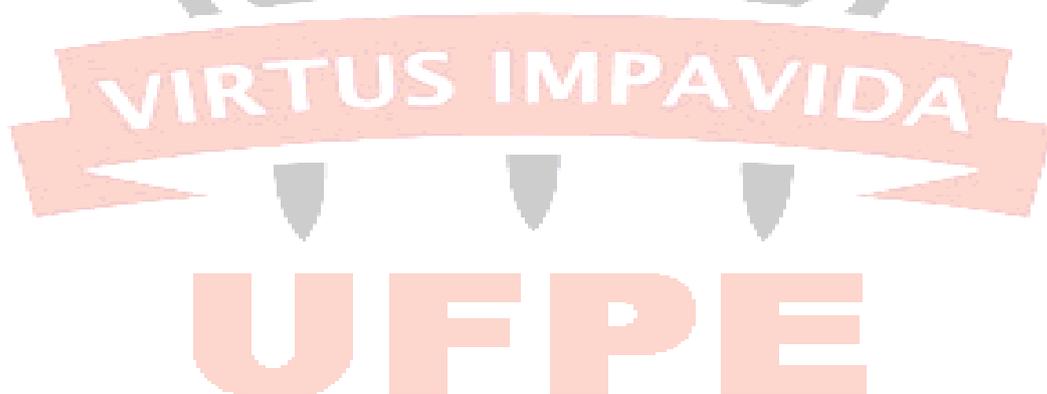


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E EMISSÃO DE METANO EM CAMADAS DE  
COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS**



**Recife-PE  
2011**

**REGIA LUCIA LOPES**

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E EMISSÃO DE METANO EM  
CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá**

**Co- Orientadoras:  
Profa. Dra. Maria Cristina Moreira Alves  
Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano**

Recife-PE  
2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

L864i Lopes, Régia Lúcia.

Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos / Régia Lúcia Lopes. - Recife: O Autor, 2011.

xxiii, 250f., il., figs., tabs., gráfs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Co-Orientadoras: Profa. Dra. Maria Cristina Moreira Alves.

Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

Inclui Referências.

**1. Engenharia Civil. 2. Camada de Cobertura. 3. Camada Metanotrófica. 4. Infiltração. 5. Emissão de Metano. 6. Oxidação de Metano. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Alves, Maria Cristina Moreira (Co-Orientadora). III. Mariano, Maria Odete Holanda (Co-Orientadora). IV. Título**

624CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-189/2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado \*

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E EMISSÃO DE METANO EM CAMADAS  
DE COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

defendida por

Régia Lúcia Lopes

Considera a candidata APROVADA

Recife, 22 de julho de 2011

---

José Fernando Thomé Jucá – DEC/UFPE  
(orientador)

---

Maria Cristina Moreira Alves – DEC/UFPE  
(co-orientador)

---

Maria Odete Holanda Mariano – CAA/UFPE  
(co-orientador)

---

Fernando Antônio Medeiros Marinho – DEEF/USP  
(examinador externo)

---

Armando Borges de Castilhos Júnior – DESA/UFSC  
(examinador externo)

---

Leonardo José do Nascimento Guimarães – DEC/UFPE  
(examinador interno)

---

Silvio Romero de Melo Ferreira – DEC/UFPE  
(examinador interno)

***“Tudo tem a sua ocasião própria, e há tempo para todo propósito debaixo do céu; Há tempo de nascer, e tempo de morrer; tempo de plantar, e tempo de arrancar o que se plantou. (Eclesiastes 3.1-2).***

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico esse trabalho às minhas amadas filhas Bia, minha amiga e companheira de todas as horas, meu tesouro na terra, e Sarah, “in memoriam”, meu anjo no céu, que me fazem viver o maior amor do mundo, o “amor de mãe.*

*A meu marido Jefferson pelo carinho, companheirismo e apoio incondicional em todos os momentos.*

*A toda minha família pela compreensão dos momentos de ausência, pelo convívio fraterno, e em especial, aos meus pais, Maria e Ponciano, que com simplicidade, retidão e muito amor, doaram toda a vida para os seus filhos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor meu Deus, por tudo na minha vida, por mais essa etapa vencida, por todos os momentos de alegria, de adversidade, incertezas e superação. Enfim, agradeço por permitir que eu viva, a cada dia, Sua infinita bondade e viva segundo o Seu amor.

Às minhas irmãs Rosa e Rosalba pelo apoio e incentivo em todas as fases de minha vida e pela amizade e cumplicidade constantes.

Ao Professor Jucá, pela orientação, ensinamentos e excelente convívio. Agradeço também a oportunidade de oferecer condições para realização dessa pesquisa e pela confiança depositada no meu trabalho. Meu muito obrigado.

Às professoras Cristina e Odete, pelas valiosas contribuições no desenvolvimento dessa pesquisa, incentivo constante, confiança e, em especial, pela amizade.

A Felipe Maciel pelo apoio, críticas e sugestões no trabalho, e pelo profissionalismo que demonstra em todas as suas ações.

A Keyla Beltrão e Tatyane Rodrigues, pela amizade “que não tem preço” nem palavras para definir.

A Humberto e Dantas, amigos de início de caminhada, pelos momentos de descontração, trocas de experiências e grande amizade.

A Cláudia, minha amiga de todas as horas, pelas sugestões, críticas e incentivo constantes.

Ao amigo Ricardo Severo pela amizade fortalecida ao longo da estrada Natal-Recife-Natal, por cumprir sempre o “quadro de horários”, pela descontração, e pelos ensinamentos de vida e profissional aprendidos durante nossas viagens.

A Gerson pelo auxílio nos ensaios de laboratório e ajuda na discussão dos resultados, além de transmitir muita paz de espírito, e a Eduarda Mota e Jean pela amizade demonstrada em todos os momentos.

A grande família GRS, minha gratidão pelo convívio fraterno nesse tempo que estive em Recife, em especial a Eduardo Maia, Alessandra, Cecília, Ingrid, Fabrícia, Suianne, e mais recentemente Kelma, Leda e Magdalena.

Aos bolsistas de Iniciação Científica Fernandes, Jhony e Laís, pelo apoio fundamental nas atividades de campo e laboratório.

Aos funcionários do laboratório de solos da UFPE, em especial a Rose, Brito e Seu Severino pela ajuda na realização dos ensaios e pela amizade em todos os momentos.

Aos funcionários do aterro da Muribeca pelo apoio na realização dos trabalhos de campo: Aduino, Josélia, Ceiza, Carlinhos e Paulo, e a todos que trabalharam no projeto da CHESF: Gustavo, Bruno, Salatiel, Neto e Lindomar e aos vigilantes que estiverem sempre em nossa companhia, também meu muito obrigado.

A CAPES pelo apoio financeiro, e aos amigos do IFRN pelo incentivo nas atividades de pesquisa, disponibilidade para o afastamento, em especial ao Pró-reitor de Pesquisa José Yvan e aos amigos Flávio Gutenberg e André Calado.

Enfim, gostaria de expressar meus profundos agradecimentos a todos àqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, que sempre sonhei em realizar. Como para tudo “tem seu tempo”, hoje é tempo de agradecer.

## RESUMO

A disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários necessita de tecnologias que minimizem os impactos ambientais gerados nessas unidades. A infiltração de águas e as emissões de biogás em aterros sanitários têm como um dos principais elementos de controle a camada de cobertura final. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a infiltração de água e as emissões de  $\text{CH}_4$  em três diferentes camadas de cobertura, instaladas em uma célula experimental de aterro de resíduos sólidos, e analisar a influência da configuração construtiva, das características dos materiais e das variações climáticas nesses processos, e no potencial de oxidação  $\text{CH}_4$ . A metodologia compreendeu ensaios de laboratório para caracterização dos materiais, investigação em campo, com medição de infiltração, temperatura e umidade em profundidade das camadas de cobertura e medição de emissão de biogás na superfície da célula. A estimativa de eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  foi feita com base na variação da relação  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  em perfil. Os resultados da pesquisa permitiram concluir que o comportamento em relação ao fluxo de líquidos e gases em cada camada de cobertura está diretamente relacionado às características construtivas e as variações climáticas, devido à influência dessas variáveis nas condições de saturação do solo. As camadas do tipo metanotrófica e barreira capilar apresentaram maior taxa de infiltração do que a camada convencional, e com relação às emissões de  $\text{CH}_4$ , essas camadas apresentaram emissões seis vezes inferiores às da camada convencional. A camada metanotrófica apresentou uma eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  três vezes superior à camada convencional e duas vezes superior à barreira capilar. O teor de matéria orgânica, pH, temperatura do solo e o conteúdo volumétrico de ar foram os parâmetros que mais se relacionaram com as maiores eficiências de oxidação  $\text{CH}_4$ . A vegetação se mostrou um fator decisivo para proteção da camada de cobertura, retendo umidade, aumentando a eficiência de oxidação e reduzindo a emissão de  $\text{CH}_4$ .

**Palavras-chave:** camada de cobertura; camada metanotrófica; infiltração; emissão de metano; oxidação de metano.

## ABSTRACT

The disposal of solid waste in landfills requires technologies that minimize environmental impacts generated in these units. The final cover layer is the main element of control of water infiltration and biogas emissions from landfills. The aim of this study was to evaluate the infiltration of water and CH<sub>4</sub> emissions in three different covers layers installed in an experimental cell of municipal solid waste (MSW), and analyze the influence of the constructive setting, the characteristics of materials and climate variations in these processes and in the potential of CH<sub>4</sub> oxidation. Laboratory and field tests were conducted to investigate the liquids and gas flow, with measurement of infiltration, temperature, humidity in-depth, and emission of biogas from the landfill surface. The estimation of CH<sub>4</sub> oxidation efficiency was based on the variation in the relationship CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> profile. The survey results concluded that the behavior in relation to the flow of liquids and gases in each cover layer is directly related to building characteristics and climatic variations, due to the influence of these variables in the conditions of soil saturation. The methanotrophic layer and capillary barrier presented a higher infiltration rate than the monolithic layer, and the superficial emissions of CH<sub>4</sub> in these layers were six times lower than in the monolithic layer. The CH<sub>4</sub> oxidation efficiency in methanotrophic layer was three times higher than the monolithic layer and two times higher than the capillary barrier. The organic matter content, pH, temperature and high air-filled porosity were the parameters that best correlated with the highest efficiencies CH<sub>4</sub> oxidation. The vegetation played a decisive factor in protecting the cover layer, retaining moisture, improving oxidation and reducing superficial CH<sub>4</sub> emission.

**Key-words:** cover layer; methanotrophic layer; water and biogas flow; capillary barrier; methane emission; methane oxidation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Balanço Hídrico em um aterro sanitário (Adaptado de QIAN <i>et al.</i> , 2002) .....	8
Figura 2: Produção de metano e recuperação ao longo da vida do aterro (Adaptado de HUBER-HUMER <i>et al.</i> , 2008).....	12
Figura 3: Sistemas de cobertura de acordo com a EPA, para (a) aterros de resíduos sólidos urbanos e (b) aterros de resíduos perigosos e de baixo nível de radioatividade (Adaptado de NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2007) .....	14
Figura 4: Lisímetro e instrumentação utilizada em Albrigh <i>et al.</i> (2006) .....	17
Figura 5: Balanço Hídrico da camada convencional do Aterro de Albany (EUA) (ALBRIGHT <i>et al.</i> , 2004).....	18
Figura 6: Esquema conceitual de biocobertura (Adaptado de HUBER-HUMER <i>et al.</i> , 2008).....	24
Figura 7: Influência do teor de umidade na taxa de oxidação do CH <sub>4</sub> (Adaptado de SCHEUTZ e KJELDEN, 2004) .....	30
Figura 8: Teor de umidade na biocobertura e em um solo controle (STERN <i>et al.</i> , 2007) .....	30
Figura 9: Influência da temperatura na taxas de oxidação de CH <sub>4</sub> e de hidroclorofluorcarbono (SCHEUTZ e KJELDEN, 2004).....	32
Figura 10: Presença de micro-organismo e matéria orgânica (COT) (VISVANATHAN <i>et al.</i> 1999).....	33
Figura 11: Percentual de oxidação em função do material da cobertura (STERN <i>et al.</i> , 2007)..	34
Figura 12: Presença de micro-organismos metanotróficos e pH em profundidade (JUGNIA <i>et al.</i> , 2008).....	35
Figura 13: Balanço Hídrico na Camada de Cobertura .....	37
Figura 14: Taxa de infiltração e capacidade de infiltração (SILVEIRA <i>et al.</i> , 2000 citado por BRANDÃO <i>et al.</i> , 2006) .....	38
Figura 15: Balanço Hídrico em uma camada de cobertura (a) camada convencional (b) cobertura evapotranspirativa (BOSCOV, 2008) .....	39
Figura 16: Camadas evapotranspirativas (BENSON e KHIRE, 1995) .....	40
Figura 17: Perfil de uma Barreira Capilar (ZORNBERG e McCARTNEY, 2007).....	41
Figura 18: Barreira Capilar (KHIRE <i>et al.</i> , 1999 citado por Qian <i>et al.</i> 2002).....	42
Figura 19: Esquema de uma Barreira Capilar com desvio lateral (MORRIS e STORTMONT, 1999) .....	43
Figura 20: Determinação da capacidade de armazenamento através da curva característica (ABICHOU <i>et al.</i> , 2003).....	45

Figura 21: Perfis das camadas alternativas avaliadas por Albright <i>et al.</i> (2004).....	47
Figura 22: Balanço hídrico para o lisímetro de Albany (Geórgia-EUA) com uma camada evapotranspirativa (ALBRIGHT <i>et al.</i> , 2004) .....	48
Figura 23: Balanço hídrico em camada evapotranspirativa no período de dezembro de 2001 a janeiro de 2002 (ALBRIGHT <i>et al.</i> , 2004) .....	49
Figura 24: Experimentos em barreiras capilares (VIEIRA, 2005) .....	50
Figura 25: Balanço hídrico da Barreira capilar (MELCHIOR <i>et al.</i> , 2010) .....	51
Figura 26: Planta Experimental Barreira (BERGER <i>et al.</i> 2005).....	52
Figura 27: Balanço de metano e dióxido de carbono em aterros de RSU (SCHEUTZ <i>et al.</i> , 2009 e IPCC, 2007) .....	54
Figura 28: Biocoberturas (RONCATO, 2009).....	61
Figura 29: Principais parâmetros da curva de retenção (Adaptado de FREDLUND e XING, 1994).....	67
Figura 30: Coeficiente de permeabilidade ao ar (Ka) e a água (Kw) em função da saturação (WYCKHOFF e BOTSET, 1936 citado em JUCÁ, 2009).....	72
Figura 31: Período de Investigação .....	75
Figura 32: Localização do Aterro Controlado da Muribeca (PE) (RODRIGUES, 2009) .....	76
Figura 33: Localização da célula experimental (Foto: Acervo EMLURB em abril/2009) .....	77
Figura 34: Precipitação e temperatura mensal em Recife/PE (média da série histórica de 61-90) Fonte: <a href="http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento_brasil.shtml">http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento_brasil.shtml</a> . Acesso em: 20 ago 2010 .....	78
Figura 35: Excedente hídrico e Deficiência hídrica para Recife/PE (Dados CPTEC de 2001 a 2008).....	79
Figura 36: (a) colocação de pedras rachinha e geotêxtil na base da barreira capilar (b) compactação da camada de solo na barreira capilar (c) regularização para colocação da camada metanotrófica acima do solo compactado (d) compactação da mistura de solo e composto.....	82
Figura 37: Divisões das camadas de cobertura experimentais.....	83
Figura 38: Perfil típico das camadas de coberturas .....	83
Figura 39: Material utilizado no infiltrômetro da camada metanotrófica (a) composto <i>in natura</i> (b) Mistura de solo e composto MET01 em campo (c) e (d) amostras da MET01 e MET02 para análise em laboratório.....	86
Figura 40: Coleta de amostras para ensaios de curva característica (a) posicionamento do anel, (b) anel metálico cravado na camada convencional (c) e (d) anéis cravados nas camadas MET01 e MET02.....	88

Figura 41: Preparação dos corpos de prova para ensaio de curva de retenção: (a) pedras porosas para saturação por percolação (b) e (c) regularização do corpo de prova (d) corpo de prova MET01 (e) colocação dos corpos de prova para saturação por meio de percolação (f) saturação dos corpos de prova .....	90
Figura 42: Etapas do ensaio de curva de retenção: (a) pesagem inicial do corpo de prova (b) colocação do papel filtro (c) envolvimento com filme plástico (d) envolvimento com papel alumínio e colocação em caixa térmica durante 7 dias (e) pesagem do papel filtro (f) colocação do papel filtro em cápsulas para secagem e determinação de umidade .....	91
Figura 43: Coleta de amostras para ensaio de permeabilidade (a) Limpeza do terreno (b) cravação (c) e (d) amostra da camada convencional (e) e (f) amostra da camada MET01 (g) e (h) amostra da camada MET02 .....	92
Figura 44: Preparação do corpo de prova para ensaio de permeabilidade (a) amostra acondicionada (b) retirada do corpo de prova do molde (c) corpo de prova da camada convencional (d) medidas do corpo de prova .....	93
Figura 45: Ensaio de permeabilidade à água: (a) montagem do corpo de prova (b) colocação de membrana (c) colocação de corpo de prova na célula (d) entrada de água para aplicação de pressão confinante (e) realização do ensaio (f) corpo de prova após ensaio .....	95
Figura 46: Ensaio de permeabilidade ao ar com amostra CONV .....	97
Figura 47: Amostras saturando para determinação da capacidade de campo.....	98
Figura 48: Perfil do infiltrômetro instalado na camada metanotrófica (MET01) .....	99
Figura 49: Perfil do infiltrômetro instalado na barreira capilar (BAC) .....	99
Figura 50: Perfil do infiltrômetro instalado na camada convencional (CONV) .....	100
Figura 51: Detalhes do infiltrômetro instalado na barreira capilar (a) tela na base (b) base para captação de água em formato de pirâmide invertida (c) vista lateral (d) vista superior .....	100
Figura 52: Detalhe esquemático do infiltrômetro instalado .....	101
Figura 53: Localização dos infiltrômetros na célula experimental.....	102
Figura 54: Instalação do infiltrômetro da camada metanotrófica (a) fixação da base (b) compactação ao redor da base (c) compactação da camada inferior (d) mistura de solo e composto (50%) (e) compactação da camada superior (f) conclusão da instalação .....	103
Figura 55: Instalação do infiltrômetro da barreira capilar (a) colocação do geotêxtil (b) bloco capilar com pedra rachinha (c) preenchimento e compactação interna (d) e (e) compactação da camada superior (f) camada finalizada .....	104
Figura 56: Instalação do infiltrômetro da camada convencional (a) colocação de geotêxtil (b) compactação (c) compactação dos 20 cm finais (d) infiltrômetro instalado e camada reconstituída .....	105
Figura 57: Medição de água infiltrada (a) tubulação de saída (b) medição com proveta.....	106

Figura 58: Instrumentação para medidas de umidade e temperatura (a) conector tipo “k” (b) sensor de umidade e temperatura (c) escavação para instalação (d) recompactação da camada de cobertura (e) sensores inseridos no solo (f) testes de medição de umidade.....	107
Figura 59: Curva de calibração dos sensores de umidade volumétrica EC-5 .....	108
Figura 60: (a) Termômetro e (b) medidor de umidade.....	109
Figura 61: Instrumentação para medidas de concentração de biogás em profundidade (a) colocação de brita e tela na base do CAP (b) conexão de bico de latão e mangueira (c) colocação do conjunto de CAP e mangueira no solo (d) teste com medição de concentração (e) DMPC instalados na camada convencional (f) DMPC instalados na camada metanotrófica .....	110
Figura 62: Localização da instrumentação para medidas de concentração e pressão em profundidade.....	111
Figura 63: Perfil esquemático da instrumentação para medidas de temperatura, umidade e concentração de biogás em profundidade .....	112
Figura 64: Equipamentos utilizados nos ensaios de câmara de fluxo.....	113
Figura 65: Determinação do fluxo de gases a partir de ensaios de câmara de fluxo .....	115
Figura 66: Coleta de amostra pra determinação de umidade e peso específico (a) retirada de anel da camada convencional (b), (c) e (d) retirada de anel da camada metanotrófica .....	116
Figura 67: Localização dos ensaios de fluxo realizados entre setembro de 2008 a fevereiro de 2009 .....	117
Figura 68: Localização dos ensaios de fluxo realizados entre março de 2009 a agosto de 2009 .....	118
Figura 69: Localização dos ensaios de fluxo realizados entre setembro de 2009 a fevereiro de 2010 .....	118
Figura 70: Detalhe das caixas de fluxo (a) vista geral (b) colocação de medidores de concentração em profundidade (c) instrumentação para medidas de temperatura e umidade (d) ensaios de determinação de taxa de respiração de CO <sub>2</sub> no substrato.....	121
Figura 71: Precipitação mensal e média mensal da série histórica (1961-2010) .....	127
Figura 72: Precipitação e Evapotranspiração Potencial .....	127
Figura 73: Balanço Hídrico no período monitorado.....	128
Figura 74: Variações de pressão e temperatura entre setembro/08 a dezembro/10.....	129
Figura 75: Curva granulométrica das camadas de cobertura da célula experimental, do solo usado no infiltrômetro e do composto.....	130
Figura 76: Curva de retenção de água (Umidade Volumétrica x Sucção Matricial) .....	135
Figura 77: Curva de retenção de água (Umidade Gravimétrica x Sucção Matricial) .....	135

Figura 78: Relação de Capacidade diferencial de umidade com as características do solo .....	136
Figura 79: Variação do Grau de Saturação com a sucção matricial do solo.....	137
Figura 80: Curvas de retenção de água ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980) .....	139
Figura 81: Curva teórica de Permeabilidade ao ar x grau de saturação.....	142
Figura 82: Variação do teor de umidade no perfil MET01 .....	145
Figura 83: Umidade volumétrica em profundidade em período seco e chuvoso no perfil MET01 .....	146
Figura 84: Teor de umidade a 0,20 m de profundidade nos perfis MET01 e MET02 .....	147
Figura 85: Presença de vegetação na camada de cobertura MET01 .....	148
Figura 86: Fissuras e presença de vegetação na camada de cobertura MET02 .....	149
Figura 87: Precipitação e infiltração no infiltrômetro da camada metanotrófica MET01 .....	150
Figura 88: Balanço hídrico da camada metanotrófica MET01 no período de junho de 2009 a dezembro de 2010 .....	152
Figura 89: Precipitação diária e variação de altura de água armazenada no perfil MET01 .....	153
Figura 90: Variação de umidade no perfil BAC01 (sem vegetação).....	154
Figura 91: Umidade volumétrica em profundidade em período seco e chuvoso no perfil BAC01 .....	155
Figura 92: Presença de vegetação na camada de cobertura tipo barreira capilar .....	156
Figura 93: Teor de umidade a 0,20 m de profundidade nos perfis BAC01 e BAC02.....	157
Figura 94: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da Barreira Capilar (BAC01) .....	158
Figura 95: Balanço hídrico no perfil BAC01, no período de jun/09 a dez/10.....	160
Figura 96: Precipitação diária e variação de volume armazenado no perfil BAC01 .....	161
Figura 97: Variação de umidade no perfil CONV01 sem vegetação .....	162
Figura 98: Umidade volumétrica em profundidade em período seco e período chuvoso no perfil CONV01 .....	163
Figura 99: Fissuras superficiais e ausência de vegetação na camada convencional.....	164
Figura 100: Teor de umidade a 40 cm de profundidade em perfil CONV01 e CONV02 .....	165
Figura 101: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da camada convencional .....	166
Figura 102: Balanço hídrico do perfil CONV01 no período de jun/09 a dez/10 .....	168
Figura 103: Precipitação diária e variação de volume armazenado no perfil CONV01 .....	169

Figura 104: Precipitação e Infiltração acumulada.....	170
Figura 105: Distribuição da taxa mensal de infiltração normalizada pela espessura, em cada camada de cobertura.....	172
Figura 106: Precipitação mensal e infiltração mensal normalizada pela espessura.....	173
Figura 107: Variação de permeabilidade efetiva em função do grau de saturação médio da camada de cobertura.....	174
Figura 108: Saturação média e indicação de saturação para permeabilidade máxima e mínima (a) MET01 (b) BAC e (c) CONV.....	174
Figura 109: Infiltração diária em função de umidade volumétrica para precipitação acima de 10 mm/dia.....	176
Figura 110: Aspecto do infiltrômetro da barreira capilar quando removido para conserto.....	177
Figura 111: Precipitação e variação de altura de lixiviado em piezômetros localizados nas camadas de cobertura.....	178
Figura 112: Precipitação e emissões de CH <sub>4</sub> na MET01 e MET02.....	182
Figura 113: Fissuras na camada MET02 em 04.12.2008 (primeiro período seco).....	183
Figura 114: Vegetação na camada MET01 e MET02 em 28.04.2009.....	184
Figura 115: Aspectos das camadas MET01 e MET02 e ensaio EP77 (29.10.09).....	186
Figura 116: Camada metanotrófica em 28.01.2010.....	187
Figura 117: Variação de Emissão de CH <sub>4</sub> e permeabilidade ao ar (teórica) com o grau de saturação na camada MET01.....	187
Figura 118: Variação de Emissão de CH <sub>4</sub> e permeabilidade ao ar (teórica) com o grau de saturação na camada MET02.....	188
Figura 119: Variação de grau de saturação, grau de compactação, concentração de CH <sub>4</sub> na base e gradiente de pressão com as emissões de CH <sub>4</sub> nas camadas MET01 e MET02.....	190
Figura 120: Presença de vegetação na barreira capilar em diversos períodos.....	191
Figura 121: Precipitação e emissões de CH <sub>4</sub> na BAC.....	194
Figura 122: Perfis de medição de concentração e pressão na barreira capilar (a) sem vegetação (b) com vegetação.....	196
Figura 123: Fatores relacionados com a emissão de CH <sub>4</sub> na barreira capilar.....	198
Figura 124: Camada convencional em períodos secos e presença de fissuras.....	200
Figura 125: Precipitação e emissão de CH <sub>4</sub> na camada convencional.....	200

