

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ATERRAMENTO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES COM A VAZÃO E A COMPOSIÇÃO DOS
GASES GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO CLARO – SP.

Olívia Chiacchio Gotardo

Rio Claro (SP)

2016

OLÍVIA CHIACCHIO GOTARDO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE
ATERRAMENTO DOS RESÍDUOS DOMICILIARES
COM A VAZÃO E A COMPOSIÇÃO DOS GASES
GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO
CLARO – SP**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Comissão do Trabalho de Formatura do Curso
de Graduação em Engenharia Ambiental do
Instituto de Geociências e Ciências Exatas –
Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como parte
das exigências para o cumprimento da disciplina
Trabalho de Formatura no ano letivo de 2016.*

Orientador: Marcus César Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2016

OLÍVIA CHIACCHIO GOTARDO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ATERRAMENTO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES COM A VAZÃO E A
COMPOSIÇÃO DOS GASES GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO
CLARO – SP

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.*

Comissão Examinadora

Prof. Dr.º Marcus César Avezum Alves de Castro (orientador)

Prof.º Dr.º César Augusto Moreira

Prof.º Dr.º Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro, 28 de Junho de 2016.

assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

À minha mãe Silvana e meus avôs Domingos e Rômulo,

Pelo exemplo de vida, caráter e dedicação

RESUMO

O presente trabalho investiga as variações na vazão e na composição do biogás gerado em duas células com diferentes tempos de disposição de resíduos sólidos no aterro sanitário municipal de Rio Claro – SP. Uma das células encontra-se desativada e apresenta áreas com resíduos dispostos a mais de 10 anos, de 5 a 7 anos e a 3 anos. A célula onde está localizada a atual frente de operação contém resíduos dispostos a aproximadamente 18 meses. Foram realizadas medidas, com frequência quinzenal durante 1 ano, da vazão e das concentrações de gás carbônico (CO₂) e metano (CH₄) do biogás liberado pelos drenos implantados nas células do aterro, levando em consideração o período de estiagem e chuvas. Os drenos que relataram a maior média de concentração de metano no biogás e o maior valor de vazão no período descrito, por volta de 56,63% e 108,74m³/h, respectivamente, estão localizados em áreas com resíduos aterrados entre 3 e 7 anos. Os drenos com resíduos aterrados durante 18 meses apresentam forte correlação linear positiva entre as variáveis concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás. Os resultados demonstraram que as taxas de produção de metano e vazão de biogás podem consideradas parâmetros indicadores de atividade biológica, subsidiando estudos para análise do potencial de geração de energia em aterros sanitários.

Palavras-chave: resíduos sólidos; aterro sanitário; processo biológico; metano, biogás.

ABSTRACT

This work investigates the variation in flow and composition of the biogas generated in two solid waste cells in the sanitary landfill of Rio Claro – SP (Brazil). One of the cells is disabled and presents waste buried for more than 10 years, from 5 to 7 years and 3 years. The other one is currently in operation and has been receiving waste for approximately 18 months. The measurements were performed twice a month during 1 year, in order to obtain data for the flow and concentration of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) in the biogas released from drains implanted in the landfill cells, taking into account the dry and rainy seasons in Rio Claro – SP. The drains that reported the highest average concentration of methane in the biogas and the highest flow value in the period described, around 56.63% and 108,74m³/h, respectively, are located in areas with waste grounded between 3 and 7 years. Drains surrounded by waste grounded for a period of 18 months show a strong positive linear correlation between the variables concentration of oxygen in the biogas and methane concentration in biogas. The results demonstrated that the rates of methane production and biogas flow may be considered as parameters that indicate biological activity, therefore, supporting studies of energetic potential in waste landfills.

Keywords: *solid waste; sanitary landfill; biological process; methane, biogas.*

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEAPLA: Centro de Análise e Planejamento Ambiental

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ppmV: partes por milhão em volume

t.: toneladas

USEPA: United States Environmental Protection Agency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Condição do local de disposição dos resíduos sólidos domiciliares nos municípios do Estado de São Paulo.

Figura 2: Evolução do enquadramento do IQR Nova Proposta no Estado de São Paulo, quanto à percentagem de municípios.

Figura 3: Diagrama dos aspectos gerais de aterros sanitários, divididos em níveis.

Figura 4: Modelo genérico de disposição dos drenos de gás e lixiviado em um aterro sanitário.

Figura 5: Sequências metabólicas da digestão anaeróbia.

Figura 6: Variações de parâmetros indicadores das fases de estabilização da matéria orgânica em um aterro sanitário.

Figura 7: Evolução das populações de bactérias e da taxa de geração de metano ao longo das quatro fases do processo de degradação anaeróbica.

Figura 8(A): Distribuição espacial da concentração de dióxido de carbono no aterro de Lazareto, Tenerife 2002.

Figura 8(B): Distribuição espacial da concentração de metano no aterro de Lazareto, Tenerife 2002.

Figura 9: Variação da porcentagem de metano no biogás dos diferentes quadrantes definidos no estudo de González et al. (2011).

Figura 10: Produção de biogás em diferentes profundidades na célula do aterro.

Figura 11: Concentração de metano nos meses de abril e junho em um dos drenos estudados.

Figura 12: Valores teóricos e experimentais de vazão do gás na célula estudada.

Figura 13: Imagem da localização do aterro sanitário de Rio Claro.

Figura 14: Vista aérea das áreas do aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Figura 15: Fluxograma geral dos materiais e metodologia do presente trabalho.

Figura 16: Imagem do aterro sanitário de Rio Claro – SP com a localização dos drenos de gás.

Figura 17: Áreas de disposição antiga e nova do aterro sanitário municipal de Rio Claro.

Figura 18: Frente de operação atual.

Figura 19: Imagem do aterro sanitário de Rio Claro – SP com a localização dos drenos de gás analisados no presente estudo.

Figura 20: Dreno 31 localizado na célula nova, com destaque para a localização do dreno 32 e a frente de trabalho atual.

Figura 21: Área de alteamento, com identificação dos drenos 25 e 26 analisados no estudo.

Figura 22: Subdivisão do aterro sanitário de Rio Claro – SP em parcelas de estudo.

Figura 23: Termo-anemômetro.

Figura 24: Adaptadores para medição da velocidade do biogás.

Figura 25: Termo-anemômetro inserido na chaminé para medição da velocidade do biogás.

Figura 26: Aparelho LANDTEC 2000.

Figura 27: Procedimento de fechamento do dreno de gás para posterior medição.

Figura 28: Variação da concentração de metano no biogás liberado pelos drenos antigos e médios localizados na célula desativada.

Figura 29: Variação da vazão de biogás liberado pelos drenos antigos e médios localizados na célula desativada.

Figura 30: Variação da concentração de metano no biogás liberado pelos drenos novos localizados na área de alteamento ou suas proximidades.

Figura 31: Variação da vazão de biogás liberado pelos drenos novos localizados nas áreas de alteamento ou suas proximidades.

Figura 32: Variação da concentração de metano no biogás liberado pelos drenos recentes localizados na célula com atual frente de operação.

Figura 33: Variação da vazão de biogás liberado pelos drenos recentes localizados na célula com a atual frente de operação.

Figura 34: Gráfico *boxplot* da vazão do biogás de acordo com cada dreno analisado.

Figura 35: Gráfico *boxplot* da porcentagem de metano (CH_4) no biogás de acordo com cada dreno analisado.

Figura 36: Gráfico *boxplot* da porcentagem de gás carbônico (CO_2) no biogás de acordo com cada dreno analisado.

Figura 37: Gráfico *boxplot* da porcentagem de oxigênio (O_2) no biogás de acordo com cada dreno analisado.

Figura 38: Gráfico *boxplot* da temperatura do biogás ($^{\circ}\text{C}$) de acordo com cada dreno analisado.

Figura 39: Representação gráfica *boxplot* considerando cada tipo de dreno.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução do enquadramento do IQR Nova Proposta no Estado de São Paulo, quanto aos municípios.

Tabela 2: Características dos gases presentes no biogás.

Tabela 3: Composição do gás de aterro em diversas localidades do mundo.

Tabela 4: Composição de biogás em diferentes profundidades da camada de resíduos considerados frescos.

Tabela 5: Médias de composição do biogás no sítio de estudo desde o quadrante mais antigo (QI) até o resíduo mais recente (QIV).

Tabela 6: Composição do biogás em cada poço de perfuração da célula experimental.

Tabela 7: Valores da produção de biogás para as amostras de resíduo dos biorreatores com diferentes umidades

Tabela 8: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 07 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 9: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 08 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 10: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 19 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 11: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 25 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 12: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 26 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 13: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 28 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 14: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 31 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 15: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 32 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Tabela 16: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como antigos.

Tabela 17: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como médios.

Tabela 18: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como novos.

Tabela 19: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como recentes.

Tabela 20: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados de todos os drenos considerados no presente estudo.

Tabela 21: Valores representativos dos dados de concentração de metano e vazão de biogás obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Grupos de drenos monitorados.

Quadro 2: Classificação e características dos drenos monitorados e áreas de estudo do aterro sanitário de Rio Claro – SP.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Conversão da matéria orgânica em condições anaeróbicas em gases.

Equação 2: Definição de vazão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1. Panorama sobre resíduos sólidos e aterros sanitários	04
3.2. Processo de degradação anaeróbia	09
3.2.1. <i>Degradação anaeróbia na fração orgânica dos resíduos sólidos e o metano como indicador de atividade biológica</i>	11
3.3. Fatores que influenciam a produção de biogás em aterros sanitários	14
3.4. Comportamento da geração e composição de biogás em aterros sanitário	17
3.5. Influência da precipitação na vazão e porcentagem de metano presente no biogás em aterros sanitários	23
3.6. Caracterização da área de estudo	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1. Definição dos pontos de amostragem de biogás no aterro sanitário de Rio Claro – SP	30
4.2. Procedimentos para a medição da velocidade do biogás e cálculo da vazão	37
4.3. Análise da composição do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro – SP	39
4.4. Forma de análise dos resultados	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6. CONCLUSÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das sociedades ao longo dos últimos séculos, principalmente após o advento da Revolução Industrial no século XVIII, foi evidenciado pelo crescimento econômico, tecnológico e populacional, e por uma alteração nos padrões de consumo do ser humano. No entanto, a estas mudanças estão atrelados problemas nos âmbitos ambiental, econômico e social. Dentre os problemas ambientais estão o crescente descarte de resíduos sólidos e a carência da oferta de energia, consequência da demanda cada vez maior desta (VANZIN, 2006).

A energia é essencial para o fornecimento de serviços e a produção de bens, com base em recursos naturais (HINRICHS E KLEINBACH, 2003). Desta forma, para que a exaustão destes recursos seja parcialmente interrompida, aliada à agressão ao meio ambiente, o conceito de sustentabilidade é apontado como parâmetro a ser inserido no modelo de desenvolvimento da economia mundial.

Uma realidade que se insere neste contexto e que pode ser atenuada é a falta de tratamento ou a disposição final precária de resíduos sólidos domiciliares, que podem acarretar na disseminação de doenças, no favorecimento da presença de catadores, na contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais e na poluição do ar pelo gás.

O método mais seguro e viável de disposição final destes resíduos sólidos é o aterro sanitário. A grande quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos domiciliares e a conseqüente elevada atividade biológica, contribui significativamente para os impactos ambientais, associados à disposição desses resíduos em aterros sanitários, que podem formar pontos de emissões fugitivas de gases na superfície do aterro sanitário devido à ineficiente implantação da camada de cobertura de solo, e principalmente na geração de gases de efeito estufa e na formação de líquidos percolados, os quais possuem alto grau de contaminação de solos e recursos hídricos, além da geração de odores e atração de vetores de doenças.

Considerando que a fração orgânica destes resíduos, quando dispostos em aterros sanitários, sofre um processo de degradação predominantemente anaeróbia com a geração de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), e em menor quantidade de gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), entre outros gases, existe a possibilidade de coleta destes gases para o aproveitamento energético do gás metano, que possui elevado poder calorífico, como fonte alternativa de energia, também promovendo a redução de impactos ambientais, como danos à camada de ozônio.

Neste sentido, é necessário que haja o conhecimento do potencial de geração de biogás, para que possa ser realizado o aproveitamento do mesmo, em células do aterro sanitário formadas por resíduos com diversos tempos de aterramento. Porém, a viabilidade do aproveitamento energético não garante uma estimativa segura da taxa de geração de metano (CH₄) nas instalações mencionadas.

2. OBJETIVOS

A pesquisa propõe como objetivo geral analisar a composição do gás gerado, relacionando-a com o tempo de aterramento dos resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário de Rio Claro – SP. Nesse sentido, a presente pesquisa apresenta como objetivos específicos:

- Determinar a vazão e concentração de metano (CH_4) e de dióxido de carbono (CO_2) dos gases gerados na nova célula de resíduos do aterro;
- Dar continuidade às medições da vazão e composição do biogás em áreas já desativadas;
- Correlacionar os parâmetros de vazão e composição do gás produzido com o tempo de aterramento dos resíduos, considerando possíveis variações devido à influência das condições operacionais do aterro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

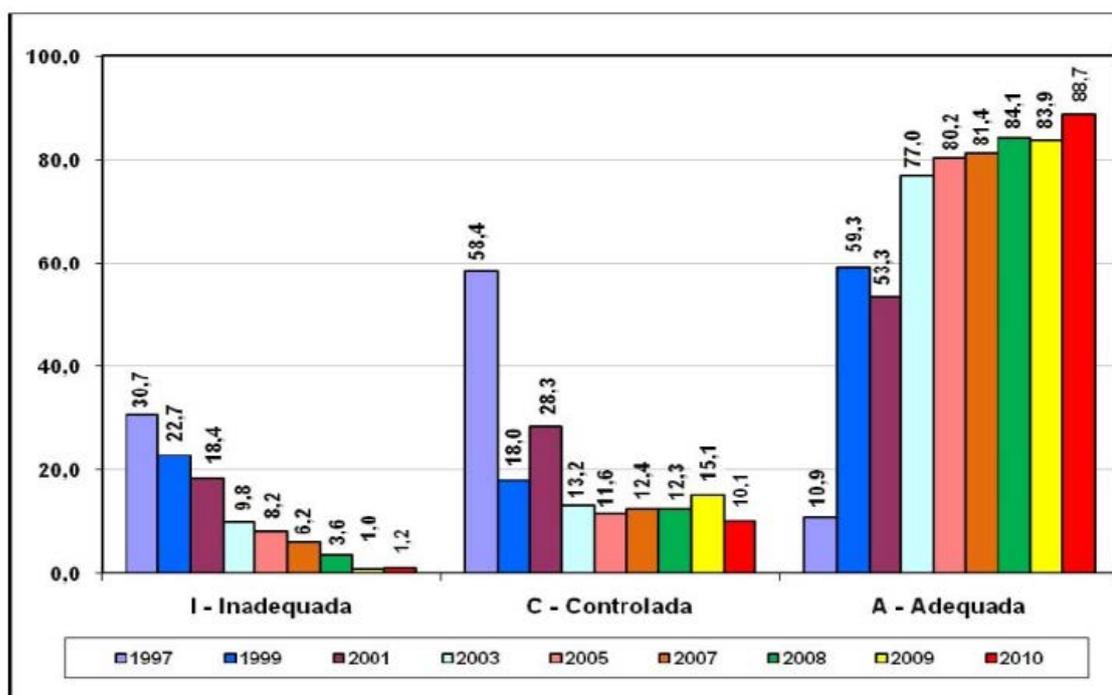
3.1. Panorama sobre resíduos sólidos e aterros sanitários

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 10.004,2004), resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos, instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e econômicas inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Já, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), a definição de resíduo sólido, utilizada no presente trabalho, contempla um material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Enquanto práticas alternativas correntes no país, como aterros controlados e lixões, são consideradas irregulares, aterros sanitários remetem a locais de disposição com condições ambientais adequadas, de acordo com critérios de avaliação do Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos (IQR) do Estado de São Paulo. A **Figura 1** a seguir exprime o aumento da taxa de disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários nos municípios do Estado de São Paulo nos últimos anos, de acordo com o órgão licenciador deste tipo de empreendimento, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). É também possível observar uma tendência de eliminação da disposição inadequada dos resíduos em questão.

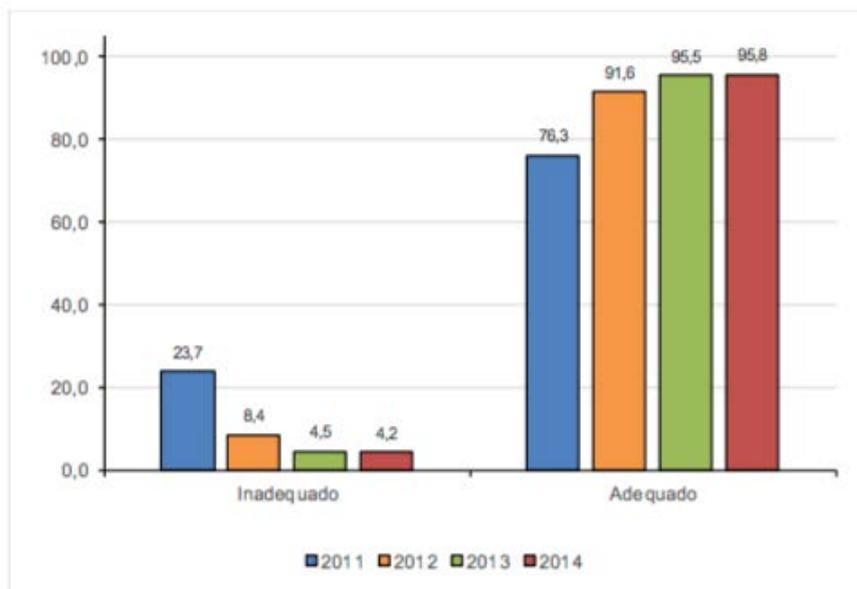
Figura 1: Condição do local de disposição dos resíduos sólidos domiciliares nos municípios do Estado de São Paulo



Fonte: CETESB (2011, p.174).

No ano de 2014, a CETESB elaborou o “IQR – Nova Proposta”, novo método de classificação dos locais de disposição de resíduos sólidos que considera novos critérios de pontuação e incorpora dados registrados e adquiridos pelo órgão ambiental ao longo dos anos. Assim, promoveu-se uma reavaliação dos municípios paulistas, notando-se uma melhora do IQR médio no Estado de São Paulo, como é possível observar na **Figura 2** e na **Tabela 1**, a seguir.

Figura 2: Evolução do enquadramento do IQR Nova Proposta no Estado de São Paulo, quanto à percentagem de municípios.



Fonte: CETESB (2014, p.110).

Tabela 1: Evolução do enquadramento do IQR Nova Proposta no Estado de São Paulo, quanto aos municípios.

Ano	2011		2012		2013		2014	
	RSU(t/dia)	%	RSU(t/dia)	%	RSU(t/dia)	%	RSU(t/dia)	%
Inadequado	4.018,0	15,3	761,3	2,9	855,7	2,1	878,99	2,2
Adequado	22.231,0	84,7	25.665,0	97,1	39.009,0	97,9	38.193,02	97,8
Total	26.249,0	100,0	26.426,3	100,0	39.864,7	100,0	39.072,01	100,0

Fonte: CETESB (2014, p.110).

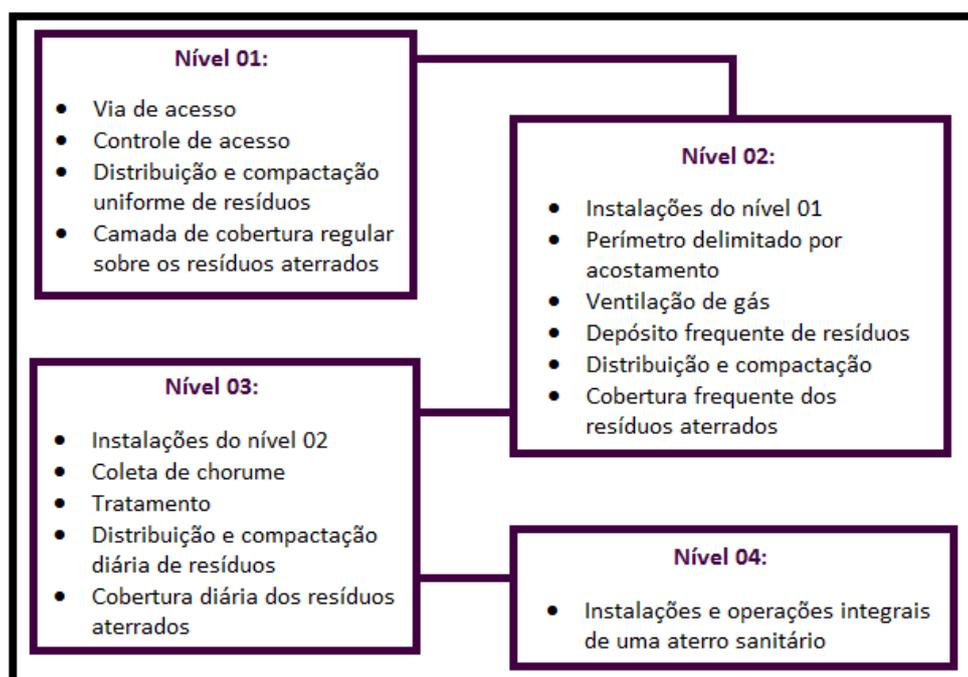
A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu em 1992, através da norma NBR 8.419, que aterro sanitário consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

Atualmente, a gestão integrada dos resíduos sólidos no Brasil é definida pela Lei 12.305/2012, também denominada Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Este documento oficial reitera que a disposição final ambientalmente adequada para tais resíduos é em aterros sanitários, e preza pela “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a

minimizar os impactos ambientais adversos”, sendo que os rejeitos mencionados contemplam “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”.

Segundo Eusuf et al. (2007), os mecanismos e atividades que contribuem para o bom funcionamento de um aterro sanitário podem ser classificados em níveis, e são apresentados na **Figura 3**.

Figura 3: Diagrama dos aspectos gerais de aterros sanitários, divididos em níveis.



Fonte: Adaptado de Muhammad Abu Eusuf et al. (2007).

O aterro sanitário de resíduos domiciliares é um sistema dinâmico formado pela massa de resíduos, sobre o qual processos físicos, químicos e biológicos ocorrem, promovendo a degradação da fração orgânica com geração de líquidos e gases (ALCÂNTARA, 2007).

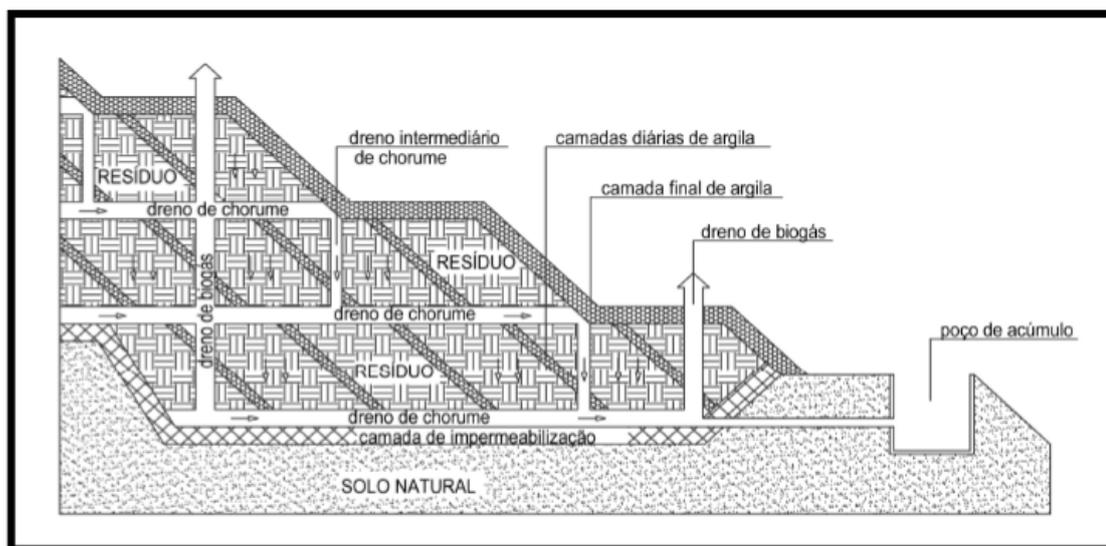
Da mesma maneira, Nolasco et al. (2008) concebe aterros sanitários como reatores bioquímicos autênticos, os quais introduzem no meio ambiente grandes quantidades de contaminantes em forma de gás e lixiviado.

