UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NA MASSA DE RESÍDUOS COM DIFERENTES TEMPOS DE DISPOSIÇÃO NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO CLARO – SP.

Flávio Roberto Araújo De Franceschi

Rio Claro (SP)

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

FLÁVIO ROBERTO ARAÚJO DE FRANCESCHI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NA MASSA DE RESÍDUOS COM DIFERENTES TEMPOS DE DISPOSIÇÃO 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 2013.

Orientador: Marcus César Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JULIO DE MESQUITA FILHO"

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

FLÁVIO ROBERTO ARAÚJO DE FRANCESCHI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERTURA NA MASSA DE RESÍDUOS COM DIFERENTES TEMPOS DE DISPOSIÇÃO 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. Marcus César Avezum Alves de Castro (orientador)

Prof.º Dr.º César Augusto Moreira

Prof.º Dr.º Valdir Schalch

Rio Claro, 28 de Novembro de 2013.

_____ _____

assinatura do(a) aluno(a) assinatura do(a) orientador(a)

604.6 Franceschi, Flávio Roberto Araújo de
F815a Avaliação do comportamento da temperatura na massa de resíduos com diferentes tempos de disposição no aterro sanitário de Rio Claro – SP / Flávio Roberto Araújo de Franceschi. - Rio Claro, 2013
66 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Marcus César Avezum Alves de Castro

1. Resíduos – Tecnologia. 2. Resíduos sólidos. 3. Processo biológico. 4. Temperatura. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Ao meu pai Roberto e minha mãe Jaqueline,

Pelo exemplo de família, vida e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, que não poupou esforços para que eu chegasse até este momento de minha vida. Especialmente aos meus pais Roberto e Jaqueline por ser sempre meu exemplo de amor, dedicação e honestidade. Aos meus avós Jurandir e Marina, que sempre foram segundos pais para mim, me dando todo o amor e auxílio. Ao meu irmão Bruno, meu primeiro, grande e eterno amigo, com quem passei muitos momentos felizes e sempre foi uma pessoa que esteve e está sempre comigo, em presença ou em coração.

À minha namorada Paula, por ter vivenciado comigo todos os momentos do meu curso e de minha vida nestes anos, sejam momentos bons ou ruins, por ser minha amiga, minha companheira, ter me ajudado em tudo que precisei e por ser uma pessoa tão especial na minha vida.

Ao professor Marcus que foi um excelente orientador, estando sempre presente, esclarecendo minhas dúvidas, tendo muita paciência, competência, confiança, conhecimentos e principalmente a amizade.

À minha amiga e parceira de projeto Olívia, por estar sempre disposta a me ajudar, por ser muito dedicada em tudo que faz e por ter compartilhado comigo esta experiência.

A todos do Handebol Masculino da Unesp de Rio Claro, por me mostrar a força da união e da amizade. Agradeço muito aos amigos que lá formei e sei que onde estiver sempre levarei comigo boas lembranças de vocês. Graças a todos vocês tive mais que a oportunidade de jogar handebol nestes cinco anos, mas principalmente, tive a chance de fazer grandes amigos fora das quadras. Tenho enorme gratidão por poder fazer parte deste grupo e espero estar sempre junto de vocês. Quando a distância nos separar, as lembranças de ter feito parte dessa família vai me fazer eternamente feliz e grato.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte da minha vida nestes anos, que sempre contribuíram direta ou indiretamente para que eu cumprisse esta etapa e principalmente pela formação da pessoa que eu sou hoje.

RESUMO

O presente trabalho investiga o comportamento da temperatura dos resíduos em diferentes profundidades em duas células do aterro sanitário de Rio Claro – SP. Uma das células está localizada próxima à frente de operação e os resíduos possuem tempo de disposição de aproximadamente 1 ano. A outra célula encontra-se em uma área desativada, com resíduos dispostos no período de 5 a 7 anos. Um terceiro ponto de tomada de temperatura localizado em solo sem disposição de resíduos e foi utilizado como referência. As medidas foram realizadas com frequência quinzenal durante 1 ano. As temperaturas foram maiores na célula em operação, com temperatura máxima de 38,1 °C, na profundidade de 4,0 m. Já na célula desativada a temperatura máxima foi de 36,3 °C a uma profundidade de 8,5 m. As temperaturas foram mais elevadas na célula em operação em virtude de maior disponibilidade de substrato, indicando maior atividade biológica de degradação. Na profundidade de 3,0 m a temperatura na célula em operação foi de 36,6 °C, na célula desativada 33,8 °C, e no local sem disposição de resíduos 24,5 °C. Os resultados demonstraram que temperatura pode ser um bom parâmetro indicador de atividade biológica em um aterro sanitário, subsidiando estudos de utilização do biogás.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos, Aterro Sanitário, Processo Biológico, Temperatura.

ABSTRACT

The present work investigates solid waste temperature behavior in different depths in two cells in the Rio Claro-SP city's sanitary landfill. One of the cells is in operation with waste disposal beginning about one year ago. The other one is located in an closed area and contain waste disposed from five to seven years before. Measures were also made in an area that have no disposed waste in order to collect reference values. The data were obtained every fifteen days. The temperature results shows higher values in the operating cell, with maximum 38,1 °C in a depth of 4,0 m. In the closed cell the highest values were 36,3 °C in a depth of 8,5 m. The highest temperature values were obtained in the operating cell due to wider substract availability that indicates a more intense biological degradation activity. With three meters depth, the temperature results were 36,6 °C in the operating cell, 33,8 °C in the closed cell and 24,5 °C in the reference area. Therefore the temperature can be used as a biological activity indicator in sanitary landfills, supporting biogas studies.

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

LISTA DE ABREVIAÇÕES

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

t. toneladas

USEPA United States Environmental Protection Agency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exigências mínimas para localização de aterros

Figura 2: Sistemas de proteção ambiental em um aterro sanitário

Figura 3: Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares gerados por dia (ton/dias)

Figura 4: Localização do município de Rio Claro – SP

Figura 5: Localização e detalhe do aterro sanitário de Rio Claro – SP

Figura 6: Detalhe das áreas do aterro sanitário de Rio Claro – SP

Figura 7: Enquadramento de Rio Claro com relação à disposição final dos resíduos sólidos pela IQR – CETESB

Figura 8: Mecanismo de degradação anaeróbica

Figura 9: Faixas de temperatura para os processos de digestão anaeróbia

Figura 10: Comparação do (a) comportamento da temperatura superficial do solo sem resíduos e (b) comportamento da temperatura superficial do solo com disposição de resíduos em relação à profundidade

Figura 11: Variação da temperatura com a profundidade em aterro sanitário na Colúmbia Britânica (EUA)

Figura 12: Variação da temperatura dos RSU com a profundidade, Aterro da Muribeca, Estado de Pernambuco – Brasil

Figura 13: Mapas de temperatura em função da idade dos resíduos em Michigan (à esq.) e Novo México (à dir.) Período de 2004 – 2007

Figura 14: Relação entre umidade e temperatura nos períodos da manhã (e) e tarde (f)

Figura 15: Foto da termorresistência utilizada para aferição da temperatura na massa de resíduos. Detalhe ao lado para os terminais de ligação

Figura 16: Indicador Digital Multi-Ponto DMY-2015

Figura 17: Localização da célula em operação em detalhe

Figura 18: Limites da nova célula de disposição (em vermelho) e localização dos drenos 30, 31, 32 e indicação do dreno 33

Figura 19: Medição da profundidade da camada de resíduos a partir de medição no próprio dreno de gás

Figura 20: Corte longitudinal esquemático de nova célula de operação, sem escala

Figura 21: Vista lateral da nova célula de disposição de resíduos e detalhes (vistas frontais) dos drenos 31 e 32, selecionados para instalação dos conjuntos

Figura 22: Comparação do funcionamento da leitura da termperatura da termorresistência e comparação da temperatura aferida pela temorresistência e do termômetro tipo espeto

Figura 23: Detalhe da extremidade da termorresistência - sensor instalado fora do suporte das ripas de madeira

Figura 24: Termorresistências fixadas às ripas, montadas para instalação na massa de resíduos

Figura 25: Detalhe para algumas marcações para facilitar a identificação no momento da coleta de dados

Figura 26: Início da escavação da massa de resíduos ao lado do Dreno 31 para instalação das termorresistências

Figura 27: Início da escavação do aterro ao lado do Dreno 32 para a instalação das temorresistências (Ponto "P2"), realizado com a máquina escavadeira "Poclain"

Figura 28: Instalação das termorresistências na massa de resíduos após a escavação

Figura 29: Detalhe para a colocação da termorresistência na massa de resíduos, onde foi posteriormente recoberta com resíduos

Figura 30: Espacialização dos pontos de coleta de dados de temperatura e suas respectivas profundidades

Figura 31: Temperaturas nas profundidades de 0,15 m, 1,0 m, 3,0 m e temperatura ambiente em "P1", de junho/2012 a outubro/2013

Figura 32: Temperaturas nas profundidades de 5,0 m, 6,5 m, 8,5 m e temperatura ambiente em “P1”, de junho/2012 a outubro/2013

Figura 33: Temperaturas na célula em operação a cada coleta de dados (15 dias)

Figura 34: Comportamento da temperatura com a precipitação acumulada nos intervalos de medição (15 dias) para a célula desativada

Figura 35: Comportamento da temperatura com a precipitação acumulada nos intervalos de medição (15 dias) para a célula em operação

Figura 36: Comportamento geral das temperaturas médias em todas as profundidades nos três locais de medição

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros estatísticos dos dados da célula em operação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

2. OBJETIVOS 17

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

3.1 ATERROS SANITÁRIOS: GERENCIAMENTO E SISTEMAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL 18

3.2 PROCESSO DE DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA 22

3.2.1 Influência da temperatura no processo de degradação anaeróbia ..25

3.3 COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NA MASSA DE RESÍDUOS EM UM ATERRO SANITÁRIO 27

3.3.1 Temperatura da massa de resíduos X Profundidade 29

3.3.2 Temperatura da massa de resíduos X Idade dos resíduos 31

3.3.3 Temperatura da massa de resíduos X Umidade 32

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 33

4. MATERIAIS E MÉTODOS 36

4.1 MATERIAIS 36

4.2 MÉTODOS 37

4.2.1 Definição dos pontos para instalação das termorresistências e das respectivas profundidades 37

4.2.2 Instalação das termorresistências 42

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 49

6. CONCLUSÕES 59

7. RECOMENDAÇÕES 61

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos séculos o padrão de vida do ser humano foi completamente transformado, com a inclusão sempre crescente de novas tecnologias, aliadas à procura constante do desenvolvimento econômico que resultaram em um novo estilo de vida a toda população mundial. Porém, o crescente e desenfreado consumo de todo tipo de produto e serviço gera grande pressão sobre o meio ambiente, que nem sempre pode suportar tal demanda.

Nesse sentido, é perceptível o aumento do consumo dos recursos naturais e em consequência disso, o aumento da produção de resíduos. Este aumento de geração de resíduos aliado a uma má gestão ambiental resultam na degradação do meio ambiente.

Em termos gerais a gestão integrada dos resíduos sólidos é uma forma real de minimizar os impactos decorrentes da geração destes resíduos. De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituída em 02 de agosto de 2010 pela Lei n. 12.305 (2010) e regulamentada e implementada em 23 de dezembro de 2010 pelo Decreto n. 7.404 (2010), a gestão integrada é definida como o "conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável". Assim sendo, deve ser estabelecida de maneira geral compreendendo todos os aspectos, como a não-geração; acondicionamento; coleta; tratamento (incineração, compostagem, reciclagem, entre outros) e por fim a disposição final.

Entretanto, na prática, a gestão integrada ainda se mostra muito incipiente, seja por falta de viabilidade econômica de alguns aspectos, ou por falta de incentivo público para auxiliar no desenvolvimento, ou ainda por não haver aplicação de tecnologias relacionadas a tais questões. Nesse contexto os aterros sanitários, forma adequada de disposição final de resíduos sólidos domiciliares, representam o destino final de todos os resíduos, recicláveis ou não, distanciando-se da concepção correta que seriam receber apenas os "resíduos últimos", aqueles que não possuem tecnologia viável à sua reciclagem ou aproveitamento energético.

De acordo com a ABNT NBR 8419/1992, aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua 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 necessário (ABNT, 1992).

Em um aterro sanitário, é importante o conhecimento de diversos parâmetros que influenciam na estabilização da matéria orgânica. Nesse sentido, a temperatura pode ser um importante parâmetro para indicar a atividade biológica, relacionada ao processo de decomposição da matéria orgânica. Desta forma, o presente trabalho monitora o comportamento da temperatura na massa de resíduos de um aterro sanitário de modo a compreender melhor a sua relação com a idade de deposição de tais resíduos sólidos, bem como com a profundidade, em condições reais de operação.

2. OBJETIVOS

A pesquisa tem por objetivo geral comparar o comportamento da temperatura na massa de resíduos em diferentes profundidades em uma célula nova em operação e em uma célula já desativada no aterro sanitário de Rio Claro. Nesse sentido, a presente pesquisa tem por objetivos específicos:

- Monitorar a temperatura em diferentes profundidades em célula já encerrada e comparar com dados prévios em pesquisa realizada no mesmo aterro sanitário;
- Analisar o comportamento da temperatura da massa de resíduos em diferentes profundidades em célula em início de operação;
- Avaliar a influência da precipitação na temperatura das duas células em estudo.
- Comparar o comportamento da temperatura entre uma célula nova e outra encerrada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ATERROS SANITÁRIOS: GERENCIAMENTO E SISTEMAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL

De acordo com a ABNT NBR 10.004/2004, somente podem ser dispostos em aterros sanitários os resíduos classificados como não perigosos e não inertes (Classe II-A), ou seja, resíduos que apresentam características de biodegradabilidade ou combustibilidade, como por exemplo, os resíduos sólidos domiciliares (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT], 2004).

No Brasil, a gestão de resíduos está pautada pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que estabelece diretrizes gerais que orienta na busca pela gestão integrada. Porém, na prática, tal gestão caminha a passos lentos, pautada principalmente pela falta de recursos econômicos para a efetiva implantação (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2010).

Um fator importante contemplado na Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) relacionado a aterros sanitários é a disposição final ambientalmente adequada, definida como "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". Nesse caso, a orientação é dispor apenas os rejeitos, "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".

A análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos nos indica que a única forma de disposição ideal é em aterros sanitários e os municípios devem buscar criar mecanismos para se ajustar a essa questão, seja na diminuição da quantidade de resíduos gerados; disposição apenas de resíduos últimos ou ainda na adequação das condições do aterro em que utiliza.

Durante a busca por condições ideais em aterros sanitários, alguns itens são obrigatórios a fim de proteger o meio ambiente de possíveis impactos ambientais decorridos da operação de aterros sanitários. Desta forma, busca-se a implantação de sistemas de proteção ambiental obrigatórios nestes empreendimentos.