Figura 126: Variação de emissão de CH <sub>4</sub> e permeabilidade ao ar (teórica) com o grau de saturação na camada CONV, no primeiro período chuvoso .....	204
Figura 127: Área dos perfis para medição de concentração e pressão de biogás instalado na camada convencional (a) sem vegetação (b) com vegetação.....	205
Figura 128: Variação da permeabilidade ao ar (teórica) e da emissão de CH <sub>4</sub> em área com e sem vegetação com o grau de saturação na camada CONV no segundo período seco .....	207
Figura 129: Fatores relacionados com a emissão de CH <sub>4</sub> na CONV no primeiro período seco .....	208
Figura 130: Emissões de CH <sub>4</sub> e variação de Pressão atmosférica e Temperatura ambiente (Tamb) .....	210
Figura 131: Gradiente de pressão medido nos ensaios de campo no período de setembro de 2009 a fevereiro de 2010 .....	212
Figura 132: Emissão de CH <sub>4</sub> por camada de cobertura .....	213
Figura 133: Emissão de CO <sub>2</sub> por camada de cobertura .....	213
Figura 134: Distribuição dos resultados de Emissão de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> por camada de cobertura e período investigado.....	214
Figura 135: Variação de teor médio de matéria orgânica ao longo de 2009 e 2010 .....	220
Figura 136: Dendograma para o gel DGGE obtido com produtos PCR das amostras da cobertura experimental da célula experimental (Purificação, 2009) .....	221
Figura 137: Eficiência média de oxidação de CH <sub>4</sub> acumulada ao longo da profundidade e variação da relação CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> da interface solo/resíduo até a camada superficial nas camadas metanotróficas.....	223
Figura 138: Eficiência média de oxidação de CH <sub>4</sub> acumulada ao longo da profundidade e variação da relação CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> da interface solo/resíduo até a camada superficial na barreira capilar. ....	224
Figura 139: Eficiência média de oxidação de CH <sub>4</sub> acumulada ao longo da profundidade e variação da relação CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> da interface solo/resíduo até a camada superficial na camada convencional.....	225
Figura 140: Eficiência média de oxidação de CH <sub>4</sub> acumulada ao longo da profundidade e variação da relação CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> da interface solo/resíduo até a camada superficial .....	229
Figura 141: Eficiência de oxidação CH <sub>4</sub> em função do conteúdo volumétrico de ar.....	230

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da composição típica de biogás gerado em aterro sanitário .....	10
Tabela 2: Emissões de CH <sub>4</sub> .....	20
Tabela 3: Parâmetros recomendados para testar a adequação de materiais composto para biocoberturas .....	26
Tabela 4: Percolação equivalente a coberturas prescritivas.....	46
Tabela 5: Emissões de CH <sub>4</sub> reportados na literatura em camadas de cobertura .....	56
Tabela 6: Experimentos em laboratório para determinação de taxas de oxidação.....	59
Tabela 7: Características das biocoberturas de campo .....	61
Tabela 8: Determinação de permeabilidade não saturada usando modelos matemáticos.....	68
Tabela 9: Valores de Coeficiente de escoamento superficial (Pruski <i>et al.</i> , 2004) .....	81
Tabela 10: Características do equipamento utilizado para medição de concentração de Biogás .....	111
Tabela 11: Quantidade de ensaios de câmara de fluxo .....	116
Tabela 12: Instrumentação para medida de temperatura e umidade do solo, e concentração de biogás em cada perfil de cobertura experimental .....	120
Tabela 13: Planilha de determinação de % variação de CH <sub>4</sub> da base até superfície .....	123
Tabela 14: Dados climáticos - período de set/08 a dez/10 .....	126
Tabela 15: Caracterização dos materiais utilizados em cada tipo de camada de cobertura .....	131
Tabela 16: Análise físico-química do material da camada metanotrófica.....	133
Tabela 17: Parâmetros de ajustes gerados através do modelo de van Genuchten (1980) para as curvas de retenção de água.....	140
Tabela 18: Ponto de entrada generalizada de ar estimado nos ensaio de sucção e de permeabilidade .....	143
Tabela 19: umidade de capacidade de campo .....	144
Tabela 20: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da MET01 .....	150
Tabela 21: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da BAC .....	158
Tabela 22: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da CONV .....	166
Tabela 23: Infiltração mensal normalizada pela espessura da camada .....	171

Tabela 24: Variação de condutividade hidráulica do primeiro para o segundo período chuvoso .....	175
Tabela 25: Taxa de Infiltração em quatro períodos monitorados .....	176
Tabela 26: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica – Camada MET01 ..	180
Tabela 27: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica - Camada MET02 ...	181
Tabela 28: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica – Barreira Capilar (BAC) .....	192
Tabela 29: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica na camada convencional (CONV) .....	201
Tabela 30: Fluxos de metano e gás carbônico normalizado pela espessura (com média) .....	215
Tabela 31: Emissão superficial e fatores de influência no fluxo .....	217
Tabela 32: Concentração de biogás medida em caixa de fluxo .....	218
Tabela 33: Características dos materiais .....	219
Tabela 34: Eficiência de oxidação de CH <sub>4</sub> no período de set/09 a mar/10. ....	222

## LISTA DE ABREVIações, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BAC	Barreira capilar
C/N	Relação carbono nitrogênio
CC	Capacidade de campo
CH	Argila de alta plasticidade
CH <sub>4</sub>	Metano
CH <sub>4in</sub>	Concentração de metano na entrada
CH <sub>4out</sub>	Concentração de metano na saída
CL	Argila de baixa plasticidade
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
CONV	Camada convencional
COT	Carbono Orgânico Total
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRE	Certificado de Redução de Emissões
CTRS	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos
DGGE	Eletroforese em gel de gradiente desnaturante
DM	Matéria seca
DMPC	Dispositivo de medição de pressão e concentração
DNA	Acido desorixibonucleico
DV	Dreno vertical de gás
Efox	Eficiência de oxidação
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife
EPA	Agência Ambiental Americana
EPS	Exopolímeros ou polímeros extra-celulares
ES	Escoamento Superficial
ET	Camada Evapotranspirativa
ETP	Evapotranspiração Potencial
EUA	Estados Unidos da América
GCL	Camadas de argila com geossintéticos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRS	Grupo de Resíduos Sólidos
H <sub>2</sub> O	Água
HCFCs	Hidroclorofluorcarbonos
HELP	Hydrologic Evaluation of Landfill Performance

I	Índice mensal de calor
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INF	Infiltrômetro
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de plasticidade
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
$K_{ar}$	Permeabilidade ao ar
$K_{int}$	Permeabilidade intrínseca
$K_{sat}$	Permeabilidade saturada
$K_w$	Permeabilidade à água
LABFERT	Laboratório de Fertilidade do Solo e Consultoria & Projetos Ltda.
LEMM	Laboratório da Ecologia Molecular Microbiana
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MBT	Tratamento Mecânico Biológico
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MET	Camada metanotrófica
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MO	Matéria Orgânica
NBR	Norma Brasileira
$NH_4^+$	Íon amônia
$(NH_4)_2SO_4$	Sulfato de amônia
$NH_4Cl$	Cloreto de amônia
NMOC	Compostos orgânicos não metano
$O_2$	Oxigênio
P	Precipitação
PCR	Reação de cadeia pela polimerase
PE	Pernambuco
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PERC	Percolado ou líquido infiltrado
PET	Evapotranspiração Potencial
pH	Potencial hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
$P_{méd}$	Pressão atmosférica média
PVC	Cloreto de polivinila
PZ	Piezômetro
Q	Drenagem Lateral da Cobertura

R	Escoamento Superficial ou <i>Run off</i>
$R^2$	Coefficiente de correlação
RMN	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Grau de saturação
SC	Areia argilosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
$T_{méd}$	Temperatura média
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNSAT-H	Unsaturated Soil Water and Heat Flow Model
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VADOSE/W	Vadose Zone Modeling
$V_{máx}$	Taxa de oxidação máxima
Wcc	Umidade de capacidade de campo
$\Delta C$	Gradiente de concentração
$\Delta G^o$	Gradiente de calor
$\Delta P$	Gradiente de Pressão
$\Delta U$	Armazenamento de umidade no solo
$\Delta\theta / \Delta\psi$	Capacidade volumétrica de retenção de água
$\theta$	Umidade volumétrica
$\theta_a$	Conteúdo volumétrico de ar
$\theta_r$	Teor de umidade volumétrico residual
$\theta_s$	Teor de umidade volumétrico de saturação
$\psi_b$	Valor de entrada de ar

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SIMBOLOS.....	xviii
CAPITULO I - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	5
CAPITULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE LIXIVIADOS.....	7
2.2 GERAÇÃO E EMISSÕES DE BIOGÁS .....	10
2.3 CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE RSU .....	13
2.3.1 Camadas de cobertura convencionais.....	15
2.3.2 Camadas de cobertura alternativas.....	21
2.3.3 Emissões de CH <sub>4</sub> em aterros de RSU .....	53
2.3.4 Determinação de taxas de oxidação de CH <sub>4</sub> em camadas de cobertura.....	58
2.4 FLUXO EM MEIO POROSO.....	65
2.4.1 Fluxo de água .....	65
2.4.2 Fluxo de gás.....	69
2.4.3 Fatores que influenciam a permeabilidade do solo .....	71
CAPITULO III – MATERIAIS E MÉTODOS .....	74
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	76
3.2 DADOS CLIMATOLÓGICOS.....	77
3.3 DESCRIÇÃO DA COBERTURA DA CÉLULA EXPERIMENTAL .....	81
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	84
3.4.1 Caracterização do solo da área de estudo de infiltração.....	85
3.4.2 Caracterização do composto e da mistura de solo e composto .....	86
3.4.3 Curva de Retenção de água dos solos.....	87
3.4.4 Ensaio de Permeabilidade.....	91
3.4.5 Umidade de Capacidade de Campo .....	97

3.5 INSTRUMENTAÇÃO DAS CAMADAS DE COBERTURAS .....	98
3.5.1 Medição de Infiltração.....	98
3.5.2 Medição de temperatura e umidade do solo.....	106
3.5.3 Medição de Pressão e Concentração de biogás.....	109
3.6 MEDIÇÃO DE FLUXO DE BIOGÁS .....	113
3.7 ESTIMATIVA DE OXIDAÇÃO DE METANO.....	119
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	125
4.1 INTRODUÇÃO .....	125
4.2 CONDICIONANTES CLIMATOLÓGICOS.....	125
4.2.1 Precipitação e Evapotranspiração Potencial .....	126
4.2.2 Temperatura e Pressão Atmosférica.....	129
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA COBERTURA.....	130
4.3.1 Características geotécnicas.....	130
4.3.2 Características físico-químicas .....	133
4.3.3 Curva de retenção de água .....	134
4.3.4 Permeabilidade .....	140
4.3.5 Umidade de Capacidade de campo .....	144
4.4 INFILTRAÇÃO NA CAMADA DE COBERTURA .....	145
4.4.1 Camada Metanotrófica (MET01).....	145
4.4.2 Barreira Capilar (BAC).....	154
4.4.3 Camada Convencional (CONV) .....	162
4.4.4 Desempenho das camadas de cobertura com relação à infiltração .....	170
4.4.5 Permeabilidade em função da saturação .....	173
4.4.6 Integridade das camadas de cobertura no período monitorado .....	175
4.4.7 Influência da infiltração no nível de lixiviados .....	177
4.5 EMISSÕES DE BIOGÁS .....	179
4.5.1 Emissões de biogás na camada metanotrófica (MET).....	179
4.5.2 Emissões de biogás na barreira capilar (BAC).....	191
4.5.3 Emissões de biogás na camada convencional (CONV) .....	199
4.5.4 Influência da variação de pressão atmosférica e temperatura nas emissões de CH <sub>4</sub> .....	209
4.5.5 Análise das taxas de fluxo de biogás nas camadas de cobertura da célula experimental.....	212

4.6 AVALIAÇÃO DE OXIDAÇÃO DE CH <sub>4</sub> .....	217
4.6.1 Caracterização dos materiais .....	218
4.6.2 Eficiência de oxidação .....	221
4.6.3 Fatores de influência na oxidação de CH <sub>4</sub> .....	228
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	231
REFERENCIAS .....	238

## **CAPITULO I - INTRODUÇÃO**

---

### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários vem crescendo no Brasil nas últimas décadas. Os esforços dos governos federal, estadual e municipal na construção de novos aterros sanitários e transformação e/ou recuperação de lixões em aterros controlados são observados, em grande parte, nas grandes cidades, onde se tem uma maior quantidade de resíduos gerados.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada em 2008, revelou que os vazadouros a céu aberto, conhecidos como “lixões”, ainda persistem em 50,2% dos municípios, causando uma contaminação difusa em todo território nacional. Por outro lado as unidades de aterros sanitários, tem se expandido desde o ano 2000 de 17,7% para 27,7% como solução para tratamento e destino final dos municípios brasileiros (IBGE, 2010). A pesquisa mostra ainda que, em municípios de até 50 mil habitantes, o destino final em aterros sanitários tem apresentado índices aproximados da média nacional.

Mais recentemente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº. 12.305/10 regulamentada pelo Decreto nº 7.404/10) determinou que a gestão dos resíduos sólidos é uma responsabilidade de todos e proibiu o de lançamento de resíduos em lixões, com prazo de até 4 anos para erradicação dessas unidades em todo território nacional. Desta forma, todas as municipalidades deverão trabalhar no sentido de elaborar seus planos de gestão de resíduos de forma a encontrar solução, tanto ambientalmente, como social e economicamente viáveis, alcançando assim um novo marco para a gestão de resíduos sólidos no Brasil (BRASIL, 2010).

Do ponto de vista técnico, a NBR 8.419/92 define aterro sanitário de RSU como uma “obra de engenharia, onde a disposição final no solo não cause danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando assim seus impactos ambientais” (ABNT, 1992). Nessas unidades se faz necessário um monitoramento ambiental e geotécnico, tanto durante a sua operação quanto após o encerramento das atividades, para garantir a preservação do meio ambiente, a salubridade da população do entorno e a segurança da obra, bem como a estabilidade do maciço e a integridade dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases (van ELK, 2007). Dessa forma, o monitoramento

adequado dos aterros sanitários permite que seja atendido o requisito mais importante dessa instalação que é não poluir ou degradar o meio ambiente.

Os RSU quando lançados nos aterros sanitários, aterros controlados e lixões, geram subprodutos através de processos de biodegradação aeróbia e anaeróbia em forma de líquidos e gases, que precisam ser monitorados e tratados e/ou aproveitados. O lixiviado tem alto poder poluidor devido às características físico-químicas e microbiológicas, e o biogás é classificado como gás de efeito estufa (GEE) contribuindo para o aquecimento global.

A geração de lixiviado em aterros depende de vários fatores sendo os mais importantes: o líquido gerado no processo de biodegradação dos resíduos, a umidade inicial dos resíduos quando depositados e a água externa que ingressa no aterro através da infiltração pelas camadas de cobertura. Dependendo da composição dos resíduos aterrados, o lixiviado pode apresentar altas concentrações de matéria orgânica e metais pesados, e os altos custos associados ao seu tratamento justificam a necessidade de se minimizar a geração através da redução de infiltração de águas de chuvas em camadas de cobertura (COSSU, 2010).

Os gases gerados pela biodegradação de resíduos em aterros sanitários são compostos basicamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), sendo esses os principais gases responsáveis pelo aquecimento global, denominados GEE. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) estima que, em um horizonte de mais de 100 anos, o poder de aquecimento do  $\text{CH}_4$  é 21 vezes maior do que o  $\text{CO}_2$ . As emissões globais de biogás em aterros são estimadas pela Agencia de Proteção Ambiental Americana (USEPA) entre 500 a 800  $\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$ . Na Europa e nos Estados Unidos, estima-se que os aterros sanitários sejam responsáveis por 35 a 69  $\text{TgCH}_4\text{/ano}$  de emissões de  $\text{CH}_4$ , constituindo 30% e 24% da produção antropogênica de  $\text{CH}_4$  respectivamente, nessas regiões (IPCC, 2007; USEPA, 2007).

De acordo com o Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, os resíduos sólidos urbanos no Brasil representam aproximadamente 12% das fontes de emissões de  $\text{CH}_4$ , sendo a disposição final responsável por 84% desse valor (van ELK, 2007). Os gases oriundos do processo de degradação dos resíduos em aterros, no Brasil, são geralmente coletados e tratados com a queima simples. O reaproveitamento e a utilização como fonte de energia vêm sendo estimulados, tendo em vista a necessidade de se reduzir os efeitos do lançamento na atmosfera.

A utilização de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) tem sido uma alternativa para garantir aos projetos de aterros sanitários uma operação adequada, utilizando tecnologias que contribuem para a minimização de impactos ambientais. O MDL funciona como instrumento que interage no processo de destinação final adequada de RSU dos municípios, pois a partir do tratamento dos gases gerados, ou de utilização de tecnologias que minimizem as emissões de biogás, os municípios podem quantificar a redução dessas emissões, possibilitando a obtenção e venda de Certificados de Redução da Emissão (CRE) de CH<sub>4</sub>, tornando mais atrativo a implantação e operação de aterros sanitários.

Nesse contexto, é de fundamental importância o estudo de camadas de cobertura que apresentem características construtivas e de materiais, que não impactem significativamente a geração de lixiviados e que promovam a retenção do biogás e ou oxidação do CH<sub>4</sub>, reduzindo assim as emissões para atmosfera, principalmente para os casos onde a exploração do biogás não seja técnica e economicamente viável.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

No Brasil, não existe nenhuma exigência legal quanto ao tipo de material que a camada de cobertura deva ser constituída. A Norma Brasileira NBR 13.896/97 estabelece apenas “a necessidade do projeto e da implantação da cobertura final do aterro, que consiste de um sistema de impermeabilização superior” (ABNT, 1997). Em geral, são utilizadas camadas de coberturas denominadas convencionais ou monolíticas como objetivo de minimizar a infiltração de água no aterro, e que exijam pouca manutenção, e material com coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.

As variações climáticas e ambientais impostas aos materiais de cobertura, ao longo do tempo, influenciam nas taxas de infiltração de águas, bem como nos processos de migração de gases. Isso se deve ao aumento ou diminuição de umidade, que alteram as proporções de água e ar nos vazios do solo e dessa forma a área disponível para que ocorra o fluxo.

Em regiões de clima úmido os altos índices pluviométricos e a diminuição da evapotranspiração, resultam em uma maior infiltração de água através do sistema de

cobertura. Por outro lado, a maior umidade no solo favorece a retenção dos gases, tendo em vista que os vazios, preenchidos por água dificultam o fluxo dos mesmos.

Portanto, faz-se necessário, estudos por períodos prolongados a fim de se estabelecer relações adequadas entre o clima e as propriedades dos solos, de modo a se obter critérios para a escolha dos materiais utilizados nas camadas de cobertura de aterros de RSU, adequando-os à realidade de cada localidade e aos custos de instalação e manutenção, de forma a minimizar os impactos ambientais dos aterros sanitários.

De uma maneira geral, a presente tese avalia as configurações construtivas e os materiais utilizados em diferentes camadas de cobertura e a influência nos processos de infiltração de líquidos e retenção e/ou oxidação de biogás, especificamente o  $\text{CH}_4$ . O estudo foi realizado através do monitoramento de três tipos de camada de cobertura de uma célula experimental, construída para exploração energética de biogás. No âmbito desta pesquisa, procurou-se abordar algumas questões relevantes, tais como:

- Quais os tipos de materiais e configurações de camadas de cobertura utilizadas em aterros de RSU, que podem ser usadas com o enfoque em uma alternativa para redução de emissões de biogás?
- Qual a influência das variações climáticas ao longo do ano, no comportamento do fluxo de líquidos e gases em camadas de cobertura de aterro de RSU?
- Que parcela de  $\text{CH}_4$  pode ser oxidada em camadas de coberturas de aterros de RSU, que utilizam materiais com mistura de solo e composto, em barreiras capilares e em camadas monolíticas convencionais?

### **1.3 OBJETIVOS**

Esta pesquisa foi realizada em uma Célula Experimental localizada no Aterro da Muribeca, situado no município de Jaboatão dos Guararapes-PE, tendo como objetivo geral avaliar o desempenho de três diferentes camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido, quanto à infiltração de líquidos e emissão de  $\text{CH}_4$ .

Os objetivos específicos pesquisados são:

- Avaliar a infiltração de água em cada tipo de camada de cobertura instalada na célula experimental, correlacionando as taxas de infiltração com as características de cada camada e suas variações ao longo de ciclos climáticos;
- Avaliar as emissões de CH<sub>4</sub> nas camadas de cobertura da célula experimental, analisando a influência das características de cada camada de cobertura e suas variações ao longo de ciclos climáticos;
- Analisar as características dos materiais utilizados nas três camadas de cobertura da célula experimental, que influenciaram na retenção e/ou oxidação de CH<sub>4</sub>, incluindo perfis de camadas com e sem vegetação;

Para cumprir os objetivos propostos foram utilizados ensaios de laboratório e investigações em campo. No laboratório foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e físico-química dos materiais, ensaios de compactação, medição de permeabilidade à água, umidade de capacidade de campo e determinação da curva de retenção de água de cada material. Em campo foi instalado um dispositivo para medição de líquido infiltrado (denominado de infiltrômetro) diretamente na interface entre a camada de cobertura e os resíduos, além de instrumentação para medições de temperatura e umidade em três profundidades. Para avaliação das emissões de CH<sub>4</sub> foram realizados ensaios de câmara de fluxo estática em estações secas e chuvosas. Para análise da variação da relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> sugerindo oxidação de CH<sub>4</sub>, foram instalados, em cada camada de cobertura, dispositivos de medição de concentração e pressão de biogás em profundidade, até a interface do solo com resíduo.

#### **1.4 ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese está dividida em cinco capítulos. No Capítulo I, apresenta-se a introdução do tema abordado na pesquisa com apresentação da justificativa e objetivos propostos. O Capítulo II, que contempla uma revisão bibliográfica sobre tópicos da pesquisa, onde são abordados aspectos relacionados com a geração lixiviados e de biogás em aterros de RSU, os tipos de camadas de cobertura comumente utilizadas e as alternativas propostas às camadas convencionais. Ainda são apresentados os aspectos relacionados ao fluxo de gases e líquidos em solos não

saturados, condição que se apresentam as camadas de cobertura. A ênfase deste Capítulo está voltada para o tema específico de camada de cobertura abordando as características e fatores geotécnicos, físico-químicos, microbiológicos que interferem nas emissões de CH<sub>4</sub> e na redução dessas emissões decorrente da oxidação por bactérias metanotróficas, além do enfoque no balanço hídrico da camada de cobertura que decorre das características geotécnicas do solo, do clima local e das condições de projeto.

No Capítulo III são descritas as metodologias utilizadas nessa tese, iniciando-se com a descrição da área de estudo, ou seja, a célula experimental construída no Aterro da Muribeca em Jaboatão dos Guararapes-PE, na qual são desenvolvidas diferentes pesquisas científicas. Também são apresentadas as metodologias dos ensaios de laboratório para caracterização dos materiais utilizados na cobertura e no preenchimento do dispositivo de medição de infiltração, da medição de permeabilidade à água, da determinação da curva de retenção e da umidade de capacidade de campo. Posteriormente é mostrada a instrumentação utilizada para medição das variáveis: temperatura, umidade do solo, concentração e pressão no contato solo/resíduo e os ensaios de campo para medição de infiltração de água e emissões de biogás. Por fim apresenta-se a metodologia para avaliação das variações de concentração ao longo do perfil de cada camada de cobertura, sugerindo atividade de oxidação, baseada nas concentrações em perfis do solo.

No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório e investigações de campo realizadas em cada tipo de cobertura com as suas respectivas discussões, considerando os principais fatores que influenciaram nas taxas de infiltração verificadas no período estudado, nas emissões de biogás e a análise comparativa entre as três camadas de cobertura estudadas.

No Capítulo V são apresentadas as considerações finais, principais conclusões e sugestões para futuras pesquisas na área, seguindo-se das referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa.

## CAPITULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Os aterros sanitários podem ser considerados reatores onde a fração sólida biodegradável se transforma em líquidos e gases que representam fontes potenciais de poluição ambiental, quando não são coletados e/ou tratados adequadamente.

De acordo com Gomes *et al.* (2006) “a degradação de compostos orgânicos e inorgânicos é um fenômeno constituído, essencialmente pela superposição de mecanismos biológicos e físico-químicos que tem a umidade como um dos fatores principais no processo”.

A transformação dos resíduos, com o tempo e em condições ambientais propícias, em gases, líquidos e sólidos inorgânicos e orgânicos relativamente inertes, geram variações significativas no comportamento mecânico dos aterros sanitários (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993; MACHADO *et al.*, 2005).

### 2.1 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE LIXIVIADOS

Os aterros são tipicamente construídos e preenchidos em camadas de resíduos, intercaladas por camadas de solo. O efeito da construção em camadas e da presença de uma cobertura intermediária e final resulta em características de fluxo diferentes no movimento de líquidos e infiltração de água no aterro. De acordo com El-Fadel *et al.* (2002) os lixiviados são formados quando o teor de umidade dos resíduos excede sua capacidade de campo<sup>1</sup>. Segundo Lange e Amaral (2009), o fator determinante na vazão de lixiviados de um aterro sanitário é o volume de águas pluviais infiltradas, enquanto o fator determinante das características físicas, químicas e microbiológicas do lixiviado são as características dos resíduos sólidos aterrados.

O processo de formação do lixiviado em aterros de RSU é influenciado por muitos fatores que podem ser divididos em: (i) fatores que contribuem diretamente com a umidade do aterro (chuva, águas subterrâneas, conteúdo de umidade inicial, recirculação, codisposição de resíduos líquidos e a decomposição do mesmo) e (ii) fatores que afetam o lixiviado ou a distribuição de umidade dentro do aterro (idade do lixo, pré-tratamento, recalque, material utilizado na parede lateral do aterro,

---

<sup>1</sup> Definida como a máxima umidade que é retida em um meio poroso sem produzir percolação.

compactação, permeabilidade, tamanhos das partículas, densidade, vegetação, cobertura, geração e transporte de calor e gás) (EL-FADEL *et al.*, 2002).

Nem toda água que alcança a superfície do aterro se converte em lixiviados, pois parte da água precipitada se perde por escoamento superficial, outra parte da água se perde por evaporação direta e transpiração vegetal (evapotranspiração) e o restante da água se infiltra na cobertura de solo. Uma porção da água ficará retida no solo de cobertura e nos resíduos, sendo essa retenção determinada pela capacidade de campo do solo e dos resíduos (MONTEIRO, 2003). O método pelo qual se determina o fluxo de entrada e de saída de água de um aterro, em um determinado período de tempo, é denominado de balanço hídrico, e está sumarizado na Figura 1.