Segundo Petrescu (2011), as emissões resultantes de aterros sanitários municipais causam impactos ambientais negativos em todos os componentes ambientais, sendo estes a água, o solo e o ar. Tais impactos se dão em decorrência da grande quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos domiciliares (RSD), principalmente em municípios de países tropicais, e, portanto, da elevada atividade biológica, associados à formação de

percolado, o qual possui alto grau de contaminação dos solos e recursos hídricos, além da geração de odores e atração de vetores de doenças. Quanto aos impactos atmosféricos, o armazenamento de resíduos sólidos em aterros sanitários provoca o aumento da geração de gases do efeito estufa (GEEs), principalmente metano e dióxido de carbono.

Neste sentido, é fundamental que a gestão dos resíduos sólidos urbanos seja feita corretamente. A fim de garantir boas práticas de execução e operação de aterros sanitários é necessária a implantação de sistemas de proteção ambiental, que compreende a adoção de dispositivos de revestimento da base do aterro, impermeabilizando-a com argila e geomembranas sintéticas e prevenindo a contaminação do subsolo e de águas subterrâneas; também devem ser instalados sistemas de coleta para os gases gerados (drenos para a saída do gás do interior do aterro, podendo estes ser direcionados a um canal central e o gás recolhido devido ao seu potencial energético) e para líquidos percolados, cuja coleta e armazenamento devem ocorrer na base do aterro e em lagoas impermeáveis ou tanques fechados, respectivamente. Dispositivos de captação e drenagem de águas superficiais que minimizam o afluxo de água para o interior de resíduos devem ser introduzidos no aterro sanitário, bem como sistemas de cobertura final que procuram minimizar infiltrações e problemas de erosão (PIRBAZARI et al., 1996; CALIJURI, 2002; MORAIS, 2005). A **Figura 4** esquematiza um modelo genérico de disposição dos drenos de biogás e lixiviado no sistema interno de um aterro sanitário, constituído pela massa de resíduos.

Figura 4: Modelo genérico de disposição dos drenos de gás e lixiviado em um aterro sanitário.



Fonte: Quituana (2010).

Maciel & Jucá (2013) afirmaram que os poucos projetos de aproveitamento energético do biogás no Brasil passam por dificuldades técnicas devido ao fracasso na previsão de produção de gás em aterro. A fim de ilustrar tal situação, os pesquisadores tomaram como exemplo as defasagens de 49,4 e 64,8% entre os dados coletados in situ e os valores estimados através do modelo do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) em dois dos maiores projetos de reaproveitamento energético no Brasil, nos aterros Bandeirantes e São João, ambos localizados no estado de São Paulo.

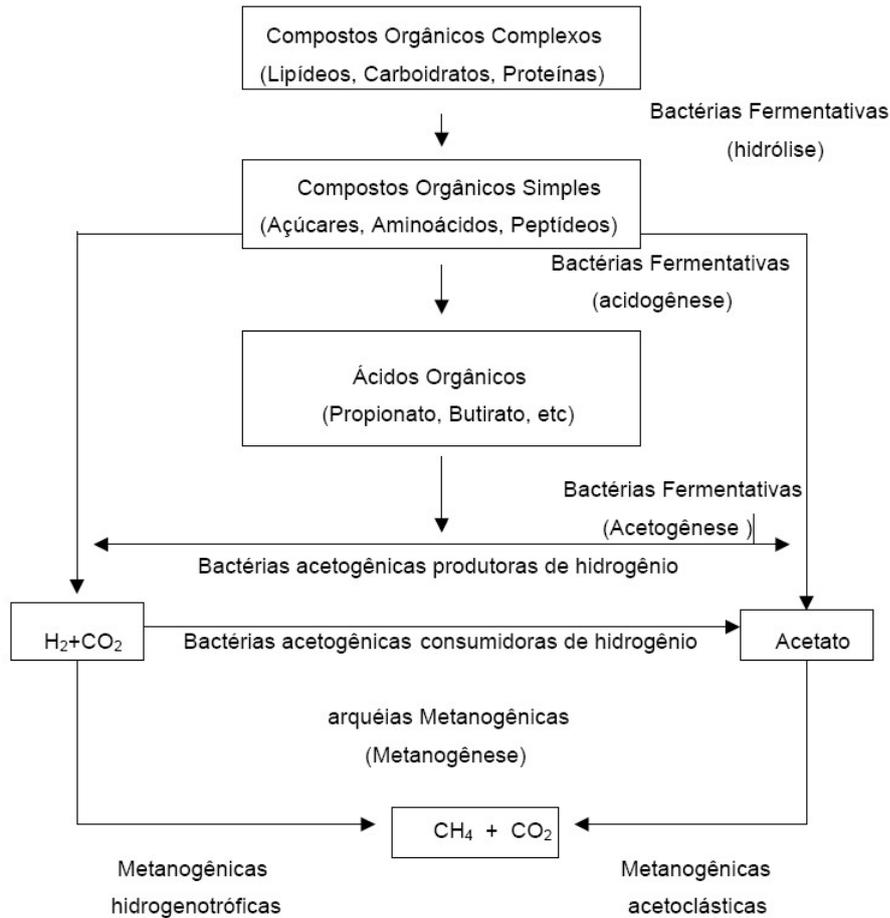
3.2. Processo de degradação anaeróbia

De acordo com Castilhos Jr. et al. (2003), o processo de degradação dos compostos orgânicos e inorgânicos, constituintes dos resíduos sólidos aterrados, refere-se a um fenômeno fundamentado pela ocorrência simultânea de mecanismos biológicos e físico-químicos, ambos catalisados pela água.

Segundo Fiore (2004), tais mecanismos promovem a conversão dos resíduos sólidos em substâncias mais simples, através da atuação de mecanismos decompositores (bactérias, fungos, protozoários e algas).

Pelczar Jr (1996) também afirma que o processo de digestão anaeróbica da fração orgânica dos resíduos sólidos apresenta diferentes fases de degradação, como ilustrado na **Figura 5** abaixo:

Figura 5: Sequências metabólicas da digestão anaeróbia.



Fonte: Pelczar Jr. (1996).

A primeira fase, denominada hidrólise enzimática, abrange a conversão lenta de polímeros orgânicos e insolúveis, tais como carboidratos, proteínas e lipídeos em compostos menores, como açúcares e aminoácidos, através da ação de exoenzimas excretadas por bactérias fermentativas hidrolíticas (CHERNICHARO, 2007).

De acordo com Russo (2005), fatores que influenciam o grau e a taxa de hidrolização de um substrato incluem o tamanho das partículas, o pH do meio, a composição do substrato, a concentração de produtos da hidrólise e a temperatura.

Posteriormente, ocorre a acidogênese, fase na qual os produtos solúveis provenientes da hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas e convertidos em compostos mais simples antes de serem excretados. Dentre os produtos gerados encontram-se alcoóis, ácido láctico, hidrogênio, sulfureto de hidrogênio, amônia, ácidos graxos voláteis e dióxido de carbono. Estes dois últimos compostos provocam uma diminuição do pH do meio, acarretando na dissolução de metais pesados incorporados na matéria orgânica (RUSSO, 2005).

A fase acetogênica se dá através da ação de bactérias acetogênicas que promovem a oxidação dos produtos gerados na acidogênese substratos apropriados para a atividade das arqueas metanogênicas.

A metanogênese, etapa final do processo de degradação anaeróbica de compostos orgânicos, é promovida por bactérias metanogênicas que utilizam os substratos ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono, para conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono. O grupo de bactérias atuantes nesta fase é dividido em dois segmentos, um deles composto por bactérias que produzem metano a partir de ácido acético ou metanol (metanogênicas acetoclásticas) e o outro por bactérias que sintetizam metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (metanogênicas hidrogenotróficas). Ambos os segmentos são responsáveis pelo consumo do hidrogênio gerado nas fases anteriores, fato que acarreta no aumento do pH do meio, que tende a ser neutro.

3.2.1. Degradação anaeróbia na fração orgânica dos resíduos sólidos e o metano como indicador de atividade biológica

Em sua pesquisa, Nopharatana et al. (2009) sustentou que a taxa e extensão da degradação de resíduos sólidos domiciliares podem ser acentuados através da elevação da umidade, agentes tampões e fontes que compreendem microrganismos tais como lodo digerido anaerobicamente.

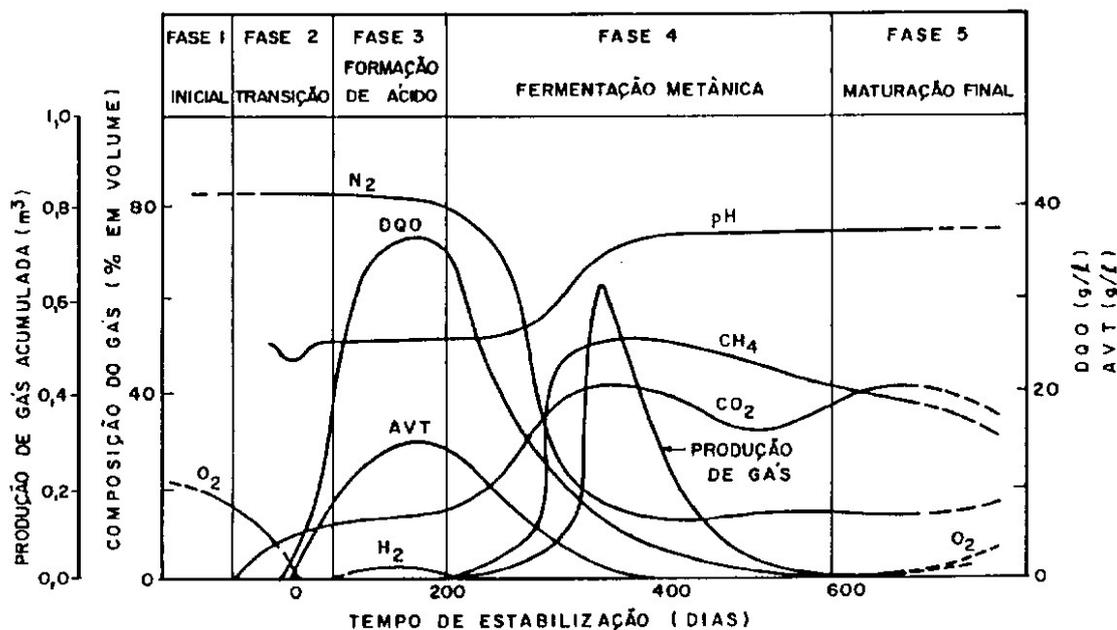
Segundo Russo (2005), as reações de degradação da fração orgânica de resíduos sólidos em aterros sanitários são condicionadas por numerosos parâmetros ambientais, dentre eles a umidade dos resíduos, a temperatura e o pH do meio, fatores que controlam a atividade microbiana e a produção de biogás.

A degradação da matéria orgânica em aterros se dá por meio de dois processos, no período inicial de deposição dos resíduos a decomposição aeróbica é estabelecida e, posteriormente, a decomposição anaeróbica é iniciada, após o esgotamento do oxigênio na massa de resíduos (BORBA, 2006).

O metano é o produto final de uma série de reações biológicas envolvidas na decomposição de resíduos em aterros sanitários. Para melhor representação de todo processo de degradação dos resíduos no aterro, foi proposto por REES (1980) e em seguida

POHLAND e GOULD (1986) um modelo composto por cinco fases, conforme ilustrado na **Figura 6** a seguir:

Figura 6: Variações de parâmetros indicadores das fases de estabilização da matéria orgânica em um aterro sanitário.



Fonte: modificado por Pohland e Gould (1986).

Desta forma, é possível observar que a atividade microbiana em um aterro sanitário é iniciada na primeira fase, cuja taxa de umidade na massa de resíduos recém aterrados favorece reações de decomposição da mesma em um processo aeróbico. Já, durante a fase de transição ocorre a conversão do aterro para um meio anaeróbico, evidenciado pelo potencial de redução e oxidação dos resíduos.

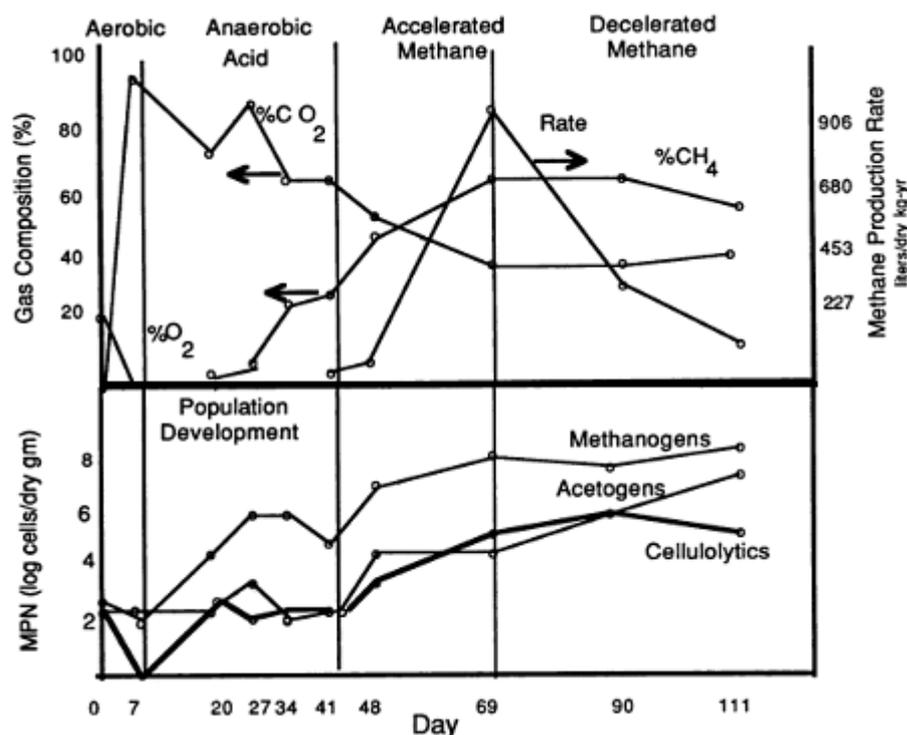
A fase ácida é caracterizada por promover a formação de ácidos, principalmente de ácidos voláteis totais, provocando diminuição do valor do pH, elevação da demanda química de oxigênio (DQO) no lixiviado e aumento de espécies iônicas. Na fase metanogênica, de fermentação do metano, predominam microorganismos estritamente anaeróbicos responsáveis pela produção de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), o aumento do pH e a redução da formação de lixiviado.

Finalmente, a fase de maturação apresenta uma considerável diminuição na taxa de geração de biogás, uma vez que a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. É importante destacar que a duração de cada fase variará conforme a distribuição dos componentes orgânicos no

aterro, a disponibilidade de nutrientes, a umidade da massa de resíduos e o grau de compactação da mesma.

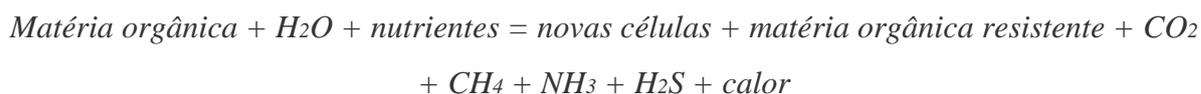
Barlaz et al. (1989) em seu estudo sobre a microbiologia da degradação de resíduos sólidos, esquematizou a evolução das populações dos três grupos de bactérias envolvidas no processo e fez uma analogia da mesma com as variações da taxa de geração de metano em um biorreator, como é possível observar na **Figura 7**, a seguir:

Figura 7: Evolução das populações de bactérias e da taxa de geração de metano ao longo das quatro fases do processo de degradação anaeróbica.



Fonte: Barlaz et al. (1989).

De acordo com Tchobanoglous *et. al.*(1993), a **Equação 1** esquematiza a conversão biológica em condições anaeróbicas da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em gases:



Equação 1: Conversão da matéria orgânica em condições anaeróbicas em gases.

É possível notar na **Equação 1** acima que os principais produtos finais do processo são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), amônia (NH₄), gás sulfídrico (H₂S), e matéria

orgânica resistente. Segundo Tchobanoglous et. al. (1993) o dióxido de carbono e o metano constituem mais de 99% do total dos gases produzidos em tal processo de conversão.

A correlação entre altas emissões de biogás, altas concentrações de gás carbônico e metano e altas temperaturas do solo sugerem que as áreas de maior atividade microbiana e reações exotérmicas liberam movimentações de CH₄ e CO₂ do aterro para a atmosfera (Nolasco, 2008).

Chiemchaisri et al. (2007) compartilha que o potencial de geração de gás metano devido à degradação biológica da fração orgânica de resíduos em aterros é maior do que em lixões a céu aberto. O metano produzido tanto em aterros sanitários de resíduos sólidos como em lixões a céu aberto é gerado a partir da ação de microrganismos durante a degradação de matéria orgânica. Entretanto, a geração de gás metano em aterros é maior do que em lixões a céu aberto, sendo este fato decorrente da presença de uma barreira de cobertura em aterros que providencia condições anaeróbicas favoráveis à produção de metano.

3.3. Fatores que influenciam a produção de biogás em aterros sanitários

Em aterros sanitários, diversos fatores, tais como baixas taxas de umidade e migração lateral de gás, podem estar associados com um menor rendimento de geração de gás quando comparado a estudos experimentais controlados (Kinman et al. 1987; Lay et al. 1998).

O biogás, caracterizado por ser um gás incolor e de baixa densidade, é composto por diferentes gases gerados a partir da decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários, como expresso na **Tabela 2**, abaixo.

Tabela 2: Características dos gases presentes no biogás.

Gás	Fórmula	Conc. Típica	Densidade (Kg/m ³)	Potencial Caloríf. (kJ/m ³)	Limite Explosivo	Solub. Água (g/L)	Propriedades Gerais
Metano	CH ₄	45-60%	0,717	35.600	5-15%	0,0645	inodor, incolor, asfixiante e inflamável
Dióxido de carbono	CO ₂	40-60%	1,977	----	----	1,688	inodor, incolor, asfixiante
Nitrogênio	N ₂	2-5%	1,250	----	----	0,019	inodor, incolor
Oxigênio	O ₂	0,1-1,0%	1,429	----	----	0,043	inodor, incolor
Sulfeto de Hidrogênio	H ₂ S	0-70ppm	1,539	12.640	4,3-45,5%	3,846	inolor, muito toxico
Hidrogênio	H ₂	0-0,2%	0,090	10.760	4-74%	0,001	inodor, incolor, não tóxico e inflamável
Monóxido de Carbono	CO	0-0,2%	1,250	----	12,5-74%	0,028	inodor, incolor, tóxico, inflamável

OBS.: Densidade. do ar atmosférico $\approx 1,29\text{kg/m}^3$

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.* (1993); Gandolla *et. al.* (1997) *apud* Maciel (2003).

A geração de metano em aterros sanitários é dependente de diversos fatores, incluindo umidade, nutrientes, microorganismos, temperatura, pH e características dos resíduos tais como composição, densidade e tamanho das partículas (EUSUF et al., 2007).

Segundo Brito Filho (2005), fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são os nutrientes, bactérias, potencial oxidação-redução, densidade da produção gás, compactação dos resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis.

A pesquisa realizada por Petrescu (2011) em um aterro na Romênia, concluiu que a quantidade e características do gás de aterro emitido são determinados por variados fatores, nos quais se destacam fatores climáticos, a composição dos materiais biodegradáveis dos resíduos sólidos orgânicos, a quantidade e composição de percolado.

Segundo o United States Environmental Protection Agency (USEPA 1991 e 1996 *apud* MENDES, 2005, p. 31), variações na taxa de geração do biogás podem ser causadas pelos seguintes fatores:

- Composição dos resíduos: o potencial de geração do metano é diretamente proporcional à porcentagem de material orgânico no resíduo;
- Concentração de oxigênio: a decomposição de matéria orgânica se dá em condições anóxicas promovidas pela cobertura da massa de resíduos com terra ou

com o próprio resíduo, criando condições anaeróbicas nas camadas inferiores do aterro;

- pH: na fase inicial da deposição dos resíduos os aterros apresentam pH ácido, tendendo a aumentar e aproximar-se da neutralidade ao alcançar a fase metanogênica, que possui bactérias atuantes com produtividade máxima entre pH de 6,8 e 7,2;
- Temperatura: as bactérias mesofílicas apresentam atividade ótima na faixa de temperatura de 29 a 38°C, enquanto as termofílicas trabalham com a faixa de 49 e 70°C. A taxa de geração de metano sofre uma queda brusca em temperaturas abaixo de 10°C. Tipicamente, a própria decomposição fornece calor suficiente para promover a metanogênese.

Uma taxa de umidade alta, de aproximadamente 60% em peso, causa aumento na geração de biogás. A água tem um papel muito importante, uma vez que é fundamental no processo químico da fermentação anaeróbia e na produção do biogás, servindo como meio de transporte para os produtos gerados pelo processo de decomposição, facilitando a mistura entre alguns componentes solúveis e participando na transformação dos componentes orgânicos em metano e dióxido de carbono na fase anaeróbia (BRAZ, 2001).

A recirculação de lixiviado nas camadas superiores da massa de resíduos também é considerada um fator que influencia a geração de biogás, uma vez que proporciona o aumento da umidade no interior do aterro sanitário e introduz bactérias responsáveis pela degradação anaeróbia na massa de resíduos. De acordo com Matos (2008), as principais vantagens que o processo de recirculação de lixiviado proporciona são a redução das emissões de compostos orgânicos voláteis, a redução da toxicidade do lixiviado e de resíduos, a utilização mais eficaz da capacidade útil do aterro, a redução dos custos do tratamento do lixiviado, a estabilização mais rápida dos resíduos e, finalmente, uma produção de metano mais rápida e maior.

Segundo Castro e Bello (2010), condições favoráveis à produção do metano são criadas devido à elevada porcentagem de material orgânico do resíduo brasileiro, associado à alta biodegradabilidade dos mesmos.

De acordo com Nolasco (2008), a dinâmica de geração e movimentação de gás em aterros depende de parâmetros de entrada e saída, assim como da estrutura do aterro e a constituição dos resíduos. Os parâmetros de entrada incluem a introdução de água através de processos naturais e artificiais, as características do resíduo sólido urbano, e a entrada de ar

atmosférico. Os principais parâmetros de saída nestes reatores bioquímicos incluem gases e percolado, considerados poluentes potenciais ao meio ambiente. O autor também afirma que para compreender a distribuição de emissão de gás no aterro, é necessário destacar que a distribuição de resíduos e os materiais componentes do aterro foram distribuídos de forma heterogênea. Os resíduos foram distribuídos e depositados de forma não homogênea no espaço disponível ao longo do tempo.