Desta forma, algumas características são consideradas ideais para a proteção ambiental. De acordo com Castro (2001), itens que devem ser observados são:

- *Captação de gases:* O controle da geração e migração desses gases é realizado através de um sistema de drenagem, constituído pela superposição vertical de tubos perfurados de concreto, revestidos com brita. Esses drenos deverão ter entre 50 e 100 m de distância uns dos outros.
- *Cobertura da massa de resíduos:* é recomendado material arenoso e argiloso na proporção aproximada de 50% cada. É possível aplicar mineral argiloso do tipo 1:1 (caulinita, gipsita) compactado. Além disso, o recobrimento final e o acabamento de um aterro sanitário é muito importante, pois essa área deverá ser incorporada ao meio ambiente, em condições de uso, sem causar incômodos à vizinhança.
- *Sistema de impermeabilização:* deve ser realizado para evitar o contato do lixiviado (mistura dos líquidos percolados das chuvas e do chorume produzido pela decomposição dos resíduos) com águas sub-superficiais e deve ser realizado com argila compactada e geomembranas sintéticas.
- *Sistemas de drenagem*: as águas provenientes da precipitação direta sobre o aterro, bem como o escoamento superficial das áreas adjacentes, tendem a percolar através da massa de resíduos, carreando poluentes que, juntamente com o chorume oriundo da decomposição do lixo, constituem material de alta carga poluidora (percolado). São realizados dois sistemas de drenagem em um aterro sanitário:
    - *Sistema de drenagem superficial:* tem como finalidade básica desviar as águas da bacia de contribuição para fora da área do aterro, diminuindo dessa forma o volume de líquido percolado, durante e após a fase de execução do aterro, além de possibilitar a sua operação inclusive em dias de chuva. Este sistema requer a construção de canais de superfície livre em encostas ou canaletas envolvendo toda a área do aterro. É recomendado conferir um bom caimento à cobertura diária do aterro para evitar empoçamentos. Toda água recolhida por esse sistema deverá ser conduzida para um ponto distante, onde não cause danos ao aterro, durante e após a fase de operação.
    - *Sistema de drenagem sub-superficial*: O sistema de drenagem sub-superficial visa coletar e conduzir os líquidos percolados para uma unidade de tratamento, evitando o comprometimento do lençol freático; esse sistema é constituído basicamente de estruturas drenantes com escoamento em meio poroso e é formado por drenos horizontais,

preenchidos com britas, com inclinação de fundo em torno de 2%. Sobre as britas devem ser colocados materiais sintéticos, como manta geotêxtil, visando a retenção de materiais em suspensão que poderiam vir a colmatar o dreno.

- *Sistema de tratamento de lixiviado:* o lixiviado deve ser tratado antes de lançamento em curso d'água após ser coletado pelo sistema de drenagem sub-superficial. O tratamento pode ser feito no próprio local ou deve ser enviado para local apropriado. Os tratamentos mais convencionais são o biológico (lagoas anaeróbias, aeróbias e lagoas de estabilização) e o tratamento químico.

Além das recomendações básicas, alguns comentários são importantes na discussão dos sistemas de proteção ambiental em aterros sanitários.

De acordo com a ABNT NBR 13.896/1997, que recomenda critérios de projeto, implantação, operação e procedimentos para um aterro de resíduos não perigosos, outros pontos são levados em consideração quando da implantação de um aterro sanitário, como o isolamento visual feito com barreira vegetal, que dificulta a visão interna do aterro; distância mínima de mais de 200 m para um núcleo urbano; e profundidades do lençol freático maiores que 3 m, entre outras recomendações, como indica a Figura 1:

Critérios	**Classificação das Áreas**		
	Recomendado	**Recomendado com Restrições**	**Não Recomendado**
Vida útil	≥10 anos	<10 anos	
Distância do Gerador	10 até 20 km		>20 km
Zoneamento ambiental	Áreas sem Restrições		ZEPAM[1] ZEPEC[2] Zona de amortecimento
Zoneamento Urbano	Vetor de crescimento mínimo	Vetor de Crescimento intermediário	Vetor de crescimento principal
Densidade demográfica	Baixa	Média	Alta
Uso e Ocupação do solo	Terras devolutas e de baixo índice de ocupação		Área Residencial de ocupação intensa
Valor da terra	Baixo custo	Médio Custo	Alto Custo
Distância de núcleos populacionais	>500 m		< 500 m
Aceitação da Vizinhança	Boa Aceitação	Aceitação Razoável	Inaceitável
Distância de cursos d'água	>200 m	< 200 m	
Profundidade do lençol freático	3 m	1,5 m	<1,5 m
Declividade	1-30%	Menor que 1% e maior que 30%	

Figura 1: Exigências mínimas para localização de aterros. **Fonte:** ABNT (1997).

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de um aterro sanitário e dos principais sistemas de proteção ambiental envolvidos:

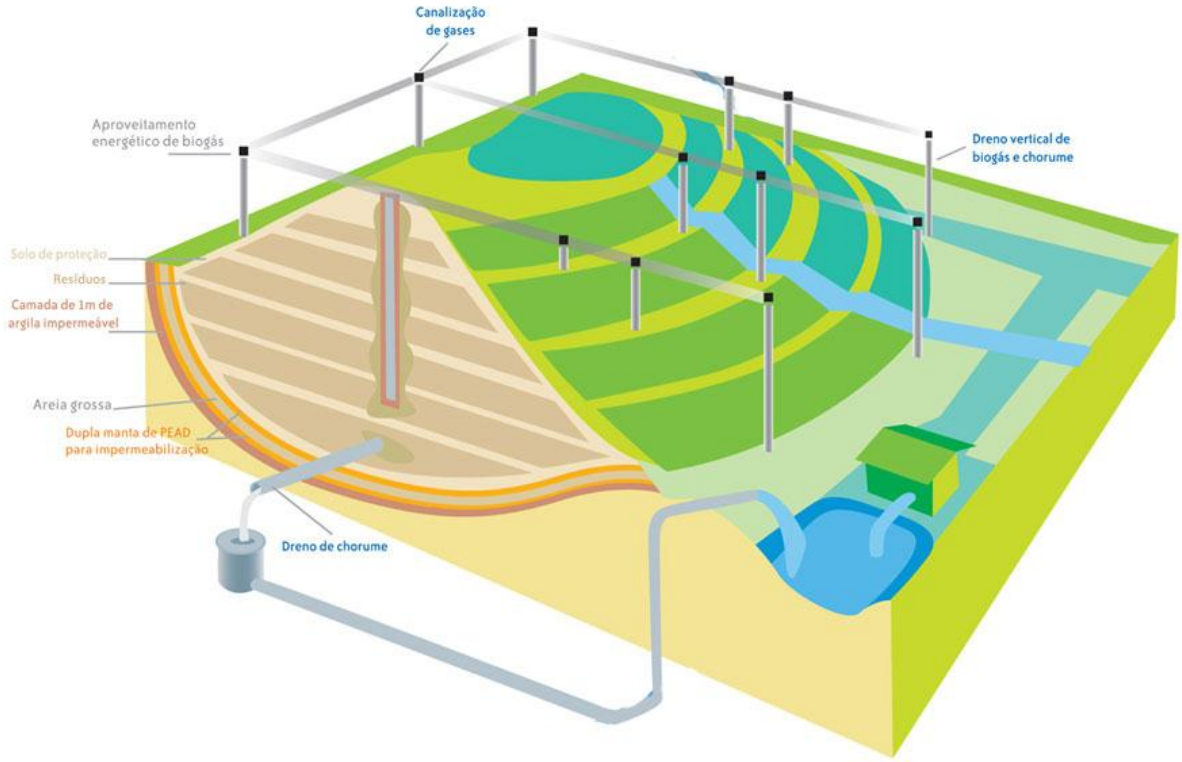


Figura 2: Sistemas de proteção ambiental em um aterro sanitário. **Fonte:** Ciclus Ambiental < http://www.ciclusambiental.com.br/ciclus_ctr.php >

Assim, de acordo com as características recomendadas pela ABNT NBR 13.896 e as características operacionais, é possível estabelecer critérios de avaliação de aterros sanitários e enquadrá-los em escalas a fim de estabelecer condições de avaliação dos mesmos, tendo meios para se chegar à condições adequadas.

Em nível nacional o último quadro geral publicado por órgão governamental foi realizado em 2008 por meio da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE , 2008).

Desta forma, foi possível identificar os municípios com melhores serviços de manejo dos resíduos sólidos. Segundo a pesquisa, os municípios situados nas Regiões Nordeste e Norte registraram as maiores proporções de destinação desses resíduos aos lixões – 89,3% e 85,5%, respectivamente – enquanto os localizados nas Regiões Sul e Sudeste apresentaram, no outro extremo, as menores proporções – 15,8% e 18,7%, respectivamente. Na Região Sudeste, os municípios do Estado de São Paulo registraram as menores proporções de destinação dos resíduos sólidos aos lixões, 7,6%, enquanto os municípios do Estado do Rio de Janeiro foram o destaque negativo da região, sendo este tipo de destinação praticado por 33,0% deles.

Com relação à quantidade de resíduos sólidos, segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (2008), são geradas aproximadamente 260.000 toneladas por dia no país, sendo que a 167.636 toneladas são destinadas a aterros sanitários , como mostra a Figura 3:

Grupos de tamanho dos municípios e densidade populacional	Quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos (t/dia)								
	Total	Unidade de destino final dos resíduos sólidos coletados e/ou recebidos							
		Vazadouro a céu aberto (lixão)	Vazadouro em áreas alagadas ou alagáveis	Aterro controlado	Aterro sanitário	Unidade de compostagem de resíduos orgânicos	Unidade de triagem de resíduos recicláveis	Unidade de tratamento por incineração	Outra
Total	**259 547**	**45 710**	**46**	**40 695**	**167 636**	**1 635**	**3 122**	**67**	**636**

Figura 3: Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares gerados por dia (t/dias). **Fonte:** Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – IBGE 2008.

A CETESB realiza análise dos resíduos no Estado de São Paulo, que segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008) registrou as melhores condições de destinação final da região. A análise é feita por meio do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, que foi realizado nos anos de 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010 e 2011. Este documento é importante, pois se podem determinar diretrizes para a busca de melhores condições.

Com relação à destinação final a CETESB analisa a questão por meio do IQR (Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos), um índice que leva em considera a adequação da área; infraestrutura existente e as condições operacionais. Por meio de inspeção técnica e atribuição de notas é possível efetuar um balanço confiável das questões ambientais além de proporcionar condições de comparação entre os municípios e diminuir eventuais distorções por análises subjetivas.

Por meio de notas atribuídas a diversos critérios, enquadrados em itens (características do local, infraestrutura implantada e condições operacionais), é proposto uma escala de 0 a 10 em que notas menores que 6 são consideradas condições inadequadas, entre 6 e 8 condições controladas e maiores que 8 condições adequadas.

3.2. PROCESSO DE DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA

No processo de digestão anaeróbia ocorre degradação de matéria orgânica através de microrganismos, na ausência de oxigênio. Os produtos finais do processo anaeróbio são compostos inorgânicos, incluindo o dióxido de carbono, amônia e o metano.

Estequiometricamente, o processo anaeróbico pode ser representado por um composto orgânico genérico, formado por moléculas de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (aCbHcOdN), onde um consórcio de várias espécies bacterianas atuam interativamente para a completa redução de substratos complexos a materiais mais simples (BOHRZ, 2010).

Os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três grupos de bactérias, com comportamentos fisiológicos distintos (CHERNICHARO, 2007):

- bactérias fermentativas – transformam, por hidrólise, polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos, como glicose;
- bactérias acetogênicas – convertem os produtos gerados pelas bactérias fermentativas em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- bactérias metanogênicas – utilizam como substrato os produtos finais do segundo grupo. Algumas usam o acetato, e o transformam em metano e dióxido de carbono, enquanto outras produzem metano através da redução do dióxido de carbono.

O processo de digestão anaeróbia, por simplificação, pode ser analisado em quatro fases principais sendo elas a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese:

- Hidrólise:

Ocorre pela conversão de materiais orgânicos insolúveis e complexos, como os carboidratos, proteínas e lipídeos em materiais dissolvidos mais simples, como açúcares e aminoácidos. As reações ocorrem com ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, as quais são destacados os gêneros *Staphylococcus, Bacteroides, Streptococcus, Bacillus e Acetivibrio* (CHERNICHARO, 2007).

A hidrólise dos polímeros ocorre usualmente de forma lenta, com vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado: temperatura; composição do substrato; o tamanho das partículas; pH do meio; concentração de produtos da hidrólise (RUSSO, 2005).

- Acidogênese:

De acordo com Russo (2005) os produtos solúveis provenientes da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, em compostos mais simples que são posteriormente excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e

sulfureto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Os ácidos graxos voláteis são produzidos por organismos fermentativos (bactérias fermentativas acidogênicas). O gás carbônico é o principal gás produzido nesta fase e a DBO, DQO e condutividade do lixiviado aumentam significativamente devido a dissolução de ácidos orgânicos. Além disso, nesta fase, ocorre a dissolução de metais pesados em função da queda do pH oriunda da grande quantidade de ácido carbônico e ácidos voláteis. A acidogênese é efetuada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, como por exemplo as espécies *Clostridium* e *Bacteroids*.

A maioria das bactérias acidogênicas são estritamente anaeróbicas, mas cerca de 1% delas consiste em bactérias anaeróbicas facultativas, as quais podem oxidar o substrato em condições aeróbicas. Fato esse importante, salvo que o oxigênio dissolvido, eventualmente presente no meio, poderia ser uma substância tóxica para a posterior etapa de degradação (BOHRZ, 2010).

- Acetogênese:

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas, que são hidrogênio, acetato e dióxido de carbono. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário que produz substrato para as metanogênicas. Os gêneros conhecidos de bactérias acetogênicas são *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas* (CHERNICHARO 2007).

- Metanogênese:

A etapa final do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas bactérias metanogênicas. As bactérias metanogênicas utilizam apenas um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metil-aminas e monóxido de carbono. Elas são divididas em dois grupos principais: um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol (bactérias acetoclásticas, responsáveis por 60-70% de toda a produção de metano a partir do grupo metil do ácido acético), e o segundo que produz metano a partir do hidrogênio e dióxido de carbono (hidrogenotróficas, constituída por uma ampla gama de espécies e, relação as acetoclásticas). Esses dois grupos de bactérias são responsáveis pelo consumo de hidrogênio das fases anteriores. Há aumento no pH, tendendo a ser neutro, fato que diminui a condutividade, DBO e DQO do lixiviado.

A Figura 8, a seguir, resume o processo de degradação anaeróbica:

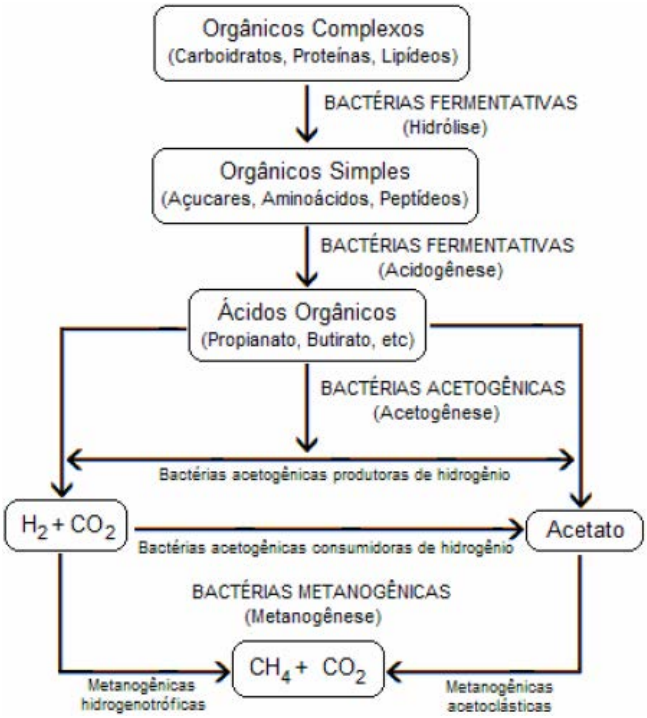


Figura 8: Mecanismo de degradação anaeróbica. **Fonte:** Bohrz (2010) adaptado de Cherrnicharo (2007).

