911,91
	Jul	53.793,04	20%	67.241,30	3.201,97
	Ago	56.016,15	20%	70.020,19	3.334,29
	Set	50.086,20	20%	62.607,75	2.981,32
	Out	50.607,35	20%	63.259,19	3.012,34
	Nov	44.793,20	20%	55.991,50	2.666,26
	Dez	38.179,01	20%	47.723,76	2.272,56
	Total	585.838,37		732.297,96	34.871,33
2011	Jan	39.530,12	20%	49.412,65	2.352,98
	Fev	33.509,50	20%	41.886,87	1.994,61
	Mar	44.986,20	20%	56.232,74	2.677,75
	Abr	49.361,17	20%	61.701,47	2.938,17
	Mai	56.521,38	20%	70.651,72	3.364,37
	Jun	55.595,32	20%	69.494,15	3.309,25
	Jul	63.386,27	20%	79.232,84	3.772,99

	Ago	58.728,20	20%	73.410,25	3.495,73
	Set	65.811,28	20%	82.264,10	3.917,34
	Out	74.523,24	20%	93.154,05	4.435,91
	Nov	68.321,01	20%	85.401,27	4.066,73
	Dez	78.765,20	20%	98.456,50	4.688,40
	Total	689.038,88		861.298,60	41.014,22
2012	Jan	74.135,75	20%	92.669,68	4.412,84
	Fev	75.997,21	20%	94.996,51	4.523,64
	Mar	85.125,79	20%	106.407,24	5.067,01
	Abr	80.819,38	20%	101.024,22	4.810,68
	Mai	94.571,06	20%	118.213,83	5.629,23
	Jun	92.668,37	20%	115.835,47	5.515,97
	Jul	90.386,68	20%	112.983,35	5.380,16
	Ago	92.206,67	20%	115.258,34	5.488,49
	Set	80.165,96	20%	100.207,45	4.771,78
	Out	Para completar o ano			4.771,78
	Nov	Para completar o ano			4.771,78
	Dez	Para completar o ano			4.771,78
	Total	766.076,87		957.596,09	59.915,16

fonte: Santos (2014)

Tabela 5 – Aterro Caieiras durante o período 2007 - 2012

Início	Resíduos depositados até 2012 (t)	Eficiência de extração projetada no PDD-1	Número de relatórios de monitoramento	Período monitorado	Metano recuperado (t)
2002	20.234.148	80%*	7	6 anos	180.365

* apenas para o ano de 2007, a eficiência de extração foi estimada no PDD em 70%.

Tabela 6– Eficiências de extração em Caieiras (valores máximo, mínimo e médio, dentro do período de observação) para cada modelo de previsão de geração de metano.

Indicador	PDD-1	PDD-1 corrigido	IPCC 2006 massa	CDM Tool ($\varphi=1$)	CDM Tool ($\varphi=0,9$)	CDM Tool ($\varphi=0,75$)
	A	B	C	D	E	F
Máx	64%	84%	105%	87%	97%	116%
Mín	32%	56%	69%	40%	44%	53%
Méd	52%	69%	87%	67%	74%	89%

Na Tabela 6, a coluna A se refere ao primeiro PDD-1 Rev elaborado com o modelo IPCC (2000), considerando a eq. (4) com o fator de normalização A e assumindo a prática comum de que as emissões são calculadas a partir do ano da disposição do resíduo, enquanto que a coluna B se refere ao PDD-1 Rev admitindo na eq. (4) o fator de normalização corrigido A' e o entendimento implícito de que as emissões são calculadas a partir do ano após a disposição do resíduo.

A coluna C se refere ao modelo IPCC (2006) usando a opção massa, com o atraso de seis meses, constante de decaimento de acordo com as condições de clima/umidade da localidade e com o potencial de geração de metano conforme as frações de resíduos indicadas no *PDD-2* do projeto (Tabela 3).

Os resultados da Tabela 6 mostram uma superestimativa de geração de metano no primeiro *PDD* – coluna A – que apresenta os menores valores não só devido ao modelo usado, mas também ao valor mais alto de L_0 em relação ao *default* do IPCC (2006). Note-se que se um fator de oxidação de 10% não tivesse sido utilizado nesta comparação, as eficiências seriam ainda menores. A correção na aplicação do modelo IPCC (2000) resulta em estimativas mais baixas e em uma maior eficiência, conforme indica a coluna B. No modelo IPCC (2006) na opção massa – coluna C – a eficiência resulta ainda maior.

No segundo *PDD* a abordagem das frações é usada. Antes de versão *CDM Tool* 06.0.0 de 25 de novembro de 2011, o fator de incerteza recomendado era 0,9 e, desde então, modificado para 0,75. Um fator de incerteza não existe nos modelos IPCC (1997) ou IPCC (2000).

Para efeitos de comparação entre os diferentes modelos, resultados com o modelo *CDM Tool* foram aqui apresentados admitindo três fatores de incerteza (1, 0,9 e 0,75) – colunas D, E, F – observando-se uma diminuição na previsão de geração de metano, e portanto uma aumento da eficiência, à medida que o fator de incerteza decresce.