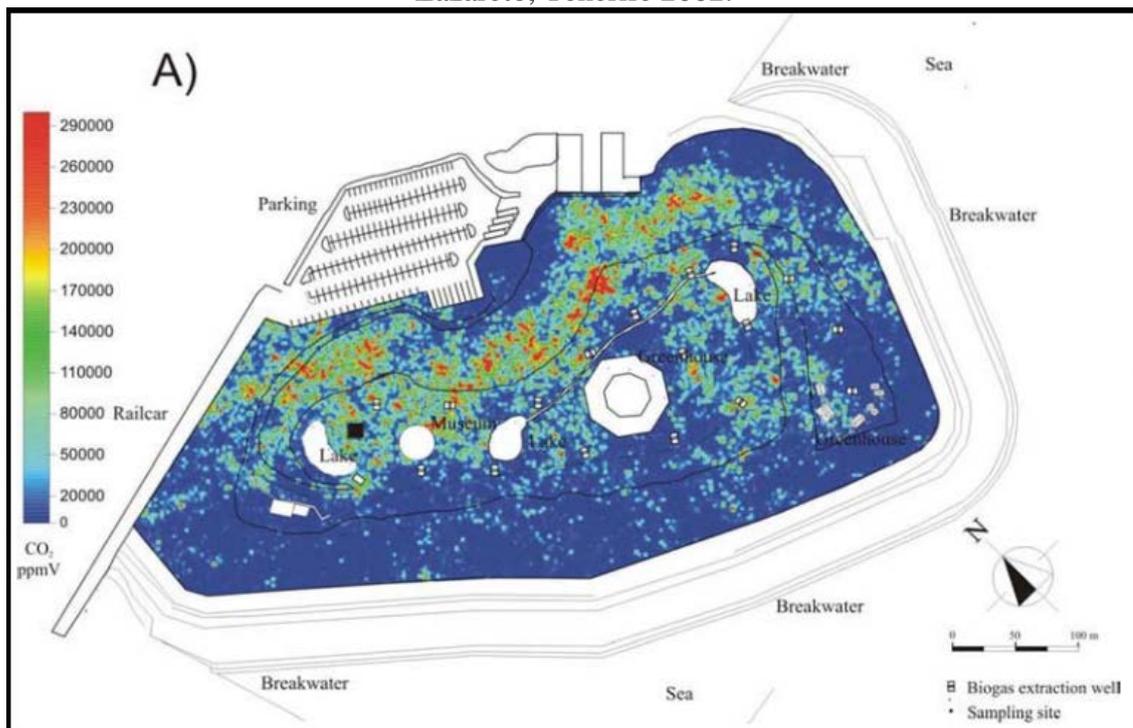
3.4. Comportamento da geração e composição de biogás em aterros sanitários

De acordo com Chiemchaisri (2007), o biogás originado dos processos de decomposição de resíduos sólidos é basicamente composto por metano e gás carbônico, sendo que uma vasta gama das taxas de produção de gás inclui também nitrogênio e oxigênio.

Segundo Eusuf et al. (2007), o metano pode sofrer três diferentes destinos, sendo estes a oxidação à gás carbônico, o lançamento do gás na atmosfera ou o armazenamento no próprio aterro (bolsões de gás).

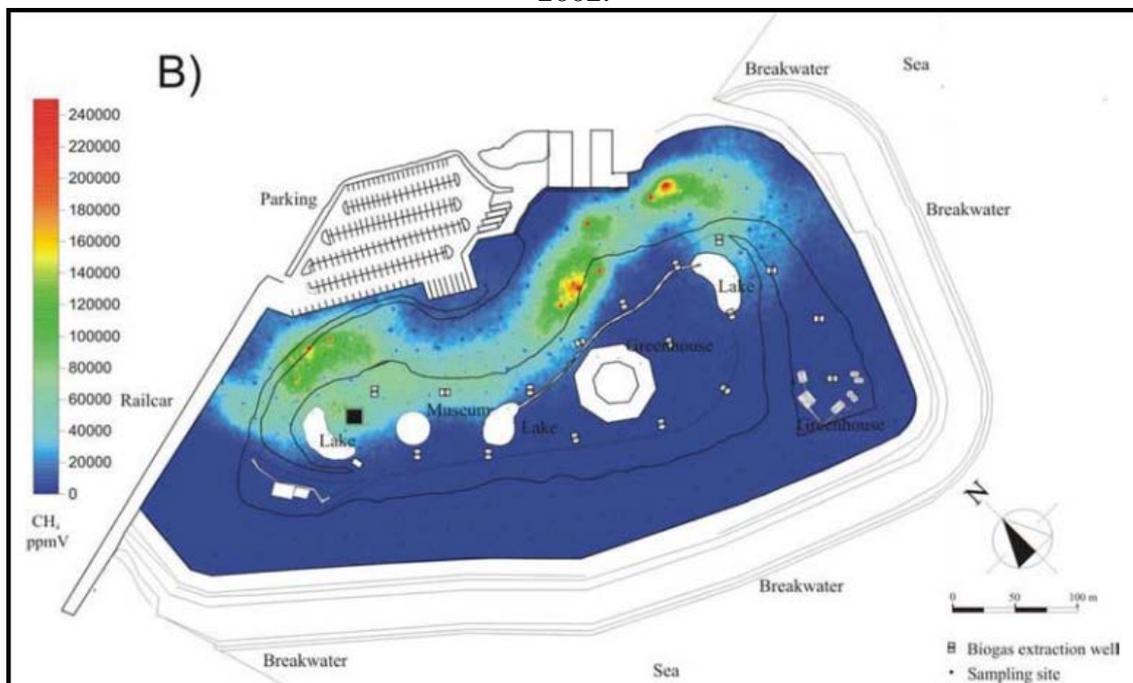
Nolasco (2008) conduziu um estudo no aterro sanitário de Lazareto na Itália, produzindo mapas de concentração de gás carbônico e metano na atmosfera, como é possível observar nas **Figuras 8(A) e 8(B)**, respectivamente.

Figura 8(A): Distribuição espacial da concentração de dióxido de carbono no aterro de Lazareto, Tenerife 2002.



Fonte: Nolasco (2008).

Figura 8(B): Distribuição espacial da concentração de metano no aterro de Lazareto, Tenerife 2002.



Fonte: Nolasco (2008).

A partir da análise da distribuição espacial de gás carbônico e metano, foram observados que altos valores de concentração de ambos os gases se associam a uma mesma

área do aterro. As áreas nordeste, central e noroeste do aterro de Lazareto expressaram os valores de concentração de gás carbônico maiores que 170000 ppmV, sendo por volta de 472 vezes mais elevados do que a concentração de gás carbônico no ar atmosférico, 360 ppmV. As mesmas áreas apresentaram atividade máxima em relação à produção de metano, apresentando valores superiores a 150000 ppmV. Segundo Dlugkencky et al. (1994), tais valores se mostram 87000 vezes maiores que as concentrações de metano no ar atmosférico, cuja média é de 1,72ppmV.

O metano gerado em aterros é resultado da ação de bactérias metanogênicas, que consomem o composto presente no solo e na água. A provável razão dos elevados níveis de concentração de gás carbônico é devido à presença de bactérias metanotróficas, que consomem e oxidam o metano (Prescott et al. 2000).

Tais bactérias metanotróficas oxidam o metano através de uma reação exotérmica que favorece o incremento da temperatura na superfície do aterro, produzindo ácido carboxílico que é incorporado no metabolismo da bactéria, e apresentando como produto secundário o gás carbônico (LEIN et al., 1999).

González et al. (2011), promoveu uma comparação entre os dados de concentração de biogás obtidos em seu estudo de um lixão no México, e aterros localizados em áreas de clima semelhante, como é possível observar na **Tabela 3** a seguir:

Tabela 3: Composição do gás de aterro em diversas localidades do mundo.

Composição do gás de aterro					
Localização do aterro	Ano	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	Período de amostragem (meses)
P. de Montaña, México	2000-2001	46	34,6	2,6	16
Nakhonpatho, Tailândia	2003	64,1	31,3	1	8
Samutprakan, Tailândia	2004	50,6	38,9	1,1	3
Área de estudo	2010-2011	45,5	32,4	3,1	7

Fonte: Adaptado de González et al. (2011).

Em seu estudo, Petrescu (2011), após promover duas perfurações com profundidade de 06 metros em células finalizadas no aterro municipal de Radauti na Romênia, observou que independentemente da estação do ano, a diferença entre as temperaturas máxima e mínima do ambiente é maior que a diferença entre as temperaturas máxima e mínima do biogás, o que indica uma continuidade da produção do mesmo. Tal processo contínuo, mesmo que lento, foi

provado pela pressão excessiva criada nos drenos, enfatizada pela pressão relativa do aterro. A vazão do gás foi significativa, considerando a condição do aterro municipal (células finalizadas), apresentando valores entre 02 e 03 l/h. O valor deste parâmetro diminuiu juntamente com as temperaturas do ambiente e das emissões de gás. As concentrações de CH₄ e CO₂ das emissões de biogás nas perfurações foram de aproximadamente 60% e 39%, respectivamente.

Segundo Nolasco (2008), o uso das instalações somado às variáveis climáticas de aterros e a diferença de idade dos resíduos, assim como o aumento de pressão dentro do sistema (como uma consequência da inatividade do sistema de extração do biogás no aterro de Lazareto na Itália, por exemplo) podem explicar altas taxas de emissão de CH₄.

Chiemchaisri (2007) investigou em sua pesquisa a composição de metano em diferentes profundidades da massa de resíduos aterrados. O experimento foi conduzido em uma célula piloto em um aterro na Tailândia, na qual resíduos com idade aproximada de 2 anos foram armazenados e caracterizados nas profundidades de 1,5, 3, 4, 5 e 6m. Os resíduos sólidos depositados na célula foram majoritariamente compostos dos materiais plástico e espuma (24,05%), sendo que outros componentes importantes foram matéria orgânica (16,8%) e papel (13,3%).

Desta forma, observou que o conteúdo de metano no volume de gás coletado entre as profundidades de 3 a 6 metros se apresentou relativamente constante entre 60,1% e 64,1%, enquanto se mostrou inferior na camada de 1,5m, por volta de 54,7%. Em contrapartida, o volume de oxigênio foi considerado relativamente alto (3,12%) em 1,5m quando comparado às outras profundidades (0,96-1,74%), apresentando tal valor provavelmente devido à influência atmosférica. Os níveis de gás carbônico foram considerados constantes ao longo das profundidades do aterro, variando de 28,09 a 32,39%. Tais composições de biogás sugeriram que condições anaeróbicas foram melhor desenvolvidas em zonas mais profundas no aterro, de 3 a 6 metros. Rachaduras presentes no solo de cobertura também podem ter ocasionado a penetração de ar no aterro ao longo de profundidades de até 1,5m. A composição de gás de aterro em diferentes profundidades da camada de resíduos recentemente aterrados pode ser observada a seguir, na **Tabela 4**.

Tabela 4: Composição de biogás em diferentes profundidades da camada de resíduos considerados frescos.

Espessura da camada de resíduos (m)	Composição de gás (%V/V)		
	CH4	CO2	O2
1,5	54,7 (4,22)	28,09 (2,93)	3,12 (0,87)
3	64,11 (1,96)	31,08 (2,16)	0,98 (0,35)
4,5	62,21 (2,45)	32,39 (2,82)	1,12 (0,56)
6	60,11 (2,72)	31,38 (2,37)	1,74 (0,72)

Fonte: Adaptado de Chiemchaisri (2007).

Na análise da composição de biogás gerada pela massa de resíduos ao longo do tempo em um sítio de estudo em Morelia, no México, González et al. (2011) dividiram as áreas de deposição em 4 quadrantes, no qual o quadrante I abordou resíduos aterrados há um período mais longo, e o quadrante IV era composto por resíduos recentes. Foi detectado também que os quadrantes mais antigos apresentaram menor taxa de resíduos orgânicos quando comparado à taxa em quadrantes mais novos, fato ocorrido devido ao alcance de fases de degradação mais avançadas. Os valores médios de composição do biogás deste estudo podem ser observados na **Tabela 5**, a seguir:

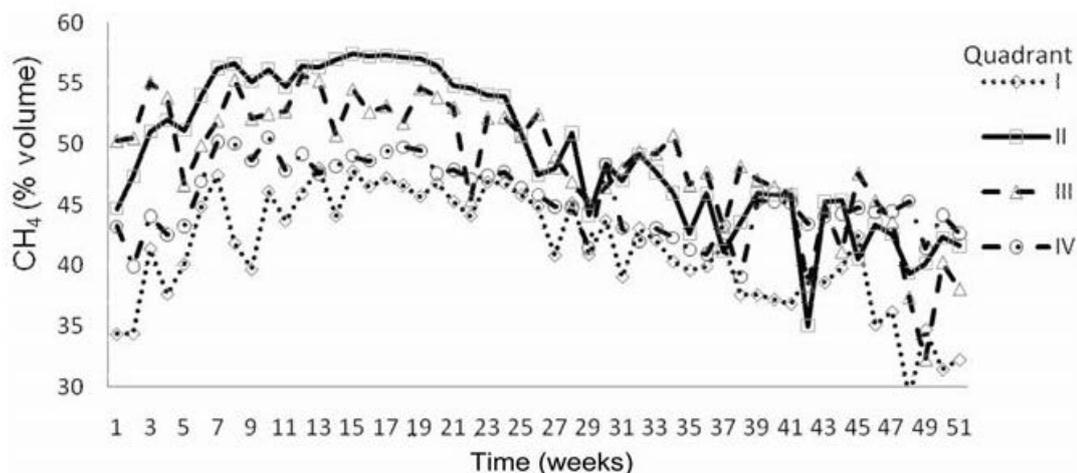
Tabela 5: Médias de composição do biogás no sítio de estudo desde o quadrante mais antigo (QI) até o resíduo mais recente (QIV).

Composição de biogás (% volume)								
Quadrante	CH4	Desvio padrão	CO2	Desvio padrão	O2	Desvio padrão	Balanco	Desvio padrão
I	41,30	15,10	27,70	10,30	4,40	4,90	26,50	21,00
II	49,40	8,40	35,40	5,30	2,20	2,90	12,70	10,60
III	48,50	5,90	35,40	4,50	2,70	2,00	13,40	8,40
IV	44,50	16,60	32,80	9,20	2,50	3,30	20,20	22,90

Fonte: Adaptado de González et al. (2011).

A **Figura 9** demonstra a flutuação do valor da porcentagem de metano no volume total do biogás gerado nos quatro quadrantes analisados compostos por resíduos de diferentes idades.

Figura 9: Variação da porcentagem de metano no biogás dos diferentes quadrantes definidos no estudo de González et al. (2011).



Maciel & Jucá (2013) promoveram um estudo em uma célula experimental no aterro da Muribeca no Estado de Pernambuco, com período de operação de 2007 a 2008, a fim de analisar as características do biogás gerado pelo aterramento dos resíduos. A **Tabela 6**, a seguir, expressa a composição do biogás nos poços de perfuração do estudo, entre o mês de dezembro de 2007 e abril de 2011.

Tabela 6: Composição do biogás em cada poço de perfuração da célula experimental.

Poço de perfuração	Composição média de biogás (%) - Dezembro/2007 a Abril/2011		
	CH ₄	CO ₂	O ₂
DV-01	56,6±6,0	39,5±3,7	1,3±1,8
DV-02	56,9±4,6	39,9±2,8	1,2±1,8
DV-03	54,0±8,2	38,4±5,8	1,6±1,8
DV-04	45,7±16,9	32,8±10,4	4,0±4,8
DV-05	48,5±12,5	35,0±9,1	3,2±4,3

Fonte: Adaptado de Maciel & Jucá (2013).

As médias das concentrações de metano e gás carbônico foram $54,3 \pm 2,7\%$ e $40,7 \pm 2,9\%$ respectivamente, durante os primeiros 18 meses de monitoramento (de fevereiro de 2008 a junho de 2009). A concentração de metano alcançou 50% imediatamente depois do fechamento da célula, segundo os referidos autores.

As fases iniciais da decomposição dos resíduos (fases aeróbica, de transição e acetogênica) não foram observadas no estudo. Desta forma, concluiu-se que tais fases

provavelmente ocorreram durante o período de operação e deposição de resíduos no aterro. Os resultados encontrados mostram que toda a massa de resíduos aterrada encontra-se na fase metanogênica de degradação anaeróbica, pois os valores médios de concentração de metano no biogás variam de 45,66% a 54,48%.

3.5. Influência da precipitação na vazão e porcentagem de metano presente no biogás em aterros sanitários

Segundo Eusuf (2007), a infiltração de água no aterro afeta o processo de decomposição dos resíduos. A umidade é um dos fatores ambientais mais importantes que determinam a velocidade da biodegradação dos resíduos, provocando a redução da produção de metano com a diminuição da umidade, se tornando um fator importante em medições *in situ*, devido à sua alta sensibilidade e suscetibilidade a mudanças dentro de minutos.

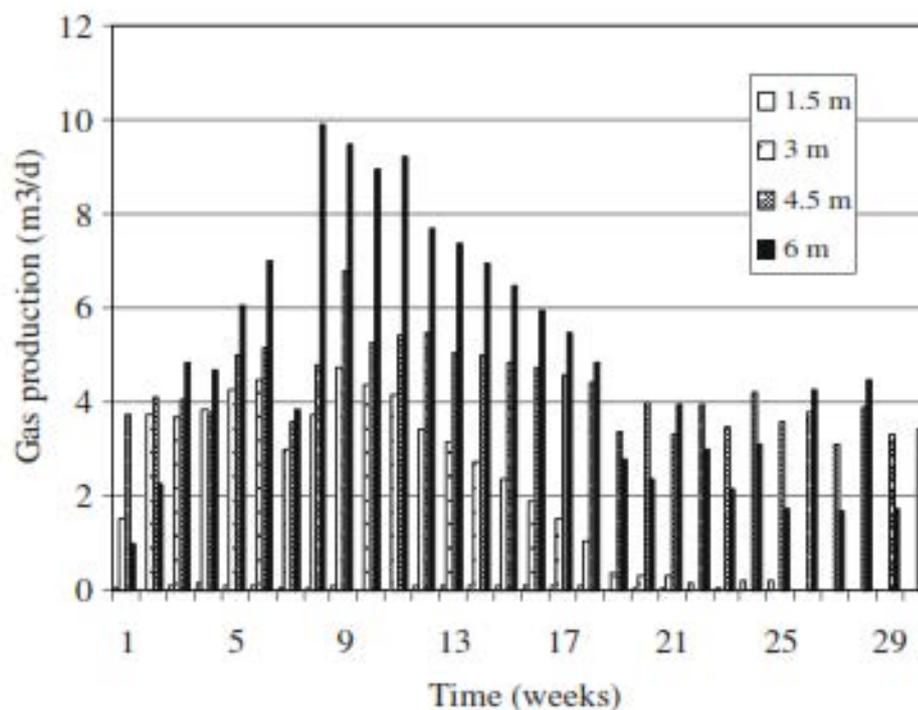
De acordo com Whalen et al. (1990) e Boeckx & Cleemput (1996), os teores de umidade do solo de cobertura influenciam indiretamente a emissão de metano para a atmosfera, uma vez que esta é intimamente ligada às taxas de oxidação do metano. Desta forma, tratando-se da influência da umidade na produção de metano no interior da massa de resíduos, é dado que para teores de umidade superiores a 40% ou inferiores a 10% em volume, a produção de metano diminui, e que o teor de umidade desejável para uma oxidação de metano varia entre 11 e 25% em volume.

Segundo Leite (2005), o Brasil possui na maior parte de seu território condições de clima favoráveis para a produção de biogás em termos de umidade e temperatura. Este fato decorre devido ao clima tropical atuante na região, caracterizando as áreas operadas como aterros úmidos, com adição de chorume e possivelmente outros líquidos, proporcionando taxas de emissão de gás muito altas e altos níveis de emissões fugitivas de gás, dependendo da forma como os líquidos são adicionados à massa de resíduos.

Já, emissões de gás em regiões consideradas áridas ocorrem durante um período mais longo de tempo do que em áreas com temperaturas mais amenas (USEPA, 2004).

Chiemchaisri (2007) conduziu uma pesquisa em uma célula piloto no aterro municipal de Nakhonpathom na Tailândia, apresentando os seguintes resultados na produção de gás em relação ao tempo, como mostrado na **Figura 10**:

Figura 10: Produção de biogás em diferentes profundidades na célula do aterro



Fonte: Chiemchaisri (2007).

Chiemchaisri (2007) notou que o volume de gás apresentou uma tendência a aumentar durante as primeiras 8-9 semanas. Subsequentemente, o volume de gás sofreu um declínio e permaneceu relativamente constante após 18 semanas, exceto na profundidade de 03m, cujo valor reduziu significativamente após 21 semanas, devido à liberação de gás através da cobertura de solo. Os componentes do percolado dos resíduos sólidos podem ser considerados uma das maiores causas da variação do biogás, que também é fortemente influenciado pela precipitação e infiltração de água das chuvas através da cobertura de solo. Os dados meteorológicos da área de estudo mostram que a precipitação variou entre 0 e 66mm durante as 08 primeiras semanas, apresentando uma média de 12mm. Já, entre a nona e décima nona (9ª e 19ª) semanas, nas quais uma maior taxa de produção de gás foi observada, a média de precipitação foi de 42,8mm. Durante as últimas 10 semanas do estudo, a média da intensidade de precipitação diminuiu para 21,5mm, sofrendo declínio assim como o volume de gás gerado.

Em seu estudo no aterro de Lazareto na Itália, o qual teve suas atividades de deposição finalizadas em 1980, Nolasco (2008), observou uma importante influência na dinâmica de geração de gás de aterro devido ao excesso de água causado pelas instalações. O clima da região onde o aterro de Lazareto se encontra é caracterizado por ser seco com pouca

precipitação, porém, a irrigação do jardim de palmeiras da superfície do aterro contribui para a manutenção da umidade neste reator bioquímico.

Com a finalidade de avaliar a capacidade de biodegradação dos resíduos por meio da produção total de biogás em biorreatores, Alves (2008), concluiu que a baixa umidade dificulta a degradação dos resíduos, enquanto teores elevados favorecem a degradação, conforme é expresso na **Tabela 7** a seguir:

Tabela 7: Valores da produção de biogás para as amostras de resíduo dos biorreatores com diferentes umidades.

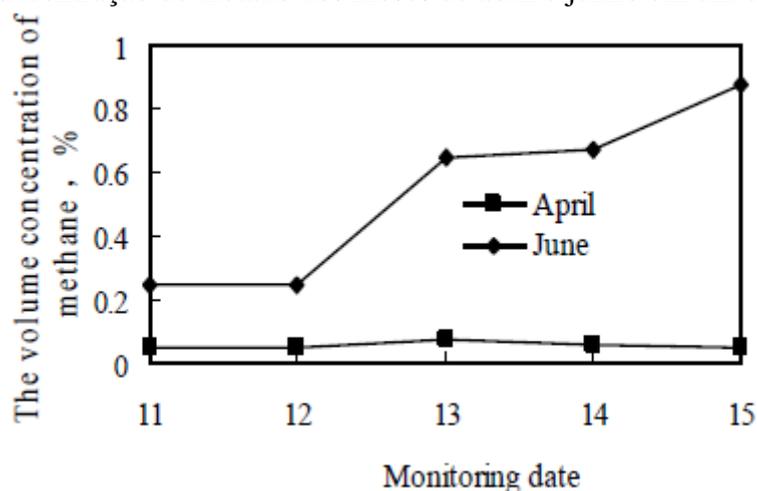
Amostra	Produção de Biogás			
	Vol.máx. acumulado (NmL)	Tx. de Geração Máxima (NmL/dia)	NmL/gSV	NmL/gMS
Reator 1 (20% umidade)	499,1	54,6	2,0	2,2
Reator 2 (40% umidade)	5558,3	395,9	22,4	25,2
Reator 3 (60% umidade)	2192,8	204,9	8,8	9,9
Reator 4 (80% umidade)	7774,7	792,5	31,4	35,3

NmL/gSV = NmL Biogás/g Sólidos Voláteis; **NmL/gMS** = NmL Biogás/g Matéria Seca.