De acordo com Russo (2005) as reações de degradação da matéria orgânica são condicionadas por numerosos parâmetros ambientais. Embora bem conhecidos, os seus efeitos permanecem ainda dificilmente quantificáveis devido à sua mútua dependência. Entre os principais fatores que controlam a atividade microbiana e a produção de biogás estão: umidade dos resíduos, pH e temperatura. Quanto às condicionantes ambientais, a temperatura e o pH são os fatores que mais afetam o desenvolvimento das bactérias responsáveis pela degradação.

3.2.1. Influência da temperatura em processos de degradação anaeróbia

A importância da temperatura na produção de biogás, através do processo de degradação anaeróbia, está associada à natureza das populações microbianas ativas durante a degradação dos resíduos e, consequentemente, no controle das velocidades das reações bioquímicas (RUSSO, 2005).

Para Bohrz (2010), a temperatura é um dos fatores físicos de maior importância no crescimento microbiano, pois os microrganismos não conseguem controlar sua temperatura interna, é determinada pela temperatura ambiente.

Rajeshwari et al. (2000) observaram que o efeito da temperatura nas etapas da hidrólise e acidogênese é menos pronunciado do que nas etapas de acetogênese e metanogênese, em virtude da grande diversidade de bactérias atuantes nas etapas iniciais, e à maior sensibilidade das espécies das fases finais, acetogênese e metanogênese.

A degradação anaeróbia pode funcionar sobre uma ampla gama de temperaturas: desde temperaturas ideais para organismos psicrófilos (em torno de 10° C) até algumas temperaturas extremas, por meio de organismos termófilos, em faixas de mais de 70°C (SCHERER et al, 2000).

Russo (2005) mostra que temperaturas superiores a 65°C são causadoras de bloqueamento dos processos metanogênicos.

Em se tratando de atividade microbiana, há três faixas ideais para o crescimento de bactérias decompositoras: psicrófila (<20°C); mesófila (20-45°C) e termófila (<45°C) (COATES, 1991).

Mata-Alvarez (2003) constatou que o rendimento do processo de degradação anaeróbia é maior em condições termofílicas do que em condições mesofílicas. O autor apresenta um gráfico que relaciona a eficiência da degradação anaeróbia com a temperatura, conforme mostra a Figura 9:

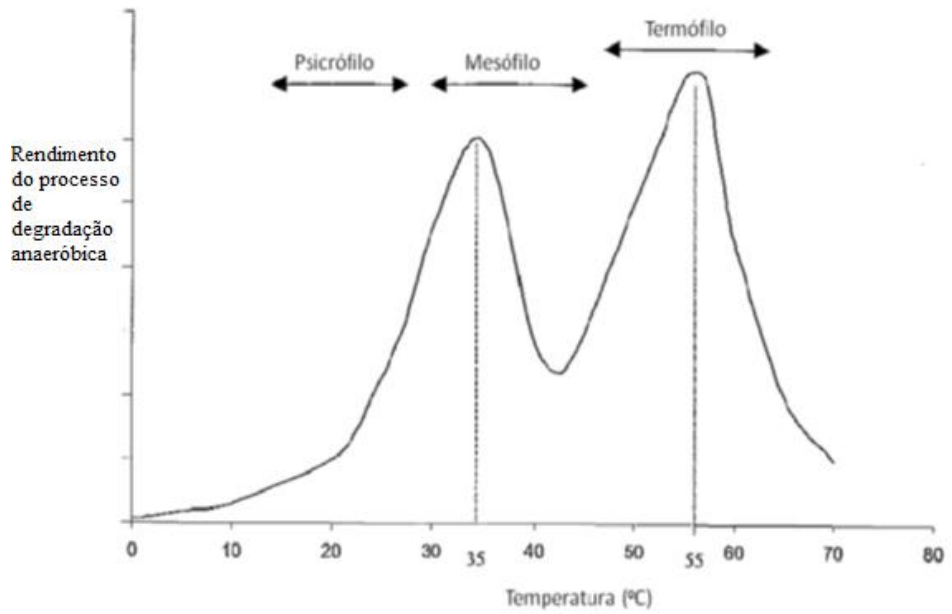


Figura 9: Faixas de temperatura para os processos de digestão anaeróbia. **Fonte:** Adaptado de Mata-Alvarez (2003).

Além do rendimento maior na faixa termofílica (Figura 9), Chen et al. (2008) afirmam que a temperatura elevada da fase termofílica produz um elevado grau de estabilização do resíduo.

No entanto, apesar das condições termofílicas garantirem uma maior eficiência, são mais sensíveis às variações das condições operacionais e do ambiente, o que torna o processo mais vulnerável do que em condições mesofílicas (SILVA, 2009).

Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), geralmente a fase da metanogênese é o passo limitante da degradação anaeróbia, atribuído ao fato das bactérias metanogênicas se reproduzirem mais lentamente e serem mais sensíveis a condições adversas ou a alterações das condições do ambiente, em relação às bactérias acidogênicas.

3.3. COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NA MASSA DE RESÍDUOS EM UM ATERRO SANITÁRIO

Para Melo (2003), a importância da análise da temperatura em aterros sanitários é devido ao fato dos microrganismos que realizam a degradação biológica não controlarem sua temperatura, a qual varia de acordo com a temperatura do meio, tendo faixas consideradas ideais para cada tipo de microrganismo.

A fração orgânica de resíduos sólidos que são dispostos em aterros é um substrato complexo e a sua degradação envolve um caminho metabólico constituído por uma série de reações até à síntese do metano como produto final. Além disso, a maior parte da digestão de resíduos sólidos em um aterro é realizada somente em faixas de temperaturas mesófilas e termófilas (MATA-ALVAREZ, 2003).

De acordo com Brito Filho (2005), embora as bactérias termófilas produzam altas taxas de geração de gás, a degradação da matéria orgânica na maior parte dos aterros ocorre na faixa das mesófilas. As máximas temperaturas de um aterro frequentemente são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição dos resíduos como um resultado da atividade aeróbia microbiológica. Após este período a temperatura diminui com o início da fase anaeróbia.

Com o aumento inicial da temperatura, devido à liberação de calor durante a degradação aeróbia, há o aumento da degradação (aumento da taxa de reação). Como ocorre perda de calor dos resíduos para o ambiente, há o decréscimo de temperatura ao longo tempo. Em aterros profundos, a perda de calor para o ambiente é menor, fazendo com que a degradação seja mais rápida (BRITO FILHO, 2005).

De acordo com Hanson et al.(2010), quantidades significativas de calor são gerados devido à decomposição de resíduos orgânicos nos aterros sanitários. O calor é um subproduto primário dos aterros sanitários, além de lixiviados e gases. O lixiviado e o biogás têm sido estudados extensivamente, ao passo que estudos sobre a temperatura em aterros são mais escassos.

Segundo Brune et al. (1991), o calor gerado por um aterro de resíduos depende da prática de gestão, a natureza dos resíduos, bem como a disponibilidade de umidade para estimular a biodegradação dos resíduos.

Rowe (2005), também verificou que a disponibilidade imediata de umidade pode acelerar o aumento de temperatura em um aterro.

Yesiller (2003) verificou que as variáveis como o clima, tempo de disposição dos resíduos e a umidade disponível têm efeitos significativos sobre as temperaturas em um aterro sanitário. Todos os fatores citados exercem influência direta na temperatura da massa de resíduos, que por sua vez seleciona os microrganismos que irão degradar os resíduos.

Em experimento realizado por Yesiller et al. (2008), as temperaturas da massa de resíduos foram sempre maiores, quando comparadas às temperaturas do solo, o que credencia a temperatura como indicador de atividade biológica na massa de resíduos de um aterro. Além disso, a geração de calor no aterro pode alterar a temperatura do ambiente na área do empreendimento.

Outro fator importante é o efeito das altas temperaturas sobre os sistemas de impermeabilização da base do aterro, como a redução da vida útil de geossintéticos e ressecamento de revestimentos de argila com o desenvolvimento de rachaduras, ocasionando a percolação de lixiviado e eventual acesso aos aquíferos (ROWE, 2005).

Segundo o autor supracitado, dados indicaram que a temperatura do solo de cobertura em um aterro pode chegar de 30 a 45 ° C em áreas com recirculação de lixiviado.

Ishigaki (2005) mostrou a relação entre o fluxo de metano e a temperatura da camada de solo da superfície do aterro. Segundo o autor, as possíveis razões para essa relação podem incluir a transferência de calor por emissões fugitivas de gás e a condução de calor a partir dos resíduos no interior.

Para Brito Filho (2005), temperaturas elevadas estimulam o movimento das partículas de gás, tendendo também a aumentar a difusão do gás. Desta forma, o gás pode ser dispersado mais rápido em condições de temperatura mais elevada.

Embora camadas de terra sobre a massa de resíduos contribuam para manter a temperatura estável, ciclos de esfriamento e aquecimento podem causar ruptura na camada de superfície do solo, causando a migração do gás de aterro para a atmosfera. O solo frio sobre o aterro pode prover uma barreira física para a migração ascendente do gás, causando a migração horizontal no solo (BRITO FILHO, 2005).

3.3.1. Temperatura na Massa de Resíduos x Profundidade

O comportamento esperado da temperatura em função da profundidade de resíduos aterrados, segundo Hanson et al. (2010) é constituído por temperaturas máximas nas zonas centrais de profundidade e temperaturas mais baixas tanto acima como abaixo desta zona central. O autor apresenta de forma esquemática, a variação da temperatura no solo e na massa de resíduos em um aterro sanitário, Figura 10, a seguir:

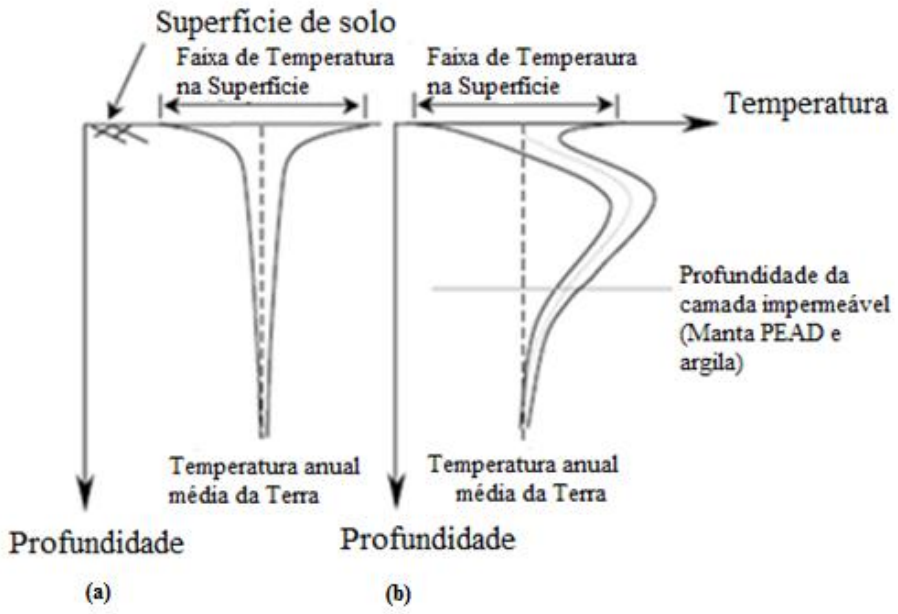


Figura 10: Comparação do (a) comportamento da temperatura superficial do solo sem resíduos e (b) comportamento da temperatura superficial do solo com disposição de resíduos em relação à profundidade.
Fonte: Adaptado de Hanson et al. (2010).

Segundo Hanson et al. (2010) as máximas temperaturas relatadas na literatura para aterros sanitários variaram de 40 a 65 °C para camadas de resíduos entre 20 a 60 m. A forma indicada teoricamente pelo autor foi comprovada experimentalmente em um aterro sanitário na Colúmbia Britânica (EUA), indicada pela Figura 11:

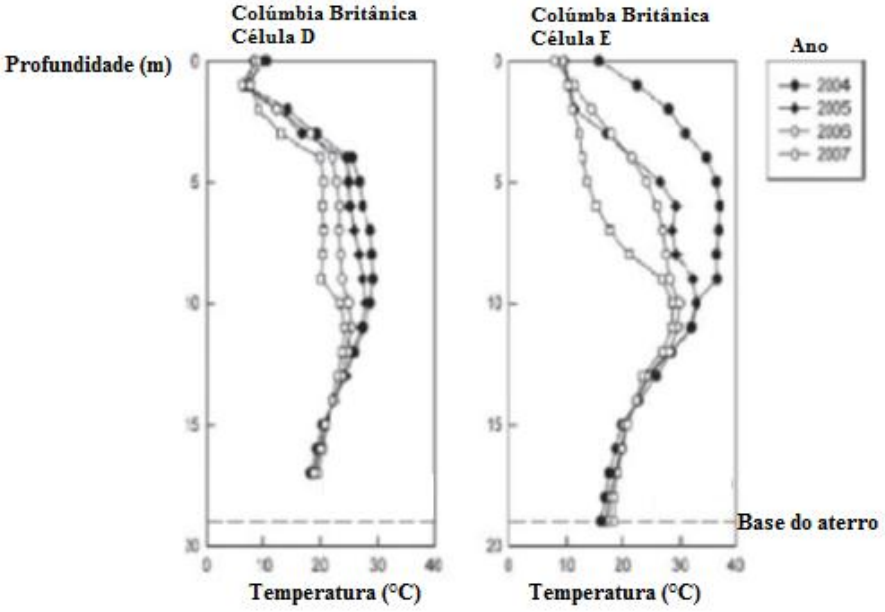


Figura 11: Variação da temperatura com a profundidade em aterro sanitário na Colúmbia Britânica (EUA)
Fonte: Adaptado de Hanson et al. (2010).

Como principais resultados o autor aponta que as temperaturas próximas à base das células e nos sistemas de cobertura de topo eram relativamente menores quando comparadas às temperaturas em profundidade médias.

No Brasil, Mariano & Jucá (1998) no aterro da Muribeca no Estado de Pernambuco acompanharam a variação da temperatura em diferentes profundidades observaram que a temperatura varia entre 30º C a 60º C, com gradiente mais elevado entre 5,0 a 10,0 m e a partir de 10,0 m tende a estabilizar, como mostra a Figura 12 a seguir:

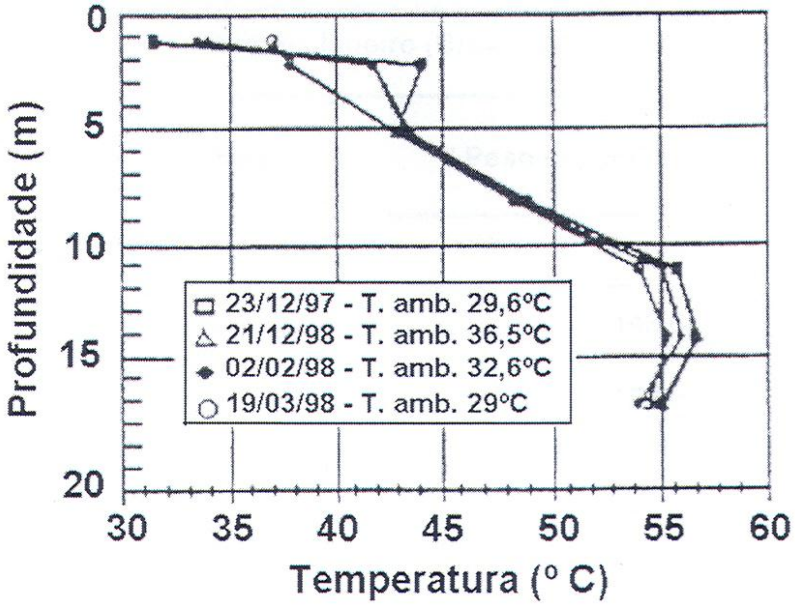


Figura 12: Variação da temperatura dos RSU com a profundidade, Aterro da Muribeca, Estado de Pernambuco – Brasil. **Fonte:** (MARIANO & JUCÁ, 1998).