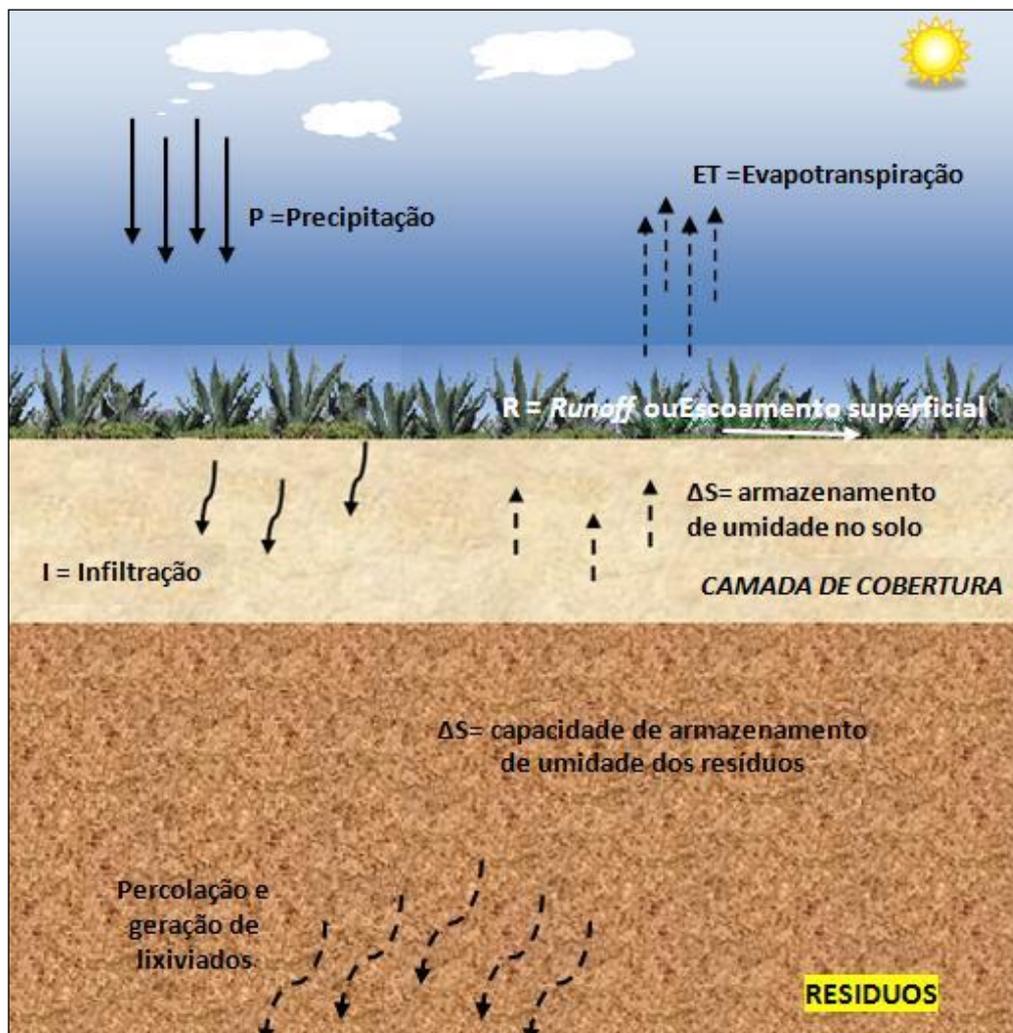


Figura 1: Balanço Hídrico em um aterro sanitário (Adaptado de QIAN *et al.*, 2002)

Geralmente os estudos relacionam qualitativa e quantitativamente a geração de lixiviados com a precipitação, para indiretamente determinar a influência da camada de cobertura nessa geração. Jang *et al.* (2002) utilizaram um modelo computacional para avaliar o balanço hídrico e prever o nível de variação do lixiviado no aterro Kimpo na Korea do Sul, analisando a influência do grau de compactação<sup>2</sup>, tanto da cobertura quanto do resíduo, e da espessura da camada de cobertura. O modelo mostrou que o grau de compactação de camadas de cobertura intermediárias e o grau de compactação do resíduo influenciaram mais no nível de lixiviados do que a espessura das camadas de cobertura.

Lange *et al.* (2006) desenvolveram estudo experimental em campo para identificar possíveis interferências das camadas de cobertura final e intermediária na degradação dos RSU e na geração de lixiviados em aterros, assim como observar seus aspectos técnicos e construtivos e sugerir critérios de projetos para essas camadas. Para isso, foram executadas quatro células com diferentes configurações de camada de cobertura e camada intermediária, e variações nas características geotécnicas. Em relação às camadas de cobertura finais, se constatou nesse estudo, que a utilização de grau de compactação de 100% não se mostrou uma solução tecnicamente viável na minimização de geração de lixiviados, frente a uma compactação de 90%, em virtude de aumento de custos para se atingir um grau de compactação maior. Com relação à qualidade dos lixiviados não foram observadas diferenças nas características em função das propriedades das camadas de cobertura e camadas intermediárias, assim como também não foram verificados efeitos das precipitações sobre a variação dos parâmetros do lixiviado.

Catapreta (2008) utilizou dois tipos de camada de cobertura (barreira capilar e uma camada evapotranspirativa) em um aterro sanitário experimental, construído na área da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) de Belo Horizonte/MG, no entanto não conseguiu separar a influência das características de cada tipo de camada na geração de lixiviado. Os resultados sugerem uma relação direta do regime pluviométrico com a vazão de lixiviado no período monitorado, assim como com o nível de líquidos no interior do aterro. Nesse estudo a camada de cobertura não apresentou eficiência suficiente para reter, ou impedir, a penetração das águas de chuva embora o material empregado tenha características de baixa permeabilidade.

---

<sup>2</sup> Relação entre o peso específico seco máximo medido em campo e o peso específico seco máximo obtido no ensaio de compactação PROCTOR em laboratório

Parte da infiltração foi atribuída à retração do material, antes da implantação da camada de proteção do mesmo, o que ocasionou diversas trincas no topo do aterro, podendo ter contribuído significativamente para o aumento no nível de lixiviados no interior do Aterro Sanitário Experimental.

Como pode ser visto as características de projeto assim como as características geotécnicas das camadas de cobertura, tem influência na geração de lixiviados. A norma brasileira de projeto de aterros sanitários, (ABNT, 1992 p.4), menciona que deve ser prevista uma impermeabilização inferior e/ou superior do aterro sanitário, quando solicitado pelo órgão ambiental e que no caso de ser necessária impermeabilização, deve ser indicado: a) o tipo de impermeabilização adotado; b) os materiais empregados, com suas especificações e características, segundo as correspondentes normas brasileiras.

## 2.2 GERAÇÃO E EMISSÕES DE BIOGÁS

A produção de biogás em aterros de resíduos sólidos tem sido considerada um fator de extrema importância ambiental e econômica, despertando o interesse de diversas áreas do conhecimento (ALVES, 2008).

O biogás de aterros de RSU geralmente é descrito como sendo composto por  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , com menos de 1% de outros componentes gasosos, inclusive gás sulfídrico, mercaptanos (compostos orgânicos que contém enxofre) e quantias de traços de componentes orgânicos não metano (NMOC), incluindo poluentes atmosféricos e componentes orgânicos voláteis. A Tabela 1 apresenta as concentrações dos principais componentes do biogás.

**Tabela 1: Variação da composição típica de biogás gerado em aterro sanitário**

<b>Componentes</b>	<b>Concentração média (%)</b>
Metano ( $\text{CH}_4$ )	30 - 70
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	20-50
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	1 - 5
Oxigênio ( $\text{O}_2$ )	0,1 - 1,0
Amônia ( $\text{NH}_3$ )	0,1 -1,0
Compostos sulfúricos ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0 -0,2
Hidrogênio( $\text{H}_2$ )	0 - 0,2
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ )	0 – 0,2
Outros gases traços	0,01 – 0,06

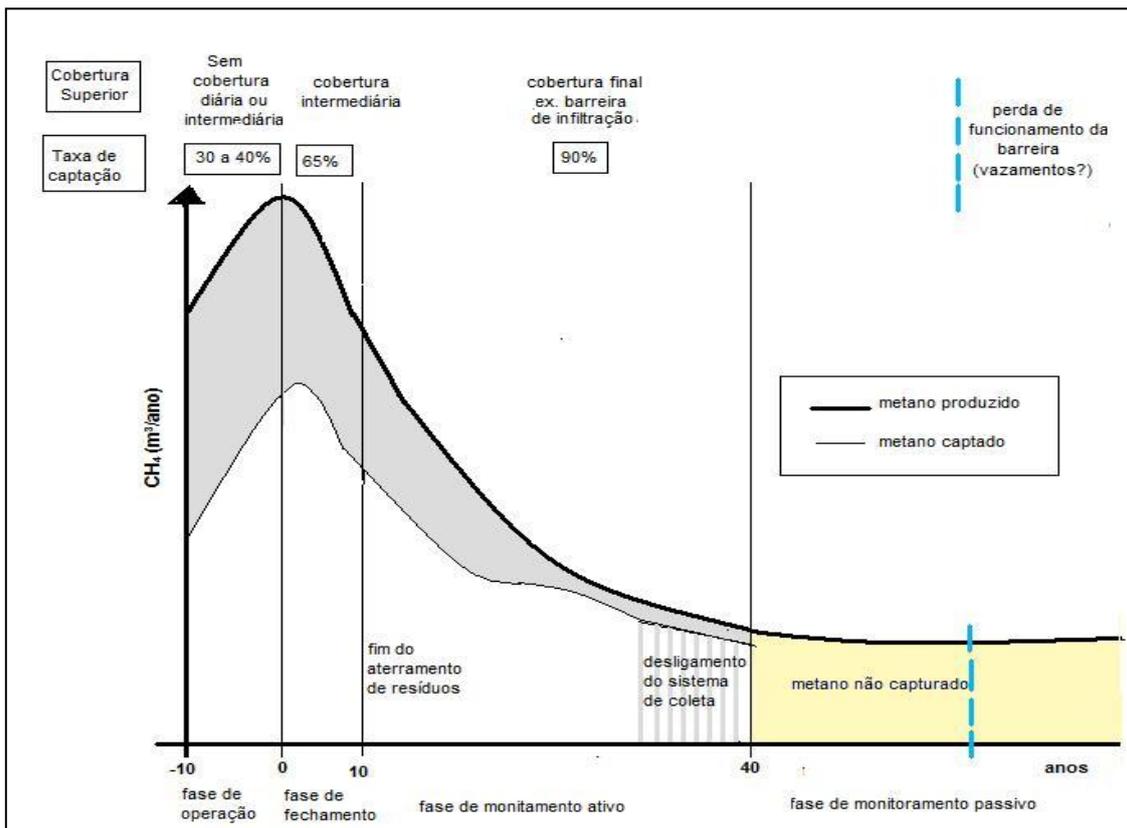
*Fonte: NIKIEMA et al. (2007)*

As variações observadas nas concentrações dos gases de aterro sanitário são atribuídas às diferenças de composição dos resíduos e ao estágio dos processos de decomposição destes. Maciel (2003) descreve os fatores de influência na geração de biogás organizados em quatro grupos: (i) geometria e operação do aterro; (ii) características dos resíduos; (iii) ambiente interno e (iv) ambiente externo.

Com relação à geometria e operação do aterro o sistema de cobertura é um dos fatores que atua reduzindo os efeitos das condições atmosféricas na massa de resíduos. As camadas de cobertura funcionam como elemento de interação entre os resíduos no interior do aterro, e a atmosfera, servindo para minimizar a liberação incontrolada de biogás não captado pelos drenos. Para aterros com aproveitamento energético é essencial que as camadas de cobertura maximizem a captação dos gases, ou seja, os materiais utilizados possuam características de baixa permeabilidade ao biogás, retendo-os o máximo possível, embora não impeçam as trocas ambientais que favoreçam a biodegradabilidade. Para aterros onde não há essa preocupação as camadas de cobertura devem minimizar emissões tendo em vista os impactos ambientais desses gases (GEE) para atmosfera.

De acordo com Huber-Humer *et al.* (2008) os sistemas de extração forçada de biogás podem operar por um tempo inferior a metade do tempo que o aterro gera biogás, pois, a partir de um determinado tempo, torna-se economicamente inviável sua exploração. Além disso, pode haver alterações na degradabilidade dos resíduos por ingresso de oxigênio na massa de resíduos.

A Figura 2 mostra de uma forma simplificada a variação da taxa de captação de CH<sub>4</sub> em um aterro sanitário, com o tempo, em função das características das camadas de cobertura de acordo com Huber-Humer *et al.* (2008).



**Figura 2: Produção de metano e recuperação ao longo da vida do aterro (Adaptado de HUBER-HUMER *et al.*, 2008)**

De um modo geral, observa-se na Figura 2 que, embora haja captação de  $\text{CH}_4$  através de sistemas de drenagem de gases e sistemas de extração forçada, uma boa parte do  $\text{CH}_4$  não é capturada, sendo essa quantidade variável, de acordo com as características das camadas de cobertura. Após a fase ativa de geração de  $\text{CH}_4$ , quando as concentrações caem abaixo de 20% a 35% (v/v) e o fluxo de biogás se situa entre 10 a 15  $\text{m}^3/\text{h}$ , tornam-se inviáveis sistemas de extração forçada de alto custo, sendo a queima em *flare*<sup>3</sup> a destinação final mais comum para o biogás (HUBER-HUMER *et al.*, 2008). Os intervalos de tempo de taxa de geração de  $\text{CH}_4$  são discutíveis em função do clima, do porte do aterro, do tipo de resíduo aterrado, dentre outros fatores.

Assim sendo, é necessária a utilização de camadas de cobertura que tanto aperfeiçoem a captação de biogás, quanto minimizem emissões em sistemas onde a extração forçada não é utilizada.

<sup>3</sup> Costuma-se utilizar o termo *flare* para o equipamento ou chaminé utilizado na destruição do  $\text{CH}_4$ . Normalmente são drens que coletam o biogás e queimam no topo da estrutura.

Pesquisas recentes indicam a utilização de camadas de cobertura denominadas “biocoberturas” como uma alternativa promissora para controle de emissões de CH<sub>4</sub>, desde a fase ativa (onde há produção intensa de biogás e extração para reaproveitamento) até a fase passiva de monitoramento (quando já não se extrai mais o biogás) (HILGER e HUBER-HUMER, 2003; BORJESSON *et al.*, 2004; NIKIEMA *et al.*, 2007; HUBER-HUMER *et al.*, 2008; AIT-BENICHOU *et al.*, 2009; PARK *et al.*, 2009; SCHEUTZ *et al.*, 2009; CABRAL *et al.*, 2010).

Esses sistemas têm uma larga faixa de aplicação, tais como: (i) o uso concomitante com sistemas de coleta de gás capturando as emissões fugitivas; (ii) em aterros antigos onde o pico de geração de CH<sub>4</sub> já foi alcançado; (iii) em pequenos aterros onde é tecnicamente e economicamente inviável a instalação de sistemas de extração forçada de biogás; (iv) em aterros velhos onde se deseja evitar emissões de CH<sub>4</sub> após fechamento; e (v) em algumas situações onde os resíduos aterrados têm baixo tempo para geração potencial de metano (HUBER-HUMER *et al.*, 2008).

### **2.3 CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS DE RSU**

No Brasil, a maioria dos aterros possui cobertura com camada homogênea de solo compactado, em grande parte usando solos argilosos. Esses materiais são geralmente utilizados devido as suas características de baixa permeabilidade à água e ao baixo custo do material, principalmente quando as jazidas se encontram próximas das áreas de aterro (MARIANO, 2008). O sistema de cobertura deve minimizar a infiltração de água no aterro, exigir pouca manutenção, não estar sujeito à erosão, acomodar os assentamentos sem grandes deformações e possuir coeficiente de permeabilidade inferior ao da área do aterro.

Nos EUA, a regulamentação corrente para camadas de cobertura são baseadas no emprego de barreiras que utilizam o princípio de camadas resistivas, isto é, uma camada que tenha baixa condutividade hidráulica saturada. Esse conceito geralmente é alcançado com a utilização de camadas de argila compactada ou camadas de argila com geossintético (GCL) com ou sem geomembrana (ABICHOU *et al.*, 2003).

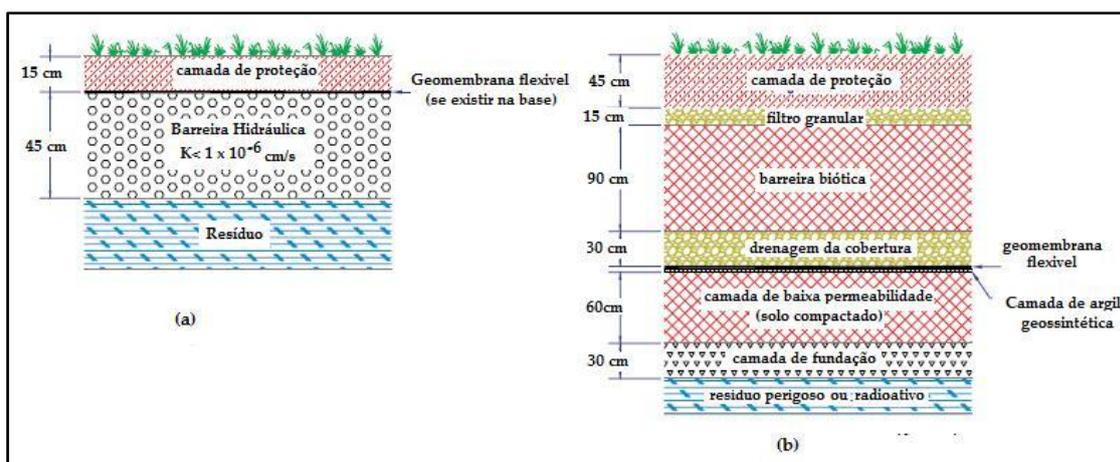
A utilização de todos os componentes numa camada de cobertura final nem sempre é necessária. A camada de drenagem, por exemplo, pode não ser necessária em sistemas de cobertura final em regiões áridas, da mesma forma que a camada de

coleta de gás pode ser exigida para algumas coberturas, mas não para outras, dependendo do fato dos gases produzidos necessitarem ou não de coleta e de gerenciamento mais eficiente.

Para Qian *et al.* (2002) as camadas de cobertura são sistemas que tem por objetivo minimizar a infiltração e a erosão, e para atingir esses objetivos devem:

- ser composta de pelo menos 450 mm de espessura de solo que tenha permeabilidade igual ou menor que a permeabilidade da camada de base ou sub solo presente, ou a permeabilidade não ser maior que  $1,0 \times 10^{-5}$  cm/s;
- ter camada de prevenção de erosão de no mínimo 150 mm de material que seja capaz de sustentar o crescimento de plantas nativas.

Essas prescrições são da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) que classifica os resíduos em subtítulos C (perigosos) e subtítulo D (resíduos não perigosos). Para a National Academy of Sciences (2007), em cobertura de aterros de resíduos não perigosos (subtítulo D) também se exige que a permeabilidade da cobertura final seja menor do que a camada de base ou da formação geológica natural. Esta exigência é geralmente conseguida colocando-se uma geomembrana sobre a camada de solo de baixa permeabilidade, na cobertura de qualquer aterro sanitário. A Figura 3 apresenta um perfil típico de acordo com as prescrições da EPA para (a) aterros de resíduos não perigosos e para (b) aterros de resíduos perigosos ou de baixo nível de radioatividade.



**Figura 3: Sistemas de cobertura de acordo com a EPA, para (a) aterros de resíduos sólidos urbanos e (b) aterros de resíduos perigosos e de baixo nível de radioatividade (Adaptado de NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2007)**

Por outro lado, o uso de geomembrana para cobertura de aterros necessita de cuidados especiais, principalmente, no caso de aterros energéticos. Em geral a geração de biogás é prejudicada pela redução de umidade e de troca de calor com o ambiente externo, visto que esses fatores influenciam na evolução dos processos de biodegradação.

De acordo com a National Academy of Sciences (2007) camadas alternativas aos sistemas de cobertura mínima exigida para aterros de RSU incluem uma camada de 0,30 m de espessura de solo de baixa permeabilidade com condutividade hidráulica saturada inferior a  $10^{-8}$  m/s ou um revestimento de argila com geossintético ou uma geomembrana, utilizados usados em lugar da camada de solo de baixa permeabilidade. Adiciona-se uma camada de drenagem abaixo da camada de proteção, com no mínimo 0,30 m de espessura.

Além dessas alternativas de barreiras resistivas, as camadas evapotranspirativas são utilizadas cada vez mais como alternativas, em locais de clima árido e semiárido, onde o desempenho das camadas de baixa permeabilidade (sistemas de cobertura em solo natural de argila) fica comprometido pela alta evaporação, que provoca o ressecamento do solo e a formação de fissuras (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2007).

As camadas de cobertura têm como objetivo principal prevenir infiltração de água para a massa de resíduos, assim como ser capaz de controlar as emissões de biogás, sendo a permeabilidade um dos principais parâmetros que fornecerá informações a cerca do comportamento da camada de cobertura ao longo do tempo.

Dentre as principais características geotécnicas que pode influenciar na permeabilidade e devem ser observadas na execução das camadas de cobertura, podemos citar: umidade de compactação, estrutura do solo, grau de saturação, sucção do solo e conteúdo volumétrico de ar, dentre outros fatores (LAMBE, 1958 e MITCHELL *et al*, 1965 citado por BOSCOV, 2008; DANIEL, 1990; MACIEL, 2003; VIEIRA, 2005, TEIXEIRA, 2008, MARIANO, 2008).

### **2.3.1 Camadas de cobertura convencionais**

As camadas de coberturas convencionais são utilizadas em aterros de pequeno, médio e grande porte, muitas vezes apenas com a preocupação de efeito

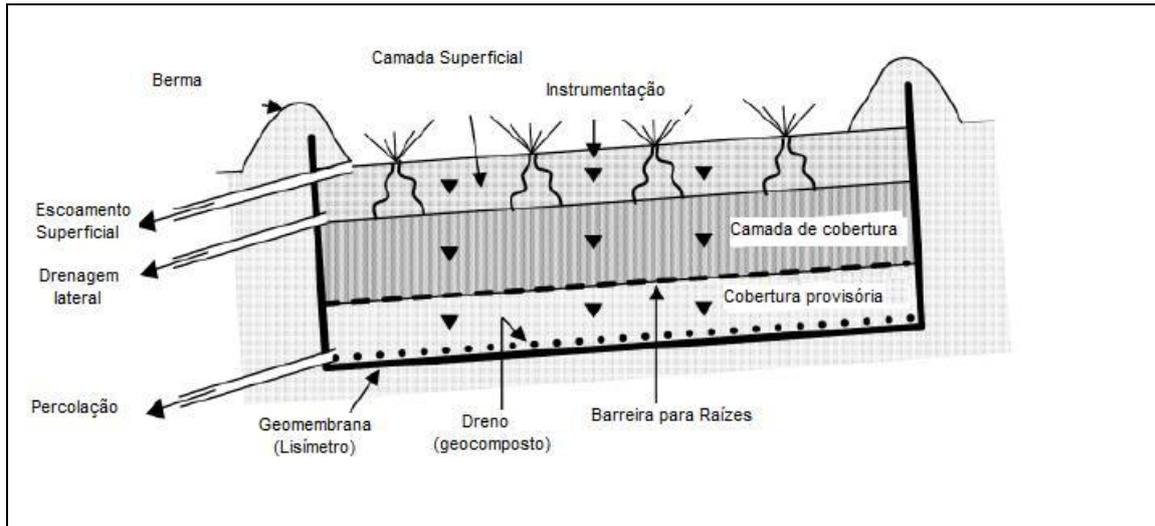
estético de cobertura dos resíduos, controle de odores e de proliferação de vetores desprezando o critério técnico requerido para minimização de infiltração de líquidos ou emissão de gases para atmosfera.

No Brasil, não existe nenhuma exigência legal quanto ao tipo de material que a camada de cobertura deva ser constituída. Muitos aspectos, portanto, devem ser avaliados para se optar por um tipo de camada de cobertura, haja vista os fatores intervenientes no seu desempenho. Cada material ou sistema de cobertura tem seus problemas potenciais, vantagens e desvantagens, portanto, para cada aterro em particular, os materiais devem ser selecionados de modo que atendam da melhor forma as funções requeridas para os quais ele foi proposto, relacionados com as condições de clima local.

O desempenho das camadas de cobertura com relação aos objetivos a que se propõe, pode variar ao longo do tempo, devido a fatores que estão intimamente ligados às características do solo tais como estrutura, índice de vazios, grau de compactação e umidade de compactação, além das variações climáticas tais como precipitação e pressão atmosférica. O monitoramento das camadas de cobertura consiste, portanto, em um fator fundamental para se avaliar a interferência decorrente das variações climáticas locais, na eficiência em termos de infiltração de líquidos e emissão de gases.

Esses fatores têm sido apresentados em pesquisas de desempenho de camadas de cobertura, convencionais com argila compactada com relação à infiltração de líquidos por diversos autores (MELCHIOR, 1997; KHIRE *et al.*, 1997; ALBRIGHT *et al.*, 2006; GEE, 2006; BERGER e MELCHIOR, 2009, MELCHIOR *et al.*, 2010).

Albright *et al.* (2006) conduziram estudos em 3 aterros para avaliar a eficiência com relação a infiltração em camadas de coberturas compactadas, em condições climáticas diferentes (clima quente e úmido, frio e úmido e quente e árido). O estudo foi feito em um período de 2 a 4 anos, em lisímetros de grandes dimensões (10 m x 20 m), como mostrado na Figura 4.



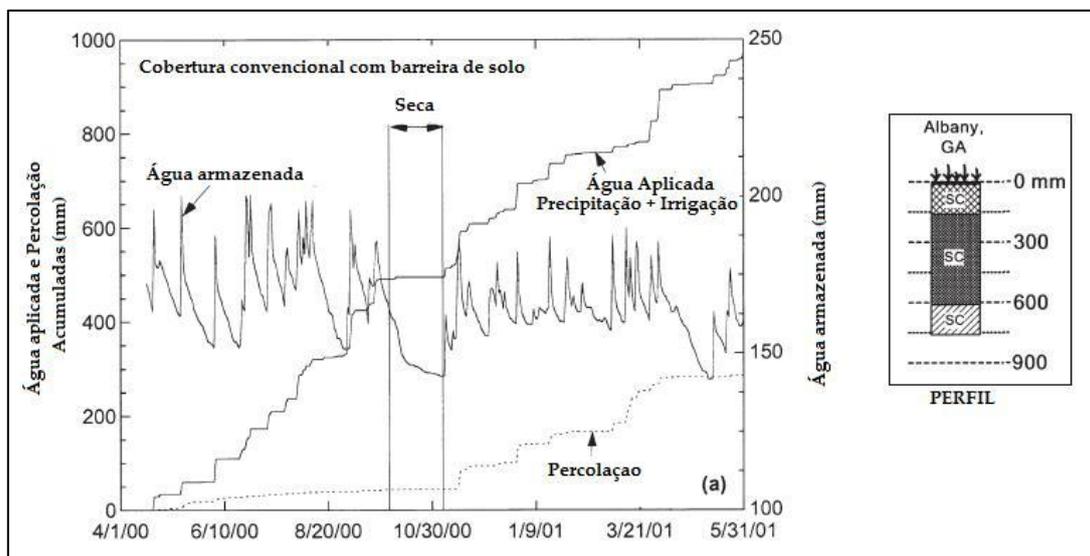
**Figura 4: Lisímetro e instrumentação utilizada em Albrigh *et al.* (2006)**

Nesse estudo a drenagem aumentou significativamente com o tempo, principalmente nos locais de clima quente e úmido, onde a drenagem excedeu em 3,2 vezes o critério de projeto ( $K_{\text{sat}} \leq 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ) e para os locais de clima quente e árido e frio e úmido, a drenagem foi consistente com os critérios de projeto. O aumento na drenagem foi consequência das modificações estruturais do solo devido aos ciclos secos e úmidos que resultaram em fissuras, e favoreceram a formação de fluxos preferenciais. Nesse estudo, os autores mostram que os processos de intemperismo devido às variações climáticas afetaram a integridade da camada de argila, modificando suas características.