Fonte: Alves (2008).

Em seu estudo realizado no aterro sanitário de Taiwan, Chen (2011) notaram que as concentrações de metano variaram com o aumento da precipitação e com o aumento da temperatura ambiente. A **Figura 11** apresenta o volume da concentração de metano, em porcentagem, em um dos drenos de gás medidos no estudo, na qual fica claro a maior concentração de metano no período de verão (mês de junho) no qual há um aumento da temperatura e da precipitação.

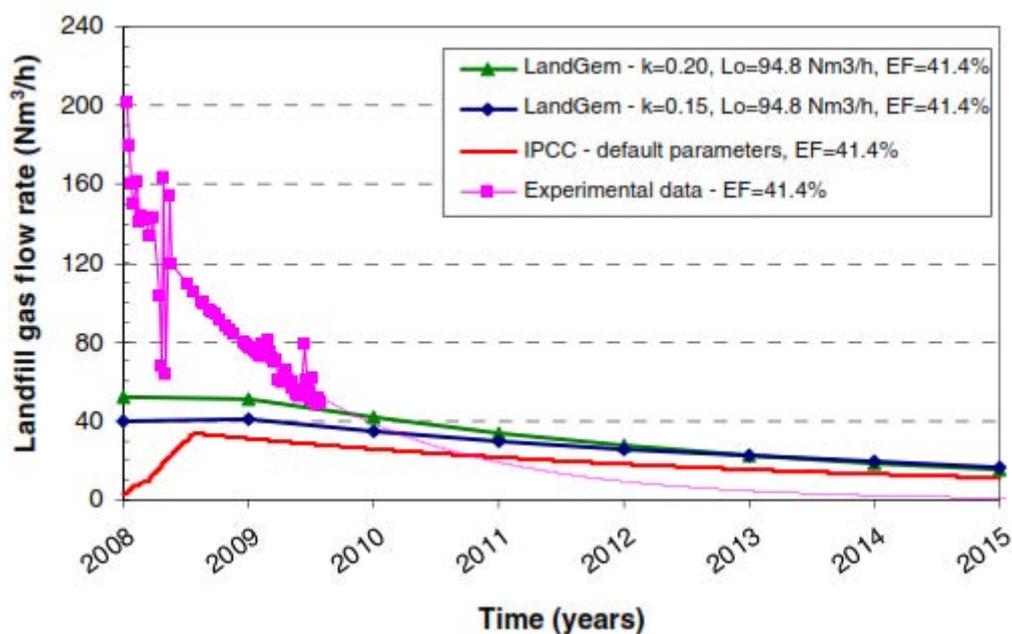
Figura 11: Concentração de metano nos meses de abril e junho em um dos drenos estudados.



Fonte: Chen (2011).

Maciel & Jucá (2011) se depararam com valores experimentais elevados de vazão de biogás, que apresentam rápido decaimento, quando comparados a valores estimados pelos modelos LandGem e IPCC, como é possível observar na **Figura 12**. Tal estudo se deu na cidade de Recife (PE), em uma célula experimental iniciada em abril de 2007 e finalizada no mês de janeiro de 2008, apresentando precipitações anuais de 1057mm e 1202mm, respectivamente.

Figura 12: Valores teóricos e experimentais de vazão do gás na célula estudada.



Fonte: Maciel & Jucá (2011).

Antônio (2012), em seu estudo sobre a concentração e vazão de gases gerados no aterro sanitário municipal de Rio Claro – SP observou também que houve um decaimento na geração de gás ao longo do período de coleta de dados justificado pela ausência de chuvas, uma vez que logo após os picos de chuvas registrados ocorre um aumento na produção de metano e o oposto ocorre com a falta de chuvas ao longo do mês de agosto os valores medidos foram diminuindo.

3.6. Caracterização da área de estudo

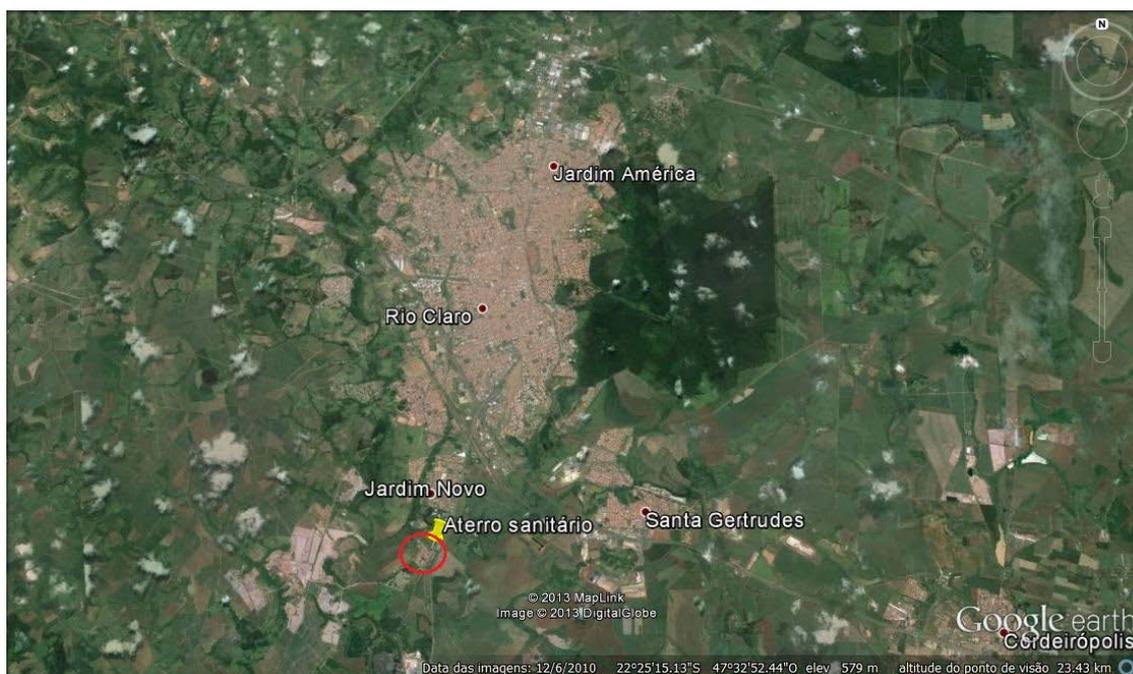
O município de Rio Claro – SP apresenta uma população de 186.253 habitantes e possui uma área de 499 km², conforme o IBGE (2010), sendo localizado na porção centro-leste do estado de São Paulo, zona 23, longitude 235.477,83E e latitude 7.519.202,16N.

Desta forma, abrange os biomas de cerrado e mata atlântica, e pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 5, referente às bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).

Segundo Troppmair (1992), Rio Claro apresenta duas estações bem definidas, fato evidenciado pelo regime de chuvas que é dividido em períodos chuvosos e de seca, estabelecidos entre os meses de abril a setembro e de outubro a março, respectivamente. Enquanto o período seco e frio apresenta temperatura média de 17°C e oscilação da precipitação na faixa de 180 a 200mm, o período quente e úmido possui precipitação por volta de 1200mm de chuva.

O aterro sanitário de Rio Claro – SP é situado às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP – 127), aproximadamente a 8 km do centro urbano do município, como ilustrado na **Figura 13** a seguir.

Figura 13: Imagem da localização do aterro sanitário de Rio Claro.



Fonte: Google Earth (2013).

De acordo com o Relatório Ambiental Preliminar (RAP) do aterro sanitário do município de Rio Claro, a vida útil do empreendimento foi projetada para 16,2 anos, tendo suas operações iniciadas em 2001 em uma área total de 141.637,68m², sendo que aproximadamente 98.000m² destinados à disposição de resíduos. Atualmente, o aterro recebe em média 190 t/dia de resíduos coletados (aproximadamente 5.000 t/mês).

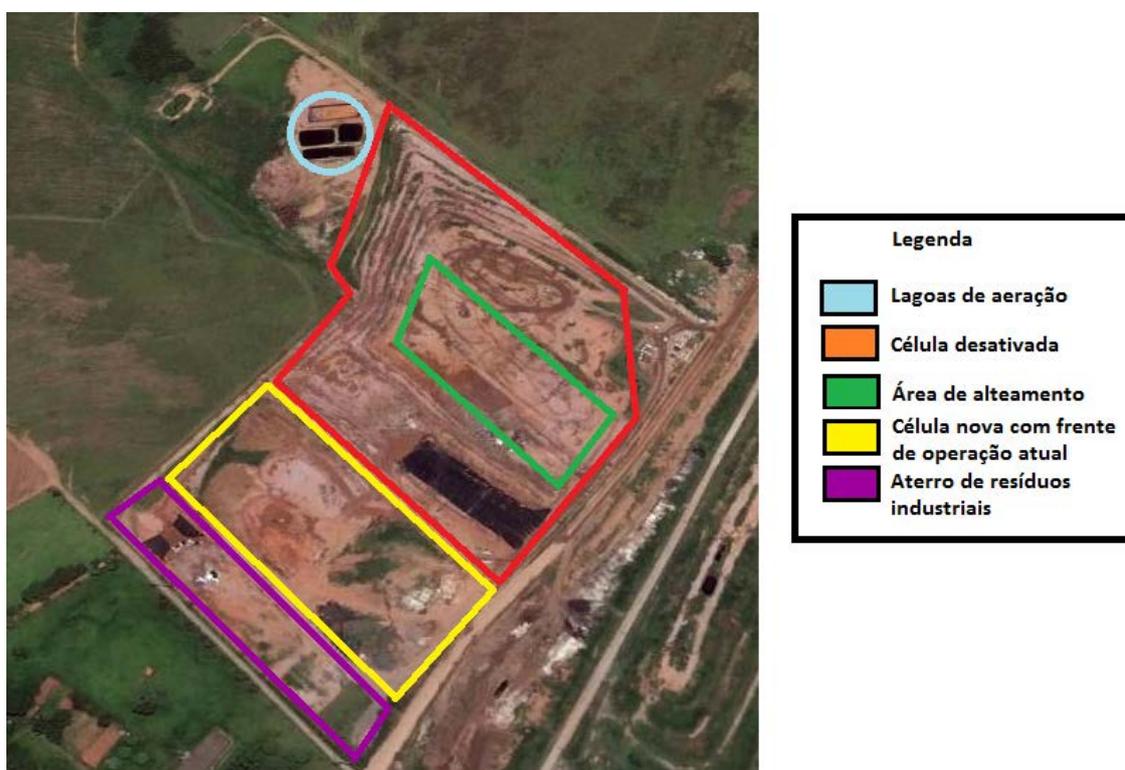
Em vista do encerramento da vida útil da área referida, ao término do ano de 2011, a deposição de resíduos passou a ocorrer em uma nova célula, localizada em área contígua. No entanto, devido ao atraso nas obras de ampliação das instalações, ocorreu o alteamento do último patamar da célula que havia sido desativada, até que em julho de 2012 as atividades de operação na nova célula do aterro foram iniciadas.

As instalações do aterro também incluem quatro lagoas de estabilização, sendo estas uma lagoa anaeróbia, uma lagoa aerada, uma facultativa ou de sedimentação e uma lagoa de maturação. No entanto, em detrimento da baixa eficiência do sistema de tratamento, e por não atender aos padrões de lançamento para corpos d'água, o sistema opera em regime fechado, direcionando o efluente tratado para a Estação de Tratamento de Efluentes de Jundiaí. A recirculação de lixiviado na superfície do aterro sanitário também foi prática corrente em 2012, porém, com o início da operação da estação no aterro, o lixiviado passou a ser direcionado para a estação de Jundiaí.

A área finalizada do aterro possui a base impermeabilizada com manta PEAD de 2mm de espessura e é formada por 5 patamares de altura média de 5 metros cada. A camada de cobertura de solo é composta por solo argiloso compactado e apresenta 0,30m de espessura.

A célula nova, em operação atualmente, apresenta uma área de (200m x 70m), base impermeabilizada por manta e solo argiloso compactado. É prevista a construção de 4 patamares nesta célula, que será operada até atingir a cota da área desativada do aterro. É possível observar o detalhamento das áreas do aterro na **Figura 14**, abaixo:

Figura 14: Vista aérea das áreas do aterro sanitário de Rio Claro – SP.



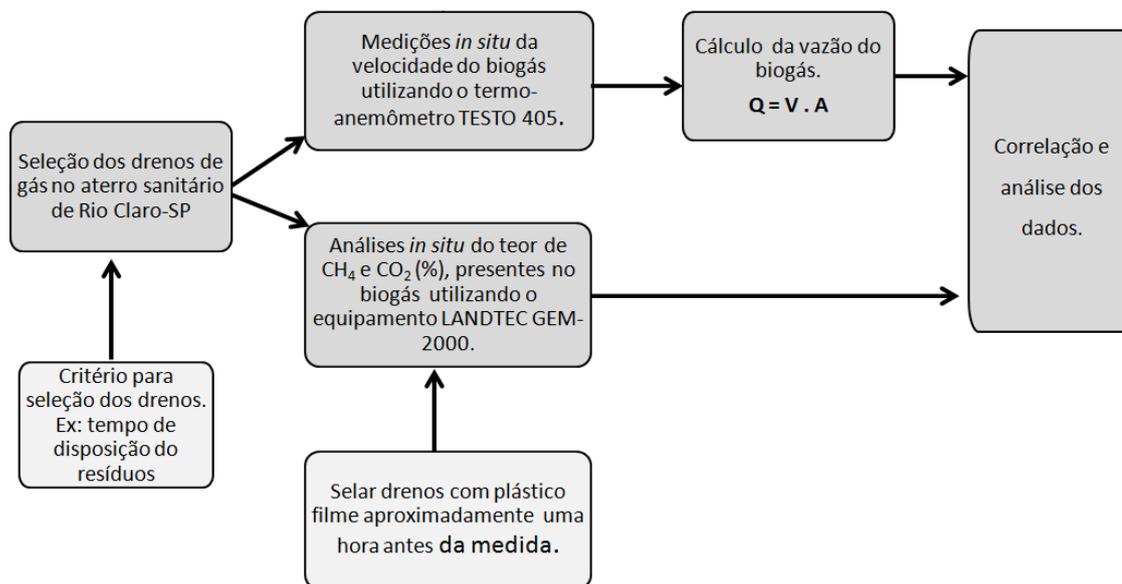
A CESTEB divulgou o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares referente ao ano de 2011, os dados revelam a classificação do aterro sanitário de Rio Claro, tida até 2010 como “adequada” passou a ser considerada “controlada”.

4. Métodos e materiais

As etapas e procedimentos metodológicos utilizados na presente pesquisa foram subdivididas nos seguintes itens: 4.1. Definição dos pontos de amostragem de biogás no aterro sanitário de Rio Claro – SP; 4.2. Procedimentos para a medição da velocidade do biogás e cálculo da vazão; 4.3. Análise da composição do biogás no aterro sanitário de Rio

Claro – SP; 4.4. Forma de análise dos resultados. Um resumo esquemático da metodologia utilizada na pesquisa é dado pela **Figura 15** a seguir:

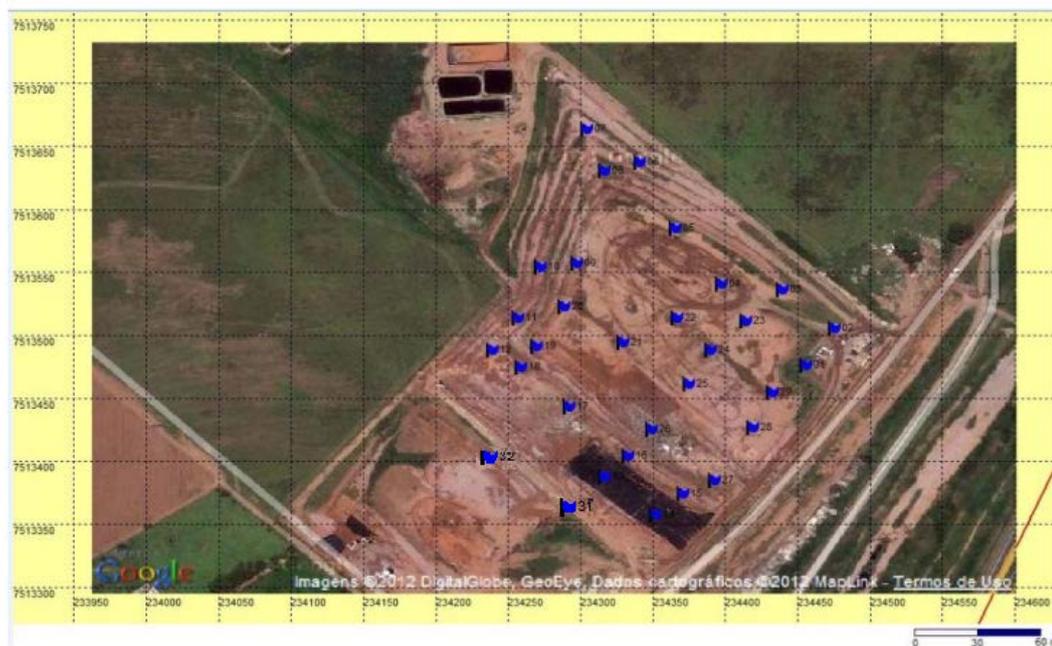
Figura 15: Fluxograma geral dos materiais e metodologia do presente trabalho.



4.1. Definição dos pontos de amostragem de biogás no aterro sanitário de Rio Claro – SP

Inicialmente, as coordenadas geográficas de todos os drenos de gás foram definidas através da utilização de GPS. A partir da utilização dos *softwares* GPS TrackMaker e Google Earth, foi promovido o georreferenciamento dos pontos de coleta em relação à área do aterro sanitário, como mostra a **Figura 16**, abaixo:

Figura 16: Imagem do aterro sanitário de Rio Claro – SP com a localização dos drenos de gás.



Alguns dos drenos de gás considerados na coleta de dados desta pesquisa foram definidos previamente a este trabalho, uma vez que um dos objetivos é dar continuidade ao monitoramento dos gases do mesmo. Para estes drenos, a metodologia utilizada visou abranger os fatores mais importantes capazes de influenciar a composição e vazão dos gases, entre eles a idade dos resíduos, áreas desativadas do aterro sanitário, a recirculação ou não do lixiviado e a temperatura dos gases. Para isto, foram realizadas campanhas de coleta de biogás, nas quais foram especificadas medidas da velocidade, temperatura e concentração de CH_4 , CO_2 e O_2 , evidenciando assim a divisão da área do aterro em diversos grupos que apresentavam características semelhantes para o estudo dos gases.

Os grupos de drenos estabelecidos na primeira fase foram classificados tomando como referência informações oferecidas pelos operadores do aterro sanitário municipal de Rio Claro - SP. No entanto, a partir da análise dos dados obtidos de maio a dezembro do ano de 2012, observou-se que alguns drenos localizados em áreas consideradas de mesma idade apresentaram resultados muito diferentes de vazão e composição, sinalizando uma possível incoerência nas informações obtidas sobre as idades dos resíduos, fator não considerado previamente. Observou-se nestes casos, que determinadas áreas já encerradas receberam resíduos novamente, devido ao alteamento da célula. Nesse sentido, completado o ciclo que abrange as estações de chuva e estiagem, foram selecionados os drenos que efetivamente

apresentavam compatibilidade entre o tempo de disposição e os dados gerados no período de maio de 2012 a julho de 2013, através da análise destes mesmos dados de concentração de metano e temperatura obtidos durante as campanhas de coleta, em combinação com dados geofísicos obtidos através de outras pesquisas na área de estudo.

Com a finalidade de complementar os grupos de parcelas do aterro com pontos de coleta de gás a serem monitorados no presente estudo, foram agregadas as extensões do aterro que remetem ao alteamento da célula antiga do aterro, finalizado há aproximadamente um ano e à frente de operação atual, iniciada no mês de julho de 2012. Os drenos localizados nestas células passaram a ser considerados pois, apesar de possuírem período de atividade próximo ou menor que um ano, já apresentavam atividade biológica anaeróbica, evidenciada pelos testes de medidas dos parâmetros de composição, temperatura e vazão do biogás dos drenos.

A classificação de resíduo antigo e novo foi fundamentada nas fases de disposição dos resíduos sólidos em diferentes células do aterro sanitário de Rio Claro – SP. Desta forma, considera-se que resíduos localizados próximos às lagoas de percolado (área inicial de operação do aterro) e em cotas topográficas menos elevadas foram aterrados no início da ocupação do terreno. Não se tem uma precisão exata nas informações obtidas sobre o tempo de aterramento dos resíduos nas demais parcelas do aterro. Entretanto, é possível afirmar o tempo de disposição exato da célula nova, iniciada em julho de 2012, como havia sido mencionado anteriormente.

Figura 17: Áreas de disposição antiga e nova do aterro sanitário municipal de Rio Claro.



Figura 18: Frente de operação atual.



As características utilizadas como critério para seleção dos drenos e das áreas de estudo do aterro são apresentadas no **Quadro 1**, a seguir:

Quadro 1: Grupos de drenos monitorados.

Drenos monitorados	Localização	Características da parcela do aterro
5	Célula antiga.	Resíduo antigo com intensa recirculação de lixiviado no período de 2012. Tempo de disposição dos resíduos entre 5 e 7 anos.
7 e 8	Célula antiga, próximos às lagoas de chorume.	Resíduo muito antigo sem recirculação de lixiviado. Tempo de disposição dos resíduos acima de 10 anos.
19	Adjacente à área de alteamento.	Resíduo antigo sem recirculação de lixiviado, área da primeira fase de ocupação do aterro.
25, 26 e 28	Área de alteamento.	Resíduo com idade por volta de 3 anos (alteamento) e resíduos com idade de 5 a 7 anos (camadas inferiores).
31 e 32	Célula nova com frente de operação do aterro.	Resíduo novo (aproximadamente 18 meses de disposição), sem recirculação de lixiviado. Atual frente de operação.

Tendo em vista que um dos objetivos do presente estudo é fazer uma análise comparativa entre as áreas antiga e nova do aterro, após a reformulação dos grupos, foram incluídos novos drenos localizados na nova célula do aterro construída em julho de 2012, em uma área contígua junto à frente de operação passaram a ser incluídos. A seleção dos drenos 31 e 32 do aterro se deu em virtude da qualidade de amostragem de biogás, visto que outros drenos não foram completamente envoltos por resíduos sólidos, sendo cercado parcialmente por camadas de solo, ou eram localizados em áreas de acesso mais difícil e menor

interferência externa em relação aos demais drenos. É possível observar a localização dos drenos estudados no presente trabalho na **Figura 19**, a seguir:

Figura 19: Imagem do aterro sanitário de Rio Claro – SP com a localização dos drenos de gás analisados no presente estudo.