3.3.2. *Temperatura na Massa de Resíduos X Idade dos Resíduos*

A seguir serão apresentados trabalhos que avaliam o comportamento da temperatura para diferentes tempos de disposição dos resíduos.

Hanson et al. (2010) apresentaram a variação da temperatura com tempo de disposição para os aterros sanitários localizados em Michigan/EUA (resíduos com tempo de disposição entre 1 e 5 anos) e Novo México (resíduos com tempo de disposição entre 1 e 9 anos), para o período de 2004 a 2007. A Figura 13, a seguir, apresenta os dois casos.

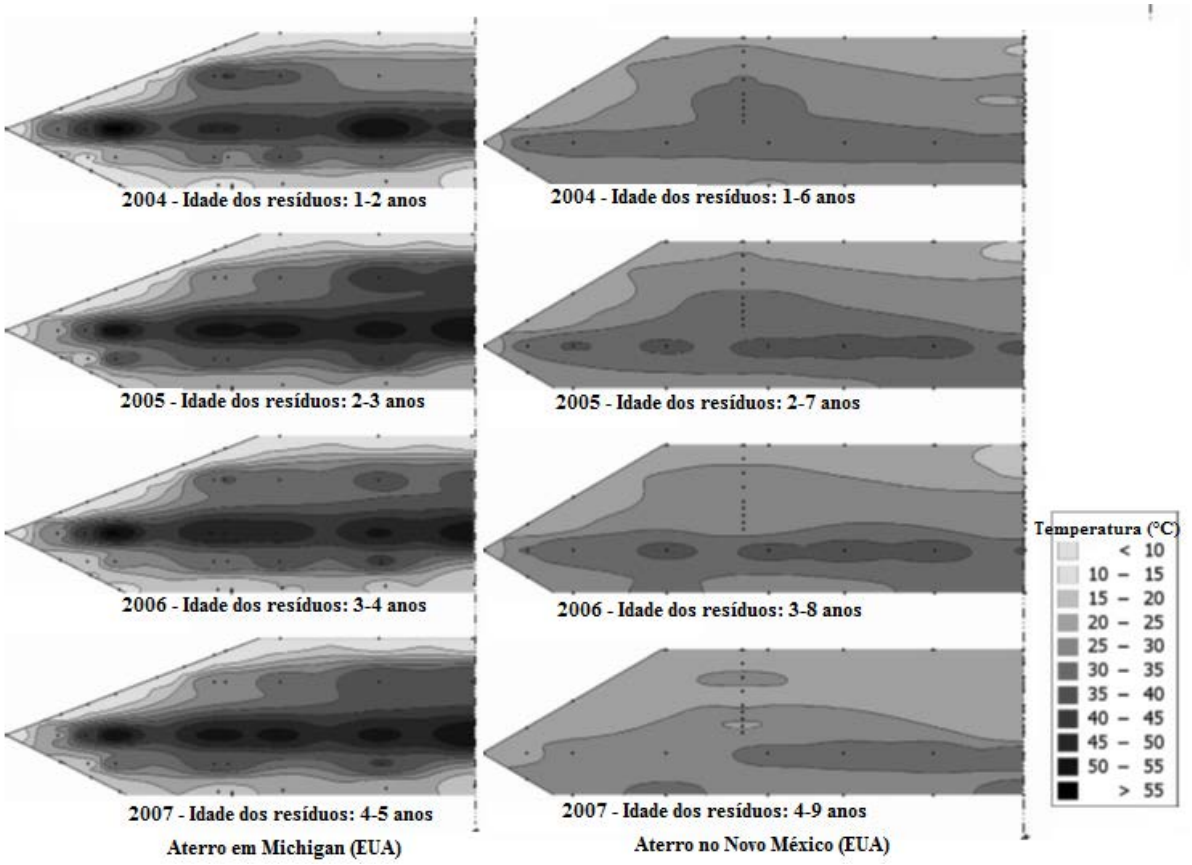


Figura 13: Mapas de temperatura em função da idade dos resíduos em Michigan (à esq.) e Novo México (à dir.) Período de 2004 – 2007. **Fonte:** Adaptado de Hanson et al. (2010).

A partir da análise da Figura 13, Hanson et al (2010) observaram maiores temperaturas no aterro de Michigan/EUA quando comparado com as obtidas no Novo México/EUA, pelos efeitos combinados de condições climáticas e operacionais. Os mapas de temperatura em função do tempo de disposição de resíduos no aterro em Novo México/EUA indicam uma redução das áreas de resíduos com elevadas temperaturas com o aumento do tempo de disposição.

O aumento de temperatura é maior para resíduos mais novos em comparação com os resíduos mais antigos. Pesquisa realizada por Yesiller (2003) mostra que a taxa de aumento de

temperatura nos resíduos com mais de uma camada foi de 2,6 °C/m enquanto que a taxa de aumento de temperatura na massa de resíduos foi de 4,0 °C/m para resíduos recém-colocados.

3.3.3. Temperatura na Massa de Resíduos X Umidade

Outro parâmetro que influencia na degradação dos resíduos em um aterro sanitário é o teor de umidade, o qual está associado principalmente à infiltração da água de chuva.

Segundo Tecle (2008) fatores físicos, especialmente umidade e a temperatura do solo, são conhecidos como os principais fatores relacionados à produção de metano em um aterro sanitário. Além disso, a medição de umidade *in situ* é muito importante porque o teor de umidade do solo é muito sensível a mudanças dentro de minutos a horas e muito sensível às mudanças de temperatura.

A análise da influência da umidade na produção de metano no interior da massa de resíduos indica que a produção do metano diminui quando o teor de umidade é superior a 40% ou abaixo de 10% em volume. O teor de umidade desejável para elevada oxidação do metano varia entre 11 e 25% (WHALEN et al. 1990; BOECKX & CLEEMPUT, 2005).

Embora o teor de umidade seja considerado um importante fator para a emissão de gás, ocorre variação nos níveis de emissão de local para local. As emissões de gás em regiões mais áridas ocorrem durante um período mais longo que em áreas com temperaturas mais amenas. Para aquelas áreas em que há recirculação de chorume, as taxas de emissão de gás são muito mais altas e existe um alto nível de emissões fugitivas de gás, dependendo da maneira que é realizada a recirculação (USEPA, 2004).

Tecle (2008) realizou estudo do comportamento da temperatura, umidade e parâmetros geotécnicos na camada de cobertura em um aterro sanitário com condições climáticas temperadas, em Kansas City no estado do Missouri nos Estados Unidos. A pesquisa demonstrou que a temperatura da massa de resíduos influencia nas propriedades físicas do solo de cobertura, tais como dilatação e contração, que são fatores importantes na regulação do teor de umidade do solo e nas emissões fugitivas metano pela camada de cobertura do solo. Da mesma forma a expansão da água congelada pode criar fissuras que poderiam servir também como caminhos para a emissão fugitiva de metano. A Figura 14 apresenta correlação positiva entre a umidade e temperatura na camada de cobertura do aterro sanitário estudado.

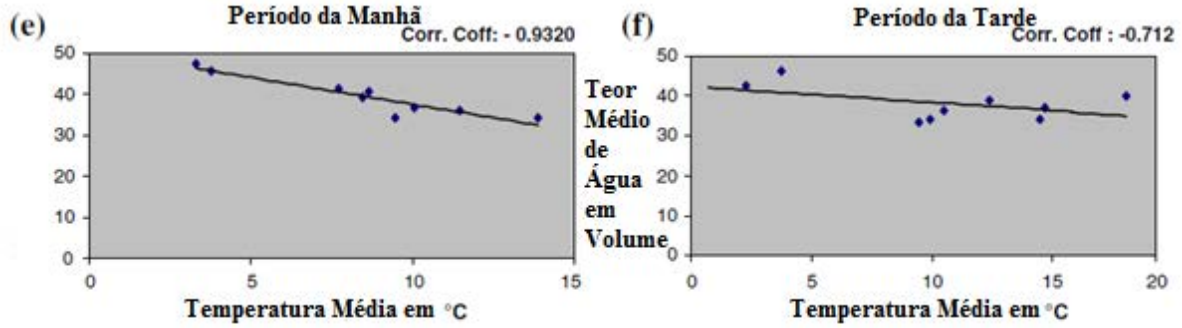


Figura 14: Relação entre umidade e temperatura nos períodos da manhã (e) e tarde (f). **Fonte:** Adaptado de Tecle (2008).

Não foi observada a emissão fugitiva de metano em solos com temperatura inferiores a 5º C. A emissão máxima metano foi observada na parte da tarde quando a temperatura de pico variou entre 15 e 24 º C (TECLE, 2008).

3.4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Rio Claro – SP possui 186.253 habitantes e uma área de 499 km² IBGE (2010). Está localizado no centro-leste do estado de São Paulo, zona 23, longitude 235.477,83 E e latitude 7.519.202,16 N, conforme indica a Figura 4, a seguir:

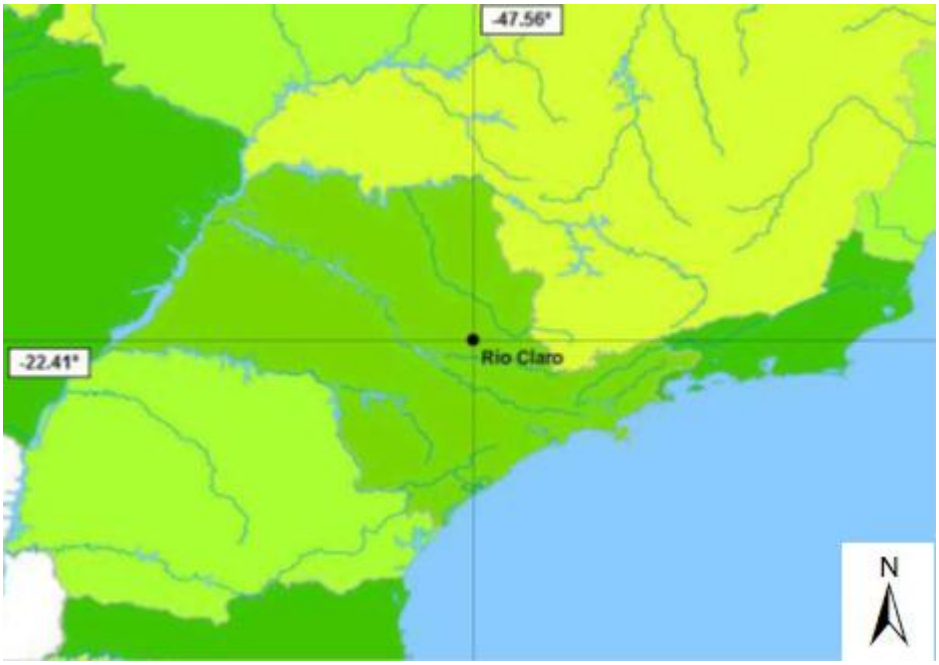


Figura 4: Localização do município de Rio Claro – SP. **Fonte:** IBGE (2010)

A média pluviométrica da região é de 1.400 mm/ano e tem seu regime de chuva dividido em período de seca, entre abril e setembro, e um período chuvoso de outubro a março, no qual ocorreram 80% das precipitações anuais (CEAPLA).

O aterro sanitário do município de Rio Claro está localizado às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP – 127), que liga o município de Rio Claro ao município de Piracicaba. A Figura 5 indica a localização e detalhe do empreendimento:

Figura 5: Localização e detalhe do aterro sanitário de Rio Claro – SP. **Fonte:** Adaptado de *Google Maps.*

Segundo dados da Prefeitura Municipal de Rio Claro, o aterro sanitário do município iniciou suas atividades em 2001 em uma área total de 141.637,68 m², sendo que aproximadamente 98.000 m² destinados à disposição de resíduos. O aterro recebe uma média de 5.000 t/mês (aproximadamente 190 t/dia de coleta)

Ao final de 2011, com o encerramento da vida útil da referida área de disposição, foi iniciado o alteamento do último patamar do local, e em paralelo iniciadas as obras de ampliação de nova célula em área contígua. Com a finalização das obras de ampliação em julho de 2012, iniciou-se a operação da nova célula.

O aterro possui sistema de captação e tratamento (lagoas aeradas e lagoas de sedimentação) de lixiviado. Porém, em virtude do não atendimento dos padrões de lançamento em corpos d'água, após o tratamento o lixiviado é transportado para uma das Estações de Tratamento de Esgoto de Rio Claro, a ETE Conduta.

A área desativada possui 5 patamares com altura média de 5 m cada um. A camada de cobertura dos resíduos é realizada com solo argiloso compactado com espessura de 0,30 m. A base do aterro é impermeabilizada com manta PEAD de 2 mm.