Melchior *et al.* (2010) apresentam os resultados de estudos de 18 anos em lisímetros de grandes dimensões com diferentes configurações e materiais, com vistas aos estudos de infiltração de água em camadas de cobertura. Esse estudo foi desenvolvido no aterro de Georgswerder-Hamburgo, Alemanha com objetivo de avaliar a estrutura das camadas compactadas ao longo do tempo, determinando o impacto nas taxas de infiltração decorrentes das modificações nessa estrutura. Os lisímetros compostos apenas por argila compactada foram executados com duas inclinações. Diversas escavações foram feitas para inspecionar as camadas de cobertura ao longo desse período mostrando que as raízes das plantas tinham alcançado a superfície da camada de solo compactado e formado caminhos preferenciais de fluxo, além de serem observadas fissuras na camada de cobertura.

As camadas de argila compactada tiveram um bom desempenho nos primeiros anos, porém sua eficiência diminuiu ao longo do tempo. Após um verão intenso em que a sucção na camada de solo compactado foi de 40 kPa, com aspecto extremamente seco, dando-se início a formação de fissuras. A partir desse período a condutividade hidráulica aumentou passando a apresentar taxa de infiltração de 10 a 30 mm/ano. Após quatro anos, as medidas de sucção ficaram acima de 80 kPa aumentando ainda mais a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração subiu para 100 a 200 mm/ano (para uma precipitação média 860 mm/ano). No período de 1992 a 1997 uma média de 143 mm/ano infiltrou na camada de solo compactado, significando que 42% de infiltração. Os fatores que contribuíram para o aumento da condutividade hidráulica e das taxas de infiltração durante a vida útil da camada de cobertura foram as fissuras e as raízes das plantas, que criaram caminhos preferenciais de fluxo na cobertura.

Albright *et al.* (2004) apresentam o balanço hídrico de um camada convencional em clima úmido com uma infiltração de 195 mm/ano (17% da precipitação), superior as prescrições de normas (< 30 mm) para solo com permeabilidade inferior a  $10^{-9}$  m/s, como mostrado na Figura 5.



**Figura 5: Balanço Hídrico da camada convencional do Aterro de Albany (EUA) (ALBRIGHT *et al.*, 2004)**

As taxas de infiltração aumentaram significativamente após um período de 6 semanas de seca no outono de 2000, quando o solo ressecou bastante, apresentando

fendas que foram responsáveis pelas altas taxas de fluxo observadas nesse período. Antes do período seco a infiltração era relativamente constante, mostrando pequenas respostas a eventos atemporais de precipitação, e após esse período o formato em escada sugere a presença de fluxos preferenciais. A taxa de infiltração depois do período seco aumentou para 326 mm/ano, não retornando aos valores anteriores ao período seco que era de 77 mm/ano.

As fissuras em solos argilosos de camadas de cobertura se devem ao fenômeno de contração e expansão devido às variações climáticas, provocando um aumento significativo no fluxo de gases (MACIEL, 2003). Como as camadas de cobertura finais encontram-se na maior parte do tempo em condições não saturadas, é importante se estabelecer parâmetros de controle para emissão de gases baseados nas características dos solos ao longo do tempo.

Boeckx *et al.* (1996) estudando as emissões de CH<sub>4</sub> em uma cobertura de ± 30 cm de solo com a superfície recoberta por grama e pequenas árvores em Antuérpia na Bélgica, mediram fluxo desde -5,9 até 914,3 mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia. Durante o verão (junho-setembro) a emissão de CH<sub>4</sub> foi menor do que no outono (outubro-dezembro). Além dos fatores externos como pressão barométrica, velocidade dos ventos e os controles de engenharia (sistema de recuperação de gás), o teor de umidade do solo foi o fator mais importante que influenciou nas emissões de CH<sub>4</sub>. Nesse estudo o solo apresentou textura fina (solo argiloso), e quando a umidade se elevou acima da capacidade de campo a cobertura foi efetivamente impermeabilizada devido à diminuição da permeabilidade vertical. Os autores observaram também aumento nas emissões de CH<sub>4</sub> até o solo atingir a umidade de capacidade de campo (30%), devido à menor difusão de O<sub>2</sub> nos vazios, provocando uma diminuição nas atividades microbiológicas e conseqüentemente de oxidação de CH<sub>4</sub> no solo. Esse mesmo comportamento também foi mencionado por Borjesson e Svensson (1997). A Tabela 2 apresenta os resultados das emissões de CH<sub>4</sub> relacionados com os parâmetros do solo, temperatura e umidade, relatados por Boeckx *et al.* (1996).

**Tabela 2: Emissões de CH<sub>4</sub>**

Mês do ano	Temperatura do solo (°C)	Teor de Umidade do solo (%)	Emissão mgCH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> .dia
Junho	20,0	8,1	14,2
Julho	24,5	5,5	-5,9
Agosto	24,0	3,8	50,2
Setembro	18,5	16,0	87,2
Outubro	13,5	29,8	416,0
Novembro	8,0	22,3	914,3
Dezembro	10,0	33,1	189,2

Fonte: Boeckx et al. (1996)

Bogner *et al.* (1995) mediram emissões de CH<sub>4</sub> em um aterro de Brea-Olinda, Orange Co., Califórnia (USA) com uma cobertura que consistia de 1 m de sedimentos arenosos, com pouca vegetação. As emissões de CH<sub>4</sub> foram extremamente elevadas com valores acima de 1.000g/m<sup>2</sup>.dia, sendo atribuídas a falta de um sistema de captação eficiente e a granulometria relativamente grossa da cobertura, com baixo teor de umidade.

Moscher *et al.* (1996) analisaram emissões de CH<sub>4</sub> em um aterro na Nova Inglaterra nos EUA, com cobertura de 1 a 2 m de uma areia-argilosa, detectando medidas de 10 a 1.495 g/m<sup>2</sup>.dia nas áreas com disposição de RSU e de 10 a 144 g/m<sup>2</sup>.dia nas área com disposição de resíduos de construção e demolição.

Maurice e Lagerkvinst (2003) avaliaram emissões de CH<sub>4</sub> em aterros na Suécia observando a influência das variações climáticas nas taxas de emissão. As emissões de CH<sub>4</sub> foram observadas apenas durante o final do inverno, quando o solo da superfície estava congelado, com emissões inferiores a 0,1 até 1,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. Durante o verão e o outono, nenhuma emissão de CH<sub>4</sub> foi detectada, no entanto, as emissões de CO<sub>2</sub> foram mensuráveis em todo do ano.

Maciel (2003) apresentou estudos de emissões de CH<sub>4</sub> para solo argiloso (argila de alta plasticidade - CH), com espessura variando de 25 cm a 90 cm, em ensaios realizados no período de março a maio de 2003. As emissões variaram de 102 a 363 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo relacionadas com a inexistência de drenagem interna de biogás, alta geração de biogás, por se situar numa área de disposição com resíduos recentes (< 5 anos) e o não controle da compactação na execução da camada de cobertura.

Fourie e Morris (2004) analisaram as emissões de CH<sub>4</sub> em 4 aterros na África do Sul. Em um dos aterros foram feitas medidas em dois períodos distintos (inverno e verão) a fim de se comparar as emissões em termos de variação sazonal de temperatura e umidade do solo. A baixa permeabilidade das camadas de cobertura não permitiu a infiltração de água para o resíduo, favorecendo a pequenas taxas de degradação, devido às condições climáticas locais (clima semiárido). De acordo com os autores, em curto prazo, embora essa condição possa ser considerada vantajosa, em longo prazo, pode haver modificações devido às condições do material da cobertura ressecar e apresentar fissuras e fluxo preferenciais, tanto de água quanto de biogás. Além disso, os esforços para incentivar recuperação de energia em aterros podem ser dificultados nessas regiões, porque as taxas de geração de biogás tendem a diminuir à medida que os resíduos não têm umidade suficiente devido à ausência de uma recarga mínima de precipitação (infiltração).

Mariano (2008) apresentou taxas de emissão de CH<sub>4</sub> de 19 ensaios no aterro de Aguazinha – Olinda - PE, no período de março de 2006 a novembro de 2007 (abrangendo períodos secos e chuvosos na região). Os estudos foram conduzidos em uma cobertura com espessura variando de 0,25 m a 0,90 m, com solos do tipo areia argilosa (SC) e argila arenosa de baixa plasticidade (CL). As emissões de CH<sub>4</sub> variaram de 0 a 401 g/m<sup>2</sup>.dia e os resultados indicaram uma tendência de aumento da retenção dos gases com o aumento do grau de saturação do solo. As maiores emissões foram verificadas em locais com grau de compactação entre 75% e 90%. Para locais com grau de compactação acima de 90% o percentual de retenção de CH<sub>4</sub> foi superior a 90%.

Zhang *et al.* (2008) analisaram emissões de CH<sub>4</sub> em coberturas convencionais de um aterro sanitário na China. O experimento consistia em analisar a influência das características do solo e da recirculação de lixiviados nas taxas de emissões de CH<sub>4</sub>. Os autores concluíram que as emissões de CH<sub>4</sub> são significativamente influenciadas pela textura do solo e pela espessura da camada de cobertura do solo, que regula a condição de transferência de CH<sub>4</sub> e a potencialidade de oxidação de CH<sub>4</sub>.

### **2.3.2 Camadas de cobertura alternativas**

As camadas de cobertura do tipo metanotróficas ou oxidativas, e as evapotranspirativas ou barreiras capilares são denominadas alternativas por ter como

finalidade substituir o uso de camadas convencionais, porém satisfazendo aos critérios de projeto com equivalência de eficiência tanto em relação à infiltração da água e gases, quanto à erosão devido às chuvas e ventos.

As camadas metanotróficas, ou biocoberturas ou oxidativas são aquelas que atuam como minimizadoras de emissão de  $\text{CH}_4$  através de reação de oxidação ao longo do perfil do solo, e as evapotranspirativas e barreiras capilares são as que atuam como armazenadoras de água em estações chuvosas, e posteriormente permitindo a evaporação para atmosfera, em estações secas.

As camadas de cobertura do tipo evapotranspirativas e barreiras capilares são mais adequadas em locais de clima árido, devido a capacidade de armazenamento de água no solo ser limitada. Em locais de muita precipitação o funcionamento não satisfaz aos critérios de infiltração de líquidos, causando taxas excessivas para a massa de resíduos. Um fator importante a se considerar é a necessidade da instalação adequada da camada de cobertura que leve em consideração um projeto apropriado, de acordo com os materiais a serem utilizados, além de medidas de controle de qualidade requeridas, de forma que se analisem, para essas camadas alternativas, os efeitos dos fatores ambientais ao longo do tempo (ZORNBERG *et al.*, 2003).

### **2.3.2.1 Camadas metanotróficas**

As camadas de coberturas denominadas metanotróficas ou oxidativas incorporam o conceito de camadas bioreativas ou biocoberturas e segundo o IPCC (2007) elas representam uma alternativa economicamente atraente para o tratamento de emissões fugitivas de  $\text{CH}_4$ .

Essas camadas de cobertura têm como características a utilização de materiais (geralmente compostos orgânicos) para criar condições ótimas no desenvolvimento de micro-organismos que consomem  $\text{CH}_4$ , sendo denominadas mais especificamente de biocoberturas (HUBER-HUMER *et al.*, 2009).

Alguns materiais vêm sendo testados tanto em laboratório quanto em campo, com a finalidade de reduzir as emissões de  $\text{CH}_4$ , tais como composto orgânico (produtos resultantes da compostagem), produtos similares proveniente de tratamento mecânico biológico de resíduos (MBT), aparas de madeira, palha ou casca de turfa e inorgânicos materiais, cinzas areias e solos e misturas de materiais orgânicos e inertes (BORJESSION, 1996; BORJESSION e SVENSON, 1997; MAURICE e LAGERKVIST,

2004; POWELSON *et al.*, 2006; ROSE *et al.*, 2007; AIT-BENICHOU *et al.*, 2008; JUGNIA *et al.*, 2008; BOHN e JAGER, 2009 PARK *et al.*, 2009).

O processo de oxidação de CH<sub>4</sub> ocorre em ambientes onde estão presentes ao mesmo tempo CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub>, e consiste na conversão de CH<sub>4</sub> para água, CO<sub>2</sub> e biomassa, através da atividade microbiana seguindo a fórmula estequiométrica mostrada na Equação 1, onde ΔG° representa o gradiente de calor.



Essa camada pode ser muito importante para aterros de pequeno e médio porte, onde a exploração do biogás não é viável tecnicamente. Nesses casos a cobertura oxidativa tem um papel ainda mais relevante para redução de emissões principalmente no Brasil, onde segundo o IBGE (2010) ainda existem 50,2% dos municípios lançando seus resíduos em lixões e onde os pequenos aterros não são tecnicamente bem operados ou monitorados.

Através de uma seleção controlada dos substratos desejados, do controle dos parâmetros ambientais para os micro-organismos metanotróficos, e da instalação de um sistema de drenagem auxiliar abaixo da camada para distribuir melhor o fluxo de biogás, se pode alcançar uma taxa ótima de oxidação de CH<sub>4</sub>. Huber-Humer *et al.* (2008) propõem uma configuração de materiais para que haja atividade de oxidação, como mostrado na Figura 6.

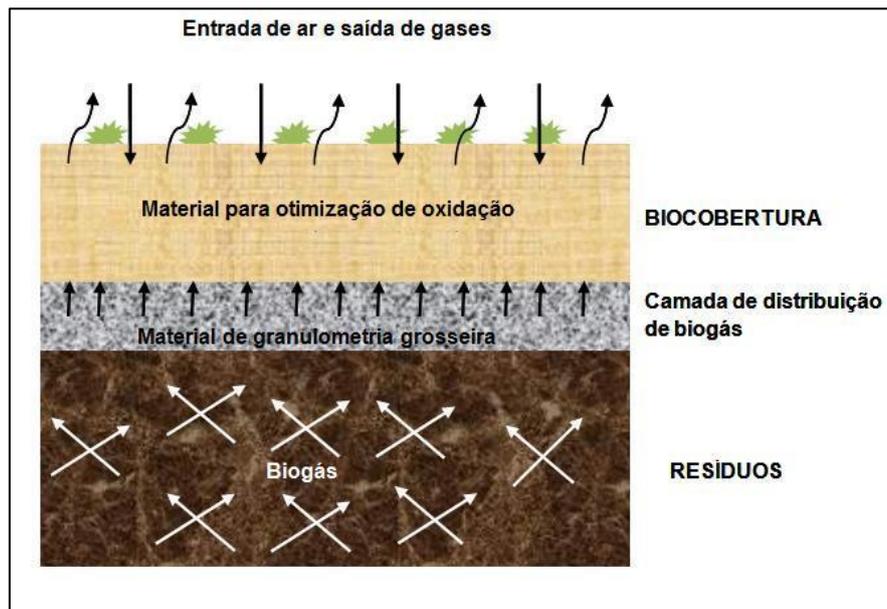


Figura 6: Esquema conceitual de biocobertura (Adaptado de HUBER-HUMER *et al.*, 2008)

A oxidação biológica de  $\text{CH}_4$  é baseada na existência de micro-organismos metanotróficos, ocorre naturalmente em solos de aterros sanitários, no suprimento de oxigênio, na disponibilidade de nutrientes, umidade adequada e meio ambiente propício para a formação de colônias (HUBER-HUMER e LECHNER, 1999). Segundo Einola *et al.* (2008) a oxidação do  $\text{CH}_4$  pode ser otimizada através de parâmetros ambientais e parâmetros físicos do solo, sendo uma estratégia interessante e de baixo custo para minimizar as emissões de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera.

A presença de bactérias metanotróficas em solos de cobertura de aterros é favorecida pela alta concentração de  $\text{CH}_4$  proveniente da biodegradação dos resíduos (HILGER *et al.*, 2007; HE *et al.*, 2008, AIT-BENICHOU *et al.* (2009). Teixeira *et al.* (2009) avaliou solos de cobertura de três aterros no Brasil, sugerindo uma tendência de aumento de quantidade de células de micro-organismos metanotróficos, inversamente proporcional ao grau de saturação do solo. Purificação (2009) determinou diferenças de estrutura na comunidade bacteriana em solo com baixo teor de matéria orgânica e outro com mistura de solo e composto na proporção de 50% em volume.

De acordo com Huber-Humer *et al.* (2009) a utilização de composto orgânico como substrato, altera as propriedades específicas em relação ao solo convencional no que diz respeito à permeabilidade ao gás, aos parâmetros físicos, incluindo a capacidade de retenção de água e a textura e conseqüentemente sobre a atividade de

oxidação do CH<sub>4</sub>. O composto com alto teor de matéria orgânica fornece numerosas condições favoráveis para os micro-organismos, tais como uma elevada superfície específica, uma alta capacidade de retenção de água combinada com adequada porosidade e textura para a troca gasosa (significando um elevado volume de poros cheios de ar, mesmo em maiores teores de umidade) e baixa condutividade térmica.

Um cuidado que se deve ter é que os compostos quando utilizados em camadas de cobertura estejam estáveis, pois compostos imaturos pode exercer um efeito oposto, devido à limitação de oxigênio pela concorrência com a respiração pela compostagem do material, seguida pela formação de substâncias exopoliméricas (HUBER-HUMER e LECHNER, 1999; HUBER-HUMER, 2004; WILSHUSEN *et al.*, 2004a). Segundo Scheutz *et al.* (2007) um benefício secundário da oxidação do CH<sub>4</sub> nos solos de cobertura é também a oxidação de outros compostos orgânicos, especialmente compostos aromáticos e clorados, reduzindo assim suas emissões para a atmosfera.

A oxidação biológica do CH<sub>4</sub> é baseada em vários fatores determinantes tais como a existência de micro-organismos metanotróficos no meio. De acordo com Huber-Humer e Lechner (1999), as bactérias metanotróficas são organismos bastante adaptáveis, porém só alcançam altas taxas de consumo de CH<sub>4</sub> quando estão em ambiente onde se tenha adequado pH, porosidade do solo, temperatura, umidade, suprimento de nutrientes, suprimento de oxigênio e metano, e quando os níveis de substâncias inibidoras tais como amônia, nitrito e vários sais, sejam baixos.

A utilização de biocoberturas implica na necessidade de avaliação de sua eficiência tanto durante a fase de planejamento quanto em toda a operação, pois a capacidade de oxidação do solo é controlada por vários fatores do (IPCC, 2007). Huber-Humer *et al.* (2009) recomendam os parâmetros úteis para se analisar a adequação de um composto a ser utilizado em biocoberturas como mostrado na Tabela 3. Estas recomendações são baseadas em resultados de experiências analisando os parâmetros relevantes em diferentes materiais com composto (n = 41), juntamente com a determinação do potencial de oxidação de metano testado em colunas de laboratório.

**Tabela 3: Parâmetros recomendados para testar a adequação de materiais composto para biocoberturas**

Parâmetro	Unidade	Valor proposto	Comentários
<b>Propriedades Físicas</b>			
Densidade	kg/l	0,8 - 1,1	Densidade < 0,8 não ocorreu nos experimentos
Teor de Umidade	% w/w	30 - 50	É recomendado um teor de umidade inicial de cerca de 50% da capacidade retenção de água
Capacidade retenção de Água	%DM	50 - 130	Em climas áridos é recomendada uma alta da capacidade retenção de água
Grau de aeração	%v/v	>25	Mínimo de 25%. Mais adequado > 30% do teor médio de umidade
Distribuição do tamanho das partículas (fração em % peso)	-	0,063 a 0,2 mm: 20% a 30% 0,2 a 6,3 mm: 40% 6,3 a 20 mm: 20% a 40% >20 mm (10%)	Valores aproximados para um composto bem equilibrado
<b>Propriedades Químicas</b>			
Condutividade	mS/cm	<4	Metanotróficas são bastante toleráveis condutividade elevadas
pH	-	6,5 - 8,5	Metanotróficas são tolerantes com variações de pH
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	ppmDM	>500	As maiores concentrações de sulfato podem ser favoráveis para a oxidação do CH <sub>4</sub> sob condições anaeróbias
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	ppmDM	<400	Altas concentrações de amônia podem inibir a oxidação do metano
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N	ppmDM	<0,1	Nitrito é um forte inibidor da oxidação do metano
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N	ppmDM	Não há valor limite	A maioria das metanotróficas pode usar nitrato como fonte de nitrogênio
P <sub>total</sub>	%DM	>0,3	P é um nutriente essencial para metanotróficas
N <sub>total</sub> (Kjeldahl)	%DM	>0,5 (composto é frequentemente > 1,0)	Altos valores de N são favoráveis
Matéria Orgânica	%DM	>15	Maiores teores de matéria orgânica são favoráveis
Carbono Orgânico Total	%DM	>7	Como um parâmetro substituto para o teor de matéria orgânica

*DM = matéria seca.*

Fonte: Huber-Humer *et al.* (2009)

### 2.3.2.1.1 Fatores de influenciam na oxidação CH<sub>4</sub>

A escolha adequada do material para uma biocobertura determina o desempenho em termos de taxas de oxidação de CH<sub>4</sub>. A estrutura físico-química da camada de oxidação é crucial, pois influenciará fortemente na velocidade de transporte dos gases, no tempo de retenção desses no meio e particularmente em características propícias ao desenvolvimento de micro-organismos que promovem a reação de oxidação (SCHEUTZ *et al.*, 2009). A mitigação de emissões através de oxidação de CH<sub>4</sub> depende da seleção de materiais que promovam a retenção de água ao mesmo tempo em que possuam poros de ar disponíveis para entrada de oxigênio na camada de cobertura (GEBERT *et al.*, 2010). Marinho e Souza (2010) apresentaram os fatores que afetam a oxidação de CH<sub>4</sub> de forma agrupada em fatores abióticos, que compreendem fatores climáticos, químicos, antrópicos e geotécnicos e fatores bióticos que compreendem os fatores de interação microbiana.

#### a) Oxigênio e porosidade

Em coberturas de aterros sanitários a penetração de O<sub>2</sub> na cobertura será o fator limitante para que haja processos de oxidação de CH<sub>4</sub>, sendo a composição do solo, tamanho das partículas e porosidade fatores importantes nesse processo (SCHEUTZ *et al.*, 2009). Em estudos de laboratório simulando coberturas de aterros o maior potencial de oxidação tem se verificado em zonas onde o perfil de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> se sobrepõe geralmente em profundidades de cerca de 20 cm da superfície, embora essa profundidade seja bastante variada, pois, depende substancialmente da capacidade de penetração do oxigênio na camada de cobertura, que está intimamente relacionada com a porosidade e o grau de saturação do solo. Profundidades variando de 10 cm a 90 cm são relatados em diversos experimentos em campo e laboratório (De VISSCHER *et al.*, 1999; HUBER-HUMER e LECHNER, 1999; HUBER-HUMER e LECHNER, 2001; GEBERT *et al.*, 2003; WILSHUSEN *et al.* 2004a; SCHEUTZ *et al.*, 2004; PAWLOWSKA e STEPNIEWSKI, 2006; URMANN *et al.*, 2007).

A camada mais próxima à superfície em aterros sanitários sofre maiores influências das variações climáticas tais como temperatura, pressão atmosférica e precipitação, influenciando nas taxas de oxidação. O aumento da pressão promove maior entrada de O<sub>2</sub> na camada de cobertura, e a precipitação promove mudanças na umidade do solo (De VISSCHER *et al.*, 1999; HILGER *et al.*, 2000; CZEPIEL *et al.*, 2003; CABRAL *et.al.*, 2007).

Im *et al.* (2008) baseados em estudos realizados em colunas em laboratório, para determinação de parâmetros de difusão e de fatores que influenciam na oxidação de CH<sub>4</sub>, concluíram que a taxa de oxidação máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) foi diretamente relacionada com a profundidade de penetração de O<sub>2</sub> e com o teor de matéria orgânica, em profundidade, enfatizando a importância de O<sub>2</sub> na quantificação da oxidação de CH<sub>4</sub> em aterros.

Abichou *et al.* (2009) utilizaram modelos para avaliar a redução de emissão de CH<sub>4</sub> comparando uma biocobertura e um solo controle. Usando o modelo proposto confirmam que a redução na emissão de CH<sub>4</sub> foi devido aos dois componentes no fluxo: o bloqueio (retenção) e a oxidação biológica, ambos devido a presença do composto. Os resultados simulados confirmaram as observações em experimentos de campo, concluindo que, o projeto de biocoberturas deve levar em consideração os dados climáticos do local específico onde serão implantadas, a fim de se determinar as características adequadas do material.

Ait-Benichou *et al.* (2009) menciona que o fator crítico para que ocorra a oxidação seria o conteúdo volumétrico de ar, que muda em função da umidade, pois o CH<sub>4</sub> oriundo da biodegradação dos resíduos deve atingir os micro-organismos por difusão e se não houver área suficiente não haverá favorecimento de reações de oxidação. Gebert *et al.* (2010) investigaram a influência das propriedades físicas do solo na eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub> em camadas de cobertura. Os experimentos desenvolvidos em estudos de coluna mostraram que o fluxo de biogás e a profundidade de ingresso de O<sub>2</sub> atmosférico são fortemente diminuídos com graus crescentes de compactação e, que o aumento do fluxo de entrada de CH<sub>4</sub> foi inversamente relacionado com a eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub>. Nesse estudo também se verificou que a difusividade do solo esteve relacionada com o conteúdo volumétrico de ar (ou poros cheios de ar), a tortuosidade e a conectividade do sistema de poros. A difusividade e a eficiência do transporte de gás foram muito baixas, devido a descontinuidade dos poros quando o volume de poros aerados foram inferiores a 10%.

#### **b) Umidade e grau de saturação**

A oxidação do CH<sub>4</sub> é fortemente regulada pela umidade do material, principalmente através da difusão do gás no perfil do solo e pela atividade de bactérias metanotróficas, que geralmente são micro-organismos aeróbios. O aumento do grau de saturação do solo implica em uma redução de transporte de gás (BOECKX e van CLEEMPUT, 1996; AIT-BENICHOU *et al.*, 2009), isso porque a difusão molecular na

água é cerca de  $10^4$  vezes mais lenta que no ar (CABRAL *et al.*, 2004). Para valores muito baixos de umidade há uma inibição nas atividades de metabolismo microbiano, reduzindo-se assim as taxas de oxidação assim como para valores muito altos, próximo à saturação do solo, a taxa de oxidação também diminui, pois a água preenche os espaços vazios do solo inibindo assim a difusão do  $O_2$  e reduzindo a assimilação de  $CH_4$  (CHRISTOPHERSEN, *et al.*, 2001; VISVANATHAN *et al.*, 1999).