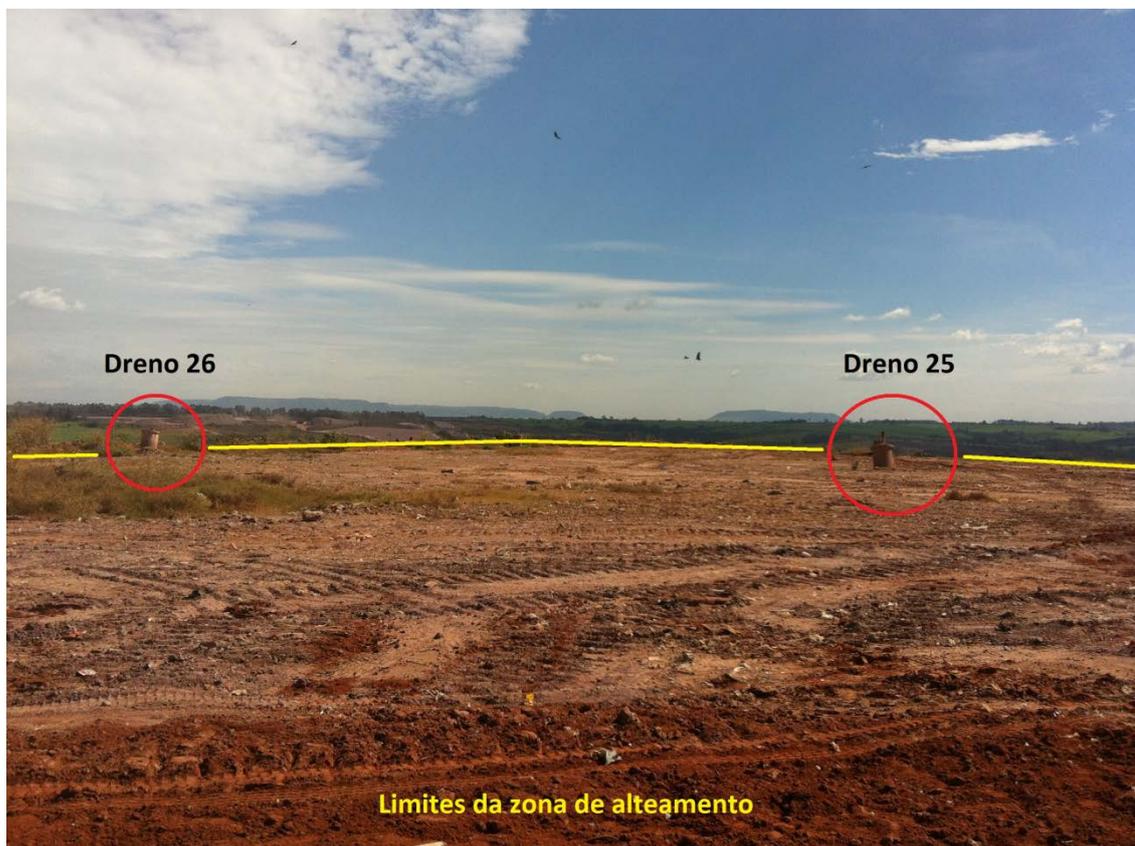


Figura 20: Dreno 31 localizado na célula nova, com destaque para a localização do dreno 32 e a frente de trabalho atual.



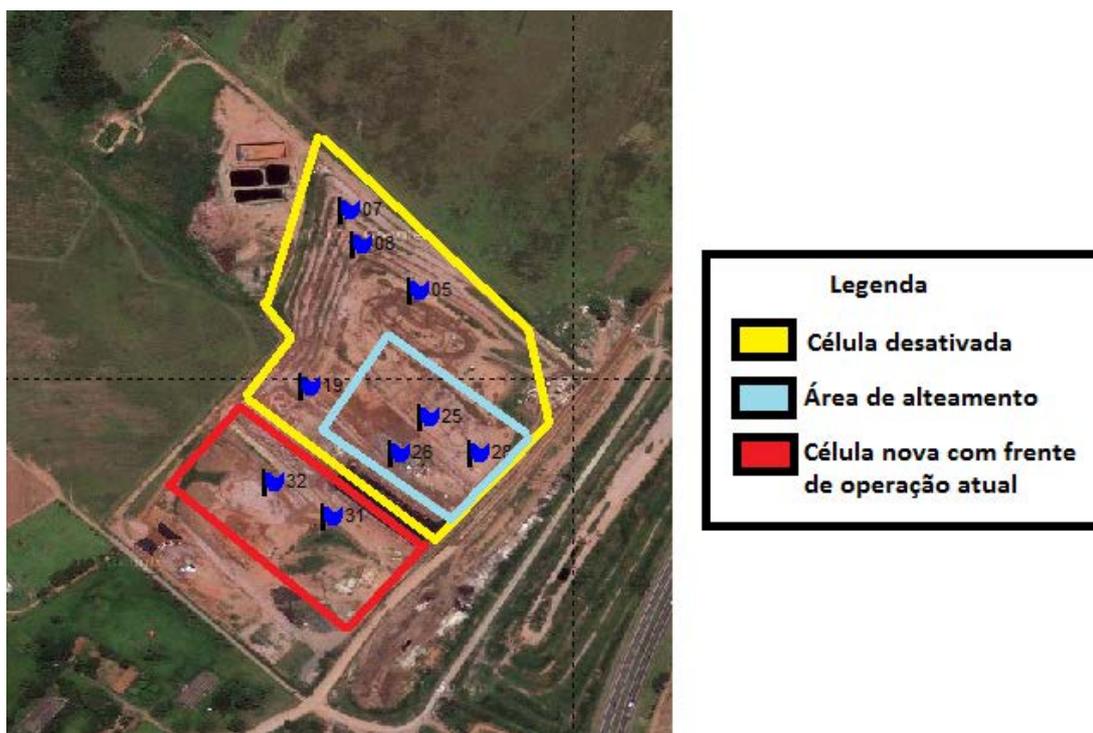
Além dos drenos localizados na nova célula, foram selecionados também os drenos 25, 26 e 28, localizados no último patamar do aterro sanitário, uma vez que foi realizado alteamento no qual ocorreu disposição dos resíduos desde o final de 2011 a julho de 2012, quando então foram finalizadas as obras da nova célula.

Figura 21: Área de alteamento, com identificação dos drenos 25 e 26 analisados no estudo.



Posteriormente, foi feita a especificação das subáreas do aterro a serem analisadas, com seus respectivos drenos, como mostra a **Figura 22:**

Figura 22: Subdivisão do aterro sanitário de Rio Claro – SP em parcelas de estudo.



4.2.Procedimentos para a medição da velocidade do biogás e cálculo da vazão

A metodologia aplicada para a medição da velocidade para posterior cálculo da vazão no presente estudo foi definida no projeto de Auxílio Regular “Estudo do comportamento da temperatura, umidade, lixiviado e sua influência na vazão e na composição do biogás em um aterro sanitário de médio porte”, processo número 2011/20081-0, uma vez que apresentou dados satisfatórios e coerência no período analisado no mesmo. O equipamento utilizado para a medição da velocidade nos drenos monitorados foi o termo-anemômetro digital portátil TESTO modelo 405-V1, que apresenta precisão de 5% (**Figura 23**).

Figura 23: Termo-anemômetro.



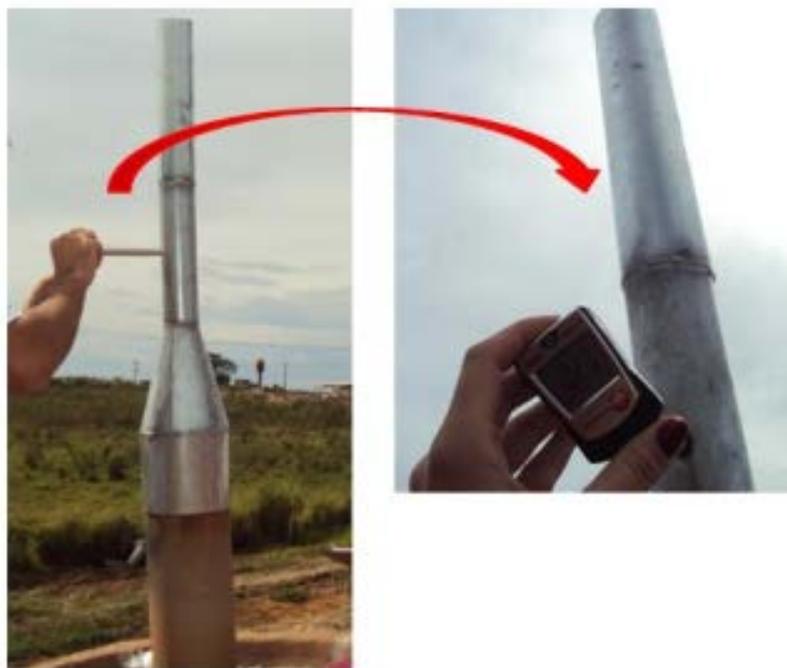
As medidas foram realizadas com o auxílio de adaptadores de chapa galvanizada, semelhantes a “chaminés” (**Figura 24**), sendo estas adaptadas aos dois diâmetros dos drenos do aterro. Esta medida foi tomada com a finalidade de minimizar a interferência da circulação de ar (vento) e aumentar a velocidade do biogás através da diminuição da seção dos drenos.

Figura 24: Adaptadores para medição da velocidade do biogás.



A técnica utilizada para aferir a velocidade do biogás é dada pela inserção perpendicular do termo-anemômetro em relação ao fluxo de gás através de um orifício que possui diâmetro similar ao do equipamento, procurando manter o sensor do mesmo no centro da seção da “chaminé” utilizada (**Figura 25**). O aparelho é posicionado a uma distância de 96 cm do final do tubo a fim de impedir que o regime de transição de escoamento do biogás influencie as medidas de velocidade.

Figura 25: Termo-anemômetro inserido na chaminé para medição da velocidade do biogás.



Considerando a grande sensibilidade do termo-anemômetro em relação a alterações de velocidade, foram obtidas medidas de velocidade do biogás durante um minuto, com intervalos de 10 segundo, totalizando assim, seis medidas, que serão utilizadas para o cálculo da velocidade média do biogás e posteriormente, o cálculo da vazão do mesmo em um determinado dreno.

O cálculo da vazão do biogás é representado pela seguinte equação:

$$Q = V * A$$

Equação 2: Definição de vazão.

Onde, no caso:

$$\left\{ \begin{array}{l} V - \text{é velocidade do biogás, em m/s;} \\ A - \text{área da secção da chaminé, em m}^2; \\ Q - \text{vazão, em m}^3/\text{s.} \end{array} \right.$$

4.3. Análise da composição do biogás gerado no aterro sanitário

A determinação da composição do biogás proveniente dos drenos do aterro foi realizada através da utilização do Instrumento portátil LANDTEC GEM-2000 (**Figura 26**),

Figura 27: Procedimentos de fechamento do dreno de gás para posterior medição.



Fonte: Antônio (2012).

4.4. Forma de análise dos resultados

As coletas de dados do biogás nos drenos 5, 7, 8, 19 e 28 se iniciaram no dia 03 de maio de 2012, enquanto a coleta de dados nos drenos 25, 26, 31 e 32 se iniciaram na primeira semana do mês de março de 2013, sendo que todas continuarão por um período de oito meses, em intervalos de 15 dias, no presente trabalho, de forma a obter um histórico da variação da composição e características do biogás nas subáreas definidas do aterro sanitário de Rio Claro – SP, promovendo a correlação destes dados com as idades distintas de operação de aterramento de resíduos.

Os resultados obtidos por meio das coletas *in situ* são analisados, a princípio, através da associação entre a composição e vazão do biogás nos grupos de drenos estabelecidos e monitorados (apresentados na **Tabela 8**) e as fases graduais do processo de degradação anaeróbica, demonstrado na revisão bibliográfica.

Uma analogia entre a porcentagem de metano, a vazão de biogás e o tempo de aterramento dos resíduos também é providenciada através do cruzamento dos dados mensurados em saídas de campo, podendo estes acarretar ou não na confirmação dos

resultados apresentados na bibliografia. Tal análise será promovida através da confecção de gráficos que apresentam a variação temporal da vazão e concentração de cada um dos drenos para o período do estudo.

Com a finalidade de possibilitar uma análise conjunta das variáveis envolvidas no estudo, como a porcentagem de metano, a vazão de biogás e o tempo de aterramento dos resíduos, também foram realizadas análises estatísticas no ambiente computacional “R”, através da interface “Tinn-R”.

Os dados pluviométricos diários obtidos do CEAPLA-UNESP serão cruzados com as taxas de produção de metano referentes aos períodos de estiagem ou chuva. A análise da influência das condições climáticas de precipitação na geração de biogás será promovida individualmente para cada dreno através de análises gráficas da precipitação acumulada ocorrida no período entre coletas, com a geração e concentração de metano, possibilitando uma análise conjunta das principais variáveis estudadas na atual pesquisa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de simplificar a interpretação dos dados obtidos em campanhas de coleta no decorrer do presente trabalho, optou-se pela classificação dos drenos estudados em quatro grupos, discriminados na **Quadro 2**, a seguir:

Quadro 2: Classificação e características dos drenos monitorados e áreas de estudo do aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Dreno	Localização	Características dos resíduos aterrados nas áreas onde se encontram os drenos	Classificação do dreno de acordo a partir dos dados obtidos em campo
5	Célula antiga.	Resíduo antigo com intensa recirculação de lixiviado no período de 2012. Tempo de disposição dos resíduos entre 05 e 07 anos.	Médio
7 e 8	Célula antiga, próximos às lagoas de chorume.	Resíduo muito antigo sem recirculação de lixiviado. Tempo de disposição dos resíduos acima de 10 anos.	Antigo
19	Adjacente à área de alteamento.	Resíduo antigo sem recirculação de lixiviado, área da primeira fase de ocupação do aterro. Resíduos com idade de 05 a 07 anos (camadas inferiores) e 03 anos na área contígua de aterramento.	Novo
25, 26 e 28	Área de alteamento.	Resíduo com idade por volta de 03 anos (área de alteamento) e resíduos com idade de 05 a 07 anos (camadas inferiores).	Novo
31 e 32	Célula nova com atual frente de operação do aterro.	Resíduo novo (aproximadamente 18 meses de disposição), sem recirculação de lixiviado.	Recente

As **Figuras 28 a 33** apresentam a variação ao longo do tempo das medidas de concentração de metano e vazão de biogás referentes a cada dreno em seu respectivo grupo.

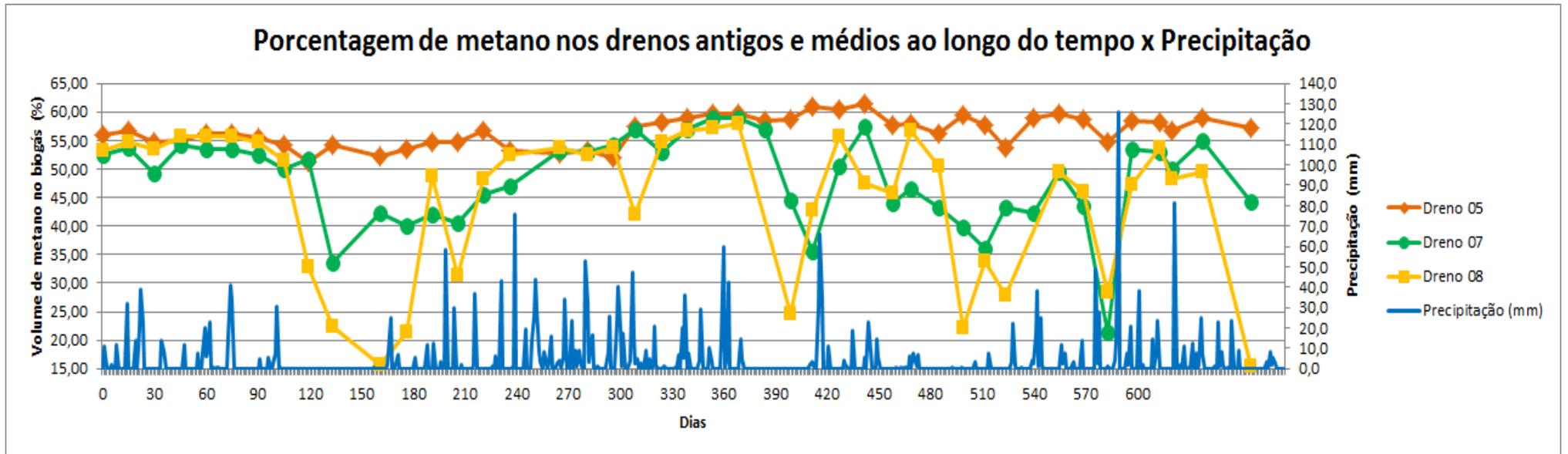


Figura 28: Variação da concentração de metano no biogás liberado pelos drenos antigos e médios localizados na célula desativada.

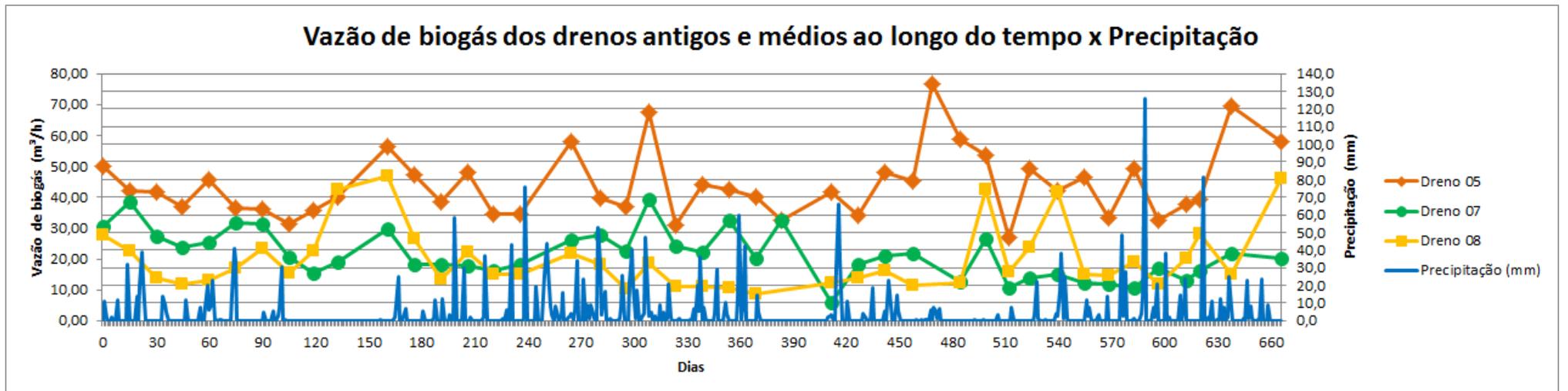


Figura 29: Variação da vazão de biogás liberado pelos drenos antigos e médios localizados na célula desativada.

A partir da análise da **Figura 28**, nota-se que os drenos 07 e 08, classificados como antigos, apresentam comportamento semelhante ao longo do tempo: em períodos de estiagem ou em que ocorre a diminuição da precipitação, a produção de metano tende a diminuir, como é possível notar nos intervalos dos 110° ao 130°, 380° ao 410° e 650° ao 670° dia.

Observa-se que no dreno 05, com tempo intermediário de disposição dos resíduos (05 a 07 anos), os valores da concentração de metano no biogás mantiveram-se homogêneos durante todo o período de monitoramento, sem aparente influência das águas das chuvas que infiltram na massa de resíduos. A prática de recirculação de lixiviado, realizada em 2012 (até o 300° dia aproximadamente), na área próxima ao dreno 05, contribuiu para a maior estabilidade na porcentagem de metano no biogás neste dreno.

Ainda com base na **Figura 28**, verifica-se que as porcentagens de metano nos drenos 07 e 08, com médias 48,12% e 44,10% respectivamente, são menores em relação à média do dreno 05 (56,63%). Tal fato está associado à presença de resíduos com menor tempo de disposição nesta área do aterro, quando comparados com os drenos 07 e 08, áreas mais antigas do aterro.

Verifica-se que, dentre todos os drenos, os drenos 07 e 08 apresentam menores valores de vazão de biogás (**Figura 29**). Este fato é consequência da baixa disponibilidade de matéria orgânica biodegradável disponível nestas áreas mais antigas, a qual apresenta uma atividade biológica menos intensa, que por sua vez demanda um menor volume de água para a manutenção da atividade, sendo menos suscetíveis as variações de precipitação, quando comparados a drenos mais novos, envoltos por resíduos mais recentes (apresentados na **Figura 29**), os quais demandam maiores quantidades de água.

Os valores de vazão encontrados para o dreno 05 mostram elevada variação, entre 26,88m³/h e 86,66m³/h, apresentando picos entre os 460° e 490° dias. Presume-se que tais picos de vazão se deram em decorrência do período do período de chuvas entre os 415° e 450° dias, no qual é possível notar o crescimento inicial da curva que resulta em tais pontos.

Finalmente, observa-se que a influência da precipitação na concentração de metano e na vazão do biogás, em áreas com resíduos mais antigos (acima de 07 anos) foi pouco expressiva. Considerando o estágio avançado de degradação da fração orgânica dos resíduos nestas áreas (baixa quantidade de material biodegradável), a atividade biológica é menor, e, conseqüentemente, demanda menores quantidades de água para a manutenção do metabolismo das bactérias responsáveis pela degradação.

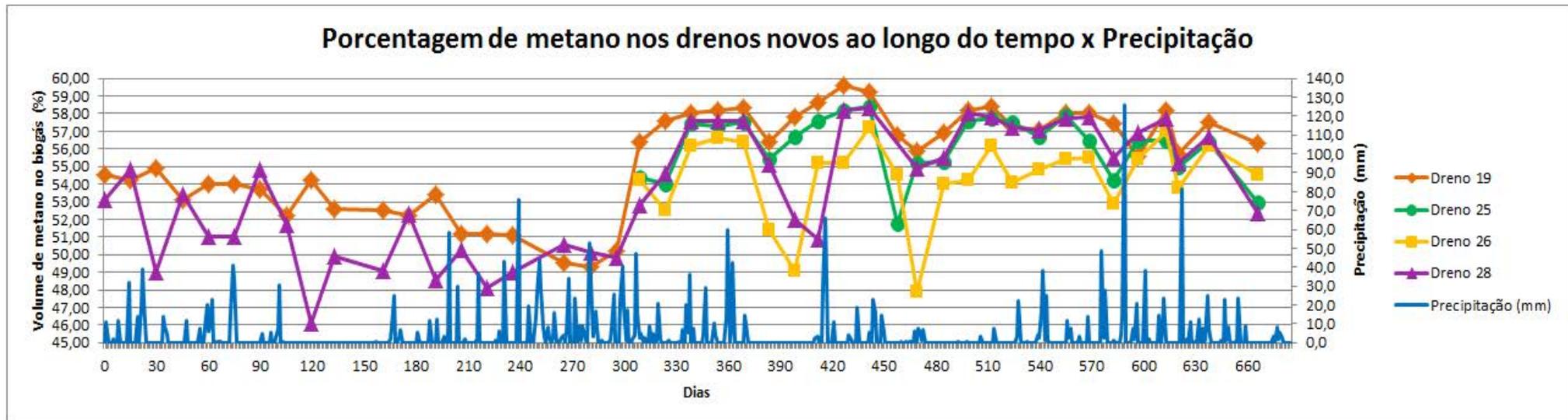


Figura 30: Variação da concentração de metano no biogás liberado pelos drenos novos localizados na área de alteamento ou suas proximidades.