A nova célula em operação possui uma área de 14.000 m² (200 m x 70 m), a base é impermeabilizada com manta e solo argiloso compactado. A célula terá 5 patamares e será

operada até a cota da área desativada do aterro. A Figura 6 a seguir detalha as duas células de operação:

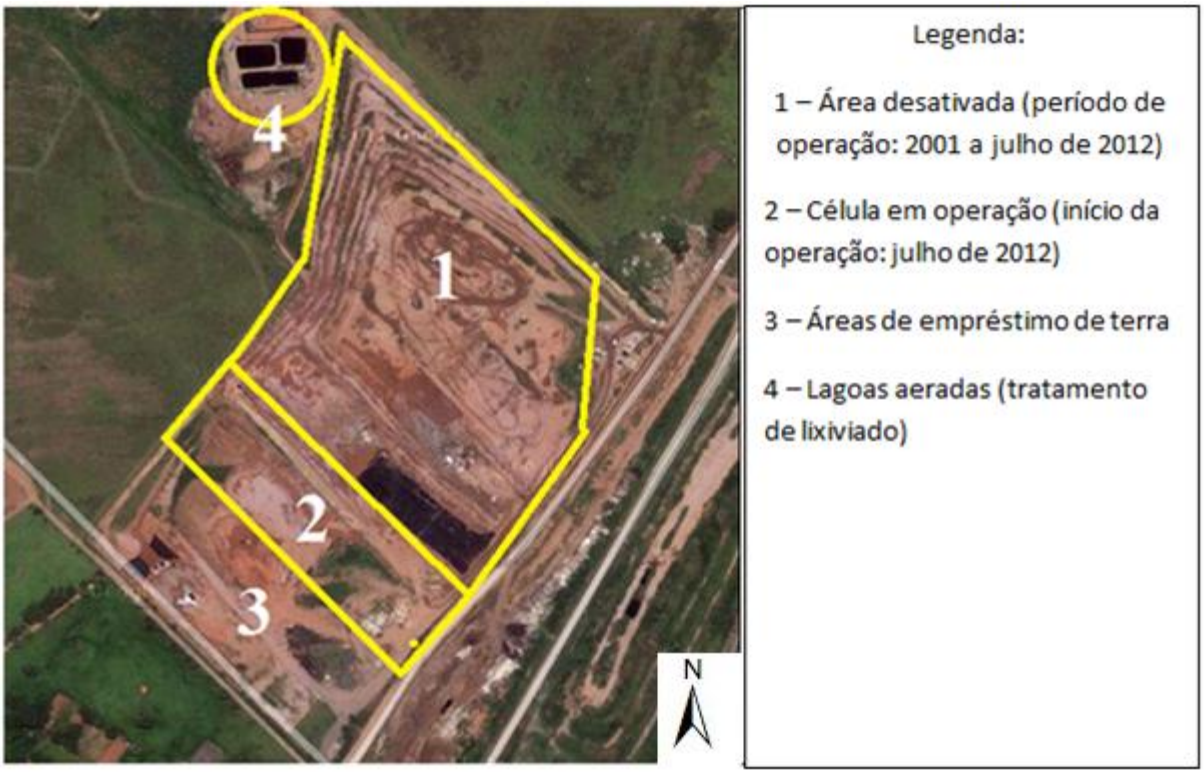
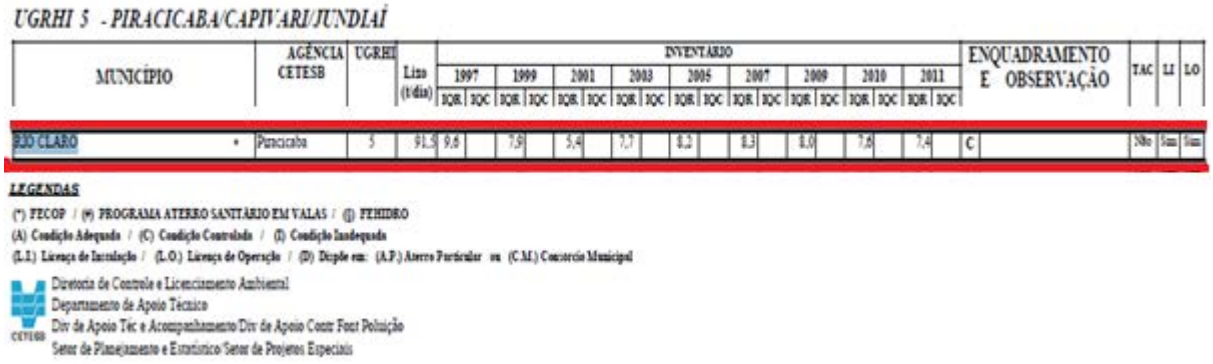


Figura 6: Detalhe das áreas do aterro sanitário de Rio Claro – SP. **Fonte:** Autor.

Segundo a CETESB, por meio da análise do IQR (Índice de Qualidade de Aterro Sanitário), indicador desenvolvido para acompanhar a qualidade do local de disposição de resíduos no estado de São Paulo, o aterro de Rio Claro apresentou a redução do índice com o passar dos anos. Entre 2005 e 2009 o aterro teve nota superior a 8, em 2010 registrou nota 7,6 e em 2011 nota 7,4 sendo considerado como em "condições controladas". O inventário da CETESB para o ano de 2012 ainda não foi divulgado. A Figura 7 mostra as notas atribuídas para o aterro de Rio Claro durante as avalições do IQR:



UGRHI 5 - PIRACICABA/CAPIVARI/JUNDIAÍ

MUNICÍPIO		AGÊNCIA CETESB	UGRHI	Lixo (t/dia)	INVENTÁRIO 1997 IQR	1997 IQC	1999 IQR	1999 IQC	2001 IQR	2001 IQC	2003 IQR	2003 IQC	2005 IQR	2005 IQC	2007 IQR	2007 IQC	2009 IQR	2009 IQC	2010 IQR	2010 IQC	2011 IQR	2011 IQC	ENQUADRAMENTO E OBSERVAÇÃO	TAC	LI	LO
RIO CLARO	*	Piracicaba	5	91,5	9,6		7,9		5,4		7,7		8,2		8,3		8,0		7,6		7,4		C		Não	Sim	Sim

LEGENDAS

(*) FECOP / (#) PROGRAMA ATERRO SANITÁRIO EM VALAS / (@) FEHIDRO
(A) Condição Adequada / (C) Condição Controlada / (I) Condição Inadequada
(L.I.) Licença de Instalação / (L.O.) Licença de Operação / (D) Depde em: (A.P.) Aterro Particular ou (C.M.) Consórcio Municipal

CETESB
Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental
Departamento de Apoio Técnico
Div de Apoio Téc e Acompanhamento/Div de Apoio Contr Fest Poluição
Setor de Planejamento e Estatístico/Setor de Projetos Especiais

Figura 7: Enquadramento de Rio Claro com relação à disposição final dos resíduos sólidos pela IQR – CETESB. **Fonte:** (CETESB, 2013).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

As características importantes de um sistema eficaz de medição de temperatura em aterros são: durabilidade dos sensores contra a corrosão do ambiente agressivo, durabilidade mecânica contra tensões e movimentos, rápida implantação, monitoramento viável, capacidade de emenda e extensão, e capacidade de fornecer medições *in situ.*

As termorresistências são sensores de temperatura que utilizam do princípio da variação da resistência em função da temperatura, aumentando a resistência com o aumento da temperatura.

Segundo a bibliografia consultada, estes equipamentos apresentam condições de alta estabilidade, repetibilidade, resistência à contaminação, baixa influência de ruídos e precisão de leitura (LOTI EQUIPAMENTOS). Assim, foi escolhida temorresistências modelo PT-110, classe A, que variam de 0,15 °C a 0,35 °C em temperaturas de 0 a 100 °C, com precisão de

$$\text{Classe } A = +/- \, 0{,}15 \, ºC + (0{,}002.t)ºC$$

Foram adquiridos os conjuntos de sensores de temperatura, cabos e terminais para diferentes profundidades, os quais foram instalados em nova célula de resíduos do aterro sanitário de Rio Claro. Os conjuntos de termorresistências adquiridos possuem o sensor de temperatura na extremidade; três cabos metálicos de cobre envoltos em uma capa de teflon para proteção do conjunto; e revestimento com capa de aço inox flexível, (Figura 15).

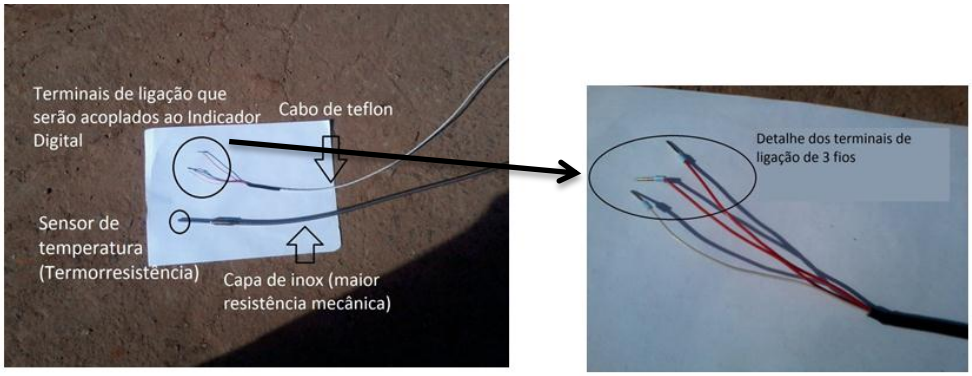


Figura 15: Foto da termorresistência utilizada para aferição da temperatura na massa de resíduos. Detalhe ao lado para os terminais de ligação. **Fonte:** Autor.

Para a leitura do sinal das termorresistências foi utilizado o Indicador Digital Multi-ponto (IDM) DMY-2015, já utilizado nas leituras dos pontos "P1" e "Controle" em pesquisa no mesmo aterro sanitário, realizada por Zanatta (2012). A Figura 16 apresenta o equipamento:

Figura 16: Indicador Digital Multi-Ponto DMY-2015. **Fonte:** http://www.presys.com.br/produtos_ft.php?id_prod=76

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Definição dos pontos para instalação das termorresistências e das respectivas profundidades

Foram instalados dois conjuntos de termorresistências no aterro sanitário de Rio Claro. O conjunto denominado por "Controle", instalado no solo, fora da massa de resíduos, nas profundidades de 1,0 m; 3,0 m; e 5,0 m. A finalidade desde conjunto é monitorar a temperatura do solo em diferentes profundidades sem a presença de resíduos, o qual funciona como "branco" do sistema. O outro conjunto denominado por "P1", foi instalado em uma área desativada do aterro a qual possui resíduos com tempo de disposição entre 5 e 7 anos, em profundidades de 1,0 m; 3,0 m; 5,0 m; 6,5 m e 8,5 m.

Assim, a definição dos novos locais para instalação das termorresistências considerou-se o objetivo da pesquisa de comparar o comportamento da temperatura na massa de resíduos de uma célula nova com outra encerrada. Nesse sentido, considerando o conjunto de termorresistências instaladas em uma área desativada, os novos conjuntos foram instalados em nova célula a qual teve início em julho de 2012.

A Figura 17 indica a localização da célula em operação:

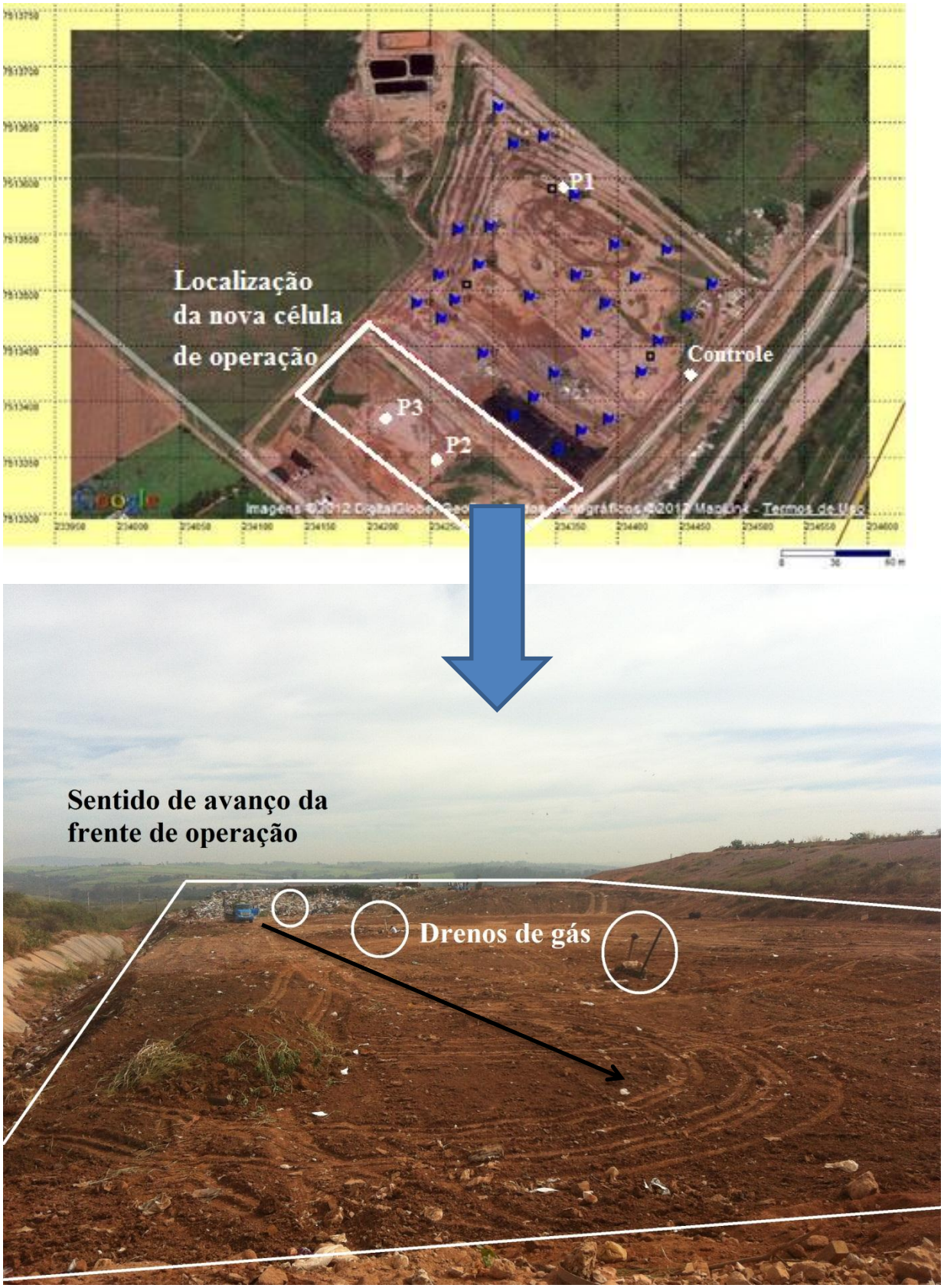


Figura 17: Localização da célula em operação em detalhe. **Fonte:** Autor.

A célula em operação possui 4 drenos de gás denominados 30, 31, 32 e 33. A Figura 18, indica os limites da célula, bem como o sentido de avanço da frente de operação.

Figura 18: Limites da nova célula de disposição (em vermelho) e localização dos drenos 30, 31, 32 e indicação do dreno 33. **Fonte:** Autor.

Para a seleção das profundidades para instalação das termorresistências foram determinadas as alturas das camadas de resíduos nas tubulações dos drenos de gás na célula em operação e também da altura da camada de resíduos saturada com lixiviado, na base do aterro, (Figura 19):

Figura 19: Medição da profundidade da camada de resíduos a partir de medição no próprio dreno de gás. **Fonte:** Autor.

A seguir são descritas as medidas aproximadas dos drenos 31, 32 e 33:

- Dreno 31: altura da camada de resíduos – 5,10 m; nível do lixiviado – 0,88 m;
- Dreno 32: altura da camada de resíduos – aproximadamente 8 m; nível do lixiviado – 1,70 m;
- Dreno 33: altura da camada de resíduos – aproximadamente 9 m; nível do lixiviado – 3,80 m.

O Dreno 30 foi excluído em virtude da inexistência de quantidade significativa de resíduos dispostos próximos a este dreno quando da realização das medidas, ocorridas no mês de Janeiro.

Tendo em vista que as medidas foram realizadas em Janeiro, é relevante destacar a possibilidade de influência do período das chuvas no nível do lixiviado.

A Figura 20 representa um corte esquemático da célula em questão, com as alturas das camadas de resíduos e o nível de lixiviado.

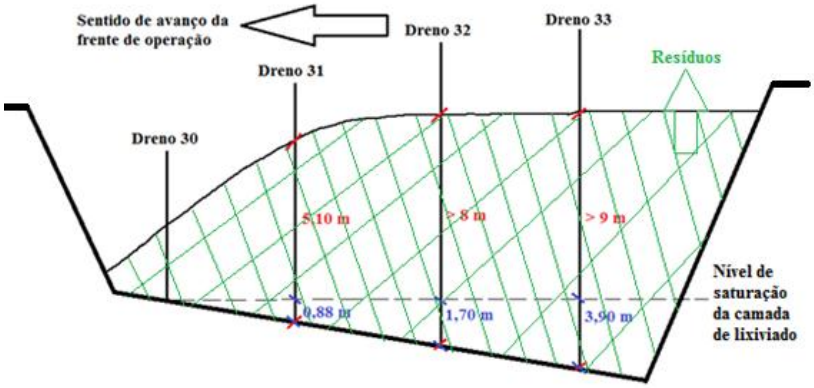


Figura 20: Corte longitudinal esquemático de nova célula de operação, sem escala. **Fonte:** Autor.