Observe-se que para o projeto Caieiras foram adotadas as frações de resíduos *default* do IPCC (2006), diferentemente do aterro vizinho Bandeirantes, ambos servindo ao município de São Paulo. A fração relativa a alimentos – a que mais rápido degrada – foi de 44,9% para Caieiras e de 60,6% para o aterro Bandeirantes. Outra diferença entre os dois aterros é que para Caieiras foram consideradas condições de clima temperado-úmido, enquanto que para o aterro Bandeirantes foram admitidas condições de clima tropical-úmido. Se forem usados os mesmos parâmetros de Bandeirantes para Caieiras a eficiência deste último, considerando o modelo *CDM Tool*, decresce.

A caracterização ambiental é importante e pode ser alterada. As emissões de aterros – juntamente com a estabilização dos resíduos – podem ser melhoradas e aceleradas, de modo a ocorrer consideravelmente mais rápido, como indicado por US-EPA (2005-b), se o aterro for concebido e operado como um biodigestor, envolvendo principalmente adição de umidade ou recirculação de lixiviado. US-EPA (2005-a) indica valores *default* para os parâmetros do modelo considerando aterros americanos convencionais (não em zonas áridas), uma constante de decaimento k de $0,04 \text{ ano}^{-1}$ e um potencial de geração de metano L_0 de $100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{t}$ de resíduos, mas se forem operados como biodigestores os respectivos valores são modificados para $0,7 \text{ ano}^{-1}$ e $96 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{t}$ de resíduos. Mesmo sabendo que o US-EPA (2005-b) sugere um valor conservativo para k de $0,3 \text{ ano}^{-1}$ para aterros úmidos, isto ainda significa que se atinge um ritmo mais rápido de geração de gás com essa tecnologia.

Outra fonte de incerteza quando se considera um modelo de geração de biogás é a própria quantidade de resíduos depositados anualmente. De 2003 a 2012, as diferenças anuais do primeiro *PDD* para o segundo foram significativas: aumento médio de 66% , com valores mínimo de 3% e máximo de 136%. Neste trabalho os valores reais obtidos dos relatórios de monitoramento foram considerados na comparação entre os modelos, eliminando-se, assim, esse tipo de incerteza.

CONCLUSÕES

As discrepâncias entre a previsão de geração e a captação efetiva de biogás em um aterro sanitário operado sob o âmbito de projetos MDL podem, em parte, ser explicadas pelo uso inadequado dos modelos de previsão. Situações limítrofes de temperatura e umidade, exemplificadas nos casos dos aterros de Caieiras e Bandeirantes, bem como incertezas sobre a composição e quantidade dos resíduos eliminados anualmente e a forma de operação do aterro levam a variações importantes nos resultados finais determinados pelos modelos de previsão de geração de metano. Nesse sentido, são necessárias pesquisas adicionais, a fim de aprofundar o conhecimento da realidade local. Também falhas na estrutura de captação do biogás acabam influenciando negativamente a eficiência do projeto.

Tendo em vista que a legislação brasileira tenta, mais uma vez, acabar com lixões, o uso de modelos aperfeiçoados para prever a geração de metano é fundamental, a fim de permitir uma melhor compreensão de como esse gás de efeito estufa pode ser usado como fonte de energia limpa em vez de ser simplesmente liberado na atmosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHRISTENSEN, T. H. e KJELDSSEN, P. Basic biochemical processes in landfills, Chapter 2.1 of Sanitary Landfilling: process, technology and environmental impact, Academic Press, Londres, ISBN 0-12-174255-5. 1989.
2. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volumes 1, 2 and 3. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Tréanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J. and Callander, B.A. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France, 1997.
3. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nyenzi, B., Enmanuel, S., Buendia, L., Hoppaus, R., Martinsen, T., Meijer, J., Miwa, K. and Tanabe, K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan, 2000.
4. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Summary for Policymakers and Technical Summary of Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Bert Metz et al. eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2001.
5. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.
6. *KYOTO PROTOCOL*. Disponível em <http://UNFCCC.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, 1997
7. OONK, H. Literature Review: Methane from Landfills – Methods to Quantify Generation, Oxidation and Emission, Oonkay! Innovations in Environmental Technology, 2010.
8. SANTOS, M.M.O. Geração de biogás em aterros sanitários: uma análise sobre os modelos de previsão aplicados a projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Dissertação de mestrado profissional em Engenharia Urbana e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2014
9. UNFCCC, 2011. *Methodological Tool – Emissions from solid waste disposal sites – (Version 06.0.1)*. Disponível em <http://cdm.UNFCCC.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v6.0.1.pdf>
10. US-EPA. *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*, Estados Unidos. EPA-600/R-05/047. 2005-a
11. US-EPA. *First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills*. EPA-600/R-05/072, 2005-b.