O grau de saturação é um dos parâmetros geotécnicos que melhor expressa a importância do conteúdo de água no solo, pois tanto indica a disponibilidade de água para o metabolismo celular quanto o espaço disponível para migração de gás (CABRAL *et al.*, 2008). Quando o grau de saturação do solo atinge valores próximos de 85% os vazios preenchidos de ar não estão mais interconectados e os gases se difundem na fase líquida reduzindo drasticamente a disponibilidade de  $CH_4$  e  $O_2$  (CABRAL *et al.*, 2004), limitando, portanto, a oxidação de  $CH_4$ . A manutenção de umidade promove também o crescimento de vegetação que protege contra erosão que limita a infiltração de águas pluviais e promove a evapotranspiração (HUBER-HUMER *et al.*, 2008).

Hilger e Huber-Humer (2003) estudando aspectos geotécnicos relacionados com a oxidação de  $CH_4$  concluíram que a umidade ótima para captura de  $CH_4$  está em torno de 10% a 20%. Jones e Nedwell (1993) verificaram que a capacidade do solo de cobertura em manter um substancial teor de umidade em toda a profundidade, promove uma distribuição mais uniforme e uma maior oportunidade para remoção de  $CH_4$ , ou seja, solos com maior capacidade de manutenção de umidade tais como os de alto teor de matéria orgânica, serão mais favoráveis às reações de oxidação de  $CH_4$ .

Park *et al.* (2009) conduzindo investigações em um filtro de laboratório para avaliar o efeito de fatores ambientais na taxa de oxidação de  $CH_4$  em de um solo, variou teores de umidade em 5%, 13% e 20%. O teor de umidade de 20% era correspondente a capacidade máxima de retenção de água do solo, e o teor de 5% se situou próximo do ponto de murcha<sup>4</sup>. A máxima capacidade de oxidação foi alcançada para teores de umidade de 13%, na profundidade de 30 cm.

---

<sup>4</sup> Umidade abaixo da qual a taxa de absorção de água pela planta não será suficiente para atender a demanda evapotranspirativa (MAIA *et al.*, 2005).

Scheutz e Kjeldsen (2004) estudaram a influência de diferentes fatores ambientais nas taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  e de hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), em ensaios de laboratórios. Teores de umidade entre 18% e 24% (em peso) apresentaram as maiores taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  como mostra a Figura 7. O decréscimo da umidade reduziu a taxa de oxidação significativamente, provavelmente devido ao stress hídrico, resultando no ressecamento do solo e na redução da atividade microbológica.

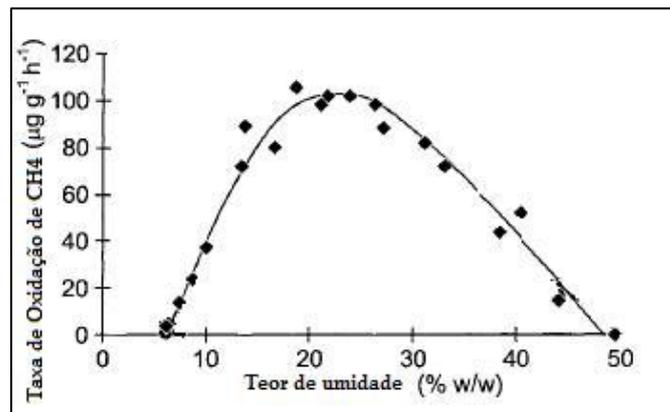


Figura 7: Influência do teor de umidade na taxa de oxidação do  $\text{CH}_4$  (Adaptado de SCHEUTZ e KJELDSEN, 2004)

Stern *et al.* (2007) investigaram a oxidação de  $\text{CH}_4$  em uma biocobertura e uma cobertura controle composta apenas por solo. Para o mesmo período analisado, sob as mesmas condições climáticas, a biocobertura é capaz de manter maior teor de umidade, como é mostrado na Figura 8, evitando assim a formação de fendas e reduzindo as emissões de  $\text{CH}_4$ .

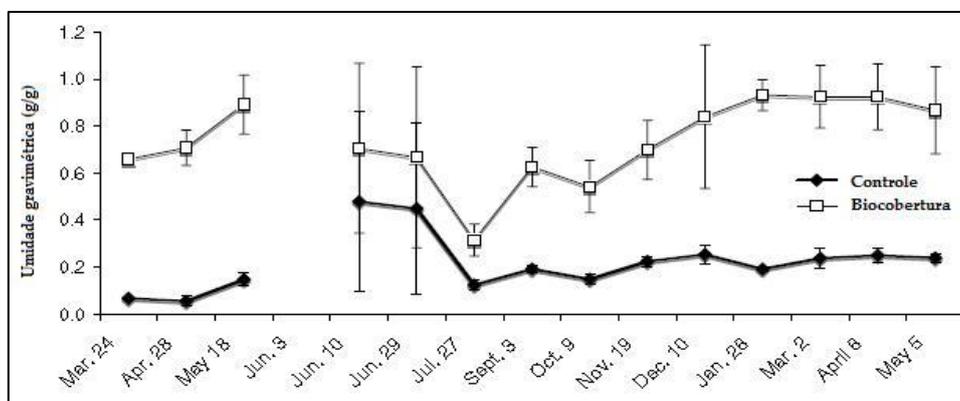


Figura 8: Teor de umidade na biocobertura e em um solo controle (STERN *et al.*, 2007)

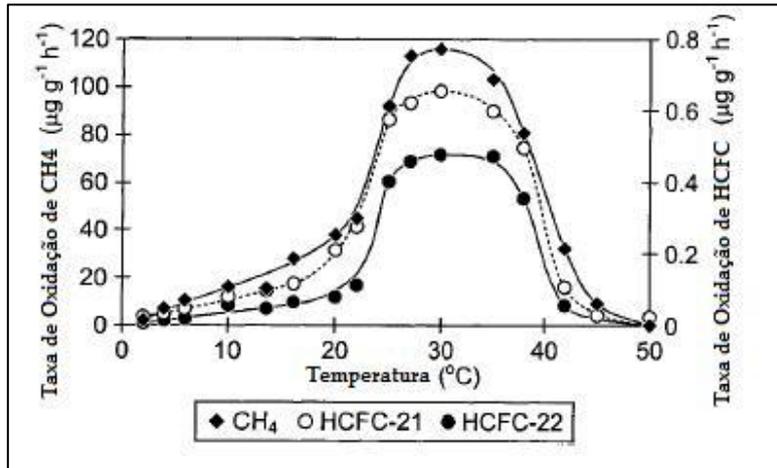
Ait-Benichou *et al.* (2009) apresentam valores médios de 76% de grau de saturação para os primeiros 20 cm de uma biocobertura experimental. A atividade potencial metanotrófica foi influenciada por fatores ambientais especialmente o grau de saturação e as concentrações de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub>.

Roncato (2009) analisou taxas de oxidação em colunas com diferentes substratos obtendo eficiência de oxidação variando de 81% a 90%. Os fatores que mais influenciaram nas taxas de oxidação foram: a variação da concentração de CH<sub>4</sub>, a espessura do substrato e o grau de saturação. As maiores taxas de oxidação foram determinadas em coluna com substratos de composto e areia com grau de saturação de 70%, e em colunas com mistura de areia, composto e cascalho, com grau de saturação entre 40% e 50%.

### **c) Temperatura do solo**

As variações de temperatura do solo têm efeito no fluxo de gás e água e nos processos biológicos, incluindo a atividade de oxidação de CH<sub>4</sub> (SCHEUTZ *et al.*, 2009). Diversos experimentos mostram relação de temperatura do solo com a oxidação de CH<sub>4</sub>, com faixas de temperatura ótima variando de 30°C a 36°C por Whalen *et al.* (1990), Boeckx e van Cleemput (1996), Czepiel *et al.* (1996) e Chanton e Liptay (2000). Park *et al.* (2009) estudando a influência da temperatura e umidade nas taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> encontraram taxas mais altas para temperaturas variando de 25°C a 35°C. Esta variação coincidiu com experimentos realizados por Bender e Conrad (1995) que sugeriram indução de atividade de oxidação de CH<sub>4</sub> com essa mesma variação de temperatura, obtidas em estudos com quatro tipos de solos.

Scheutz e Kjeldsen (2004) determinaram em ensaios de laboratórios que as taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> e de HCFC aumentaram exponencialmente com temperaturas entre 2°C e 25°C, com máxima taxa de oxidação de CH<sub>4</sub> verificada na temperatura de aproximadamente 30°C. Um aumento na temperatura até 50°C resultou na diminuição da taxa de oxidação com inibição da atividade dos micro-organismos, como pode ser visto na Figura 9.



**Figura 9: Influência da temperatura na taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> e de hidroclorofluorcarbono (SCHEUTZ e KJELDSEN, 2004)**

Yoon *et al.* (2009) estudando um modelo baseado em transporte advectivo-difusivo para estimar a eficiência na oxidação de CH<sub>4</sub> em um biofiltro, determinaram através de simulações que, a temperatura teve uma alta correlação com a oxidação e que a umidade apresentou dependência com outros fatores tais como ingresso de CH<sub>4</sub> e conteúdo de ar, para se relacionar com a oxidação.

Estudos de campo têm mostrado, com ajuda da técnica de isótopos estáveis<sup>5</sup> que, aumentos de temperatura na faixa de 5°C e 35°C causam um claro aumento na taxa de oxidação de CH<sub>4</sub>, mas, para alguns autores ainda é discutível como o aumento da temperatura influencia efetivamente no processo. Gebert *et al.* (2003) realizaram testes de oxidação em batelada, e mostraram que a oxidação de CH<sub>4</sub> é possível a baixas temperatura (entre 0 e 10°C) e Gebert *et al.* (2007) comprovaram que as taxas de oxidação crescem exponencialmente para temperaturas até 38°C embora tenha se observado atividade oxidativa para todas as faixas de temperatura analisadas (3°C até 45°C).

#### **d) Teor de matéria orgânica**

Kingtley *et al.* (1995) desenvolveram importante estudo em escala de laboratório contendo diferentes tipos de solos que foram alimentados com CH<sub>4</sub> para investigar o desenvolvimento de comunidade metanotrófica. O solo mais poroso constituído de areia grossa desenvolveu alta capacidade de crescimento de

<sup>5</sup> Técnica que se baseia no consumo de isótopos de carbono leves ( $\delta^{12}\text{C}$ ) que são preferidos pelas bactérias metanotróficas.

metanotróficas. Um aumento significativo no teor de matéria orgânica derivado possivelmente da biomassa metanotrófica gerada, ocorreu onde se observou maior taxa de oxidação de  $\text{CH}_4$ . A adição de lodo de esgoto à areia grossa favoreceu a uma maior capacidade de oxidação de  $\text{CH}_4$  (26% maior) quando comparado a um solo controle sem alterações.

Visvanathan *et al.* (1999) estudando em laboratório os fatores que influenciam nas taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  em solo de cobertura, encontraram altas concentrações de micro-organismos metanotróficos na profundidade entre 0,20 e 0,40 m. Os autores relacionaram a elevada população de micro-organismos ao maior teor de matéria orgânica (determinada a partir do Carbono Orgânico Total - COT), que foram mais elevados nas profundidades entre 0,30 e 0,60 m, como pode ser visto na Figura 10.

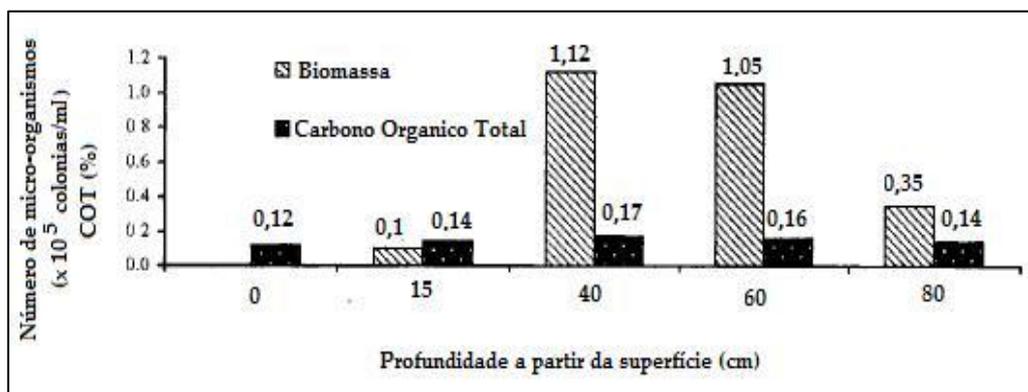
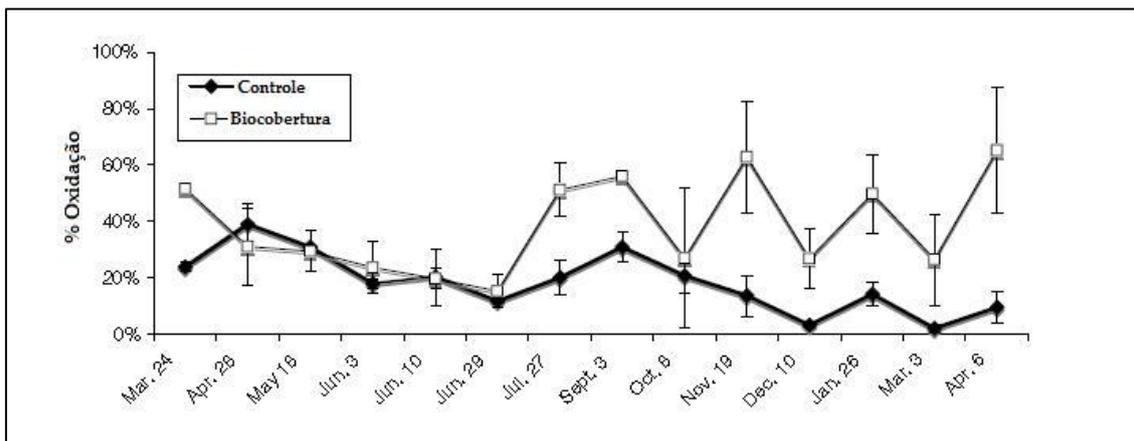


Figura 10: Presença de micro-organismo e matéria orgânica (COT) (VISVANATHAN *et al.* 1999)

Krull *et al.* (2004) relata que as funções biológicas da matéria orgânica no solo são, principalmente, fornecer um reservatório de energia metabólica que conduz aos processos biológicos, atuando como uma fonte de macro e micronutrientes e garantindo que tanto a energia e os nutrientes sejam armazenados e lançados de forma sustentável. Os processos biológicos, por sua vez influenciam tanto nas propriedades químicas e estruturais do solo, quanto afetam as reações redução-oxidação (transferência de elétrons) do solo.

Stern *et al.* (2007) investigaram a oxidação de  $\text{CH}_4$  em um aterro na Flórida (USA) com biocobertura composta por 0,50 m de resíduos de compostagem de jardim sobre uma camada de distribuição de gás de 0,15 m, comparando-a com uma camada de cobertura de solo de 0,40 m a 1,00 m (controle). A biocobertura apresentou

maiores taxas de oxidação como mostra a Figura 11, observando-se que a biocobertura necessita de um tempo para adaptação dos micro-organismos metanotróficos, pois maiores taxas de oxidação são medidas a partir do 6º mês de funcionamento.



**Figura 11: Percentual de oxidação em função do material da cobertura (STERN *et al.*, 2007)**

Da mesma forma Cabral *et al.* (2007), em estudos de campo em coberturas metanotróficas constituída de composto adicionado ao solo, observaram uma relação entre a presença de matéria orgânica e microrganismos, com redução de matéria orgânica ao longo do período estudado e maior concentração de micro-organismos nas profundidades próximas à superfície.

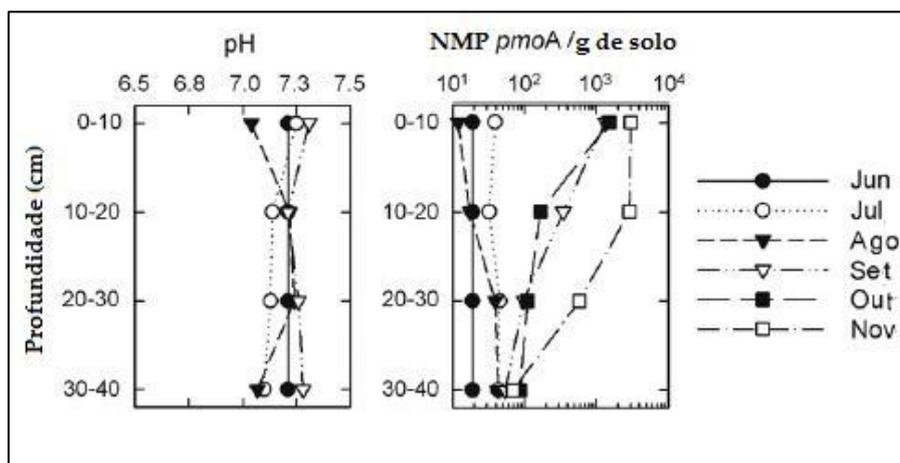
### e) pH e Nutrientes

Substâncias inorgânicas (amônia e nitrato), estimulam ou inibem a oxidação de  $\text{CH}_4$  no solo, dependendo das espécies e das concentrações destas substâncias aliadas a concentração de  $\text{CH}_4$  e do pH (BOECKX e van CLEEMPUT, 1996; SCHEUTZ *et al.*, 2009). De Visscher e van Cleemput (2003a) investigaram a influência do tempo de exposição do  $\text{CH}_4$  e efeito imediato devido a adição de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (cloreto de amônia) e de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (sulfato de amônia) no solo. Os autores concluíram que em concentrações de  $\text{CH}_4$  acima de 1%, há um rápido crescimento de micro-organismos metanotróficos, que se dá em três fases dependentes da concentração de nitrogênio.

Bodelier e Laanbroek (2004) mencionam que a oxidação de  $\text{CH}_4$  em solos de coberturas de aterros é limitada quando a relação C/N for alta (baixa concentração de

N). O uso de fertilizantes pode causar inibição dos micro-organismos metanotróficos, pelo excesso de nitrogênio, e a presença de vegetação diminui a quantidade de nutrientes necessários ao desenvolvimento dos micro-organismos, tendo em vista a absorção pelas do nitrogênio pelas plantas.

Estudos em geral apresentam ambientes propícios ao desenvolvimento de micro-organismos metanotróficos, em pH variando de 6,5 a 8,0. Scheutz *et al.* (2009) mencionam que o pH das camadas de coberturas dependem do tipo de solo (material) usado e que as bactérias metanotróficas se desenvolvem numa ampla faixa de pH, minimizando assim os efeitos desse fator no crescimento desses micro-organismos. Jugnia *et al.* (2008) determinaram que as variações de pH do solo (com pouca variação 7,0 a 7,3) não foi o fator limitante para desenvolvimento de micro-organismos metanotróficos como pode ser visto na Figura 12.



**Figura 12: Presença de micro-organismos metanotróficos e pH em profundidade (JUGNIA *et al.*, 2008)**

Outras substâncias podem afetar as taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> tais como o acúmulo de exopolímeros<sup>6</sup> (EPS) no solo e a presença de hidroclorofluorcarbono (HCFC) e de compostos orgânicos clorados (NMOCs) (KIGHTLEY *et al.*, 1995; HILGER *et al.*, 2000; SCHEUTZ e KJELDSEN, 2003a; STRESS e STEGMANN, 2003; WILSHUSEN *et al.*, 2004b, ALBANNA *et al.*, 2010), porém são mencionadas com menor frequência na literatura.

<sup>6</sup> Polímeros extracelulares

### 2.3.2.2 Camadas evapotranspirativas

As camadas de coberturas evapotranspirativas têm como princípio de funcionamento, a capacidade de armazenamento de água no solo, e a habilidade de determinadas espécies de vegetação em remover a água do solo por evapotranspiração. Esse tipo de camada é utilizada geralmente como alternativa a uma camada monolítica de solo compactado (camada convencional) em regiões de clima semiárido (ALBRIGHT *et al.*, 2006). Quanto maior a capacidade de armazenamento do solo e suas propriedades evapotranspirativas, menor o potencial de infiltração através do sistema de cobertura (ZORNBERG e McCARTNEY, 2007).

As camadas evapotranspirativas são estudadas com base na análise do balanço hídrico que contabiliza o movimento de entrada, armazenamento e saída de água na cobertura. O fluxo de água e umidade entre a superfície do solo e da atmosfera é um processo complexo que apresenta três fatores principais. O primeiro fator diz respeito ao suprimento e demanda de água impostos pelas condições atmosféricas tais como precipitação total, radiação líquida, velocidade dos ventos, umidade e temperatura do ar. O segundo fator é a capacidade do solo em transmitir água que é função da condutividade hidráulica e de suas características de armazenamento e de retenção, e o último fator está relacionado com a influência da vegetação. O tipo e a densidade de vegetação afetam a evaporação por meio do consumo de água através das raízes e também afetam as taxas de escoamento superficial (BORMA e KARAM FILHO, 2004).

Numericamente o balanço hídrico em uma camada de cobertura é expresso pela Equação 02, e pode ser representado esquematicamente como mostrado na Figura 13.

$$\text{PERC} = \text{P} - \text{R} - \text{ETP} - \text{Q} - \Delta\text{U} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

PERC = Líquido infiltrado através da camada de cobertura

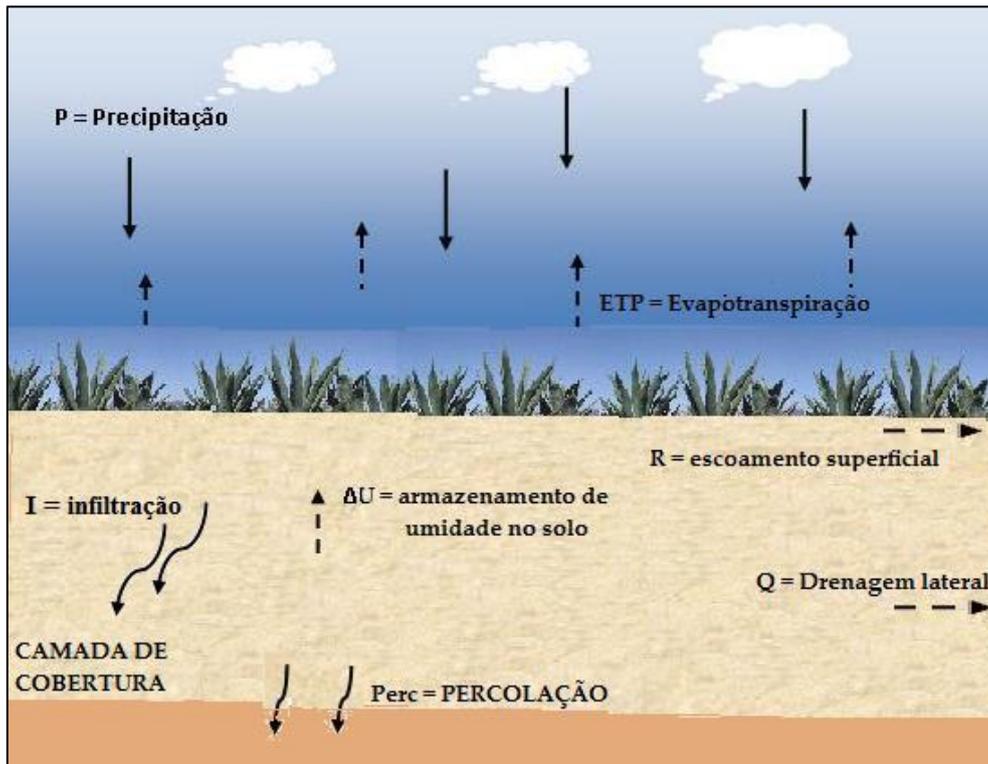
P= Precipitação

R = Escoamento superficial ou *Runoff*

ETP = Evaporação/evapotranspiração

Q = Drenagem lateral na camada de cobertura

$\Delta\text{U}$  = Armazenamento de umidade no solo



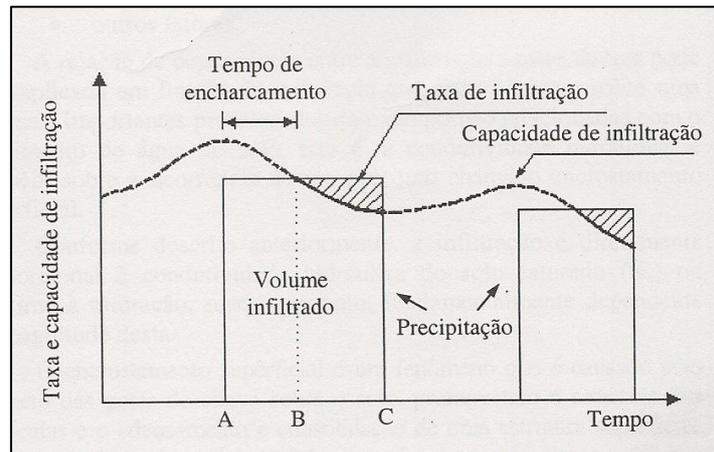
**Figura 13: Balanço Hídrico na Camada de Cobertura**

A percolação é definida como a quantidade de água que se infiltra no resíduo através da camada de cobertura. A evaporação e evapotranspiração removem água de armazenamento criando um gradiente negativo (fluxo vertical para cima) agindo para dessaturar o perfil do solo. Esta ação de secagem restaura a capacidade de armazenamento do solo para eventos futuros de precipitação (HADJ-HAMOU e KAVAZANJIAN JR, 2003). A drenagem lateral e o escoamento superficial são funções da permeabilidade não saturada do solo, e da inclinação da camada de cobertura.

Os modelos que descrevem a infiltração no solo podem ser empíricos ou teóricos. Os modelos empíricos têm a vantagem de relacionar os parâmetros do modelo às características do solo, porém tem como desvantagem de só serem válidos para as condições em que eles foram determinados, ou seja, não podem ser adotados em outros tipos de solo. Já os modelos teóricos são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrita por Darcy (BRANDÃO *et al.*, 2006), e serão abordados no item de fluxo de água e gás em meios porosos.

A percolação ou infiltração no solo se dá à medida que a camada superior vai se umedecendo no sentido descendente, alterando gradativamente a umidade do solo.

Enquanto houver aporte de água, o perfil de umidade tende a saturação em toda a profundidade, sendo a camada superficial, naturalmente, a primeira a saturar (BRANDÃO *et al.*, 2006). A Figura 14 mostra as curvas de variação temporal da taxa de infiltração e da capacidade de infiltração.



**Figura 14: Taxa de infiltração e capacidade de infiltração (SILVEIRA *et al.*, 2000 citado por BRANDÃO *et al.*, 2006)**

A partir do início da precipitação ( $t = A$ ), o solo começa a aumentar seu teor de umidade e sua capacidade de infiltração diminui. Como a intensidade da precipitação é menor do que a capacidade de infiltração, o processo de infiltração é determinado pela intensidade da precipitação e, assim a taxa de infiltração é igual a própria intensidade de precipitação. No tempo  $t = B$ , a taxa de infiltração se iguala a capacidade de infiltração, que continua decrescendo, mesmo após este instante, e inicia o escoamento superficial, cujo volume é representado pela área *hachurada*. No tempo  $t = C$ , a precipitação termina e o solo perde a umidade por evaporação, com isso a capacidade de infiltração começa a aumentar de novo até que uma nova precipitação ocorra e o processo se repita (BRANDÃO *et al.*, 2006).