A instalação das termorresistências foi realizada próxima aos drenos de gás para maior proteção dos cabos ao trânsito de máquinas e caminhões.

Analisando as profundidades estimadas dos três drenos da nova célula de operação, foram selecionados os drenos 31 e 32 para a instalação das termorresistências em suas proximidades, nas áreas centrais da célula em operação.

A Figura 21 apresenta a espacialização dos drenos escolhidos, bem como o detalhe da vista frontal dos mesmos. Além disso, é possível visualizar os limites da célula (em vermelho) e o avanço da frente de trabalho no lado direito:

Figura 21: Vista lateral da nova célula de disposição de resíduos e detalhes (vistas frontais) dos drenos 31 e 32, selecionados para instalação dos conjuntos. **Fonte:** Autor.

4.2.2. Instalação das termorresistências

A fim de verificar a calibração dos sensores, foi realizada uma comparação das temperaturas da termorresistência com um termômetro digital tipo espeto, o qual foi aferido com solução de gelo e água anteriormente. Foram verificadas leituras foram semelhantes, sendo indicados pelo termômetro tipo espeto 27,2 °C e pela termorresistência 27,3 °C. A Figura 22 apresenta a comparação das temperaturas:

Figura 22: Comparação do funcionamento da leitura da termperatura da termorresistência e comparação da temperatura aferida pela temorresistência e do termômetro tipo espeto**. Fonte**: Autor.

As termorresistências foram fixadas em ripas de madeira graduadas de metro em metro para facilitar seu posicionamento nas profundidades desejadas no momento da instalação. Vale ressaltar que a extremidade da termorresistência, onde está localizado o sensor, não foi apoiado nas ripas para não haver influência nas leituras. Dessa forma, a Figuras 23 e a Figurar 24 apresentam as termorresistências fixadas às ripas de madeira:

Figura 23: Detalhe da extremidade da termorresistência - sensor instalado fora do suporte das ripas de madeira. **Fonte:** Autor.

Figura 24: Termorresistências fixadas às ripas, montadas para instalação na massa de resíduos. **Fonte:** Autor.

Todas as termorresistências foram identificadas com etiquetas, nos canos de sustentação ou nos próprios cabos, de acordo com sua profundidade, como mostra a Figura 25, a seguir:

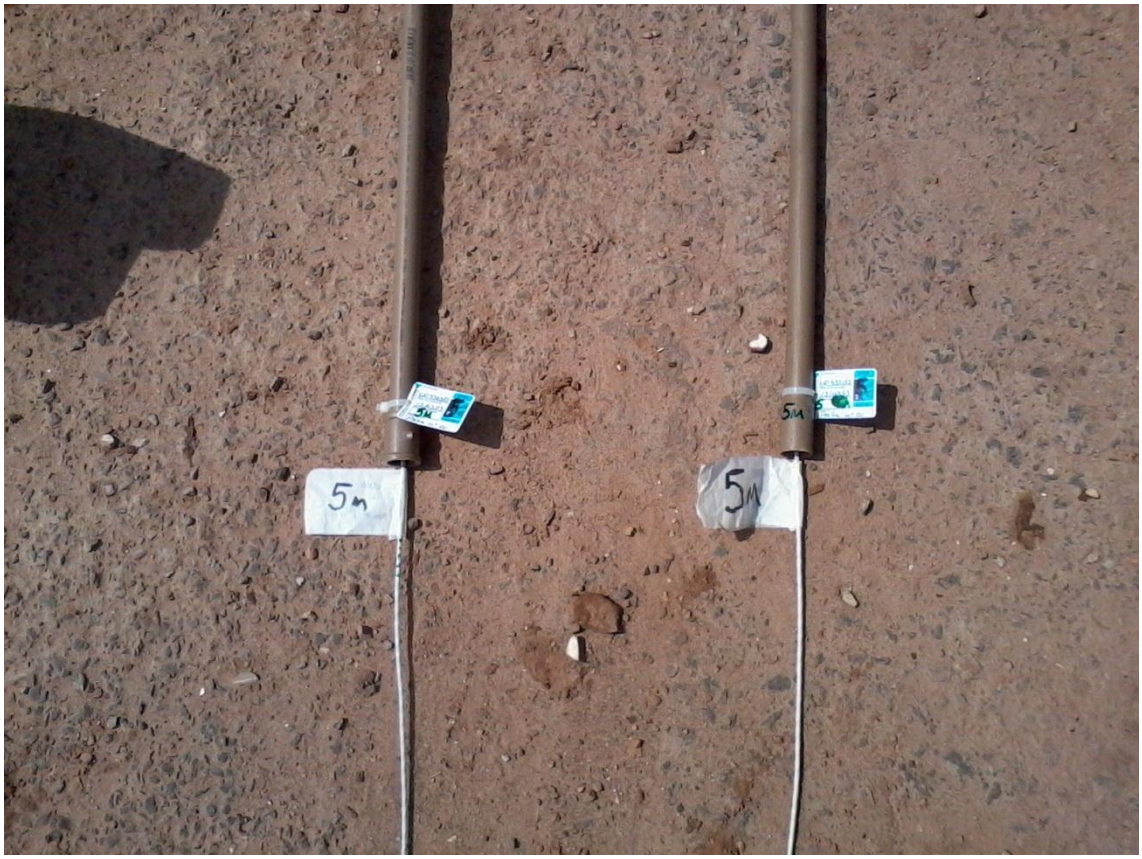


Figura 25: Detalhe para algumas marcações para facilitar a identificação no momento da coleta de dados.
Fonte: Autor.

Inicialmente a instalação das termorresistências seria realizada em tubos fixados às grades dos drenos de gás colocados desde o início de operação da nova célula. Porém, foi observado a obstrução das tubulações que impediram a penetração das termorresistências, o que impossibilitou o uso deste método. Outro ponto considerado foi que a instalação de sensores em tubo rígido sem preenchimento poderia criar vias de circulação de gás e interferir nas temperaturas devido a transferência de calor por convecção ao longo do comprimento do tubo, resultando em medições não representativas.

Por outro lado, considerando as dificuldades encontradas na perfuração com trado mecânico para a instalação do conjunto de termorresistências “P1”, optou-se pela escavação da massa de resíduos com a máquina escavadeira “Poclain”. A Figura 26 mostra o início da perfuração ao lado do dreno:

Figura 26: Início da escavação da massa de resíduos ao lado do Dreno 31 para instalação das termorresistências**. Fonte:** Autor

Foram escavados dois pontos ao lado dos drenos de números 31 e 32 nas seguintes profundidades:

- Dreno 31, denominado por "P2", profundidades:
  - 6,0 m
  - 5,0 m
  - 3,0 m;
- Dreno 32, denominado por "P3", profundidades:
  - 4,0 m
  - 2,0 m

Cabe ressaltar que tais profundidades são referentes ao nível do primeiro patamar da célula em operação. Prevendo a colocação de novas camadas de resíduos, foram instalados junto com os conjuntos das termorresistências, cabos extras de forma a permitir a extensão com a evolução dos níveis dos patamares da nova célula do aterro (Figuras 27, 28 e 29):

Figura 27: Início da escavação do aterro ao lado do Dreno 32 para a instalação das temorresistências (Ponto "P2"), realizado com a máquina escavadeira "Poclain". **Fonte:** Autor.

Figura 28: Instalação das termorresistências na massa de resíduos após a escavação. **Fonte:** Autor.

Figura 29: Detalhe para a colocação da termorresistência na massa de resíduos, onde foi posteriormente recoberta com resíduos. **Fonte:** Autor.

Desta forma, a localização dos pontos de aferição de temperatura no aterro, bem como as respectivas profundidades a cada ponto são mostradas na Figura 30, a seguir:

Pontos de Coleta	Controle	Ponto P1	Ponto P2	Ponto P3
Profundidades (m)	1 m	1 m		
	3 m	3 m	3 m	2 m
	5 m	5 m	5 m	4 m
		6,5 m	6 m	
		8,5 m		

Figura 30: Espacialização dos pontos de coleta de dados de temperatura e suas respectivas profundidades.

Fonte: Autor

Os pontos de tomada de temperatura localizados no ponto “P3”, localizados a 2,0 m e 4,0 m foram danificados em setembro pelo trânsito de máquinas, o que impossibilitou a continuidade do monitoramento de suas temperaturas. Para fins de resultados, foram utilizados os dados coletados até o momento da interrupção do funcionamento dos equipamentos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 31 e a Figura 32 apresentam dados de temperatura do ponto “P1”, e optou-se pela separação em dois gráficos distintos para melhor visualização. O período de análise dos dados da célula desativada foi compreendido de junho/2012 a outubro/2013 de modo a compreender melhor o comportamento da temperatura. Os dados do ano de 2012 foram obtidos em pesquisa realizada por Zanatta (2012).

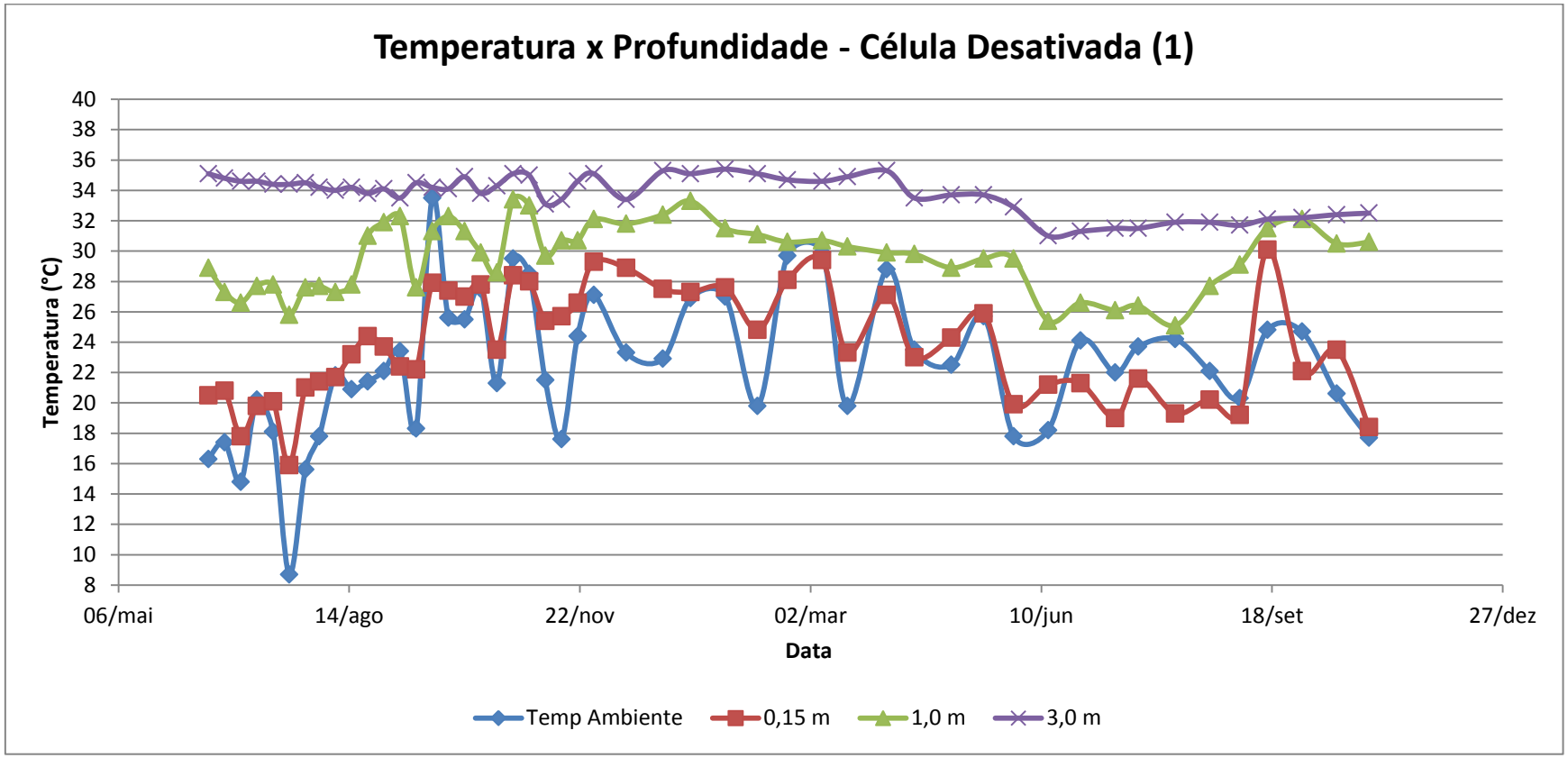


Figura 31: Temperaturas nas profundidades de 0,15 m, 1,0 m, 3,0 m e temperatura ambiente em "P1", de junho/2012 a outubro/2013.

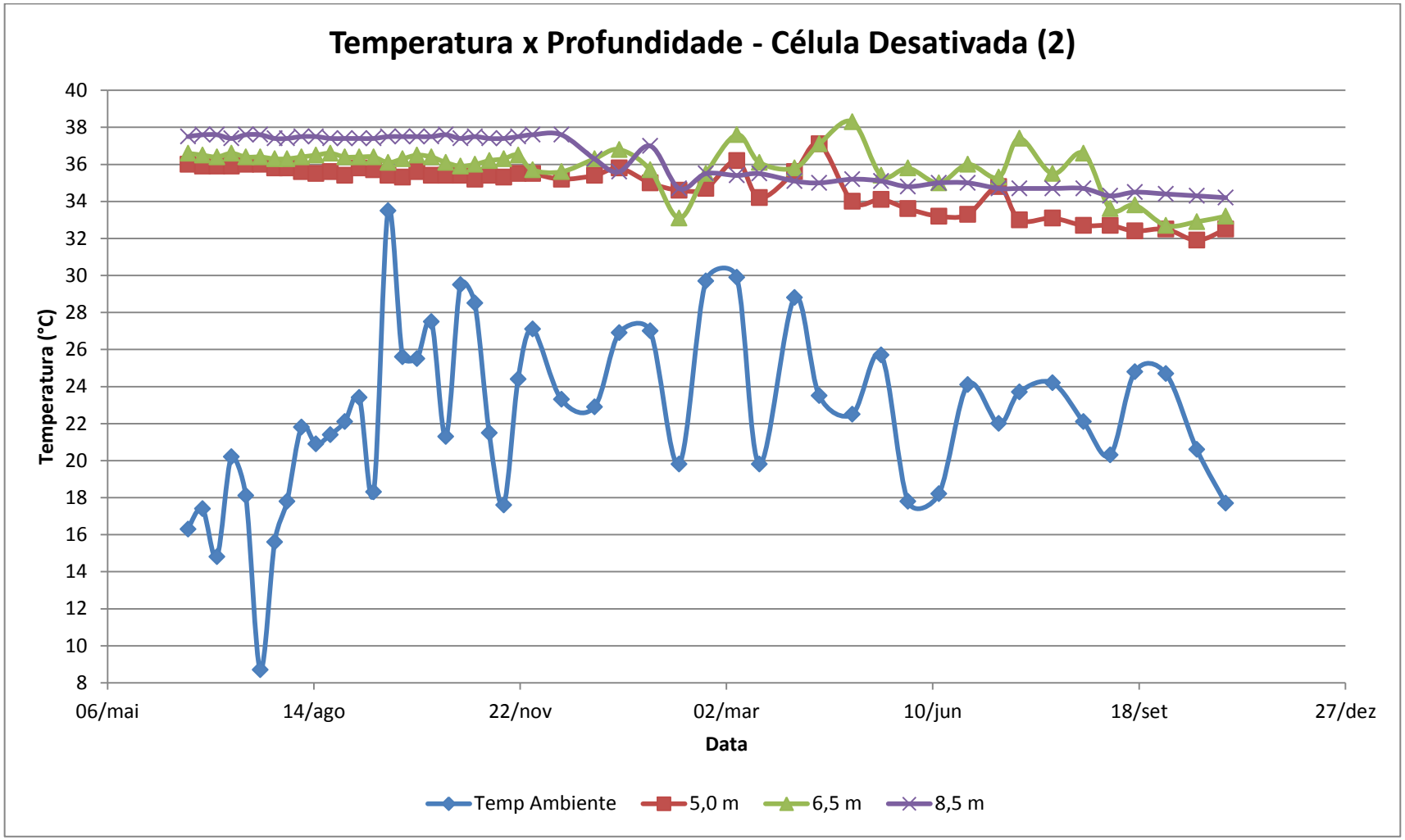


Figura 32: Temperaturas nas profundidades de 5,0 m, 6,5 m, 8,5 m e temperatura ambiente em "P1", de junho/2012 a outubro/2013.