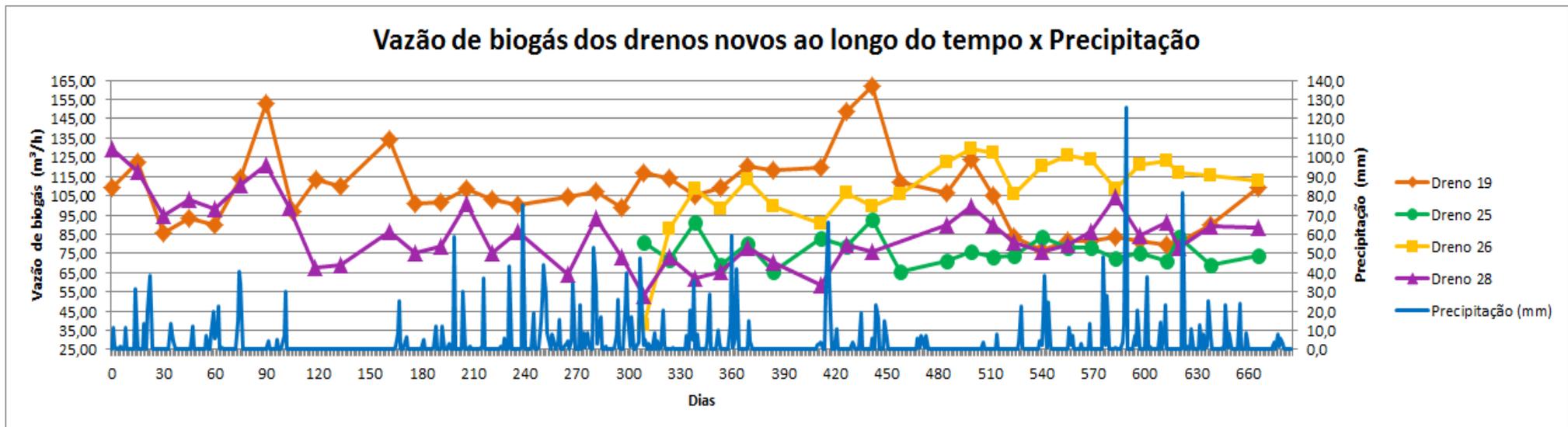


Figura 31: Variação da vazão de biogás liberado pelos drenos novos localizados nas áreas de alteamento ou suas proximidades.

De acordo com a **Figura 30**, após um lento decréscimo da produção de metano nos drenos 19 e 28, até o 300º dia aproximadamente, ocorre um aumento acentuado das porcentagens de metano no biogás liberado por tais drenos. A única explicação possível para este comportamento assenta-se no fato de que ocorreu a estruturação da camada de cobertura de terra no último patamar do aterro e no talude onde se localizam estes drenos, o que pode ter propiciado condições mais favoráveis para a atividade anaeróbia pelo melhor “isolamento” da massa de resíduos. Destaca-se que no referido período não ocorreu a disposição de novos resíduos nestas áreas. Posteriormente, as concentrações de metano no dreno 19 perduraram elevadas, em média de 55,35%.

Ao mesmo tempo, o dreno 25 se mostra menos suscetível a variações nas taxas de produção de metano e vazão em relação à precipitação. Cabe ressaltar que, por volta do 450º dia, o dreno 25 passa a apresentar certa homogeneidade, possuindo uma média de 76,41m³/h.

Observa-se que os drenos 26 e 28 possuem grande sensibilidade em relação à precipitação, apresentando quedas acentuadas na produção de metano em períodos de estiagem, evidenciado entre os 100º e 120º, 370º e 390º, e 450º e 470º dias. O menor valor de concentração de metano alcançado pelo dreno 26 é de 47,9% e ocorreu no terceiro intervalo mencionado, enquanto o menor valor alcançado pelo dreno 28 é de 40,9%. O crescimento da curva de metano do dreno 28 com a presença de precipitação é notado no período entre os dias 220 e 370. O mesmo ocorre do 410º ao 420º dia, enquanto o decréscimo da curva é percebido com a diminuição da precipitação a partir do 640º dia.

De maneira geral observa-se uma diminuição da porcentagem de metano em todos os drenos nos períodos de estiagem (períodos compreendidos entre os 370º e 390º, e 450º e 470º dias). As porcentagens médias de metano nos drenos 19, 25, 26 e 28 (55,35%, 56,19%, 54,42% e 53,44%, respectivamente) foram maiores quando comparadas com as médias apresentadas nos drenos mais antigos, apresentados nas **Figuras 28 e 29**.

Finalmente, observa-se uma maior variação da concentração de metano em relação à precipitação para os drenos localizados em áreas com resíduos mais novos quando comparados com as áreas mais antigas, possivelmente pela maior atividade biológica que demanda maiores quantidades de água, e, portanto, mais suscetível a variação da precipitação.

Analisando o comportamento da vazão dos gases nos drenos (**Figura 31**) verificou-se que os valores de vazão de biogás no dreno 26 permaneceram altas, com uma diminuição nos intervalos entre os dias 370 e 420, e 510 e 520, períodos sem precipitação. Já, as taxas de

vazão registradas no dreno 28 apresentam grande e constante oscilação (com vazão média de $83,23\text{m}^3/\text{h}$), não se mostrando perceptível na **Figura 31** a influência da precipitação em tais valores. Não é nítida a relação entre a precipitação e as altas taxas de vazão observadas no mesmo dreno, que apresenta maior valor de $162,09\text{m}^3/\text{h}$ após um pico de chuva por volta do 420º dia.

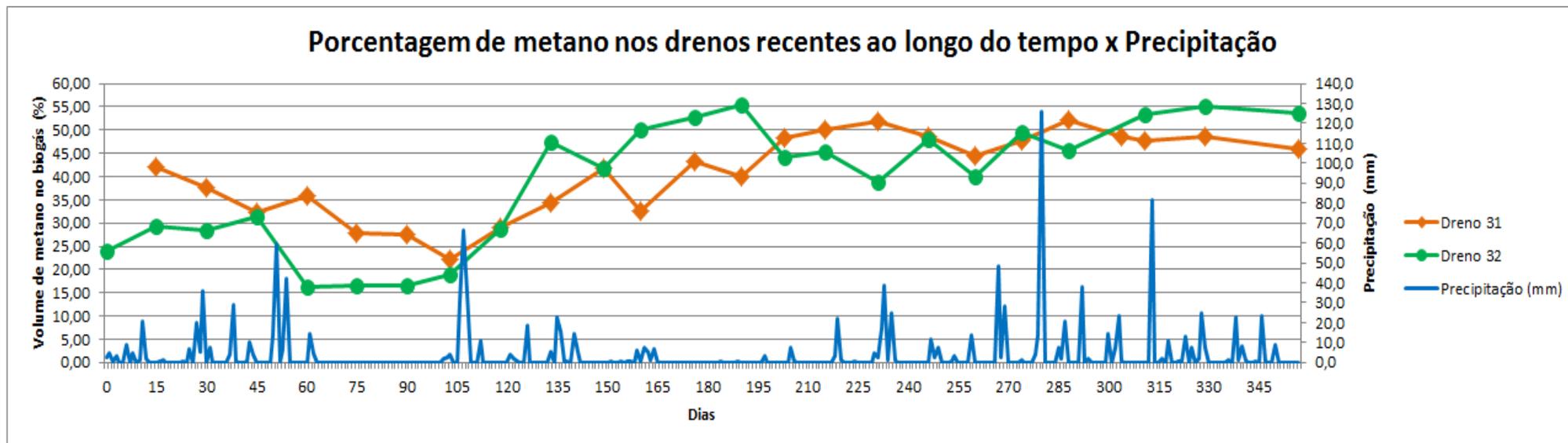


Figura 32: Variação da concentração de metano no biogás liberado pelos drenos recentes localizados na célula com atual frente de operação.

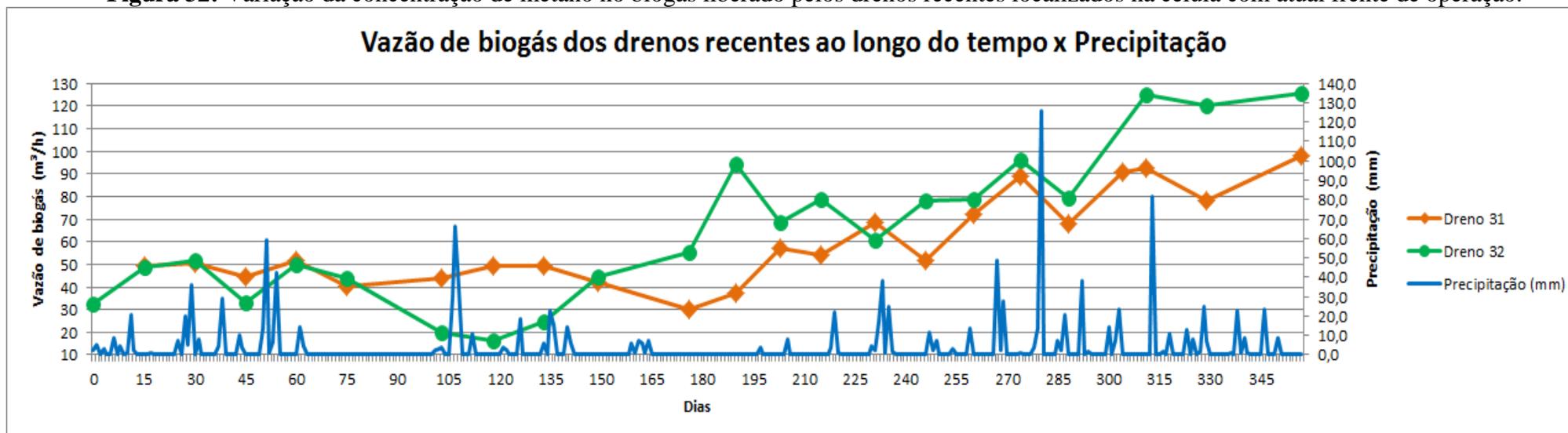


Figura 33: Variação da vazão de biogás liberado pelos drenos recentes localizados na célula com a atual frente de operação.

Com base nas **Figuras 32 e 33**, verifica-se em ambos os drenos 31 e 32 um declínio das concentrações de metano logo após o início do monitoramento, devido à escavação da massa de resíduos para a instalação de termo-resistências ao lado dos drenos, operação que promoveu a aeração dos resíduos e, conseqüentemente, a diminuição da atividade do processo anaeróbio.

De maneira geral, observa-se o aumento da porcentagem de metano, sinalizando a estabilização da fase metanogênica na degradação da parcela orgânica dos resíduos aterrados. Outro fator que possivelmente contribuiu para a melhoria da atividade metanogênica foi a implantação de sucessivas sobreposições de camadas de resíduos devido às operações da frente de trabalho situada nesta área do aterro, durante o monitoramento dos drenos no presente estudo.

Em meados do mês de junho de 2013, por volta do 90º dia, um segundo patamar de resíduos começou a ser construído na célula nova do aterro em que esses drenos estão localizados. Assim, um maior isolamento da massa de resíduos propiciou condições favoráveis à degradação anaeróbia da parcela orgânica dos resíduos aterrados. A frente de operação atingiu, em primeiro momento, o dreno 32, e posteriormente o dreno 31, evidenciado pelo crescimento retardado das taxas de produção de metano e vazão de biogás deste em relação ao dreno 32 (**Figuras 32 e 33**, respectivamente).

Após um período contínuo de crescimento da curva, o dreno 31 passa a apresentar valores médios de concentração de metano no biogás referentes à fase metanogênica de degradação anaeróbica por volta do 170º dia, uma vez que estes variam na faixa de 44,50% a 52,10%. O mesmo ocorre com o dreno 32 por volta do 130º dia, em que as taxas de produção de metano passam a oscilar entre 47,40% e 55,00%. Nota-se o início de um período de estabilidade das taxas de concentração de metano em ambos os drenos.

Observa-se um crescimento contínuo das curvas de vazão de biogás nos drenos 31 e 32, possuindo valores máximos de 97,81m³/h e 125,63m³/h, respectivamente. Acredita-se que a precipitação exerce influência sobre a produção de metano e vazão de biogás, uma vez que as curvas apresentam um crescimento acentuado após o início da estação chuvosa, por volta do 230º dia.

Os drenos localizados em áreas de aterramento recente de resíduos apresentam grande quantidade de matéria orgânica a ser degradada e a presença de água das chuvas promove uma maior atividade biológica. A infiltração de água na massa de resíduos afeta o processo de

decomposição dos mesmos, uma vez que a umidade é um dos fatores ambientais determinantes da velocidade de biodegradação, provocando um reflexo negativo na alteração da porcentagem de metano com a diminuição da umidade. Desta forma, drenos mais novos se mostram mais sensíveis a variações de parâmetros que influenciam a geração de metano e vazão de biogás.

No entanto, cabe destacar que, nesses drenos classificados como novos, há grande disponibilidade de substrato e umidade para suprir o processo de degradação anaeróbica dos resíduos orgânicos.

Ao longo do período analisado no presente estudo, mais um patamar de resíduos foi construído, e outro iniciado na célula nova do aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Com o interesse de detectar e confirmar a associação entre as variáveis consideradas no presente trabalho, optou-se por calcular correlações das mesmas para cada dreno e cada grupo de drenos definido anteriormente. Em virtude de observações feitas em campo, acredita-se que as variáveis “vazão e precipitação acumulada”, e “vazão e temperatura do biogás” apresentam correlações fortes. Em contrapartida, espera-se que haja uma correlação fraca entre “concentração de metano e vazão de biogás”.

Cabe destacar também que valores próximos de $\pm 1,00$ indicam correlação forte, de modo que correlações de valor positivo indicam uma dependência linear positiva entre as variáveis. Caso a correlação apresente um valor negativo, as variáveis possuirão uma dependência linear negativa.

A variável “precipitação acumulada” representa a soma das precipitações diárias entre dois dias de campanhas de coleta em campo. A mesma foi utilizada nos cálculos estatísticos, pois é necessário um período para que água das chuvas infiltre na massa de resíduos e influencie o processo de degradação anaeróbia, no caso, definido como 15 dias, já que os dados do presente estudo foram coletados quinzenalmente.

As **Tabelas 10 a 17**, a seguir, exibem as correlações encontradas ao considerar as variáveis de cada dreno monitorado separadamente:

Tabela 10: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 07 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 7							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,30	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,46	0,80	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	-0,01	-0,75	-0,74	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	0,08	0,21	0,27	-0,03	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	0,16	0,63	0,60	-0,38	0,46	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,22	0,18	0,16	0,10	0,67	0,43	1,00

Com base na **Tabela 10**, a correlação mais forte que o dreno 07 apresenta é de ordem crescente, entre “concentração de gás carbônico no biogás” e “concentração de metano no biogás”, ou seja, à medida que os valores da concentração de gás carbônico aumentam, aumentam também os valores da concentração de metano no biogás. O mesmo fenômeno ocorre, em intensidades menores, no dreno 07 com as variáveis:

- Temperatura ambiente e temperatura do gás;
- Vazão de biogás e concentração de metano no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de gás carbônico no biogás.

Os cálculos também acusam, para o dreno 07, forte correlação de ordem decrescente entre “concentração de oxigênio no biogás” e “concentração de metano no biogás”. Portanto, à medida que os valores da concentração de oxigênio aumentam, diminuem os valores da concentração de metano no biogás. Tal comportamento também é observado entre as variáveis:

- Concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás.

Tabela 11: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 08 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 8							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,36	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,51	0,92	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	-0,35	-0,98	-0,92	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	0,05	0,04	0,07	0,01	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,22	-0,76	-0,66	0,75	0,24	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,23	-0,12	0,00	0,10	0,72	0,30	1,00

Observa-se na **Tabela 11**, que o dreno 08 apresenta as seguintes correlações de ordem crescente:

- Concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de oxigênio no biogás;
- Temperatura ambiente e temperatura do gás;
- Concentração de gás carbônico no biogás e precipitação acumulada.

Em contrapartida, as correlações de ordem decrescente para o mesmo dreno são:

- Concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás;
- Concentração de oxigênio no biogás e concentração de gás carbônico no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de metano no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de gás carbônico no biogás.

Cabe destacar que todas as correlações presentes entre os dados do dreno 07 também ocorrem para o dreno 08.

Tabela 12: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 19 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 19							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	-0,55	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,54	-0,87	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,28	-0,07	-0,20	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	-0,03	-0,30	0,16	-0,02	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,11	-0,19	0,09	-0,40	0,08	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,22	-0,35	0,21	0,09	0,66	-0,13	1,00

Os cálculos envolvendo dados do dreno 19 apontam correlação forte de ordem crescente entre as seguintes variáveis:

- Temperatura ambiente e temperatura do gás;
- Concentração de gás carbônico no biogás e precipitação acumulada.

Já, as correlações fortes de ordem decrescente detectadas para o mesmo são:

- Concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás;
- Concentração de metano no biogás e precipitação acumulada.

Nota-se que a quantidade de correlações encontradas para o dreno 19 (**Tabela 12**) é menor em relação aos drenos 07 e 08, no entanto, este se diferencia dos demais drenos por possuir correlação forte entre concentração de metano no biogás e precipitação acumulada.

Tabela 13: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 25 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 25							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,15	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	-0,04	-0,15	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,16	-0,54	-0,26	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	0,02	-0,62	-0,18	0,38	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	0,17	0,46	0,00	-0,09	-0,27	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,12	-0,49	-0,28	0,49	0,69	0,21	1,00

A partir da **Tabela 13**, tem-se que o dreno 25 apresenta apenas uma correlação de ordem crescente: temperatura ambiente e temperatura do gás. Considerando correlações de ordem decrescente, para o mesmo dreno tem-se:

- Temperatura do gás e concentração de metano no biogás;
- Concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás.

Este é o único dreno monitorado no presente estudo que apresenta uma correlação forte entre temperatura do gás e concentração de metano no biogás.

Tabela 14: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 26 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 26							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,48	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,22	0,37	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	-0,17	-0,38	0,38	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	-0,23	-0,31	-0,11	-0,17	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,13	0,23	-0,55	-0,50	-0,04	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,12	-0,32	-0,10	0,06	0,45	-0,34	1,00

Com base na **Tabela 14**, observa-se que o dreno 26 não apresenta correlações de ordem crescente. Em contrapartida, os cálculos acusam para este mesmo dreno forte correlação de ordem decrescente entre:

- Vazão de biogás e concentração de gás carbônico no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de oxigênio no biogás.

Cabe destacar que somente o dreno 08 apresenta ambas as correlações detectadas no dreno 26. No entanto, a primeira correlação listada acima ocorre também para o dreno 07, enquanto a segunda ocorre para o dreno 32.

A **Tabela 15**, a seguir, mostra que o dreno 28 apresenta fortes correlações de ordem crescente e decrescente entre temperatura ambiente e temperatura do gás, e concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás, respectivamente.

Tabela 15: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 28 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 28							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	-0,38	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,39	-0,10	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,11	-0,76	-0,42	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	0,03	0,07	0,27	-0,45	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,25	0,32	-0,02	-0,33	0,25	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,21	-0,10	0,09	-0,18	0,65	0,02	1,00

Tabela 16: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 31 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 31							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,21	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,08	0,93	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	-0,14	-0,98	-0,98	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	-0,15	0,38	0,37	-0,41	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	0,27	0,56	0,32	-0,47	0,40	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,10	0,32	0,26	-0,32	0,53	0,44	1,00

Observa-se na **Tabela 16** que as correlações mais fortes que o dreno 31 apresenta são de ordem decrescente, entre as variáveis “concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás” e “concentração de oxigênio no biogás e concentração de gás carbônico no biogás”. As correlações de ordem crescente detectadas no dreno 31 são:

- Concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de metano no biogás;
- Temperatura ambiente e temperatura do gás.

Tabela 17: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados do dreno 32 obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Correlações entre diferentes variáveis no dreno 32							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	-	-	-	-	-	-
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	-0,11	1,00	-	-	-	-	-
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	-0,18	0,92	1,00	-	-	-	-
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,17	-0,95	-0,93	1,00	-	-	-
Temperatura do gás (°C)	0,01	0,09	-0,05	0,05	1,00	-	-
Vazão de biogás (m ³ /h)	0,00	0,71	0,42	-0,56	0,50	1,00	-
Temperatura ambiente (°C)	0,13	0,19	0,06	-0,05	0,68	0,41	1,00

Considerando correlações de ordem crescente destacadas na **Tabela 17**, para o dreno 32, tem-se:

- Concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de metano no biogás;
- Temperatura ambiente e temperatura do gás;
- Vazão de biogás e temperatura do gás.

Tais correlações são coincidentes, porém mais fortes quando comparadas aos resultados do dreno 31, verificados acima. Por fim, os cálculos acusam que, o dreno 32 possui correlações de grande intensidade e ordem decrescente entre:

- Concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás;
- Concentração de oxigênio no biogás e concentração de gás carbônico no biogás.

Além disso, também é observada uma forte correlação entre “vazão de biogás e concentração de oxigênio no biogás”.

As correlações detectadas para cada grupo de drenos são mostradas nas **Tabelas 18, 19, 20 e 21**, a seguir:

Tabela 18: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como antigos.

Correlações entre diferentes variáveis nos drenos antigos							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,32	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,46	0,88	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	-0,19	-0,87	-0,87	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	0,06	0,14	0,19	-0,07	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,04	-0,18	-0,15	0,34	0,36	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,23	0,01	0,06	0,08	0,69	0,35	1,00

A partir da **Tabela 18**, é possível notar que as correlações consideradas fortes para o grupo dos drenos antigos, de ordem crescente ou decrescente, coincidem com as correlações fortes de cada dreno componente do grupo (drenos 07 e 08). Porém, há casos de forte correlação para ambos os drenos 07 e 08 que não se repetem para este grupo. Estes são:

- Vazão de biogás e concentração de metano no biogás;
- Vazão de biogás e concentração de gás carbônico no biogás.

Tabela 19: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como médios.

Correlações entre diferentes variáveis nos drenos médios							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	-0,28	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,58	-0,56	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,20	-0,61	0,34	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	-0,03	-0,44	0,16	0,43	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	0,05	0,05	-0,05	-0,03	0,01	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,24	-0,42	0,18	0,32	0,66	0,21	1,00

É importante ressaltar que os dados apresentados na **Tabela 19** representam também os resultados obtidos para dreno 05, uma vez que este é o único elemento da categoria dos drenos médios. Desta forma, observa-se que a correlação mais forte para este grupo é de ordem crescente: temperatura ambiente e temperatura do gás. Outra correlação forte da

mesma ordem é entre concentração de gás carbônico no biogás e precipitação acumulada. As correlações fortes de ordem decrescentes observadas no grupo dos drenos médios são:

- Concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás;
- Concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás.

Ao comparar os resultados obtidos nota-se que as correlações consideradas fortes para o grupo dos drenos médios ocorrem com maior intensidade no grupo dos drenos antigos. No entanto, a correlação entre concentração de gás carbônico no biogás e concentração de metano no biogás é considerada forte apenas para os drenos médios, enquanto é considerada fraca para os drenos antigos.

Tabela 20: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como novos.

Correlações entre diferentes variáveis nos drenos novos							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	-	-	-	-	-	-
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	-0,25	1,00	-	-	-	-	-
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,36	-0,28	1,00	-	-	-	-
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,11	-0,59	-0,32	1,00	-	-	-
Temperatura do gás (°C)	-0,07	-0,22	0,04	-0,14	1,00	-	-
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,09	0,17	-0,04	-0,23	0,26	1,00	-
Temperatura ambiente (°C)	0,18	-0,24	0,05	0,02	0,52	-0,12	1,00

De acordo com a **Tabela 20**, as correlações fortes de ordem crescente e decrescente destacadas para o conjunto dos drenos novos coincidem com as correlações de todos os elementos do grupo (drenos 19, 25, 26 e 28), com exceção ao dreno 26, que não mostra semelhança alguma quando comparado a este grupo. Os drenos 19 e 28 apresentam as mesmas correlações fortes que o conjunto dos drenos novos, porém a associação de tais variáveis se mostra mais intensa na análise para cada um desses drenos separados. Ao mesmo tempo, o dreno 25 detecta uma correlação mais intensa entre temperatura ambiente e temperatura do gás, e outra menos intensa entre concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás, quando comparado ao conjunto dos drenos novos. Os elementos deste grupo de drenos apresentam a menor quantidade de correlações dentre todos os drenos monitorados.

Além disso, observa-se que todas as correlações presentes entre os dados do conjunto de drenos novos também ocorrem para os conjuntos de drenos antigos e médios, ainda que com maior intensidade na associação de suas variáveis. O conjunto dos drenos novos é o grupo que contém menor número de correlações fortes dentre todos os grupos de drenos analisados.