O escoamento superficial está relacionado com o deslocamento das águas sobre a superfície do solo. Todos os fatores que influenciam na taxa de infiltração de água no solo também interferem no escoamento superficial (fatores relacionados ao solo e fatores relacionados à superfície, dentre outros) (PRUSKI *et al.*, 2004).

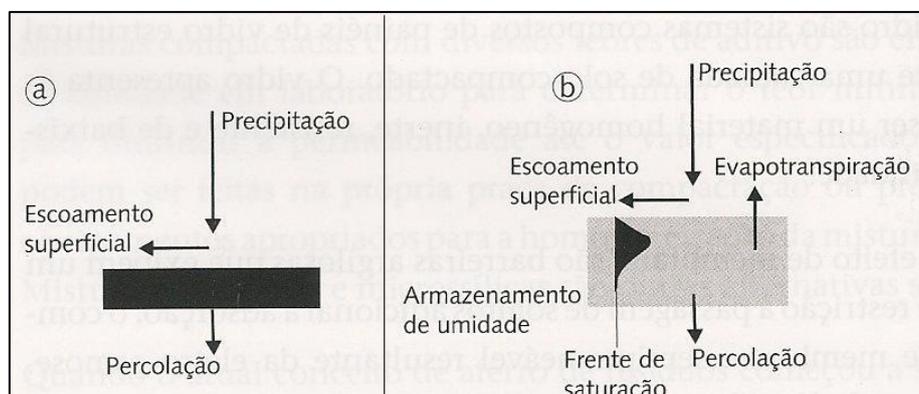
A evapotranspiração (ETp) é a combinação dos processos de evaporação pela superfície do solo e transpiração pelas plantas. De acordo com Cunha e Wedland (2005) a evapotranspiração potencial foi inicialmente definida por Thornthwaite em

1948, como sendo a perda de água para a atmosfera através de uma superfície natural coberta com vegetação nativa, sem restrição de água no solo. Quando uma das condições citadas não for atendida, tem-se a evapotranspiração real.

O método de Thornthwaite utiliza a temperatura média mensal do ar para estimar a evapotranspiração potencial. Esse método foi desenvolvido para condições de clima úmido e, por isso, normalmente apresenta subestimativa da ETp em condições de clima seco. Apesar da limitação, é um método bastante empregado para fins climatológicos na escala mensal, para estimar a evapotranspiração média mensal para condição padrão de 12h de brilho solar e mês de 30 dias. Esse método foi modificado por Camargo *et al.* (1999) para utilização em qualquer condição climática, empregando-se a mesma formulação com uso de temperatura efetiva. A temperatura efetiva expressa a amplitude térmica local, ao invés da temperatura média do ar.

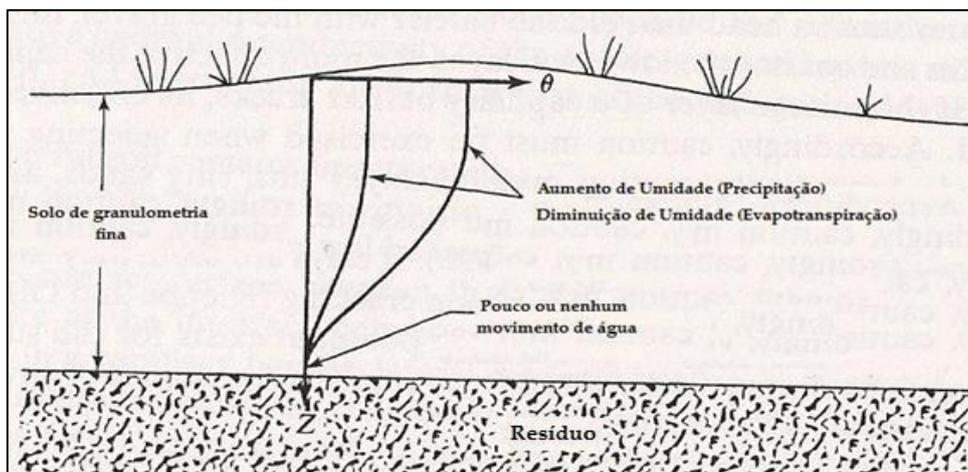
A vantagem é que nessa nova formulação a ETp não é mais subestimada em condições de clima seco. A desvantagem é a necessidade de dados de temperatura máxima e mínima que muitas vezes não está disponível em estações climatológicas. Outros autores propõem formulações combinando o balanço de energia com efeito aerodinâmico e outros que levam em consideração a interação entre fluxo de água, calor e vapor no solo não saturado, juntamente com as condições atmosféricas.

No sistema de barreira resistiva (ou camadas convencionais) a percolação basal (ou infiltração) é controlada pela maximização do escoamento superficial, enquanto que nas camadas evapotranspirativas e barreiras capilares a percolação basal é controlada basicamente pela capacidade do solo em armazenar água, como mostrado na Figura 15.



**Figura 15: Balanço Hídrico em uma camada de cobertura (a) camada convencional (b) cobertura evapotranspirativa (BOSCOV, 2008)**

As camadas evapotranspirativas do tipo monolíticas exploram duas características dos solos de granulometria fina: (i) a grande capacidade de armazenamento de umidade quando não saturada e (ii) a baixa condutividade hidráulica saturada em relação aos solos de granulação grossa (QIAN *et al.*, 2002). A camada deve ser dimensionada em função da precipitação da região, da capacidade de armazenamento de água do solo e da taxa na qual a água pode ser removida por evapotranspiração. Desse modo, a espessura da camada deve ser tal que não haja mudanças na umidade próxima a base como mostrado na Figura 16.



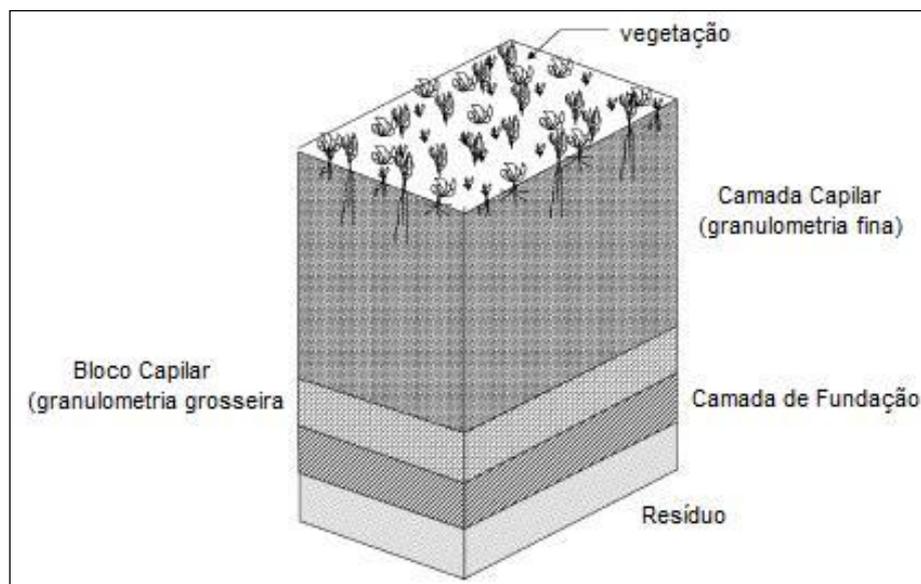
**Figura 16: Camadas evapotranspirativas (BENSON e KHIRE, 1995)**

As camadas evapotranspirativas têm recebido interesse especial nos últimos anos em vista de se mostrarem economicamente viáveis em regiões áridas. Scanlon *et al.* (2005) estudando em aterros no Novo México (USA) mostraram que as camadas evapotranspirativas apresentaram maior eficiência em minimizar a drenagem da água do que os solos com perfis uniformes. No entanto, de acordo com Gee (2006) é necessário cautela para afirmar que as camadas evapotranspirativas sejam a solução para coberturas de aterros em regiões de clima árido ou semiárido, pois muitos estudos mostram resultados de curto prazo (geralmente menores que 10 anos) e que os modelos podem não prever adequadamente desempenhos em longo prazo.

De acordo McCartney e Zornberg (2002) é necessário que haja uma quantidade ótima de água a ser infiltrada em um aterro, para satisfazer as condições de biodegradação e a geração de lixiviados em níveis ambientalmente aceitáveis. Por

isso as camadas evapotranspirativas podem ser consideradas boas alternativas, já que não impermeabiliza completamente a cobertura do aterro.

Além das camadas monolíticas, as camadas evapotranspirativas podem ter configuração denominada de barreira capilar. Essa barreira consiste de uma fina camada de material (camada capilar) que é construída acima de uma camada de material mais grosso (bloco capilar) como mostrado por Zorneberg e McCartney, (2007) na Figura 17.



**Figura 17: Perfil de uma Barreira Capilar (ZORNBERG e McCARTNEY, 2007)**

De acordo com Wedland e Cunha (2004) a drenagem da umidade retida pode ser provocada quando a interface solo fino/grosso apresenta uma inclinação em relação à horizontal. Essa declividade introduz uma componente de força gravitacional e a umidade escoar pela camada de solo fino, sem invadir o solo grosso. Em caso de acumulação de umidade na camada superior, a força gravitacional pode vencer a resistência capilar no solo fino e a umidade atingir a camada inferior. A pressão hidrostática a partir da qual a umidade invade o solo grosso é definida como pressão de entrada de água (ou de invasão) para esse material.

De acordo com Vieira (2005) a eficiência da barreira capilar está ligada à capacidade de retenção e distribuição de água nos poros, ou seja, ao fenômeno da capilaridade nos solos. Seu funcionamento é baseado no princípio do fluxo em solos

não saturados com diferentes texturas. A Figura 18 mostra, segundo Qian *et al.* (2002), o movimento de água em uma barreira capilar.

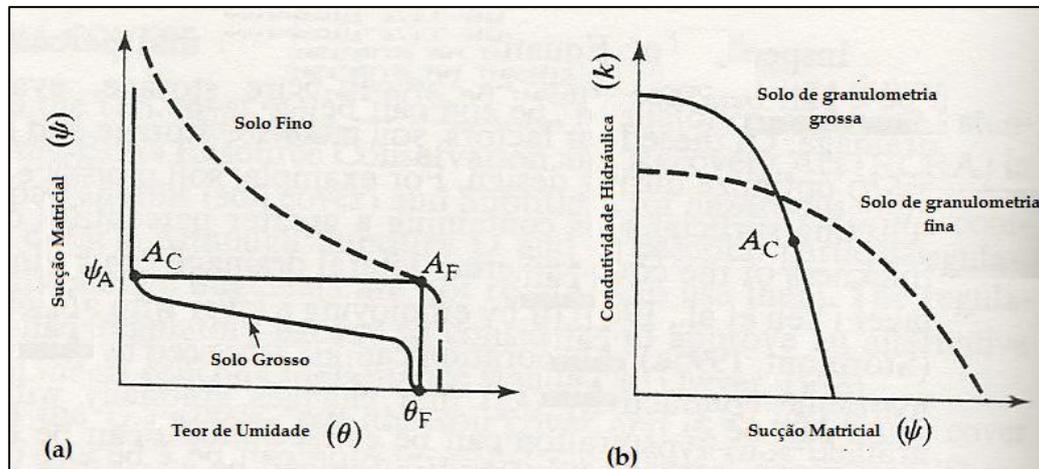


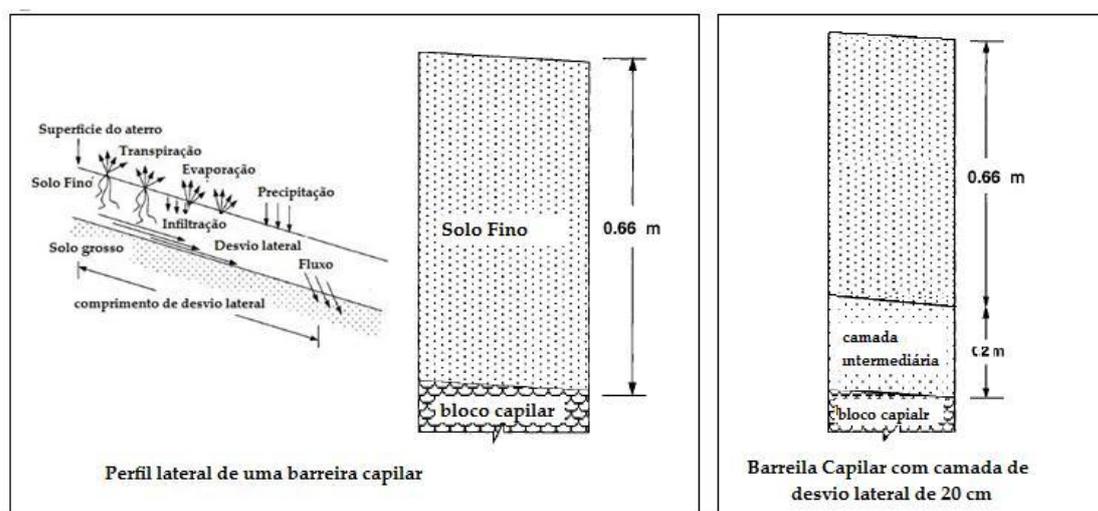
Figura 18: Barreira Capilar (KHIRE *et al.*, 1999 citado por Qian *et al.* 2002)

A água entrará no bloco capilar quando o teor de umidade do solo mais fino se aproximar da saturação ( $\theta_F$ ) na interface com o bloco capilar, e a sucção do bloco capilar atingir o valor de entrada de água (MORRIS e STORTMONT, 1999). Esse ponto se dá exatamente na mudança brusca da inclinação da curva de retenção de água (sucção de entrada de água), correspondente a uma umidade próxima da umidade residual para o bloco capilar (ponto  $A_C$ ) e sucção matricial  $\psi_A$ . A continuidade da poro-pressão na interface dos dois solos requer que a sucção matricial no solo fino seja também igual a  $\psi_A$ , antes que a água entre no bloco capilar. Esta umidade é próxima à umidade de saturação ( $\theta_F$ ) e corresponde ao ponto  $A_F$  na curva característica do solo de granulometria fina. Mesmo quando  $A_F$  é alcançado, a água ainda entrará para o solo de granulometria grossa lentamente porque a saturação e a consequente condutividade hidráulica desse solo é baixa nesse ponto ( $A_C$ ), e geralmente é menor que a condutividade hidráulica para o solo de granulometria mais fina, na mesma sucção matricial ( $\psi_A$ ), como mostrado na Figura 18 (b). Assim sendo, se a camada inferior permanece não saturada, o solo fino acima tenderá a funcionar como um reservatório de umidade e a camada inferior se comporta como uma barreira à infiltração.

Na barreira capilar, a camada de solo fino tem as mesmas funções que nas barreiras monolíticas (constituídas de uma só camada de solo), ou seja, armazenar

água até que esta seja removida do solo pelos mecanismos de evapotranspiração. Dessa forma, as barreiras capilares permitem que a camada de solo fino retenha mais água, que em uma camada monolítica de mesma espessura (MARIANO, 2008).

A inclusão de uma camada intermediária de granulometria grosseira entre o solo fino e o bloco capilar é discutida por Morris e Stortmont (1999) como forma de aumentar a drenagem lateral. Esse material deve ter permeabilidade suficiente para desviar o fluxo que se desloca lateralmente para baixo de modo que não atinja o bloco capilar, como mostrado na Figura 19.



**Figura 19: Esquema de uma Barreira Capilar com desvio lateral (MORRIS e STORTMONT, 1999)**

De acordo com Morris e Stortmont (1999) as barreiras capilares perdem desempenho em períodos chuvosos quando a intensidade da precipitação é grande e a evapotranspiração diminui e cita como vantagens delas a maior longevidade e custos baixos. No entanto Gee (2006) cita que os custos de construção das barreiras capilares podem ser maiores que um sistema convencional com geossintético, tendo em vista que os custos dos materiais que formam o bloco capilar podem ser de 5 a 10 vezes maiores de um lugar para outro, necessitando que esses custos sejam avaliados de acordo com o local onde se deseja instalar a barreira capilar.

Zornberg e McCartney (2007) relatam como vantagens adicionais das camadas evapotranspirativas e barreiras capilares a minimização do ressecamento em função da manutenção de umidade, a facilidade de construção e a baixa manutenção. Além

disso, essas camadas podem ser razoavelmente construídas com uma ampla gama de solos, o que pode levar a significativas reduções de custos.

O projeto das camadas evapotranspirativas e barreiras capilares têm como princípio assegurar o armazenamento de água infiltrada pela precipitação até que ela possa ser posteriormente removida por evapotranspiração. As principais variáveis do projeto são a espessura da camada de solo mais fino (que depende da capacidade de retenção de água) e a quantidade de evapotranspiração (que depende do clima local) (MORRIS e STORTMONT, 1999).

Abichou *et al.* (2003) mencionam que o projeto das camadas evapotranspirativas consiste em (i) avaliar as características do solo, característica da vegetação e dados climatológicos; (ii) estimar a espessura com base na capacidade de retenção de água (iii) usar modelos de balanço hídrico para verificar a espessura estimada. A espessura da camada de cobertura é determinada com base na precipitação durante a estação em que a vegetação está em dormência<sup>7</sup>, e a capacidade de armazenamento do solo. Usando os dados climatológicos e os dados de crescimento da cobertura vegetal, a precipitação que irá se infiltrar fora da estação de crescimento da vegetação é obtida através Equação 3 (ABICHOU *et al.*, 2003).

$$P_o = P_t - P_{gs} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

P<sub>o</sub> = Precipitação que se infiltra fora da estação de crescimento (mm)

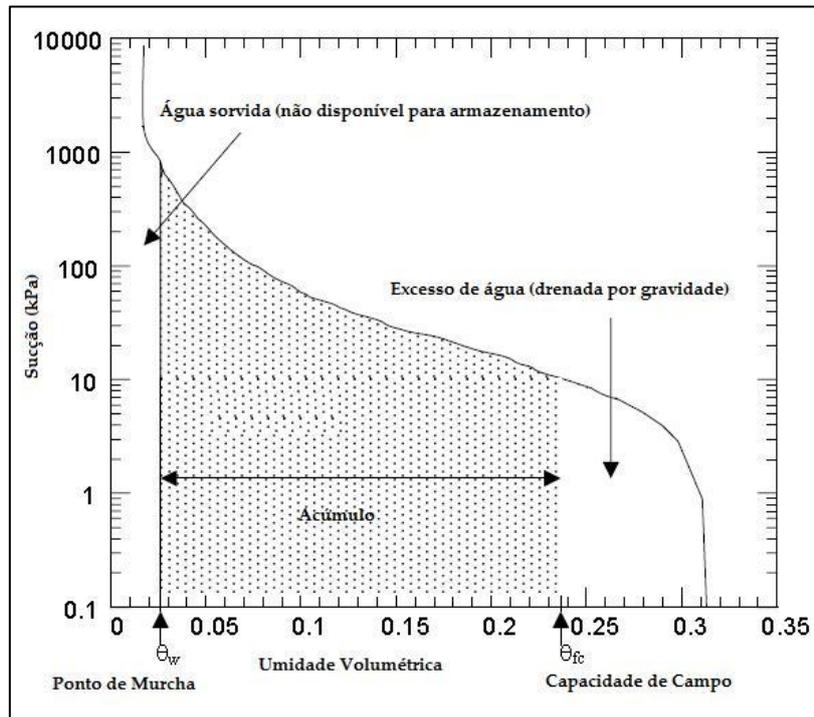
P<sub>t</sub> = Precipitação total anual (mm)

P<sub>gs</sub> = Precipitação durante o crescimento da vegetação (mm)

O solo deve ter capacidade de armazenamento para essa precipitação calculada, sendo essa capacidade obtida através da curva característica, como pode ser visto na Figura 20.

---

<sup>7</sup> Fase de repouso natural da vegetação durante condições desfavoráveis ao seu crescimento (p. ex. escassez de água e altas temperaturas).



**Figura 20: Determinação da capacidade de armazenamento através da curva característica (ABICHOU *et al.*, 2003)**

A capacidade de armazenamento ( $\theta_a$ ) é a umidade compreendida entre o ponto de murcha<sup>8</sup> ( $\theta_w$ ) e a capacidade de campo do solo ( $\theta_{fc}$ ). A espessura da camada então vai corresponder à relação entre essa precipitação ( $P_o$ ) e capacidade de armazenamento, como mostrada na Equação 4, sendo essa consideração uma premissa inicial de que o solo deve ser capaz de armazenar água durante o período de dormência da vegetação (períodos secos) (ABICHOU *et al.*, 2003).

$$L = \frac{P_o}{\theta_a} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

L = Espessura da camada (m)

P<sub>o</sub> = Precipitação que se infiltra fora da estação de crescimento (m)

$\theta_a$  = Capacidade de armazenamento do solo ( $m^3/m^3$ )

<sup>8</sup> Teor de umidade de um solo no qual as folhas de uma planta que nele cresce atingem, pela primeira vez, um murchamento irreversível, aceitando-se que a umidade no ponto de murcha permanente equivale a uma sucção de 1,5MPa (MAIA, *et al.*, 2005)

Ainda de acordo com Abichou *et al.*, (2003) esta espessura calculada é uma aproximação grosseira, sendo necessário que se utilize modelos computacionais de balanço hídrico para melhorar e aumentar a precisão das condições de projeto (tais como UNSAT-H, VADOSE, HELP etc.).

A Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) estabeleceu valores máximos aceitáveis para infiltração de água em camada de cobertura em função do clima, como mostrado Tabela 4. Esses valores são referência para projetos de camadas alternativas às convencionais, estabelecendo que a percolação seja menor ou igual à requerida para a camada prescritiva (de solo compactado ou com uso de geomembrana) que seria utilizada, de acordo como clima da região onde o aterro será implantado.

**Tabela 4: Infiltração equivalente a coberturas prescritivas**

Tipo de Cobertura Prescritiva	Infiltração Anual máxima (mm/ano)	
	Clima semi-árido e árido (P/ PET < 0,5)	Clima úmido (P/ PET > 0,5)
Camada de solo compactado	10	30
Sistema composto (solo compactado e geomembrana)	3	3

*P* = Precipitação; *PET* = Evapotranspiração Potencial  
 Fonte: ISSMGE citado por BOSCOV (2008)

Albright *et al.* (2004) avaliaram o desempenho, com foco no balanço hídrico de camadas evapotranspirativas, como alternativa para camadas convencionais (de solo compactado e solo compactado com GLC), em locais de diferentes climas nos EUA. Os tipos de clima foram classificados a partir da relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (P/PET) em clima árido ( $0,03 < P/PET \leq 0,2$ ), semiárido ( $0,2 < P/PET \leq 0,5$ ), sub úmido ( $0,5 < P/PET \leq 0,75$ ) e úmido ( $P/PET > 0,75$ ). Foram estudadas camadas do tipo camadas evapotranspirativas e barreiras capilares com variações de espessura e materiais como mostrado na Figura 21.

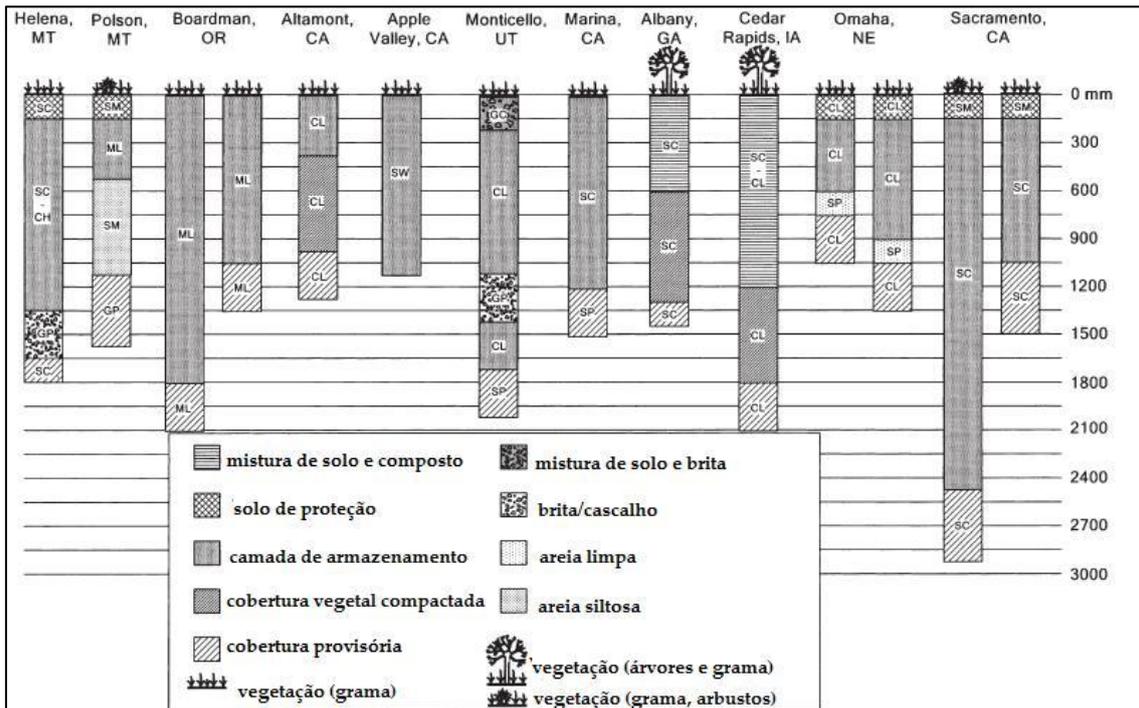
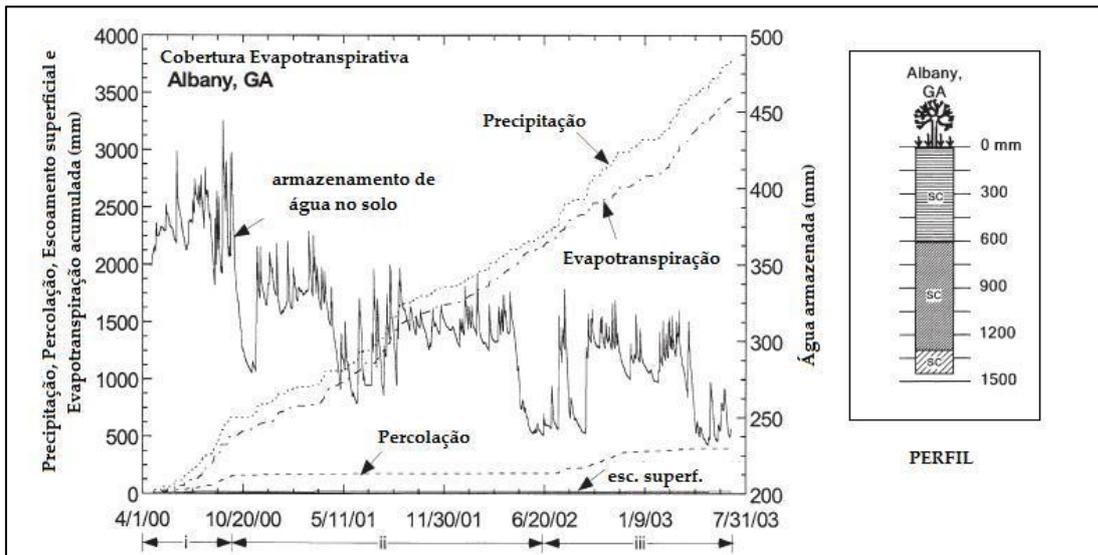


Figura 21: Perfis das camadas alternativas avaliadas por Albright et al. (2004)

O balanço hídrico das camadas alternativas foi determinado a partir de medições feitas em lisímetros instalados na cobertura (10 m x 20 m). Os resultados mostraram que as camadas alternativas do tipo evapotranspirativa (ET) localizadas em climas úmidos não foram efetivas, assim como as camadas convencionais com apenas uma camada de solo. A infiltração na camada ET variou de 123 a 160 mm (10% a 18% da precipitação) em área com barreira monolítica e presença de árvores e gramíneas. Considerando a presença de uma barreira capilar, a percolação variou de 33 a 57 mm/ano (6% a 10% da precipitação), em áreas com gramíneas.