A partir da análise da Figura 31 é possível notar que a influência da temperatura ambiente é perceptível para as profundidades de 0,15 m e 1,0 m. Para a profundidade de 3,0 m não é notável a influência da temperatura ambiente na temperatura dos resíduos. Da mesma forma, na Figura 32, observa-se que a temperatura ambiente não influencia a temperatura na massa de resíduos nas profundidades de 5,0 m, 6,5 m, e 8,5 m. Tal fato pode estar associado à condição de isolamento térmico promovido pela camada de resíduos.

A partir de 3,0 m ocorre um processo de diminuição das temperaturas e de suas variações. Em profundidades maiores que 3,0 m têm-se temperaturas mais homogêneas e elevadas até o mês de novembro de 2012, quando a partir de então, em todas as profundidades as medidas de temperatura apresentam menor variação e diminuição de valores.

Cabe destacar que durante a primeira fase de monitoramento das temperaturas no ponto "P1", correspondente ao ano de 2012, houve a prática da recirculação do líquido percolado na massa de resíduos entre os meses de junho a novembro. É possível que o procedimento de recirculação na massa de resíduos tenha criado melhores condições de umidade, de modo a favorecer a estabilidade da temperatura, que pode ser observado na Figura 32 nas profundidades de 5,0 m, 6,5 m e 8,5 m.

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos desde o início de instalação, no mês de abril até outubro de 2013.

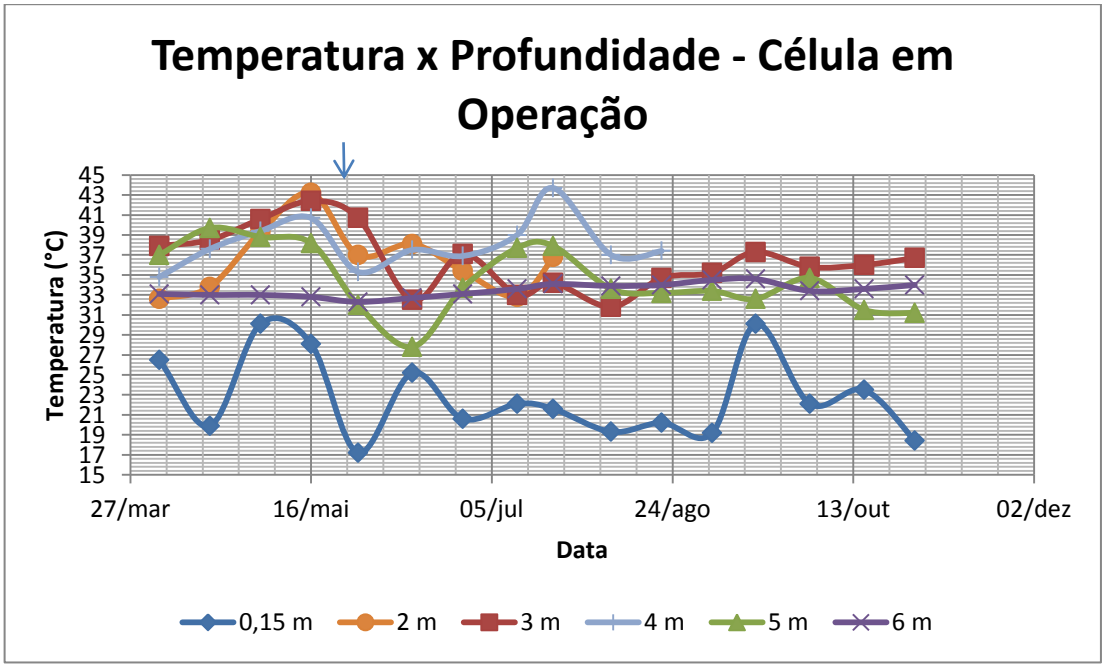


Figura 33: Temperaturas na célula em operação a cada coleta de dados (15 dias).

A Figura 33 descreve um aumento da temperatura nos primeiros 45 dias em todas as profundidades, e em seguida a diminuição dos valores. Tal comportamento pode estar associado à entrada de oxigênio (ar) durante a escavação da massa de resíduos para a instalação das termorresistências, que propiciou o desenvolvimento de um período de degradação aeróbia nos primeiros dias, com temperaturas mais elevadas. Com a exaustão do oxigênio, a atividade aeróbia diminui, passando para o regime anaeróbio.

Outro ponto observado foi que na profundidade de 6,0 m as temperaturas permaneceram relativamente constantes, que pode ser relacionada com o nível de lixiviado na base do aterro (região saturada), uma vez que naquele o ponto a profundidade da superfície até a base do aterro é de aproximadamente 6,0 m, com uma coluna de 0,90 m de lixiviado na base, como mostrado na Figura 20.

Ainda com base na Figura 33, houve durante o período de coleta de dados, um alteamento na camada de resíduos, que passou para o segundo patamar na metade do ano de 2013. A data exata em que a temperatura foi coletada após este primeiro alteamento está indicada no gráfico da Figura 33 com uma seta, que marca a data de 13 de junho de 2013. Seguindo o sentido de avanço da frente de operação o primeiro ponto a sofrer influência em virtude do alteamento foi o localizado ao lado do Dreno 32, nas profundidades de 2,0 m e 4,0 m. Após o alteamento na região do Dreno 32, no mês seguinte foi alteada a região do Dreno 31 no qual se localizam as termorresistências nas profundidades de 3,0 m, 5,0 m e 6,0 m. A partir daí, é importante ressaltar que com uma camada a mais sobre os resíduos onde estão localizados os sensores de temperatura, a tendência é de condições mais anaeróbias. A exaustão do oxigênio no local confere valores menores de temperatura em virtude da menor atividade biológica, fato que pôde ser visto na profundidade de 3,0 m, na qual teve o pico no início da medição e passou para valores menores, com menores amplitudes.

Para o melhor entendimento da variação da temperatura em todas as profundidades a Tabela 1 mostra alguns parâmetros estatísticos.

Tabela 1: Parâmetros estatísticos dos dados da célula em operação.

T (°C) \ Profundidade	0,15 m	2,0 m	3,0 m	4,0 m	5,0 m	6,0 m
Máxima	30,1	43,2	42,4	43,7	39,7	34,6
Mínima	17,2	32,6	31,8	34,8	27,8	32,3
Média	22,76	33,56	36,58	38,12	34,56	33,48
Desvio Padrão	4,1	3,41	3,03	2,51	3,33	0,66
Coeficiente de Variação	0,1801	0,1016	0,0902	0,0658	0,0963	0,0197

A Tabela 1 apresenta maiores desvios padrões e coeficientes de variação nas profundidades de 0,15 m e 2,0 m. Por serem locais próximos à superfície, estão mais susceptíveis à influência da temperatura ambiente. Os valores para 6,0 m quase não apresentam variação, o que indica um comportamento diferente dos demais valores, possivelmente por sua posição na zona saturada de lixiviado. Além disso, ocorre um comportamento semelhante nas profundidades de 2,0 a 5,0 m, tanto no desvio padrão, quanto no coeficiente de variação, que confere confiabilidade dos valores nas faixas de temperaturas medidas.

Cabe ainda ser ressaltado, que como pode ser visto na Figura 33, que os valores das profundidades em 2,0 m e 4,0 m foram interrompidos durante o período de coletas. Nos últimos meses de coletas, as duas termorresistências, ambas localizadas nas proximidades do dreno 32, instaladas a 2,0 m e 4,0 m foram danificadas pela colisão de uma máquina com o dreno de gás próximo onde estavam instaladas as termorresistências.

Com o objetivo de analisar a influência da precipitação na massa de resíduos foram coletados dados de precipitações diárias no município de Rio Claro – SP. A Figura 34 apresenta os dados de precipitação acumulada e das temperaturas aferidas para o ponto “P1” (célula desativada), enquanto que a Figura 35 apresentam estes dados para os pontos “P2” e “P3”, na célula em operação.

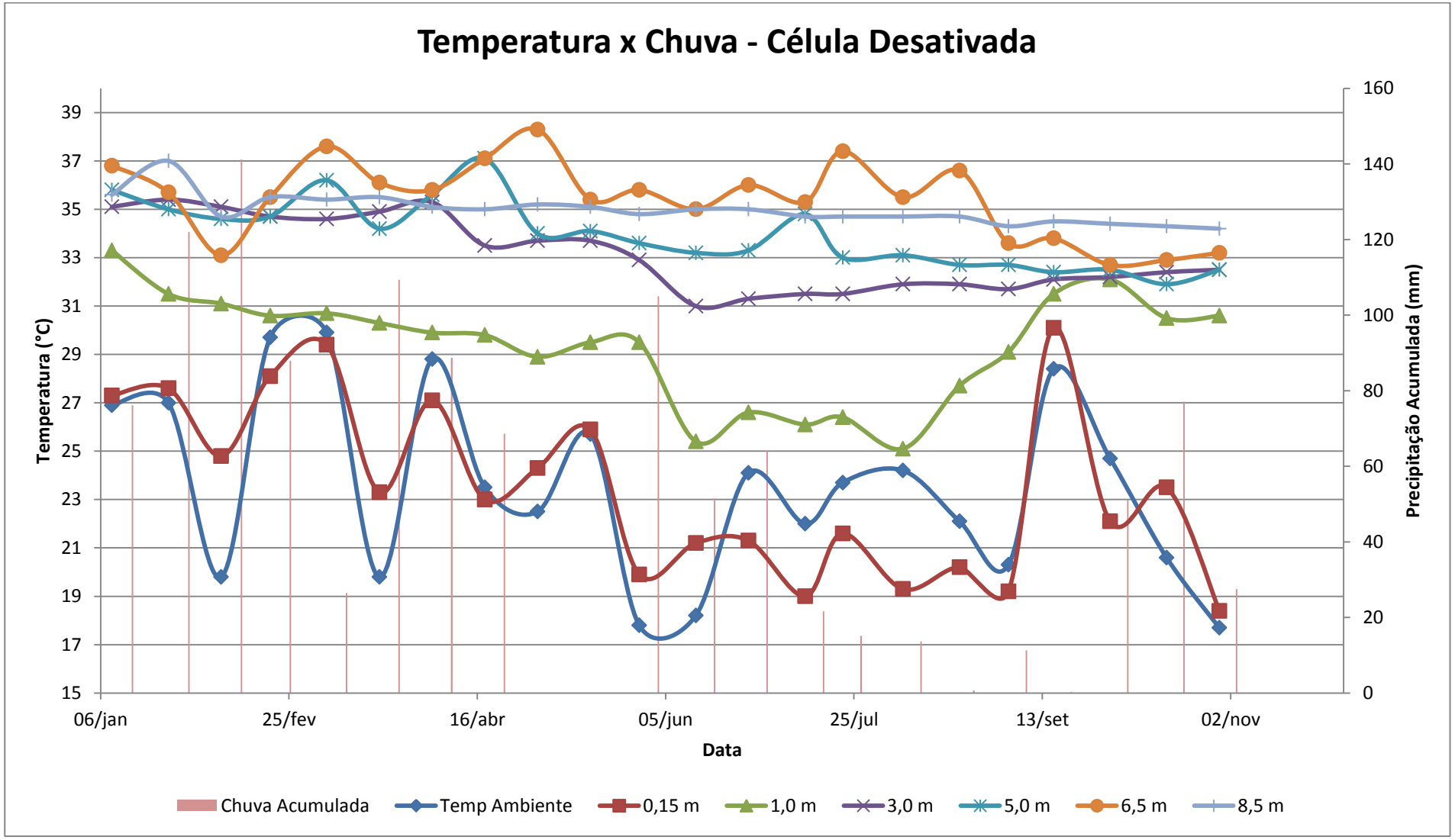


Figura 34: Comportamento da temperatura com a precipitação acumulada nos intervalos de medição (15 dias) para a célula desativada.

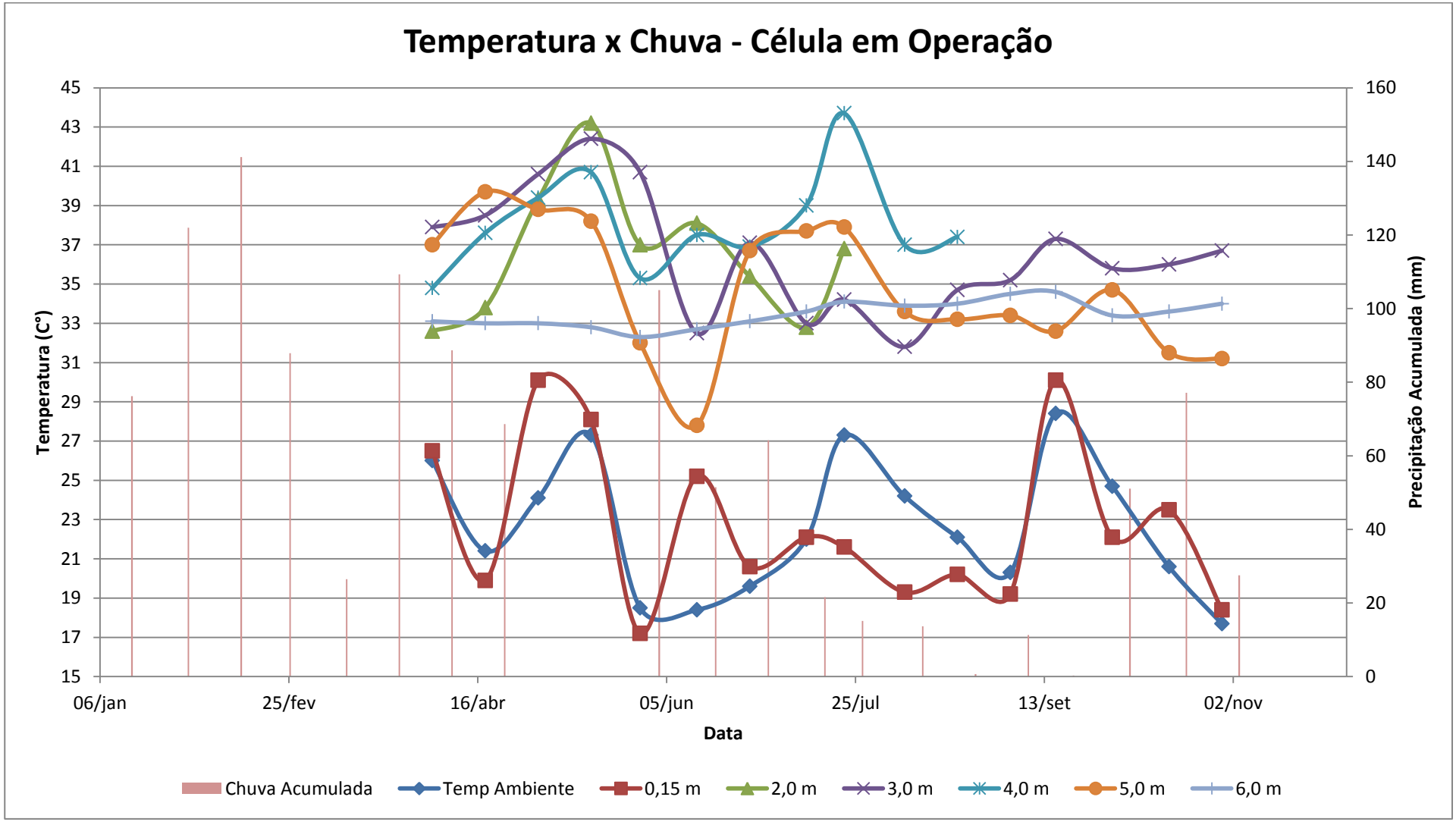


Figura 35: Comportamento da temperatura com a precipitação acumulada nos intervalos de medição (15 dias) para a célula em operação.