Tabela 21: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados dos drenos classificados como recentes.

Correlações entre diferentes variáveis nos drenos recentes							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	–	–	–	–	–	–
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,04	1,00	–	–	–	–	–
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	-0,06	0,92	1,00	–	–	–	–
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	0,04	-0,96	-0,94	1,00	–	–	–
Temperatura do gás (°C)	-0,07	0,22	0,14	-0,14	1,00	–	–
Vazão de biogás (m ³ /h)	0,09	0,64	0,38	-0,52	0,46	1,00	–
Temperatura ambiente (°C)	0,12	0,25	0,15	-0,16	0,60	0,41	1,00

Ao se tratar de ambas as ordens crescente e decrescente, as correlações consideradas mais fortes para o grupo dos drenos recentes são compatíveis com as correlações mais fortes que seus elementos (drenos 31 e 32) apresentam.

Todas as correlações fortes ocorridas para o grupo de drenos recentes, também ocorrem para o dreno 32, com uma associação mais intensa entre as variáveis analisadas. O mesmo dreno ainda apresenta correlação forte entre “vazão de biogás e temperatura do gás”, que não aparece para esta categoria de drenos. Em contrapartida, nem todas as correlações fortes observadas na **Tabela 21** coincidem com os resultados obtidos para o dreno 31.

Observa-se que o conjunto dos drenos recentes apresenta o maior número de correlações fortes, dentre todos os grupos de drenos analisados. Todos os conjuntos de drenos definidos possuem forte correlação de ordem decrescente entre as variáveis “concentração de oxigênio no biogás e concentração de metano no biogás”, na seguinte gradação de intensidade: drenos recentes, antigos, médios e novos.

A **Tabela 22**, a seguir, mostra uma visão geral da associação entre as variáveis estudadas no presente estudo:

Tabela 22: Valores representativos da correlação entre dados climáticos e dados coletados de todos os drenos considerados no presente estudo.

Correlações entre diferentes variáveis em todos os drenos							
Variáveis	Precipitação acumulada (mm)	Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	Temperatura do gás (°C)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Temperatura ambiente (°C)
Precipitação acumulada (mm)	1,00	-	-	-	-	-	-
Concentração de metano no biogás (%CH ₄)	0,08	1,00	-	-	-	-	-
Concentração de gás carbônico no biogás (%CO ₂)	0,22	0,81	1,00	-	-	-	-
Concentração de oxigênio no biogás (%O ₂)	-0,06	-0,92	-0,86	1,00	-	-	-
Temperatura do gás (°C)	-0,06	0,07	0,17	-0,06	1,00	-	-
Vazão de biogás (m ³ /h)	-0,06	0,36	0,35	-0,27	0,43	1,00	-
Temperatura ambiente (°C)	0,19	0,04	0,08	-0,04	0,54	0,05	1,00

Os cálculos envolvendo dados de todos os drenos monitorados apontam correlação forte de ordem crescente entre as seguintes variáveis:

- Concentração de gás carbônico e concentração de metano no biogás;
- Temperatura ambiente e temperatura do gás;

Já, as correlações fortes de ordem decrescente detectadas são:

- Concentração de oxigênio e concentração de metano no biogás;
- Concentração de oxigênio e concentração de gás carbônico no biogás.

Assim como nos conjuntos antigo e recente, a **Tabela 22** apresenta correlação alta entre concentração de oxigênio e de metano no biogás. Apesar de todos os drenos em geral possuírem correlação forte entre concentração de gás carbônico e concentração de metano no biogás, a categoria dos drenos novos não mostra o mesmo padrão. Este comportamento é uma consequência do processo de degradação dos resíduos aterrados, que se dá, em primeira instância, com a presença de oxigênio, e, após sua exaustão, inicia-se a degradação anaeróbica, culminando na produção do metano e gás carbônico. Não só observa-se associação forte entre temperatura ambiente e temperatura do gás para todos os drenos em geral, como também para cada conjunto de drenos.

Visando um melhor entendimento da variação da concentração de metano e vazão de biogás nos drenos monitorados a **Tabela 23**, a seguir, apresenta os valores médios, máximos e mínimos, além do desvio padrão e coeficiente de variação de tais aspectos.

Tabela 23: Valores representativos dos dados de concentração de metano e vazão de biogás obtidos nas campanhas de coleta no aterro sanitário de Rio Claro – SP.

Dreno		5	7	8	19	25	26	28	31	32
Concentração de metano no biogás (%)	Média	56,63	48,12	44,10	55,35	56,19	54,42	53,44	41,08	39,45
	Valor mínimo	51,30	21,50	14,90	49,30	51,80	47,90	40,90	22,30	16,40
	Valor máximo	61,40	58,90	57,90	59,60	58,40	57,20	58,30	52,10	55,30
	Desvio padrão	2,61	7,76	13,46	2,84	1,71	2,27	3,97	8,83	13,37
	Coefficiente de variação (%)	4,61	16,13	30,52	5,13	3,04	4,17	7,43	21,49	33,89
Vazão (m ³ /h)	Média	44,18	21,39	20,13	106,08	76,41	108,74	83,26	59,44	64,80
	Valor mínimo	26,88	5,88	8,69	76,41	65,65	37,57	53,15	30,31	16,27
	Valor máximo	86,66	39,32	47,00	162,09	92,83	129,13	129,18	97,81	125,63
	Desvio padrão	13,12	7,70	10,24	19,64	7,15	19,35	21,28	19,63	32,81
	Coefficiente de variação (%)	29,70	36,00	50,87	18,51	9,36	17,79	25,56	33,02	50,63

Com base na **Tabela 23**, nota-se que os drenos 31 e 32 apresentam as menores médias de concentração de metano no biogás dentre todos os drenos. No entanto, em um período de sete (07) meses, tais médias aumentaram consideravelmente de 37,50% para 52,20% e de 23,75% para 39,45%, respectivamente, destacando-se das demais. Ambos estes drenos classificados como recentes mostram valores máximos de 52,10% e 55,30%, compatíveis com o intervalo remetente à fase metanogênica de degradação anaeróbica da parcela orgânica de resíduos aterrados.

Ainda com relação aos drenos 31 e 32, as médias de vazão de biogás elevaram-se de 35,27m³/h para 64,80m³/h e de 42,11m³/h para 59,44m³/h, passando a apresentar valores máximos de 97,81m³/h e 125,63m³/h, nesta ordem. Acredita-se que a redução do coeficiente de variação de concentração de metano do dreno 32 neste período seja evidência do princípio de uma estabilização do processo de degradação dos resíduos ao redor do dreno.

Ao considerar os drenos antigos 07 e 08, nota-se um comportamento distinto dos coeficientes de variação de concentração de metano, os quais elevaram-se de 14,07% para 16,13% e 28,12% para 30,52%. Ambos os drenos apresentam queda em suas médias valores mínimos de concentração de metano, e o dreno 07 apresentou queda na média dos valores de vazão registrados, de 24,14m³/h para 21,39m³/h.

No período mencionado de sete meses, somente o dreno 26 manteve a média da concentração de metano no biogás, de 54,42%. De maneira geral, as médias dos drenos 05, 19 e 28 apresentaram um aumento não significativo das concentrações de metano no biogás, enquanto ocorreu o oposto com o dreno 25. As médias de vazão dos drenos 05, 08, 25, e 26 sofreram uma elevação desprezível, ao mesmo tempo que as médias de vazão dos drenos 07, 19 e 28 diminuíram.

Os drenos classificados como novos (19, 25, 26 e 28) mostram as maiores médias, assim como os menores coeficientes de variação de concentração de metano no biogás. Além disso, os drenos 19 e 26 apresentaram consistentemente os maiores valores de vazão no período descrito.

Boxplot da variável Vazão por dreno

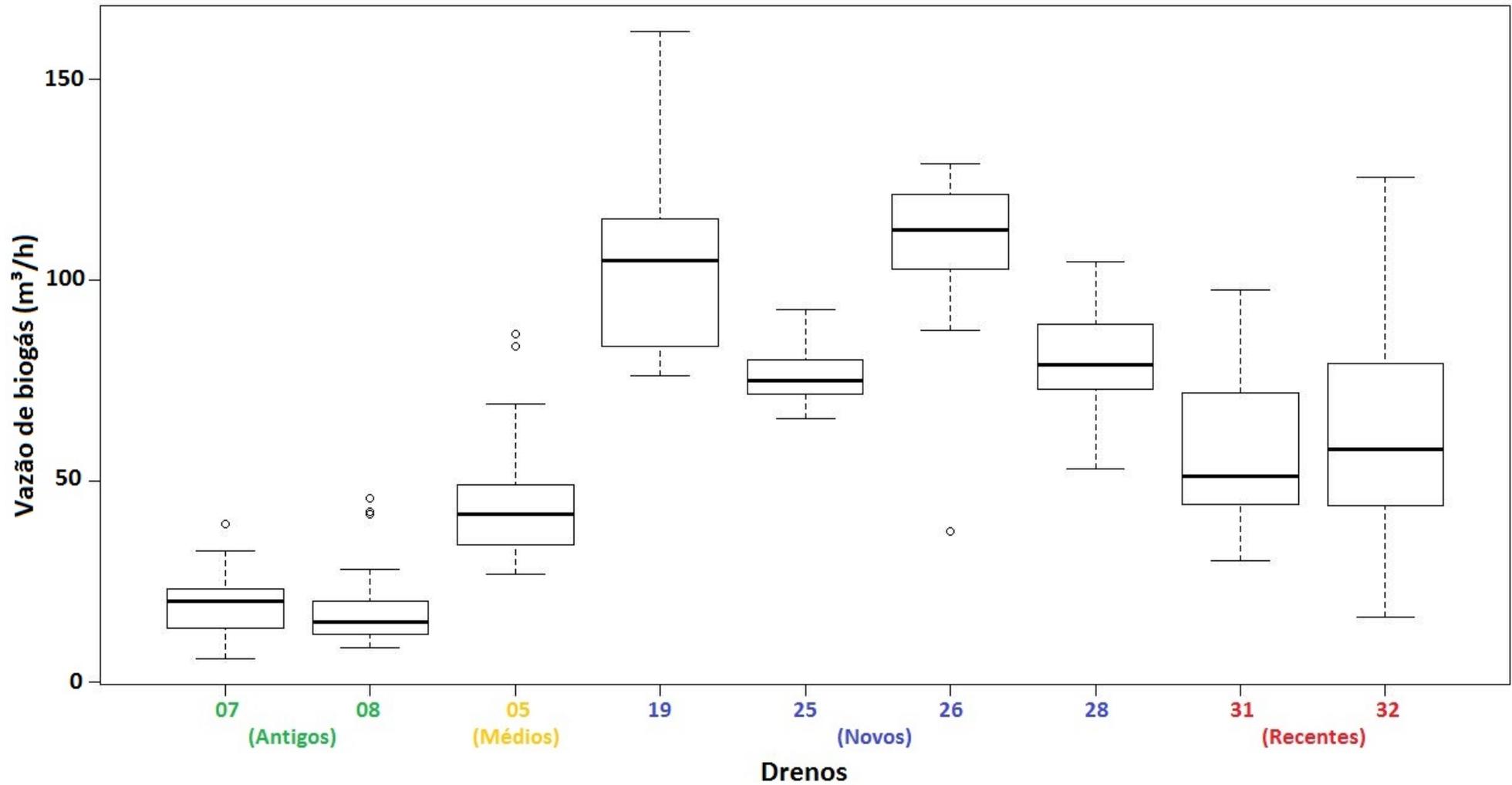


Figura 34: Gráfico *boxplot* da vazão do biogás de acordo com cada dreno analisado.

Boxplot da variável Metano por dreno

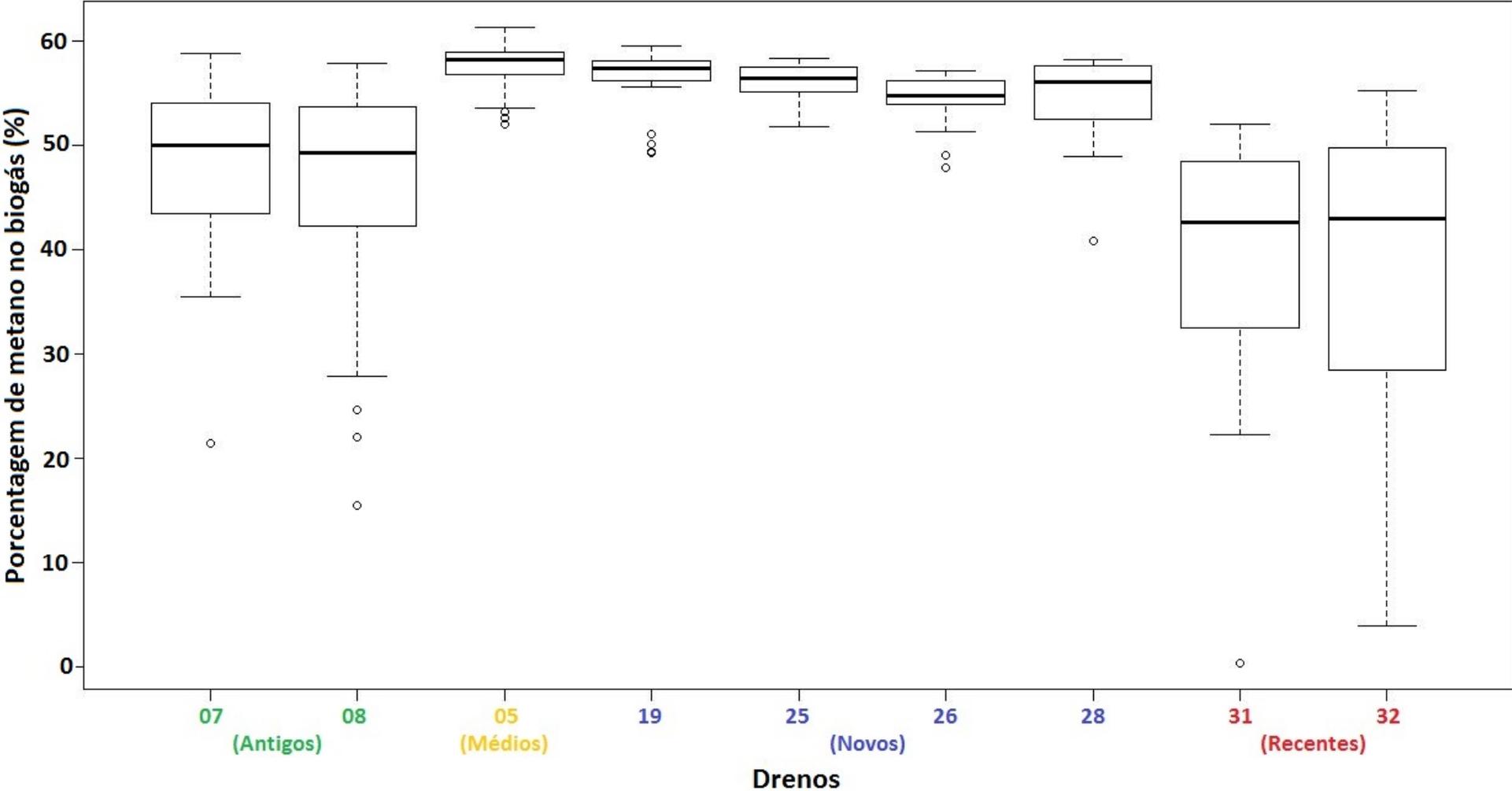


Figura 35: Gráfico *boxplot* da porcentagem de metano (CH₄) no biogás de acordo com cada dreno analisado.

Boxplot da variável Gás Carbônico para cada dreno

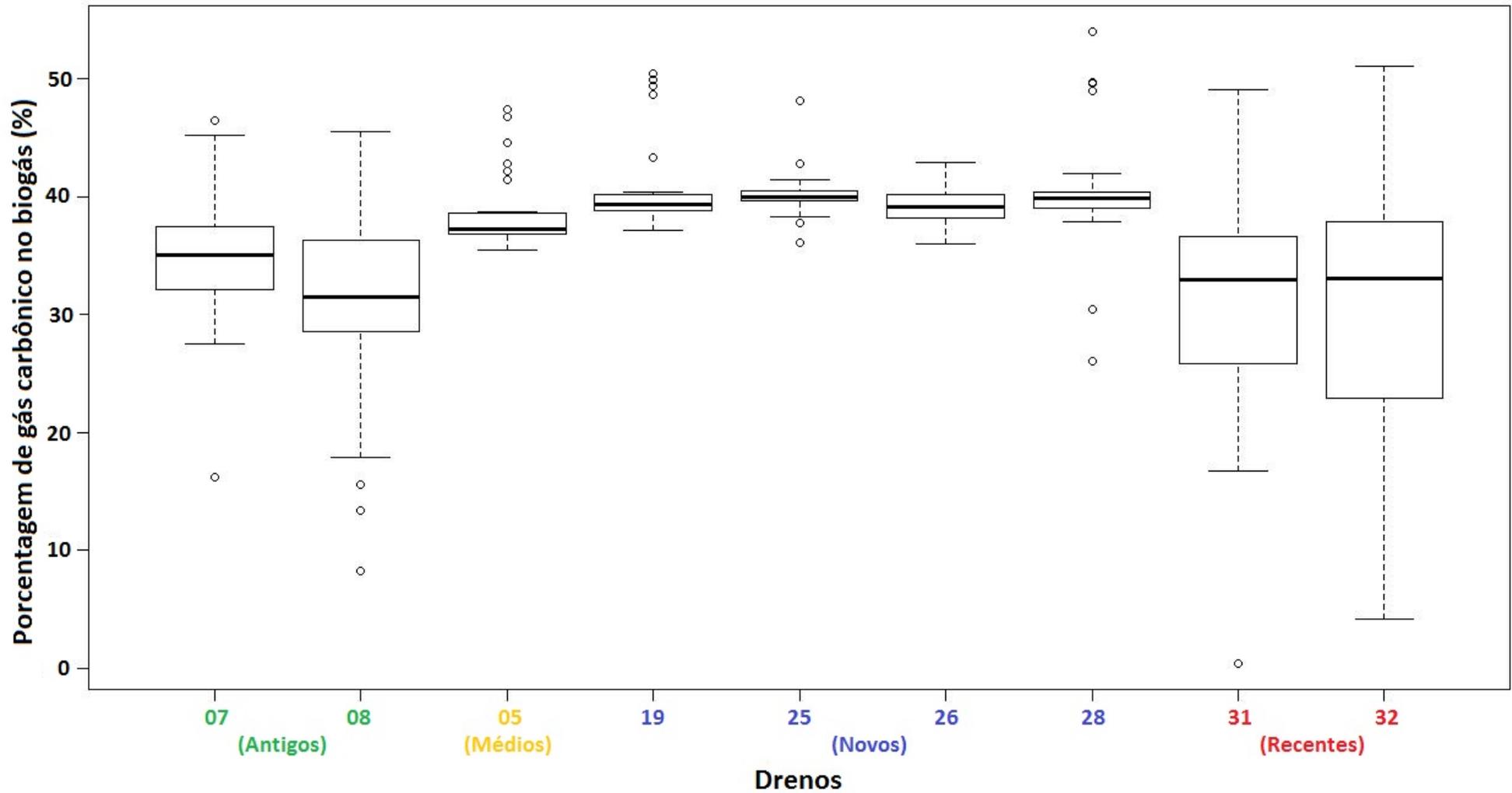


Figura 36: Gráfico *boxplot* da porcentagem de gás carbônico (CO₂) no biogás de acordo com cada dreno analisado.

Boxplot da variável Oxigênio por dreno

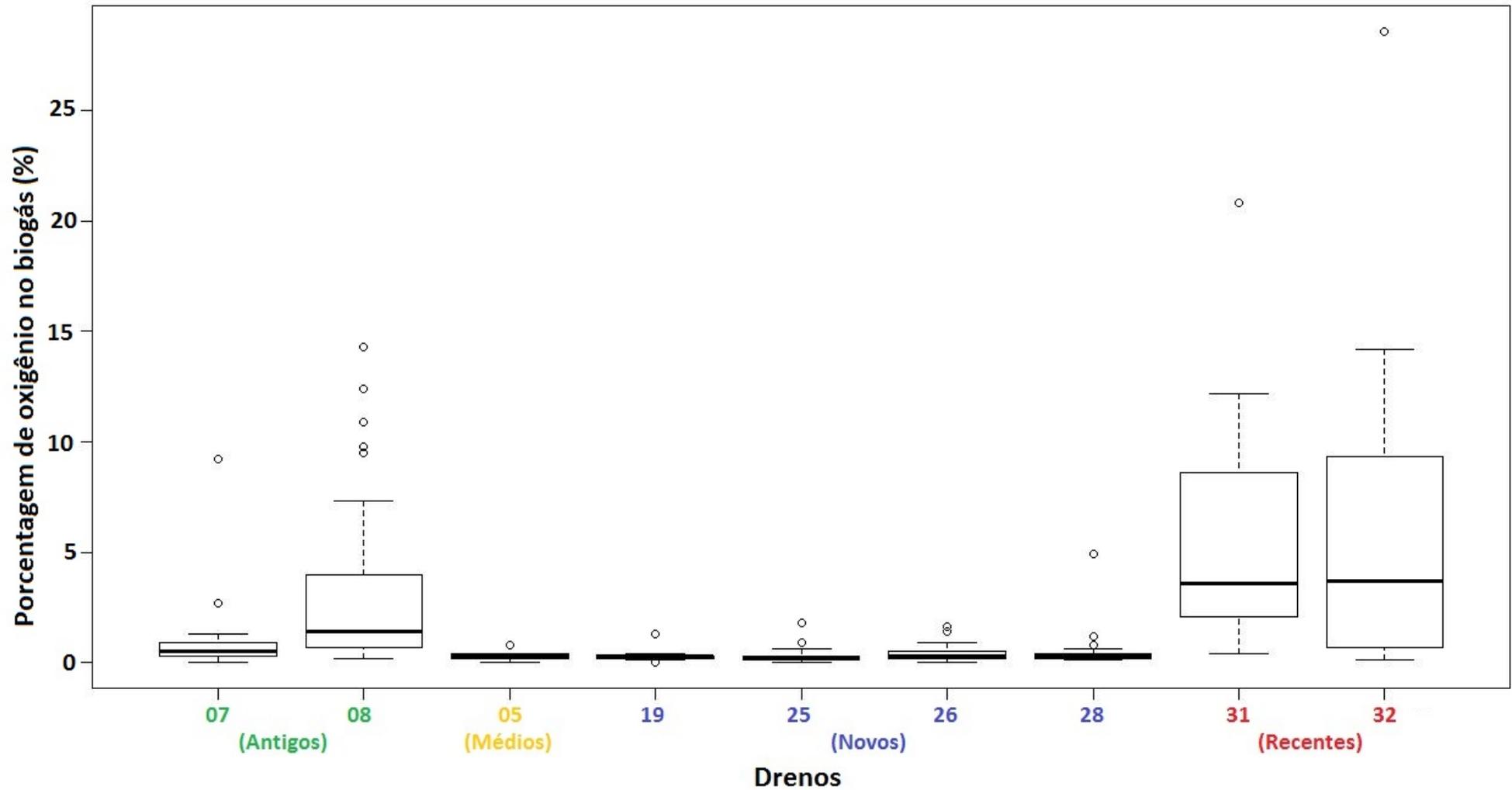


Figura 37: Gráfico *boxplot* da porcentagem de oxigênio (O₂) no biogás de acordo com cada dreno analisado.