A maioria das camadas alternativas do tipo evapotranspirativa (ET) em locais de clima úmido comportaram-se de acordo com o princípio do balanço hídrico, apresentando percolação quando a capacidade de armazenamento de água era excedida. Para o aterro de Albany (Geórgia-EUA) o comportamento da camada ET variou com o desenvolvimento de vegetação e do perfil de formação do solo, como mostrado na Figura 22.



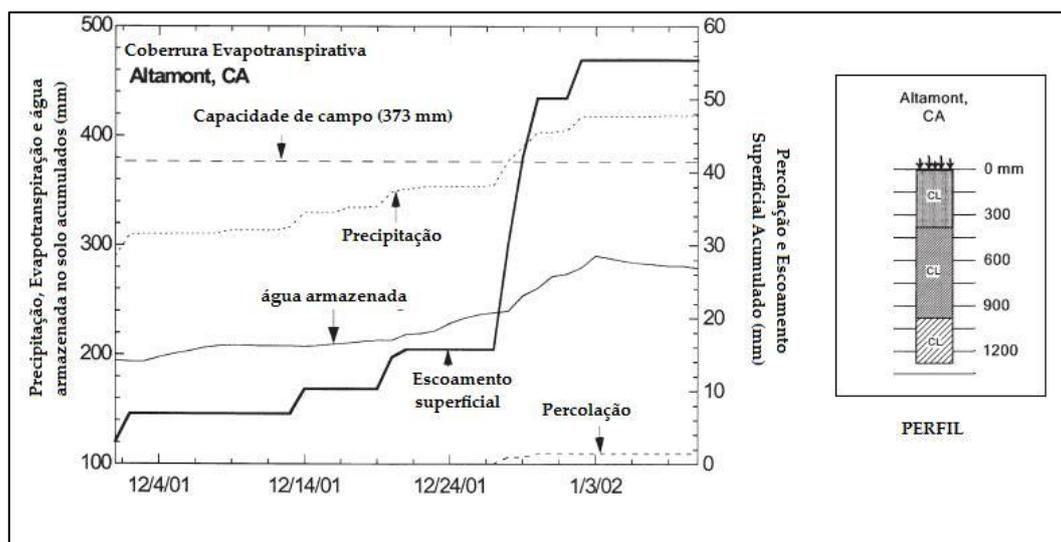
**Figura 22: Balanço hídrico para o lisímetro de Albany (Geórgia-EUA) com uma camada evapotranspirativa (ALBRIGHT et al., 2004)**

Os autores mencionam que os primeiros 6 meses, foram caracterizados pela alta taxa de infiltração e alto armazenamento de umidade, antes da vegetação se instalar (árvores de maior porte). Nos 21 meses seguintes observou-se uma pequena infiltração em função do rápido desenvolvimento das árvores e secagem do perfil do solo devido à transpiração. No final do período de monitoramento, o perfil do solo continuou com baixas umidades devido a seca e a transpiração das plantas, com taxas de infiltração semelhantes às apresentadas nos primeiros 6 meses de monitoramento. Nesse último período a infiltração seguiu-se sempre a eventos de precipitação, sugerindo a existência de fendas devido ao ressecamento do solo ou a penetração de raízes na cobertura.

Para as camadas ET em clima árido, semiárido e sub-úmido as taxas de infiltração ficaram abaixo de 1,5 mm/ano (0,4% da precipitação) em 7 dos 10 locais estudados. Elas se mostraram efetivas quando comparadas com camadas convencionais com geocomposto, que apresentaram taxa de infiltração de 12 mm/ano (1,4% da precipitação), para o mesmo regime climatológico,

A pequena infiltração apresentada na ET de Altamont (Califórnia-EUA) em clima semiárido coincidiu com eventos de forte precipitação. A existência de infiltração mesmo com a umidade abaixo da capacidade de campo sugere fluxos preferenciais ou alagamentos em pontos localizados, como pode ser visto na Figura 23, quando em

dezembro de 2001 uma intensa precipitação de 51 mm em 7 dias, resultou em infiltração, embora o solo estivesse com umidade inferior a capacidade de campo.



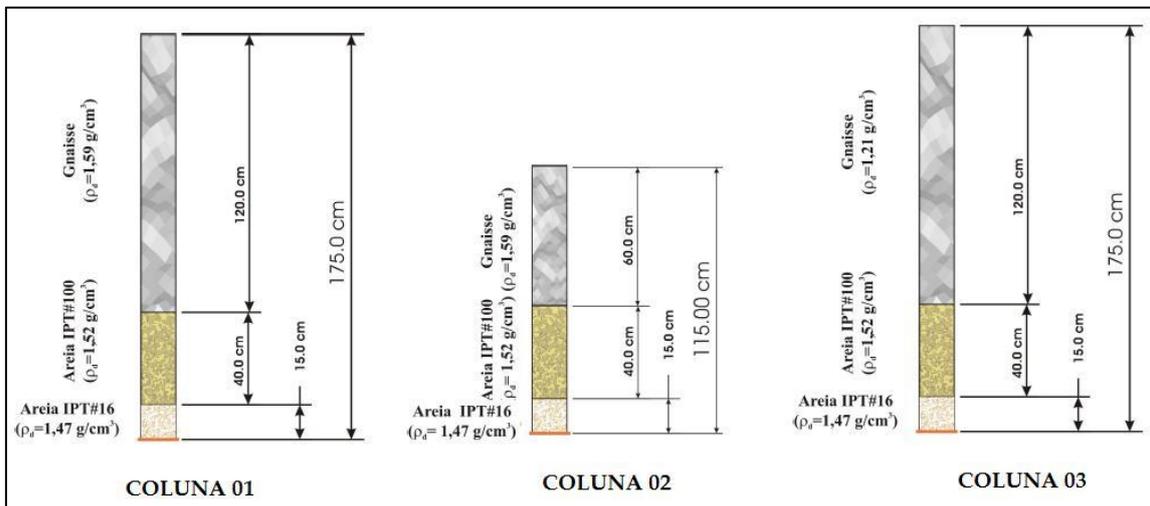
**Figura 23: Balanço hídrico em camada evapotranspirativa no período de dezembro de 2001 a janeiro de 2002 (ALBRIGHT *et al.*, 2004)**

Dwyer (2003) estudou a infiltração em duas camadas alternativas (barreira capilar e evapotranspirativa) e uma camada convencional normatizada pela Legislação Americana, em um aterro experimental do Novo México, (clima árido). Os resultados mostraram que ao longo do tempo, a camada ET foi mais eficiente, proporcionando menor infiltração, devido principalmente ao mecanismo de evapotranspiração que removeu mais umidade do solo, minimizando assim a infiltração. A barreira capilar também se mostrou bastante eficiente, com infiltração de mesma magnitude.

Suzuki *et al.* (2005) estudaram uma barreira capilar com inclinação de 5%, com 0,30 m de espessura de areia e 0,25 m de cascalho, para controle de infiltração em região de clima úmido, com precipitação anual de cerca de 1.600 mm (Japão), comparando com duas camadas convencionais de 0,50 m e 1,50 m com solo. O balanço hídrico da barreira capilar apresentou uma infiltração de 48 mm/ano correspondendo a 2% da precipitação, enquanto que a camada convencional, com espessura de 50 mm, apresentou 998 mm e a de 1,5 m apresentou 912 mm de infiltração, correspondendo respectivamente a 49% e 44% da precipitação observada.

Vieira (2005) realizou extensa pesquisa de laboratório em barreiras capilares com o objetivo de verificar o comportamento em condições distintas de compactação,

diferentes espessuras de camadas e em condições controladas de evaporação e infiltração. As colunas foram executadas em tubo de PVC de 0,15 m de diâmetro como mostrado na Figura 24.



**Figura 24: Experimentos em barreiras capilares (VIEIRA, 2005)**

As barreiras foram submetidas a condições extremas de infiltração e evaporação, e em condições de chuvas intensas simuladas, com materiais com diferentes densidades seca. Os resultados experimentais indicaram que a eficiência da barreira foi mais influenciada pelas condições de infiltração do que pela retenção de água, e que o escoamento superficial exerceu forte influência no balanço hídrico. Além desse aspecto, verificou-se que as condições de chuvas de baixa intensidade e longa duração foram mais desfavoráveis à efetividade da barreira, do que chuvas de alta intensidade e curta duração. As barreiras capilares com mesma densidade seca ( $15,9 \text{ kN/m}^3$ ) tiveram mesma efetividade, mesmo com espessuras diferentes (0,60 m e 1,20 m). Comparando-se o desempenho em diversas intensidades de chuvas, a barreira capilar de 0,60 m espessura e densidade seca de  $15,9 \text{ kN/m}^3$  foi mais eficiente que a de a barreira capilar com 1,20 m de espessura e densidade seca de  $12,1 \text{ kN/m}^3$ .

Catapreta (2008) estudou em lisímetros de laboratório, uma camada do tipo ET e uma barreira capilar, submetendo-as a variações de precipitação. A camada ET apresentou um melhor desempenho, liberando uma menor quantidade de líquido infiltrado quando submetida a precipitações intensas (maiores do que a capacidade de retenção das colunas) do que uma abarreira capilar de mesma espessura. Com

precipitações simuladas menores que 70 mm acumuladas em um mês, as duas camadas foram eficientes em termos de retenção de água.

Melchior *et al.* (2010) avaliaram a estrutura e o funcionamento ao longo do tempo, de uma barreira capilar no aterro de Georgswerder-Hamburgo, Alemanha, com o objetivo de determinar o impacto nas taxas de infiltração decorrentes das modificações na estrutura. A região apresentou uma precipitação média anual entre 717 a 899 mm no período de 1991 a 2005. A barreira capilar foi construída com inclinação de 20% para drenagem lateral, abaixo de uma camada de solo coesivo cujo objetivo era proteger a barreira de altas taxas de infiltração. O balanço hídrico para essa barreira capilar é mostrado na Figura 25.

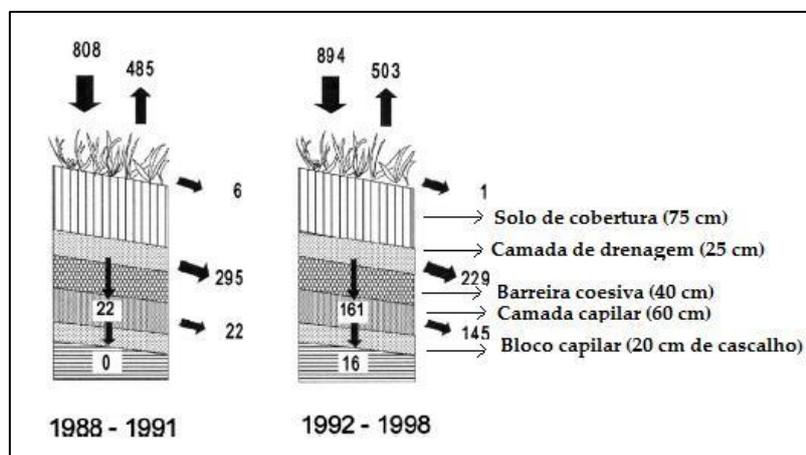


Figura 25: Balanço hídrico da Barreira capilar (MELCHIOR *et al.*, 2010)

Nos primeiros três anos apenas 22 mm/ano alcançou a barreira capilar e foi totalmente drenada lateralmente. Após formação de fissuras uma média de 161 mm/ano alcançou a barreira e 10% dessa quantidade infiltrou verticalmente através da barreira capilar, correspondendo a uma taxa de infiltração de 1,8% da precipitação.

As camadas ET e barreiras capilares utilizam as características geotécnicas do solo para evitar infiltração da água na superfície dos aterros e ao mesmo tempo impedem a saída de gases, pois ao manter umidade por um tempo mais prolongado diminuem o fluxo de gases.

Christophersen *et al.* (2001) avaliaram em estudo de migração de gases em aterros velhos na Dinamarca, que o modelo de fluxo de gases no aterro poderia ser formulado a partir dos dados de concentrações dos gases, umidade da parte superior

do perfil do solo, espessura da camada de cobertura, temperatura, pressão barométrica e gradiente de pressão. Nesse caso, análises estatísticas provaram que a variação de fluxo apresentou maior correlação com a umidade.

Embora as camadas ET e barreiras capilares não tenham como objetivo a oxidação de  $\text{CH}_4$ , as características do perfil do solo favorecem reações desse tipo. Geralmente, o solo de textura grossa apresenta uma maior taxa de oxidação do  $\text{CH}_4$  do que solos finos devido a sua capacidade de aeração (BOECKX *et al.*, 1996; WATZINGER *et al.*, 2005, GEBERT *et al.*, 2010). Além da textura do solo, a maior espessura da camada aumenta o tempo de retenção de  $\text{CH}_4$  resulta em uma maior proporção oxidada, como verificado por Abichou *et al.* (2006a) e Stern *et al.* (2007).

Berger *et al.* (2005) apresentam estudos com uma barreira capilar sobreposta com uma camada de composto misturado ao solo (simulando uma camada metanotrófica) para avaliar o desempenho desse sistema com relação à oxidação de  $\text{CH}_4$ , além das implicações na infiltração de líquidos, como mostrado na Figura 26.

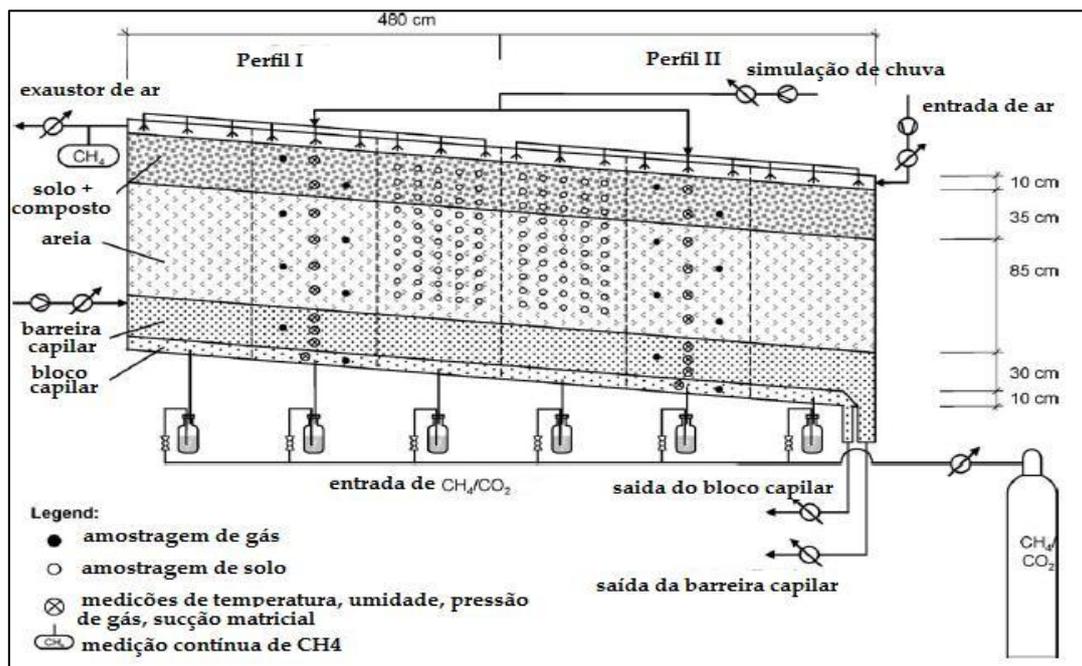


Figura 26: Planta Experimental Barreira (BERGER *et al.* 2005)

O sistema simulava um aterro em campo, com as variações climatológicas sendo impostas por alteração da temperatura do ambiente, inserções de água simulando precipitação, e uma mistura de gás  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  na base que simulava o

biogás. Após 33 semanas de avaliação, a cobertura se mostrou adequada com oxidação de 80% a 95% de CH<sub>4</sub>, mesmo em baixas temperaturas. Embora a carga de CH<sub>4</sub> imposta tenha sido baixa (55 g/m<sup>2</sup>.dia), esse sistema pode se tornar atrativo como alternativa para aterros com baixa taxas de geração de biogás, tais como aterros antigos ou contendo resíduos biologicamente tratados previamente. Nessa pesquisa o fator que mais influenciou na taxa de oxidação de CH<sub>4</sub> foi a aeração do solo, tendo em vista que após simulação de chuvas, as taxas de oxidação diminuíram em decorrência da menor oxigenação, devido a saturação do solo.

### 2.3.3 Emissões de CH<sub>4</sub> em aterros de RSU

As emissões de biogás dos aterros sanitários podem ser reduzidas através da extração de CH<sub>4</sub> antes que ele seja liberado para a atmosfera, ou através da oxidação em camadas de cobertura. A extração do biogás dos aterros pode se dá de forma natural ou forçada. Uma vez captado, o biogás pode ser queimado ou usado como fonte de energia. A eficiência de um sistema de extração forçada depende do projeto e da idade do aterro, das características do solo e do meio ambiente. Normalmente, a eficiência de coleta situa-se num intervalo de 40 a 90% (HETTIARATCHI e POKHREL, 2003). Dependendo da eficiência da extração, a redução das emissões pode atingir 35% a 90% (SPOKAS *et.al.*, 2006).

O balanço de massa de carbono em um aterro sanitário pode ser expresso pela soma das parcelas do CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> gerado, armazenado, oxidado e emitido. A Figura 27 mostra o balanço de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> em um aterro de resíduos sólidos, adaptado do IPCC (2007) e de Scheutz *et al.* (2009).

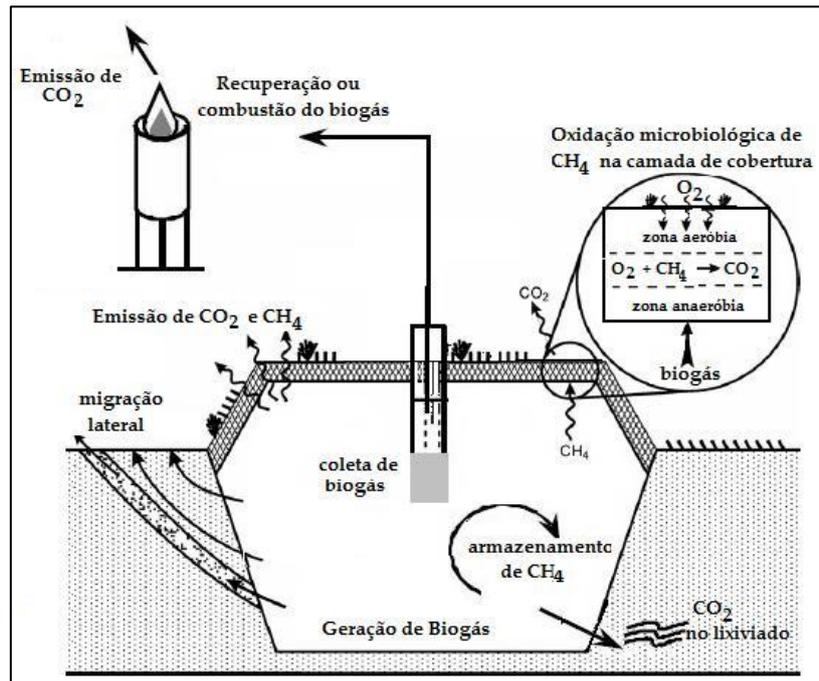


Figura 27: Balanço de metano e dióxido de carbono em aterros de RSU (SCHEUTZ *et al.*, 2009 e IPCC, 2007)

Na prática, a metodologia padrão para cálculo da geração de  $\text{CH}_4$  a partir de aterros de RSU utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) é escrita como mostrado na Equação 5.

$$\text{CH}_4_{\text{gerado}} = \Sigma (\text{CH}_4_{\text{emitido}} + \text{CH}_4_{\text{recuperado}} + \text{CH}_4_{\text{oxidado}}) \quad \text{Eq. 5}$$

Bogner *et al.* (1995) cita um conjunto de variáveis do solo tais como textura, umidade e temperatura, assim como a existência ou não de recuperação de biogás e variações na pressão atmosférica local como os principais fatores que devem ser analisados em estudos de emissões em camadas de cobertura.

Maciel (2003) apresentou os principais fatores que influenciam nas emissões superficiais de  $\text{CH}_4$  em seus estudos sobre camadas de cobertura de aterros de RSU. Os fatores foram agrupados de acordo com o ambiente interno a massa de resíduos, a camada de cobertura e a fatores climáticos ou sazonais. Com relação à camada de cobertura os principais fatores que implica nas emissões de  $\text{CH}_4$  são os aspectos geotécnicos, a configuração da camada e os aspectos ligados a oxidação.

Fischer (1999) afirma que as emissões em aterros de RSU variam muito ao longo do tempo, tanto diariamente como ao longo das estações do ano (sazonalmente). Além de fatores como pressão, precipitação e temperatura, o transporte do gás através do solo de cobertura pode ocorrer por processos tais como a adsorção e a oxidação de compostos orgânicos ou sua solubilização na fase líquida, alterando suas emissões. Da mesma forma Borjesson e Svensson (1997) realizaram extenso estudo sobre as variações sazonais e diurnas de emissões de CH<sub>4</sub> em aterros na Suécia, concluindo que as emissões de CH<sub>4</sub> têm um padrão sazonal e bastante relacionado com as variações climáticas, devido a influência dos parâmetros ambientais com processos de oxidação, que conseqüentemente se reflete nas taxas de emissões.

Scheutz *et al.* (2009) menciona que campanhas de campo indicaram que as emissões de CH<sub>4</sub> em aterro são influenciadas por (i) limitações físicas para o transporte de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> resultantes da dinâmica espacial e temporal das mudanças no grau de aeração do solo, principalmente pelas variações de umidade do solo (ii) taxas *in situ* de oxidação de CH<sub>4</sub> que são dependentes da capacidade de oxidação, temperatura, umidade, competição e outros fatores microbiológicos, e (iii) a presença ou ausência de sistemas de extração de gás sendo que muitos desses fatores estão interrelacionados.

As emissões de CH<sub>4</sub> têm sido avaliadas por diversos métodos de medições tais como métodos micrometeorológicos e uso de traçadores, câmara de fluxo estática e dinâmica e técnicas de gradiente de concentração e de pressão. A escolha do método depende da escala desejada e da finalidade das medições. Algumas técnicas têm sido testadas e aperfeiçoadas em diversas situações de campo para serem usadas nas estimativas das emissões de pequenas áreas definidas e, assim, fornecer emissões "pontuais" de biogás, enquanto outras técnicas permitem a estimativa global de fluxos para áreas maiores, como por exemplo, para um aterro inteiro (SCHEUTZ *et al.*, 2009).

Diversos estudos utilizando a câmara de fluxo estática e métodos micrometeorológicos apresentam variações de emissões de CH<sub>4</sub> desde valores negativos até 14.794 g/m<sup>2</sup>.dia. Esses estudos apresentam relações entre as emissões de CH<sub>4</sub> e fatores tais como o ambiente interno do aterro (existência de captação de gases, recirculação de lixiviados, idade dos resíduos), as características da camada de cobertura (espessura, tipo de solo, vegetação) e as variações do clima local

(temperatura, precipitação, pressão atmosférica), que são específicos de cada aterro. As taxas negativas indicam que o fluxo de gás está no sentido inverso, ou seja, de fora para dentro da massa de resíduos. (BOECKX *et al.*, 1996; BORJESSON e SVENSSON, 1997; PARK e SHIN, 2001; MACIEL, 2003; SCHEUTZ *et al.*, 2003b; HUBER-HUMER, 2004; FOURIE e MORRIS, 2004; McBAIN *et al.*, 2005; ABICHOU *et al.*, 2006b; LOHILA *et al.*, 2007; FRANZIDIS *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2008; AKERMAN *et al.*, 2007; MARIANO, 2008; ABICHOU *et al.*, 2009; BABILOTTE, *et al.*, 2010).

A Tabela 5 apresenta a variação de emissão de CH<sub>4</sub> medidas em alguns estudos utilizando metodologia de câmara de fluxo estática e medidas micro meteorológicas, realizados em diversos aterros no mundo, com as características da cobertura utilizada e de exploração do biogás.