Os dados apresentados no gráfico da Figura 35 sinalizam para uma diminuição das temperaturas em períodos de menor precipitação. Quando observado o comportamento da temperatura para a profundidade de 5,0 m, no período de abril a junho e de julho a setembro ocorre uma redução nos valores de temperatura, acompanhando o período de maior estiagem. Para a célula desativada, a menor atividade biológica demanda uma menor quantidade de água e a influencia da precipitação é pouco pronunciada.

Por fim, com o interesse de comparar o comportamento da temperatura nas duas células com diferentes tempos de disposição produziu-se um gráfico com as temperaturas médias coletadas de janeiro a outubro no Ponto "P1" e "Controle" e de abril a outubro nos Pontos "P2" e "P3", célula em operação. O gráfico com o comportamento geral nos locais distintos é apresentado na Figura 36, a seguir:

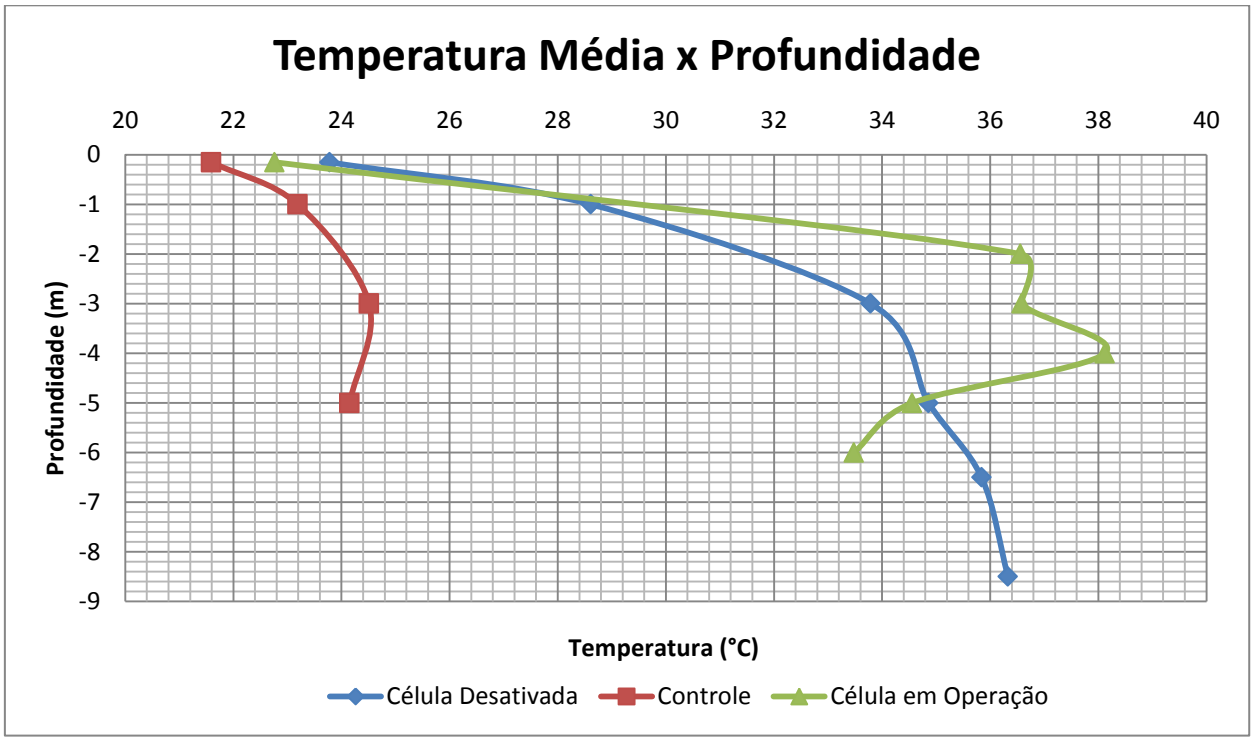


Figura 36: Comportamento geral das temperaturas médias em todas as profundidades nos três locais de medição.

Com base na Figura 36, as temperaturas na massa de resíduos são crescentes com as profundidades na célula desativada. Já os maiores valores de temperatura foram observados na célula em operação na profundidade de 4,0 m.

As médias máximas de temperatura observadas em cada um dos pontos "Controle", "Desativada" e "em Operação" foram 24,5°C, 36,3 °C e 38,1 °C.

A temperatura média máxima ocorreu em 4,0 m, porém, nesta profundidade, a termorresistência apresentou problemas de medida e teve a interrupção de seu monitoramento durante o período de coleta. Assim sendo, é provável que na possibilidade de continuação do monitoramento, a temperatura nesta profundidade teria tendência de diminuição, fato que iria modificar a média e assim haveria um efeito de suavização da curva da célula em operação.

Para a profundidade de 6,0 m na célula em operação, existe a possibilidade desta ser uma região saturada de lixiviado, em função da topografia da célula, e assim sendo, há uma relativa constância nos valores, que por sua vez, é menor que os valores comuns na célula em operação, fato que desloca a curva, acentuando ainda mais o padrão convexo.

As temperaturas mais elevadas observadas nas áreas de disposição de resíduos, tanto na área em operação quanto na área desativada, quando comparada com o ponto sem disposição de resíduos ("Controle"), sinalizam para uma atividade biológica, com reações exotérmicas, que liberam calor para o meio. Portanto, os resultados obtidos até o momento estão alinhados com os apresentados com a bibliografia consultada, caso do estudo de Hanson et al (2010).

6. CONCLUSÕES

A influência da temperatura ambiente na massa de resíduos aterrados é mais acentuada até a profundidade de 3,0 m. A partir desta profundidade, o isolamento térmico proporcionado pela coluna de resíduos é mais efetivo e as temperaturas encontradas estão mais relacionadas ao calor liberado pelas reações exotérmicas do processo biológico anaeróbio.

As maiores temperaturas obtidas nas duas células de resíduos em relação às obtidas no solo sem resíduos demonstram que a atividade anaeróbia existente na massa de resíduos aterrada constitui uma fonte de calor com capacidade de alterar as temperaturas do meio.

As maiores temperaturas foram observadas na célula em operação, com resíduos com aproximadamente 1 ano de disposição, quando comparadas com as temperaturas obtidas na célula desativada. Tal fato está associado à maior disponibilidade de substrato (material orgânico biodegradável) e consequentemente maior atividade biológica. A temperatura máxima da célula desativada foi de 36,3 °C e ocorreu na profundidade de 8,5 m. Já na célula mais recente a temperatura máxima foi de 38,1 °C em 4,0 m.

Durante a instalação das termorresistências na célula em operação foi observado um período de degradação aeróbia devido à escavação da massa de resíduos, o qual foi obtido picos de temperaturas em todas as profundidades após aproximadamente 45 dias de aterramento das termorresistências, atingindo 43,2 °C, 42,4 °C, 40,7 °C, nas profundidades de 2,0 m, 3,0 m, e 4,0 m respectivamente. Após este período as temperaturas diminuíram em todas as profundidades, e mantiveram-se mais constantes. O processo de degradação aeróbio é mais intenso e libera mais calor para o meio, quando comparado com o processo de degradação anaeróbio.

A influência da precipitação é mais perceptível para a célula em operação pelo fato haver maior disponibilidade de substrato quando comparado com a célula encerrada. Além disso, na célula em operação, alguns períodos de chuvas propiciaram melhores condições de umidade na massa de resíduos aliada à disponibilidade de substrato, pois alguns dias após esses períodos a tendência foi de aumento das temperaturas.

Com base nos resultados confirmou-se que a temperatura pode ser um bom parâmetro indicador de atividade biológica em um aterro sanitário. Ao comparar a célula em operação, com maior disponibilidade de substrato, com a célula encerrada, em que houve consumo de

grande parte de substrato, ocorre grande diferença da temperatura. Por fim, ambos os pontos, quando comparados com um local sem disposição de resíduos, ocorre temperaturas mais elevadas que o solo sem resíduos, certamente pelas reações exotérmicas de degradação da matéria orgânica, confirmando a temperatura como indicador de atividade biológica. Dessa forma, o monitoramento da temperatura pode ser uma alternativa viável quando comparada com outras formas de análises em um estudo para o potencial de geração de biogás em aterros sanitários.

7. RECOMENDAÇÕES

A coleta de dados para o monitoramento da temperatura na célula em início de operação se mostrou muito importante pois desta forma pôde ser possível acompanhar o comportamento da temperatura desde o início da disposição dos resíduos em um célula. Assim, a coleta de dados neste local ao longo dos anos pode ser fundamental para compreender ainda melhor o comportamento da temperatura e também de identificar todas as fases do processo biológico de degradação.

Sendo assim, recomenda-se em trabalhos futuros a continuidade do monitoramento da temperatura na massa de resíduos desta célula recente, de modo a proporcionar condições de melhor compreensão das fases de degradação e dos seus efeitos na temperatura dos resíduos.

Ainda, recomenda-se a utilização destes dados para a realização de outras pesquisas no mesmo aterro sanitário, de modo a comparar a influência de outros parâmetros e como a temperatura pode se relacionar com estes e interferir no comportamento geral.

Por fim, outras sugestões de pesquisas no local seriam o maior detalhamento de influência da recirculação de lixiviado no aterro e como esta prática vai influenciar em diversos parâmetros, como a temperatura, ou então trabalhos com o tipo de solo usado no aterro sanitário, camada de selamento, melhores condições para evitar emissões fugitivas e a relação da temperatura com os diferentes tipos de solo de cobertura.

8. REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS

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 10.006. São Paulo: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. NBR 10.005. São Paulo: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **– Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. NBR 10.006. São Paulo: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos.** NBR 10.007. 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

BOECKX P.; VAN CLEEMPUT O.; **Methane emission from a landfill and the methane-oxidizing capacity of its cover soil.** Soil Biol Biochem 28:1397–1405, 2005.

BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos.** Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2010, 153p.

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.

BRASIL. **Regulamentação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos.** Decreto número 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que regulamenta a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Brasília, DF, Presidência da República, 2010.

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

BRUNE, M., RAMKE, H. G., COLLINS, H., HANERT, H. H. "**Incrustation process in drainage systems of sanitary landfills."** Proc., 3rd Int. Landfill Symp. 1991, CISA, Cagliari, Italy, 999–1035.

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.

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. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares.** 2011. Disponível em: < http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes >. Acesso em 11 de maio de 2013.

CICLUS AMBIENTAL. **Sistemas de proteção ambiental em um aterro sanitário.** Disponível em: < http://www.ciclusambiental.com.br/ciclus_ctr.php >. Acesso em 10 de junho de 2013.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. **Inhibition of anaerobic digestion process. A review.** Bioresource Techonology, n. 99, p 4044-4064, 2008.

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

COATES, J. **Development, characterisation and stabilization of granular methanogenic sludges.** Ph. D. Thesis, National University of Ireland, Galway, 1991.

HANSON, J. L.; YESILLER, N.; OETTLE, N. K. **Spatial and Temporal Temperature Distributions in Municipal Solid Waste Landfills.** Journal of Environmental Engineering. ASCE, EUA, 804-814, ago. 2010.

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/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em 11 de maio de 2013.

ISHIGAKI, T.; YAMADA, M.; NAGAMORI, M.; ONO, Y.; INOUE, Y. **Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature.** Environ Geology. 48: 845–853, 2005.

LOTI Equipamentos. **Indicador Digital Multi-Ponto**. Disponível em: < http://www.loti.com.br/termoresistencia-pt-100.php >. Acesso em: 10 de junho de 2013.

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

MATA-ALVAREZ, J. **Fundamentals of the anaerobic digestion process. In Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes,** IWA Publishing, London, 91-109, 2003.

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.

PRESYS. Instrumentação - Controle de Processos: **Indicador Digital Multi-Ponto DMY-2015.** Disponível em: < http://www.presys.com.br/produtos_ft.php?id_prod=76>. Acesso em 09 mai. 2013.

RAJESHWARI, K. V.; BALAKRISHNAN, M.; KANSAL, A.; LATA, K.; KISHORE, V. V. N. **State-of-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 4, p. 135-156, 2000.

ROWE, R. K. "**Long term performance of contaminant barrier systems."** Geotechnique, 55(9), 631–678; 2005.

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 aneróbica de um efluente lático.** Universidade de Aveiro, Portugal. Departamento de Ambiente e Ordenamento. 2009. Tese de Mestrado.

SCHERER, P. A.; VOLLMER, G. R.; FAKHOURI, T; MARTENSEN, S**. Development of a methanogenic process to degrade exhaustively municipal residue refuse and 'gray waste' under thermophilc and hyperthermophilic conditions.** 1999.

TECLE, D.; LEE, J.; HASAN, S. **Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill.** Springer-Verlag, Environ Geology. 56:1135–1143, 2008.

USEPA - United States Environmental Protection Agency, 2004**. Municipal Solid Waste Landfill Regulations.** Disponível em : < http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/sw_pubs.htm >. Acesso em 14 de Junho de 2013.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Anaerobic Sewage Treatment – A practical guide for regions with a hot climate** John Wiley & Sons, UK, 1994.

WHALEN, S. C.; REEBURG, W. S.; SANDBECK, K. A. **Rapid methane oxidation rate in landfill cover soil.** Appl Environ Microbiol 56:3405–3411, 1990.

YESILLER, N.; HANSON, J. L.. **Analysis of Temperatures at a Municipal Solid Waste Landfill.** In: International Waste Management and Landfill Symposium, IX, 2003, Cagliari, Italy. CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy, p. 1-10.

YESILLER, N. ; HANSON, J. L.; OETTLE, N. K. ; LIU, W. L. **Thermal Analysis of Cover Systems in Municipal Solid Waste Landfills.** Journal of Environmental Engineering. ASCE, EUA, 1655-1664, nov. 2008.

ZANATTA, B. G. D. **Comportamento da temperatura da massa de resíduos aterrados em um aterro sanitário.** Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP. Trabalho de conclusão de curso. Rio Claro, 2012, 64 p.