Boxplot da variável Temperatura do Biogás por dreno

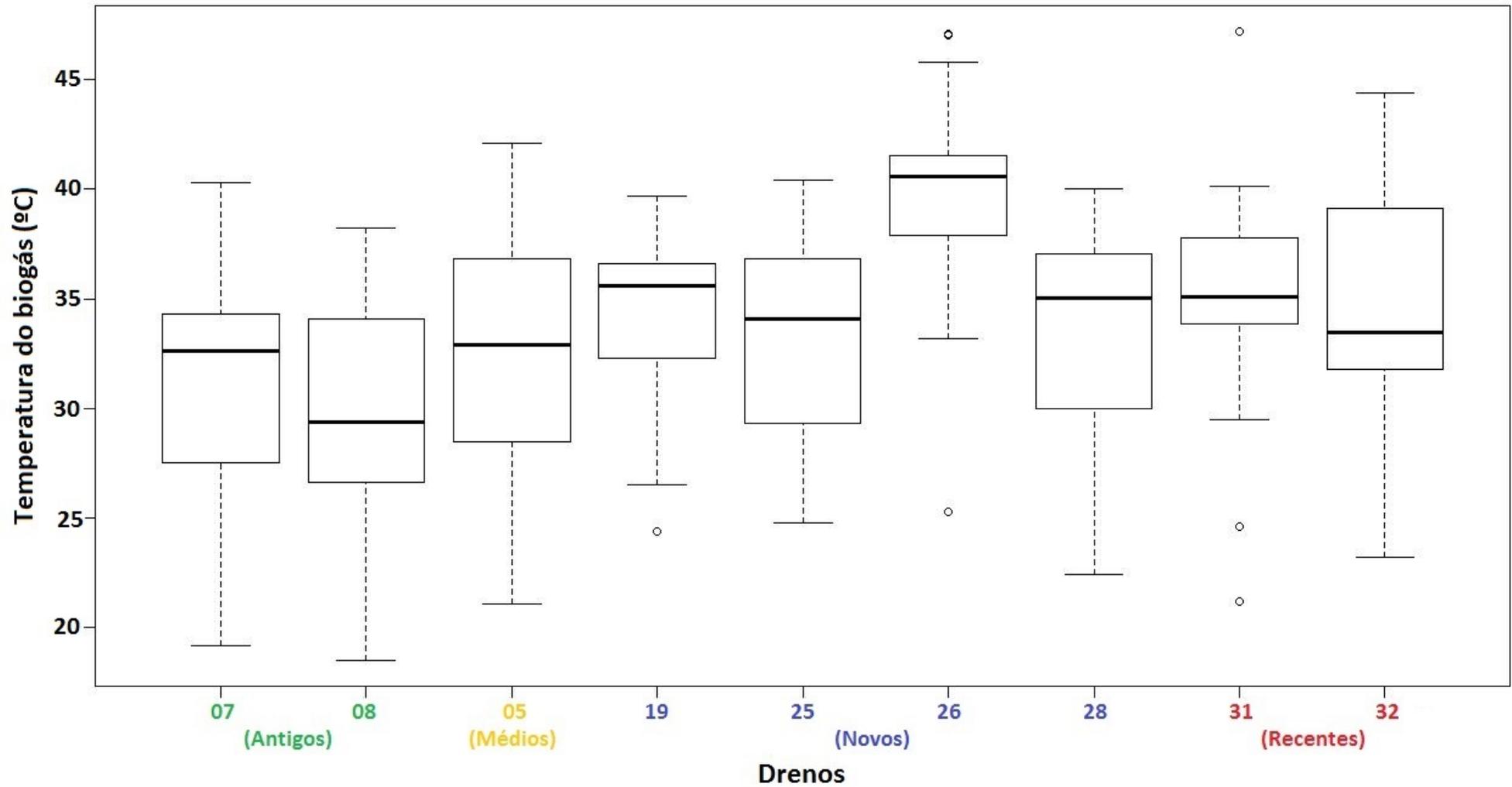


Figura 38: Gráfico *boxplot* da temperatura do biogás (°C) de acordo com cada dreno analisado.

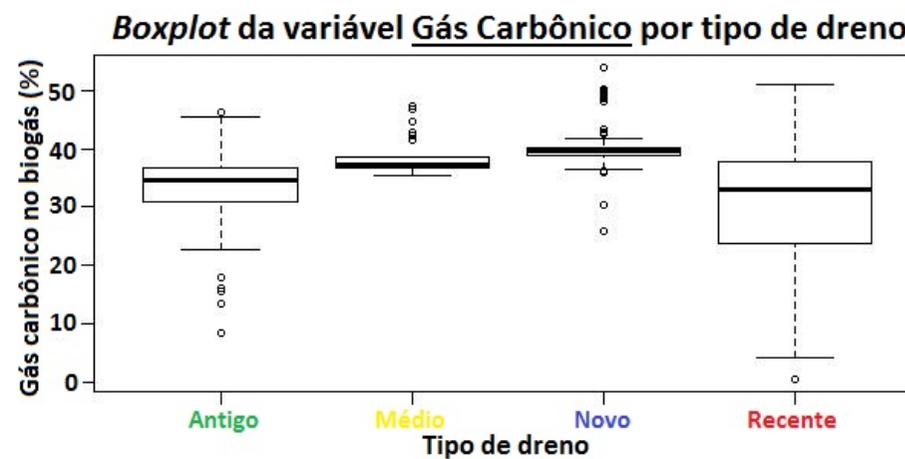
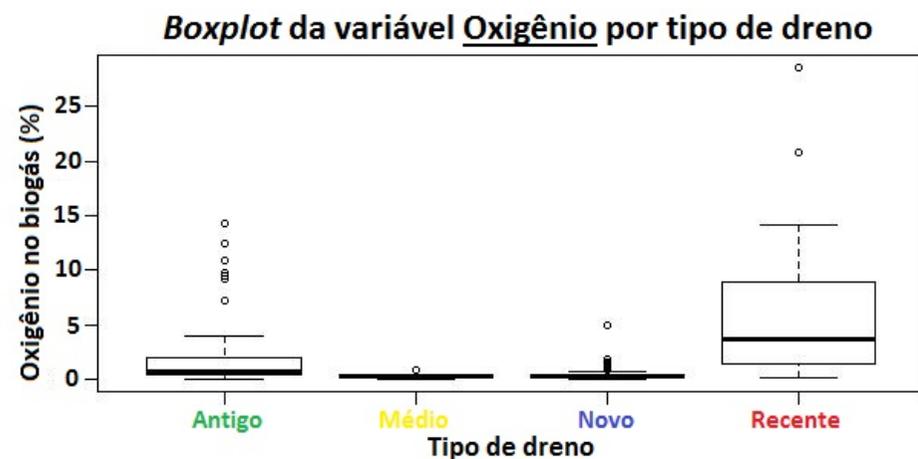
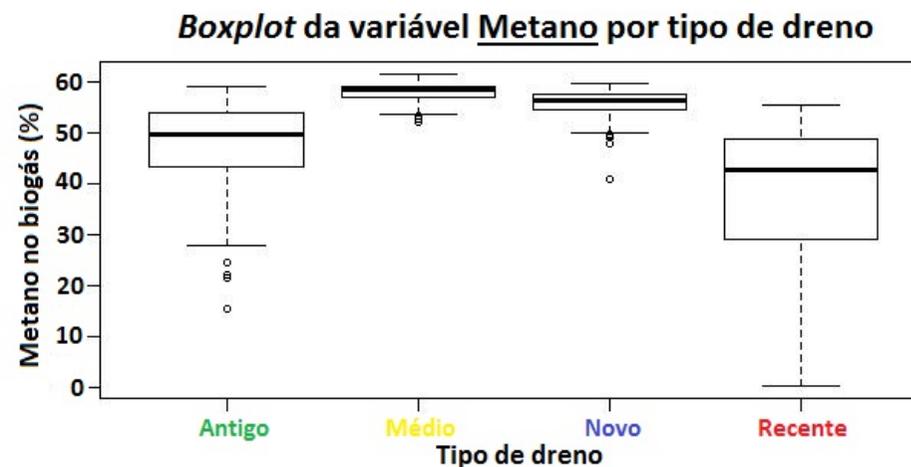
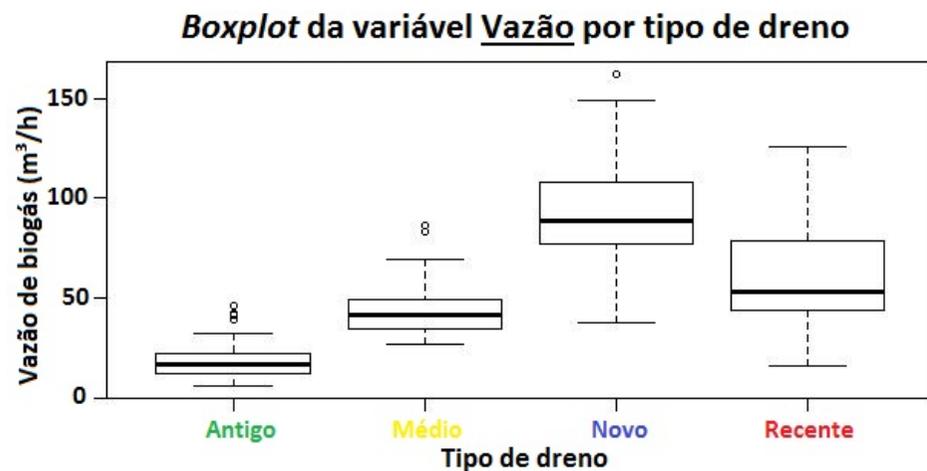


Figura 39: Representação gráfica *boxplot* considerando cada tipo de dreno. (a) *Boxplot* da vazão do biogás; (b) *Boxplot* da porcentagem de metano (CH_4) no biogás; (c) *Boxplot* da porcentagem de gás carbônico (CO_2) no biogás; (d) *Boxplot* da porcentagem de oxigênio (O_2) no biogás.

A partir da **Figura 32**, nota-se que os drenos 19 e 26 detêm as maiores medianas de vazão de biogás, e os drenos 07 e 08 possuem as menores. Além disso, tais valores nos drenos 19, 31 e 32 variam mais em relação ao restante dos drenos. Já, os drenos 08 e 25 apresentam menor variabilidade para vazão de biogás ao longo do período estudado.

Observa-se altos valores de mediana, assim como baixa variabilidade na concentração de metano para os drenos 05, 19, 25, 26 e 28 (**Figura 33**). Em contrapartida, os drenos 31 e 32 mostram medianas inferiores e grande oscilação dos valores registrados. O mesmo comportamento pode ser observado na **Figura 34**, que trata da concentração de dióxido de carbono (CO₂) no biogás, com exceção da menor mediana, que pertence ao dreno 08.

A **Figura 35** apresenta baixas medianas de concentração de oxigênio de biogás nos drenos 05, 19, 25, 26 e 28, juntamente com ínfima variabilidade dos valores registrados. Os drenos 31 e 32 apresentam as medianas mais altas, seguidos pelo dreno 08. Tais drenos também possuem as maiores oscilações para níveis de oxigênio no biogás. Acredita-se que tais valores remetem às fases iniciais do processo de degradação anaeróbica na célula nova do aterro, uma vez que o tempo de aterramento dos resíduos ainda é considerado curto.

Por fim, todos os drenos monitorados apresentam grande variabilidade para temperatura de gás, com exceção dos drenos 19, 25 e 31, como é possível reparar na **Figura 36**.

Analisando a **Figura 37**, observa-se uma compatibilidade dos resultados em relação às demais representações gráficas em forma de *boxplot*. Os conjuntos médio e novo apresentam medianas baixas para os níveis de oxigênio no biogás, e altas para os níveis de metano e gás carbônico, ao mesmo tempo que possuem variabilidade pequena. A vazão no grupo dos drenos novos é alta comparada aos demais. Em compensação, o grupo dos drenos antigos apresenta os mais baixos valores de vazão. Tais resultados obtidos estão alinhados com os apresentados com a bibliografia consultada, caso do estudo de Nolasco (2008).

Os conjuntos antigo e recente possuem as menores medianas para concentração de metano e gás carbônico no biogás, assim como as maiores para concentração de oxigênio. Tal comportamento pode estar associado ao estágio avançado da degradação anaeróbia dos resíduos com tempo de disposição acima de dez (10) anos.

A categoria dos drenos recentes mostra maiores variabilidades em todos os aspectos analisados, fato que evidencia instabilidade no processo de degradação anaeróbia para drenos com maior disponibilidade de substrato utilizado no processo de degradação anaeróbia da

parcela orgânica dos resíduos aterrados. Portanto, os resultados analisados até o momento também são compatíveis com a bibliografia apresentada de González et al. (2011).

6. CONCLUSÕES

A presença de gás metano em porcentagem entre 45% e 55% a partir de um período de treze meses de aterramento dos resíduos mostra que o processo anaeróbio de degradação é intenso na célula nova do aterro monitorado, indicando que o período de geração de gás metano seja reduzido nas condições da pesquisa. Tais valores de concentração de metano são compatíveis com a fase metanogênica de degradação de resíduos aterrados.

O esgotamento de substrato dos resíduos com grande período de aterramento é evidenciado por baixos valores de vazão, como é o caso dos drenos com idade superior a 07 anos, que liberam por volta de 20,5m³/h de biogás. Enquanto isso, os drenos com disposição de resíduos intermediária (de 03 a 07 anos) mostram-se no ápice da degradação anaeróbica com valores de vazão superiores a 75m³/h. Tal estágio de estabilidade ainda não foi alcançado pelos drenos com curto período de aterramento de resíduos (18 meses), uma vez que estes apresentam vazões continuamente crescentes.

De maneira geral, as concentrações de metano e gás carbônico no biogás possuem uma associação de crescimento concomitante, enquanto as mesmas possuem uma relação inversa com a concentração de oxigênio. Ao contrário do esperado, há uma relação entre volume de metano e vazão de biogás, mesmo que apenas para drenos situados em áreas com aterramento recente de resíduos (18 meses). Existe também uma influência da temperatura ambiente sobre a temperatura do biogás liberado pelos drenos.

Apesar dos resultados obtidos de correlação apontarem para uma direção diferente, a observação dos dados de composição do biogás ao longo do tempo aponta uma tendência para o aumento da produção de metano como consequência do aumento da pluviosidade, o que reafirma que a umidade é um fator limitante no processo de degradação biológica em um aterro sanitário.

Finalmente, observa-se que a vazão de gás é maior em drenos localizados em áreas com resíduos de menor tempo de disposição, por volta de 03 anos, mostrando uma maior atividade biológica devido a maior disponibilidade de substratos.

Drenos localizados em áreas com maiores períodos de aterramento de resíduos sólidos também apresentam médias altas de concentração de metano no biogás, entre 45 % e 60%, e coeficientes de variação pequenos, evidenciando uma maior estabilidade do processo de degradação anaeróbia. O mesmo padrão ocorre para taxas de vazão do biogás nestes drenos envolvidos por resíduos antigos, inclusive nos períodos de chuva.

Já, drenos situados em áreas com resíduos com menor tempo de aterramento liberam gases com maior instabilidade devido à maior oferta de nutrientes dos resíduos e, portanto, explicitam crescentes taxas de geração de metano, até alcançarem o equilíbrio. Além disso, apresentam maiores coeficientes de variação nos valores coletados de vazão de biogás, e, portanto, são inseridos nas fases menos avançadas da degradação anaeróbica. A vazão nos drenos em áreas com resíduos com disposição recente é mais sensível a variações de parâmetros que influenciam a vazão de biogás.

As taxas de produção de metano e vazão de biogás podem ser consideradas parâmetros indicadores de atividade biológica e, portanto, formas de análise do potencial de geração de energia em aterros sanitários.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 366p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pernambuco UFP, Recife, 2008.

ANTÔNIO, S. M.; **Avaliação da influência do índice pluviométrico com a vazão e a composição dos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro – SP**. Projeto de iniciação científica Processo Fapesp Nº 2011/20264-7.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. NBR 8419. São Paulo: 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos - Classificação**. NBR 10.004. São Paulo: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. NBR 13.896 São Paulo: 1997.

BARLAZ, M. A.; SCHAEFER, D. M.; HAM, R. K. Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill. **Appl. Environ. Microbiol.**, 55(1):55; 1989.

BELLO, P.P.G. **Estudo da variação da porcentagem e da estimativa de geração de gás metano para o aterro sanitário do município de Rio Claro – SP**. 48 p. Iniciação Científica – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

Boeckx, P., O. Van Cleemput; **J. Environ. Qual.** 25 (1996) 178-18

BORBA, S.M.P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso**. Dissertação (Pós-Graduação de Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Lei número 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Brasília, DF, Presidência da República, 2010.

BRAZ, J. A. **Avaliação do potencial energético do biogás de aterro sanitário gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001, João Pessoa/PB. Anais. João Pessoa: ABES, 2001.

BRITO FILHO, L. F.; **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2005. 222 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

CALIJURI M. L. ; MELO A. L. O. ; Lorentz J. F.. Identificação de áreas para implantação de aterros sanitários com uso de análise estratégica de decisão. **Informática Pública**, 2002.

CASTILHOS JR., A.B.; MEDEIROS, P.A.; FIRTA, I.N.; LUPATINI, G.; SILVA, J.D.; **Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos**. In: CASTILHOS JR., A.B. (ORG.). Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Brasil, Rio de Janeiro: Rima ABES, 294p, 2003.

CASTRO, M. C. A. A. **Avaliação de um sistema australiano no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados gerado em aterro sanitário**. Tese de Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento; Universidade de São Paulo, USP, Brasil, 2001.

CASTRO, M.C.A.A; BELLO, P.P.G. **Evaluation of percentage of methane gas generated in the landfill of the Rio Claro city, Brazil: study of energetic potential**. In: Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste, 2010, Veneza. Venice 2101-Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste. Padova: Eurowaste-IWWg, 2010. v.1.

CEAPLA - Centro de Estudos de Planejamento Ambiental - UNESP. **Dados climatológicos**. Disponível em: site. Acesso em: 10 de maio de 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Aterro sanitário. Definições**. Disponível em:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancasclimaticas/biogas/Aterro%20Sanit%C3%A1rio/1-Aterro%20Sanit%C3%A1rio>. Acesso em: 12 de junho de 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares**. 2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes>. Acesso em: 12 de junho de 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares**. 2014. Disponível em: <http://residuossolidos.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/36/2013/11/residuosSolidos2014.pdf>. Acesso em: 19 de junho de 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v.5, 2007, 377p.

CHIEMCHAI SRI, C; CHIEMCHAI SRI, W; SUNIL KUMAR; HETTIARATCHI J. P. A.; Solid waste characteristics and their relationship to gas production in tropical landfill. **Environ. Monit. Assess**, 135:41–48; 2007.

CHIEMCHAI SRI, C.; JUANGA, J. P.; VISVANATHAN, C. Municipal solid waste management in Thailand and disposal emission inventory. **Environ. Monit. Assess** 135:13–20; 2007.

EUSUF, M. A.; HOSSAIN, I.; NOORBATCHA, I. A.; ZEN, I. H. **The effects of climate and waste composition on leachate and emissions of gas: a case study in Malaysian context**. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 5-7, September 2007, Chennai, India. 437-44p3.

FARIA, J.C. GROSJEAN, P.; JELIHOVSCHI, E. (2014). **Tinn-R Editor - GUI for R Language and Environment**.

FIGLIARO, F.A. **Avaliação de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos e de chorume, com ênfase na fase metanogênica**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG), Belo Horizonte. 133p, 2004.

FRÉSCA, F. R. C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2007.

GANDOLLA, M., ACAIA, C. & Fischer. Formação, captação e aproveitamento de biogás em aterros, Seminário de Atualização, **Collana Ambiente**, Vol.18, C.I.P.A, Milão, Itália. 1997.

GONZÁLEZ C.; BUENROSTRO O.; MARQUEZ L.; HERNÁNDEZ C.; MORENO E.; ROBLES F. Effect of solid wastes composition and confinement time on methane production in a dump. **Journal of Environmental Protection**, 2, 1310-1316; 2011.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. K. **Energia e meio ambiente**. 3.ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **IBGE Cidades**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: 10 de maio de 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2008. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicao_de_vida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf. Acesso em: 11 de maio de 2013.

KINMAN, R.N., NUTINI D.L, WALSH J.J, VOGT W.G., STAMM J. and RICKABAUGH J., Gas enhancement techniques in landfill simulators. **Waste Manage. Res.**, 5: 13-25. 1987.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. **Biogas recovery in an experimental MSW cell in Brazil: lessons learned and recommendations for CDM projects**. Department of Civil Engineering, UFPE, Brazil. Greenhouse Gas Measurement & Management, 2013, 1-12p.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. **Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale experimental cell in Brazil**. 2011.

MARIANO, M. O. & JUCÁ, J. F. T. **Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Geotecnia, v.3 – nov. 1998, Brasília, p.1671-1678.

MATOS, A. R. V. **Contribuição para o estudo da influência da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 131p. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2008.

MELO, M.C. “Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife–PE, 2003.

MENDES, L.G.M.; SOBRINHO, P.M. Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. 134p. Artigo. **Revista Biociências** vol. 13, 2007.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. **Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. 16 p. Disponível em: http://www.oc.org.br/cms/arquivos/inventa%2%A1rio_emissa%2%B5es_geevalores_preliminares-25-11-2009.pdf . Acesso em: 03 de julho de 2013.

MORAIS, J.L. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitários**. Tese de Doutorado - Curso de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2005.

NOLASCO, D.; LIMA, R. N.; HERNÁNDEZ, P. A.; PÉREZ, N. M.; **Non-controlled biogenic emissions to the atmosphere from Lazareto Landfill, Tenerife, Canary Islands**. Environmental Research Division, Institute of Technology & Renewable Energy (ITER), Tenerife, Canary Islands, Spain, 2008.

NOPHARATANA, A.; CLARKE, W. P.; PULLAMMANAPPALLIL, P. C.; SILVEY, P.; CHINOWETH, D. P.; Evaluation of methanogenic activities during anaerobic digestion of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, 64, 169-174, 1998.

PELCZAR, JR, M.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996. Vol. II. 517 p.

PETRESCU, M.; BATRINESCU G.; STANESCU, B. Evaluation of gaseous emissions from the Radauti municipal landfill. **International Journal of Conservation Science**, Volume 2, Issue 1, January-March 2011; 45-54p.

PIRBAZARI, M.; RAVINDRAN, V.; BADRIYHA, B.N.; KIM, S.H. Hybrid membrane filtration process for leachate treatment. **Water Research**, v. 30, p. 2691-2706, 1996.

POHLAND, F. G.; GOULD, J. P. Co-disposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills. **Water Science Technology**. v.18, n.12, p.177-192. (1986).

R CORE TEAM. 2014. **The R Project for Statistical Computing**. The R Foundation for Statistical Computing.

REES, J.F. *J.Chem. Techn.Biotechnol.*, **30**, 161-175. 1980.

RELATÓRIO AMBIENTAL PRELIMINAR – RAP. **Aterro sanitário e industrial do município de Rio Claro – SP**. Ação engenharia. São Paulo – SP.

RUSSO, M. A. T. “**Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**”. Tese de doutorado. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Portugal: Maio, 2005.

SILVA, J. V. P. **Modelização cinética da degradação anaeróbica de um efluente láctico**. Universidade de Aveiro, Portugal. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Tese de Mestrado. 2009.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. USA: McGraw-Hill, 978 p. 1993.

TROPPEMAIR, H. **Atlas da Qualidade Ambiental e de Vida de Rio Claro**. 1992.

VANZIN, E. **Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no Aterro Santa Tecla. Passo Fundo**: Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, 2006 (Dissertação de Mestrado em Engenharia).

VILAS BOAS, D. M. F. **Estudo da microbiótica anaeróbia hidrolítica-fermentativa em aterro sanitário**. 157p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.