**Tabela 5: Emissões de CH<sub>4</sub> reportados na literatura em camadas de cobertura**

Referência	Cobertura	Extração de biogás	Período de análise	Fluxo de CH <sub>4</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)
Boeckx <i>et al.</i> (1996)	0,3 m de solo com cobertura vegetal e arbustos	Não	Jun/94 a Dez/94	-0,0059 a 0,91
Borjesson e Svensson (1997)	0,1 m a 0,8 m de solo arenoso	N.I.	Mai/92 a Jul/94	-0,3 a 18,4
Park e Shin (2001)	0,5 m a 0,7 m de areia siltosa	Sim	N.I.	0 a 14.794
Maciel (2003)	0,25 m a 0,90 m de solo compactado	Não	Mar/03 a Mai/03	102 a 363
Scheutz <i>et al.</i> (2003b)	0,8 m de solo argiloso acima de 0,4 m de areia grossa	Sim	Set/01	-0,01 a 10
Huber-Humer (2004)	0,9 m de composto de lodo de esgotos sobre 0,3 m de cascalho	Sim	Jul/99 a Set/01	-0,5 a 2,1
	0,9 m de composto de RSU sobre 0,3 m de cascalho	Sim		-3,3 a 5,6
	0,4 m de composto de lodo de esgotos sobre 0,3 m de cascalho	Sim		0 a 706,8
	0,3 m de composto de lodo de esgoto sobre 0,3 m de solo compactado	Sim		0,2 a 173,9
	Superfície de aterro descoberto (ref.)	Sim		0,3 a 1.181,0

Tabela 5 Continuação

Referência	Cobertura	Extração de biogás	Período de análise	Fluxo de CH <sub>4</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)
Fourie and Morris (2004)	0,1 m de areia argilosa	Não	Mar/99 e set/99	-45,0 a 638,0
	0,1m a 0,6m de areia argilosa e argila de baixa plasticidade	N.I.	Mar/99	0 a 410,0
	0,1m a 0,2 m de areia siltosa	N.I.	Mar/99	0 a 347,0
	0,15 m a 0,6 m de areia siltosa argilosa	N.I.	Mar/99	0 a 385,0
McBain <i>et al.</i> (2005)	0,5 m a 1,5m de argila compactada	Não	Jun/02 a Ago/02	7,0 a 39,0
Abichou <i>et al.</i> (2006b)	0,3 m a 0,6 m de solo argiloso	Não	Jun/03 a set/03	-14,0 a 1.755,0
	0,45 m de solo em talude	Não	Jun/03 a Jul/03	2,0 a 63,0
	0,15 m a 0,30 cm de solo (cobertura diária)	Não	Jun/03 a Nov/03	0 a 521,0
	0,45 m de solo em talude	Não	Set/03 a Fev/04	-6,1 a 343,0
Lohila <i>et al.</i> (2007)	Fina camada de RCD*	Sim	Jun/03 a Dez/03	0 a 259,2
Akerman <i>et al.</i> (2007)	1 m de cinzas e 0,3 de argila ou calcáreo	Sim	2005	0 a 15,2 <sup>(a)</sup>
	0,5 a 0,7 m de argila	Sim	2005	0 a 38,0 <sup>(a)</sup>
	0,5 m Argila (0,5 – 1m) +Solo	Sim	2005	0 a 2,0 <sup>(a)</sup>
Zhang <i>et al.</i> (2008)	0,8 m a 1,0 m de solo franco arenoso	Sim	Nov/06 a Jun/07	7,0 ± 22,0
	0,8 m a 1,0 m de solo franco arenoso	Sim	Mar/06 a Jun/07	14,0 ± 35,0 <sup>(b)</sup>
	8 m a 1,2m de solo franco	Sim	Mar/06/ a Jun/07	5,0 ± 12,0 <sup>(c)</sup>
Mariano (2008)	0,25 m a 0,9 m de solo areno argiloso	Não	Mar/06 a Nov/07	0,0 a 401,0
Abichou <i>et al.</i> (2009)	0,2 m a 0,6 de argila arenosa sobreposta 0,2 a 0,5 de areia fina	Não	Jan/05 a Dez/05	< 14,0
	1,10 m de composto sobreposto de 0,10 m de dreno de gás.	Não	Jan/05 a Dez/05	Até 0,04

CFE = Câmara de Fluxo Estática; TFD: Túnel de Fluxo dinâmico; MM: Método micro meteorológico; \*RCD: resíduos de construção e demolição; \*\*0,2 – 0,5 m de cobertura superficial e 0,5 – 2,0m de argila compactada e diatomácea; (a) obtido do gráfico (b) com irrigação e recirculação de lixiviado; (c) irrigação de lixiviado; N.I. Não informado

### 2.3.4 Determinação de taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> em camadas de cobertura

Muitos pesquisadores têm reportado altas taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> no solo de cobertura de aterros sanitários, porém a maioria desses trabalhos é baseada em experimentos de laboratório e simulações com dados campo (KIGHTLEY *et al.*, 1995; BOGNER *et al.*, 1997; HUBER-HUMER e LECHNER, 2001; STEIN *et al.*, 2001; De Visscher *et al.*, 2003b; GEBERT *et al.*, 2003; WILSHUSEN *et al.*, 2004a; POWELSON *et al.*, 2006, EINOLA *et al.*, 2008, RONCATO, 2009).

Os ensaios de laboratório que medem capacidade de oxidação de um determinado substrato utilizam experimentos em lote, que se constituem em uma ferramenta útil para a seleção de materiais a serem usados em biocoberturas. No entanto, esses experimentos apenas estimam, em campo, o desempenho de um material específico, tendo em vista a pequena amostra utilizada (geralmente cerca de 10 a 20 g).

Scheutz *et al.* (2003a) investigaram capacidade de oxidação de CH<sub>4</sub> e de atenuação de compostos orgânicos voláteis em coberturas de aterros sanitários em solo incubados com mistura sintética de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, simulando a composição de biogás em aterros. O solo proveniente da cobertura do Aterro de Skellingsted na Dinamarca, de amostras retiradas da profundidade entre 0,10 m e 0,90 m, mostrou uma alta capacidade de oxidação do CH<sub>4</sub>, resultando em remoção de 74 a 81%.

Inúmeras pesquisas utilizando uma variedade de materiais tem mostrado oxidação de CH<sub>4</sub> variando de 31 a 990 g/m<sup>2</sup>.dia com taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> chegando a 100% em alguns casos. A Tabela 6 apresenta alguns experimentos para determinação de taxas de oxidação feitos por diversos pesquisadores utilizando ensaios em colunas.

**Tabela 6: Experimentos em laboratório para determinação de taxas de oxidação**

Fonte	Vazão de CH <sub>4</sub>	Substrato	Taxa de oxidação de CH <sub>4</sub> máxima	
			(g/m <sup>2</sup> /dia)	%
Kinghtley <i>et al.</i> (1995)	5 ml/min	Areia grossa e argila e areia de cobertura de aterro	166	61
De Visscher <i>et al.</i> (1999)	7 ml/min 13 ml/min	Solo agrícola	171	79
		Solo de camada de cobertura	240	65
Hilger <i>et al.</i> (2000)	9 l/h	Solo de cobertura de aterro	283	15 a 50
Huber-Humer e Lechner (2001)	4 a 5 ml	Composto maturado (60 semanas)	400	100
		Composto fresco (20 semanas)	212	53
		Lodo de esgoto compostado	110	100
Stein <i>et al.</i> (2001)	5 ml/min	Solo de aterro	990	82
Wilshusen <i>et al.</i> , 2004a	7,5 a 8 ml/min	Composto oriundo de folhagens	400	95
		Composto oriundo de madeira	280	
		Composto de resíduos sólidos	250	
Powelson <i>et al.</i> (2006)	241 ml/min 484 ml/min	Poliestireno e composto de folhas e ramos	267	72
		Areia Grossa	423	58
Urmann <i>et al.</i> (2007)	2ml/min	Areia grossa	195	100
Einola <i>et al.</i> (2008)	2,5 a 5 ml/min	Resíduos sólidos urbanos biologicamente tratados	82	70
Roncato (2009)	1 a 9 ml/min	Areia e composto	52 a 115	64 a 96
		Areia e composto e cascalho	49 a 141	20 a 90
Rose <i>et al.</i> (2009)	5 ml/min	Solo	450*	68
		Solo e composto (3:1)	450*	96
		Solo e composto (1:1)	590*	16
		Composto	1000*	98

\*Obtidos das figuras apresentadas

Segundo Huber-Humer *et al.* (2009) procedimentos para a quantificação *in situ* da eficiência da oxidação de CH<sub>4</sub> ainda estão em fase de desenvolvimento e longe de ser comercialmente disponíveis. Um dos métodos mais precisos atualmente disponíveis para determinar a oxidação do CH<sub>4</sub> em camadas de cobertura de aterros é a técnica de medida de isótopos estáveis. Os altos custos das análises e a extrema sensibilidade do cálculo da eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub> baseada em variações

infinitesimais para o fator de fracionamento e o fracionamento devido ao transporte difusivo do gás, são os desafios de uso dessa técnica (HUBER-HUMER *et al.*, 2009; GEBERT *et al.* 2011). Esse método necessita de equipamentos e pessoal especializados e tem custo elevado (cerca de U\$ 100 por amostra) (TEIXEIRA, 2008).

De acordo com Nozhevnikova *et al.* (2003) esse método tem mostrado várias limitações causadas por variações da taxa de isótopo estável tendo também a desvantagem devido à alta variabilidade do fator de fracionamento do carbono, devendo ser específico para cada aterro. O método se baseia no consumo de isótopos de carbono leves ( $\delta^{12}\text{C}$ ) que são preferidos pelas bactérias metanotróficas, pois o  $\text{CH}_4$  produzido na degradação anaeróbia (em aterros) é rico em  $\delta^{12}\text{C}$  e pobre em isótopos de carbono mais pesado ( $\delta^{13}\text{C}$ ). As medições de  $\delta^{12}\text{C}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  são feitas através de cromatografia gasosa com espectrômetro de massa, em amostras de  $\text{CH}_4$  não afetado pela oxidação (interface solo/resíduo), e no que é emitido através da camada de cobertura, fornecendo assim as taxas de oxidação (De VISSCHER *et al.*, 2004; CHANTON e LIPTAY, 2000; STERN *et al.*, 2007; MAHIEU *et al.*, 2007). Os procedimentos para determinação da taxa de oxidação através da técnica do isótopo estável de carbono são apresentados por Abichou *et al.* (2006b) e Stern *et al.* (2007) que reportam eficiência média de 64% oxidação de  $\text{CH}_4$  em materiais com composto.

Abichou *et al.* (2009) utilizando modelos matemáticos para validar os experimentos de campo no aterro Leon County (Florida) com três biocoberturas de composto colocadas acima da camada de cobertura existente, encontrou eficiência de oxidação de 100% para biocobertura (com emissões nulas) e de 63% para uma cobertura controle.

Roncato (2009) utilizou a metodologia que se baseia no método de balanço de massa considerando a massa de  $\text{CH}_4$  que entra e sai do sistema ( $J_{\text{in}}$ ) e ( $J_{\text{out}}$ ) no experimento no aterro de St-Nicéphore no Québec, Canadá onde há extração de biogás. As taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  foram determinadas a partir das medições de concentração dos gases em perfil levando-se em consideração as taxas de respiração do substrato e a diluição dos gases em cada profundidade. A diferença entre as duas biocoberturas é a espessura e composição da camada de distribuição de biogás conforme mostrado nas Figuras 28 e na Tabela 7.

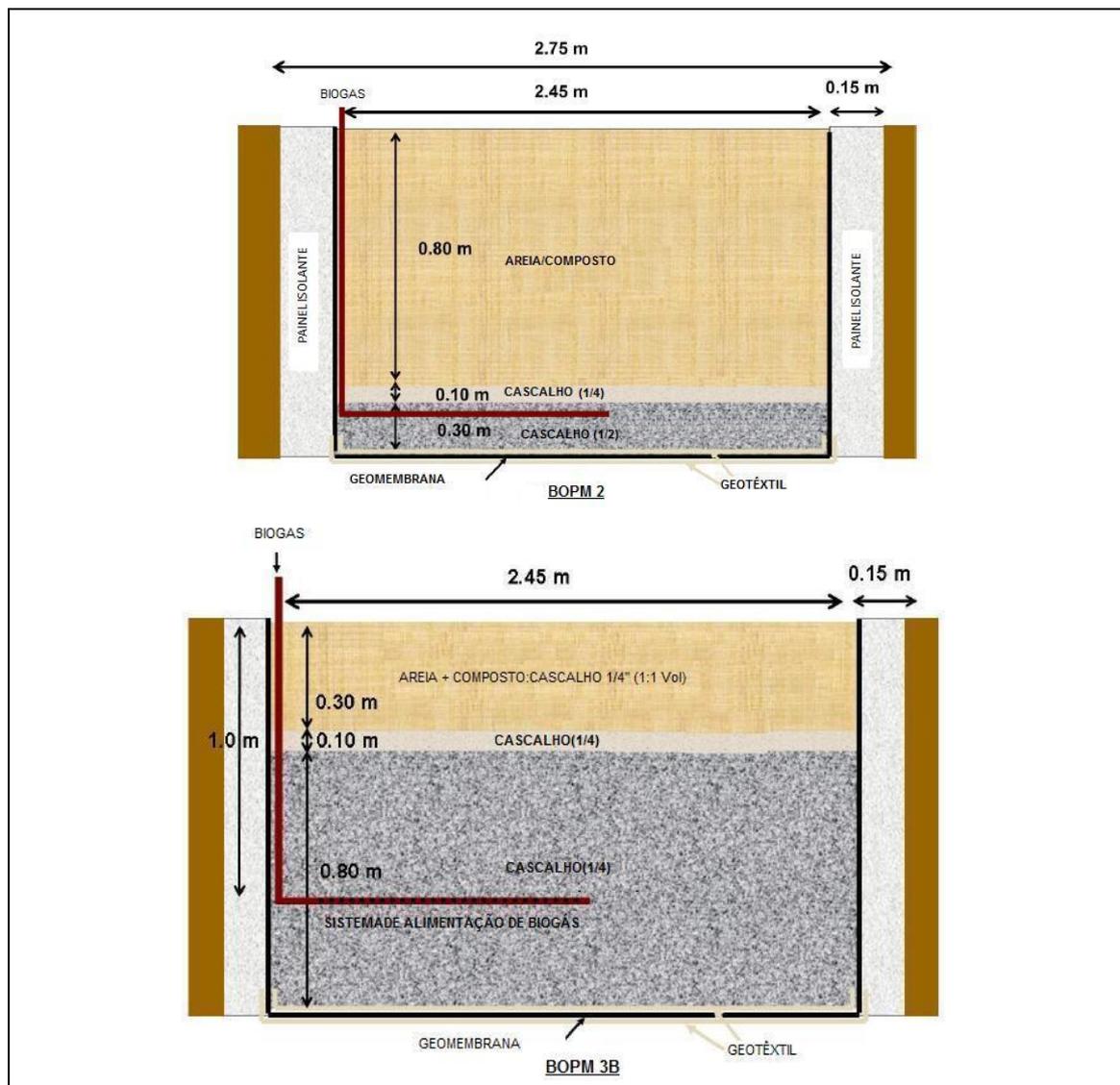


Figura 28: Biocoberturas (RONCATO, 2009)

Tabela 7: Características das biocoberturas de campo

Característica	BOPM2	BOPM 3B
Espessura da biocobertura	80 m	30 cm
Camada suporte de cascalho	10 cm	10 cm
Espessura da camada de distribuição de biogás	30 cm	80 cm
Densidade de campo	830 kg/m <sup>3</sup>	1.428 kg/m <sup>3</sup>
Peso específico dos grãos	2,24 g/cm <sup>3</sup>	2,74
Porosidade	64%	48%
Proporção de areia e composto (volume) cascalho	5:1:0	5:1:1
Teor de matéria orgânica	20%	6%

Fonte: RONCATO (2009)

As máximas taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  encontradas foi de  $625 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$  para a biocobertura BOPM2 e de  $42 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$  para a biocobertura BOPM3B. A maior taxa na BOPM2 foi atribuída à presença de vegetação que aumentou a porosidade do solo e assim permitiu maior entrada de oxigênio, favorecendo as reações de oxidação, além da presença de vegetação que aumentou a disponibilidade de nutrientes no solo. A baixa taxa de oxidação na BOPM3B foi atribuída à falta de vegetação que deixou a camada mais saturada, devido a eventos de elevada precipitação observado no período de estudo. Isso fortalece a teoria de que a vegetação contribui fortemente para a evapotranspiração removendo a umidade do solo superficial, e permitindo maior entrada de oxigênio.

Normalmente, as taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  obtidas no campo são menores do que a taxa de oxidação obtida em ensaios de coluna, porque não se podem controlar os parâmetros meteorológicos em campo. Outra razão é o fato de que no campo, pode haver fissuras que permitem a passagem direta de  $\text{CH}_4$ , sem oxidação. Os resultados obtidos em campo para a biocobertura BOPM3B em relação à coluna que usou o mesmo substrato reflete essa afirmação. Da mesma forma que para a biocobertura BOPM2, as altas taxas verificadas em campo não refletiram os resultados das colunas em laboratório que utilizaram o mesmo substrato, provavelmente devido a ausência de vegetação na superfície, o que em campo aumentou significativamente a eficiência de oxidação da biocobertura.

Gebert *et al.* ( 2011) propõem o método para estimar a eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  em coberturas de aterros e biofiltros a partir de concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  conhecidas em um perfil do solo. O método independe da natureza do fluxo (difusivo ou advectivo) e do efeito da diluição do gás pelo ingresso de ar atmosférico da superfície. Algumas considerações são assumidas pelo método:

- a) De acordo com a reação de oxidação 1 mol de  $\text{CH}_4$  é convertido em 1 mol de  $\text{CO}_2$ ;
- b) Supõe-se que em uma cobertura de aterro a população de metanotróficas é estável. Nestas condições não há transferência líquida de carbono para a biomassa microbiana, ou seja, a assimilação de carbono estará em equilíbrio com liberação de carbono, devido ao decaimento das células.
- c) O  $\text{CO}_2$  é produzido apenas pela oxidação do  $\text{CH}_4$ ;
- d) O  $\text{CO}_2$  na fase gasosa está em equilíbrio com o  $\text{CO}_2$  fase líquida;

- e) A precipitação de CO<sub>2</sub> é desprezível, como é o caso de solo não calcáreos;
- f) O sistema está em estado estável.

Dessa forma o volume de CH<sub>4</sub> oxidado é igual ao volume de CO<sub>2</sub> produzido e a quantidade de CH<sub>4</sub> oxidado em uma determinada profundidade pode ser derivada da Equação 6.

$$\frac{CO_{2biogás}+x}{CH_{4biogás}-x} = \frac{CO_{2i}}{CH_{4i}} \quad \text{Eq.6}$$

Onde:

$x$  = quantidade de CH<sub>4</sub> oxidada (% vol)

$CH_{4biogás}$  = concentração de CH<sub>4</sub> no biogás (%vol)

$CO_{2biogás}$  = concentração de CO<sub>2</sub> no biogás (% vol)

$CH_{4i}$  = concentração de CH<sub>4</sub> na profundidade  $i$  (%vol)

$CO_{2i}$  = concentração de CO<sub>2</sub> na profundidade  $i$  (%vol)

A partir da quantidade de CH<sub>4</sub> oxidado na profundidade  $i$  é possível se encontrar a eficiência de oxidação acumulada em uma determinada profundidade como sendo:

$$Efox = \frac{x}{CH_{4biogás}} \quad \text{Eq. 7}$$

Essa metodologia foi validada usando dados de balanço de massa de dois experimentos de coluna pesquisados por dois laboratórios independentes. A comparação da oxidação calculada pelo método do balanço de massa e pelo perfil de concentração do gás mostrou uma excelente correlação nos dados de eficiência de oxidação, indicando a aplicabilidade do método para locais onde o balanço de carbono é derivado da reação de oxidação. Rannaud *et al.* (2009), usando modelos de fluxo para simular a migração de CH<sub>4</sub> e a oxidação em camadas de cobertura, encontrou concordância com medidas de campo utilizando perfis de concentração de gases, em profundidade.

Gebert *et al.* (2011) menciona que esse método é uma forma de indicação de eficiência de oxidação e não do valor exato, e que permite uma avaliação qualitativa da oxidação  $\text{CH}_4$  em sistema de cobertura, além de proporcionar uma estratificação do eficiência de oxidação em todo o perfil de profundidade e, assim, uma melhor compreensão das variáveis de influência no processo tais como temperatura e umidade. Embora esse método apresente relativa facilidade algumas ressalvas devem ser feitas, tendo em vista que a taxa de fluxo de gás varia continuamente com as mudanças das pressões atmosféricas e precipitação, e que desse modo o estado estável raramente é conseguido em campo. Adicionalmente ainda deve se considerar os problemas devido à solubilidade do  $\text{CO}_2$  na água que é dependente da temperatura e da sorção das partículas no solo (RONCATO, 2009).

Gebert *et al.* (2011) apresentaram comparações entre eficiências de oxidação de  $\text{CH}_4$  obtidas de cálculos de balanço de massa e pelo método proposto (perfil de concentração) para materiais com alto teor de matéria orgânica (18%) e com baixo teor de matéria orgânica (6%). No caso de materiais com alto teor de matéria orgânica há uma superestimativa da eficiência de oxidação, se não for levado em consideração do  $\text{CO}_2$  proveniente da respiração da matéria orgânica existente no solo, embora seja sugerido que a taxa de respiração pode ser negligenciada em condições de altos fluxos de  $\text{CH}_4$  e de altas taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$ . Também foi mostrado que para altos fluxos de  $\text{CH}_4$  na base, a produção de  $\text{CO}_2$  no solo, devido a presença de matéria orgânica, torna-se desprezível nas determinações de eficiência de oxidação por esse método.

Outros métodos ainda não tão conhecidos também vêm sendo testados para avaliar a capacidade de oxidação de  $\text{CH}_4$  de coberturas metanotrófica *in situ*. (GEBERT e STREESE-KLEEBOURG, 2007 citado por HUBER-HUMER, 2009). Modelos matemáticos também vêm sendo utilizados para determinar taxas de oxidação a partir de parâmetros de controle tais como coeficientes de difusão e advecção dos gases no substrato estudado assim como os parâmetros da cinética de reação biológica (STEIN *et al.*, 2001; HETTIARATCHI e POKHREL, 2003; URMAN *et al.*, 2007; IM *et al.*, 2008, RANNAUD *et al.*, 2009).

## 2.4 FLUXO EM MEIO POROSO

As equações de transporte em meios poroso levam em consideração os fenômenos de fluxos por advecção, difusão e dispersão hidrodinâmica, e os processos físicos-químicos de retardamento (absorção) e decaimento (radioativo e microbiológico) (GUIMARÃES, 2006).

No fluxo de líquidos, a advecção (movimento de contaminantes devido ao fluxo de água) é controlada pela condutividade hidráulica do meio e pelo gradiente hidráulico. No fluxo de gás, a advecção é controlada pelo gradiente de pressão.

A difusão (movimento de um contaminante de uma concentração maior para uma menor) é controlada pelo coeficiente de difusão efetiva do solo e pelo gradiente de concentração entre dois pontos. Assim sendo, a difusão ocorre mesmo na ausência de qualquer movimento hidráulico da solução (movimento de líquidos), ou diferença de pressão, no caso dos gases (ROWE, 1998).

### 2.4.1 Fluxo de água

O fluxo de água em meios porosos está relacionado com a quantidade de líquido que se desloca nos vazios do solo. Geralmente o fluxo é avaliado em fenômenos ligados ao movimento de água, tais como a infiltração, drenagem, absorção de água pelas plantas, lixiviação de nutrientes e poluentes, entre outros (ENGLER e van LIER, 2004; PINTO, 2005).

O fluxo de água em um solo saturado geralmente é descrito pela Lei de Darcy para escoamento laminar, segundo a qual a velocidade de infiltração é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico que é dado pela relação entre a carga que se dissipa na infiltração “ $h$ ” ao longo de uma distância “ $y$ ”. Como o fluxo se dá na direção da maior para menor da carga hidráulica utiliza-se o valor negativo como mostrado na Equação 8 (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

$$v_w = -K_w \times \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$v_w$  = taxa de fluxo de água

$K_w$  = coeficiente de permeabilidade com respeito a fase água

$\frac{\partial h}{\partial y}$  = gradiente hidráulico na direção y

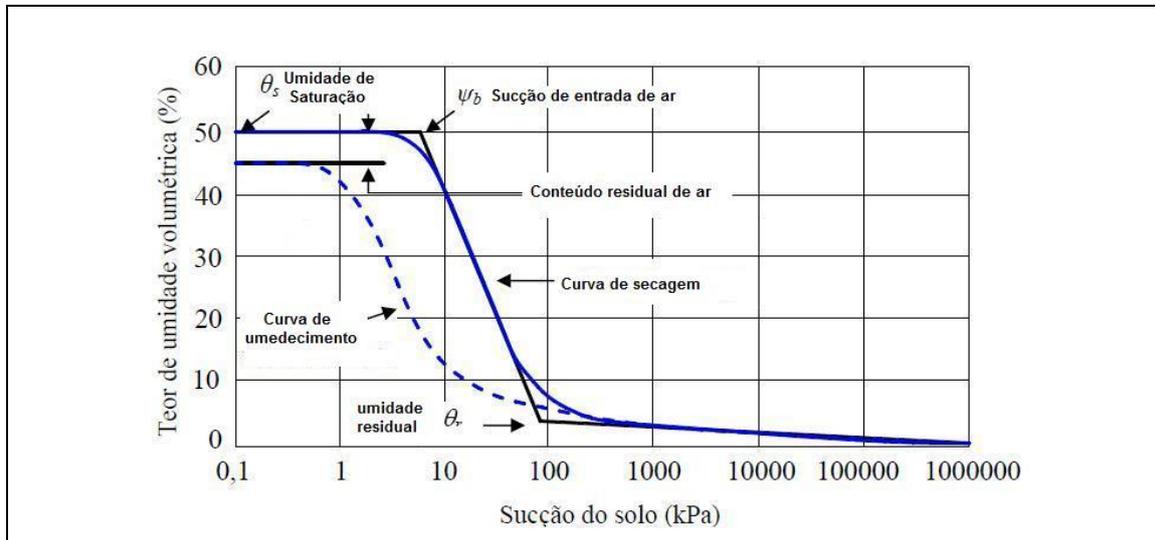
De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993) a lei de Darcy também se aplica aos solos não saturados. No entanto, o coeficiente de permeabilidade não pode ser considerado uma constante, pois varia com a quantidade de água existente nos poros. Nessa condição a área disponível para o fluxo de água varia com a sucção existente na matriz do solo.

A sucção é um estado de tensão que expressa a propriedade do solo em reter ou absorver água, sendo composta por duas parcelas: a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção matricial está relacionada com as propriedades físicas e mineralógicas do solo, sendo um fenômeno físico em consequência da tensão superficial que ocorre na interface água-ar. A sucção osmótica, por sua vez, está relacionada com a concentração química da água do solo. A sucção varia de acordo com a presença de água nos poros do solo e quando o solo está com baixa umidade, a afinidade em absorver água é grande e por isso a sucção é alta. Para solos com elevada umidade ou saturação, este efeito é reduzido e a sucção conseqüentemente decresce (JUCÁ, 1990).

A relação entre o conteúdo volumétrico de água e a sucção é representada graficamente através da curva de retenção de água no solo. A curva de retenção fornece informações primordiais para a compreensão da circulação de umidade. O formato da curva depende de vários fatores tais como a estrutura do solo (e sua agregação), teor de umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, histórico de tensões e método de compactação. Estes fatores podem interferir na forma da curva de retenção de diferentes maneiras, cada um se sobressaindo ao outro, dependendo do tipo de solo. Além disso, os coeficientes de ajuste matemáticos usados na modelagem das curvas de retenção também afetam no formato da mesma (FREDLUND *et al.*, 1994; MARINHO, 1994; MILLER *et al.*, 2002; VIEIRA, 2005).

A curva de retenção pode ser obtida a partir de trajetórias de umedecimento e secagem e o ajuste dessas curvas é feito por aproximações realizadas através de modelos matemáticos. Os principais parâmetros obtidos através da curva de retenção

são: teor de umidade volumétrica na saturação ( $\theta_s$ ), o teor de umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ), o valor de entrada de ar ( $\psi_b$ ) e a capacidade volumétrica de retenção de água ( $\Delta\theta/\Delta\psi$ ), como mostrado na Figura 29.



**Figura 29: Principais parâmetros da curva de retenção (Adaptado de FREDLUND e XING, 1994)**

O valor de entrada de ar representa a sucção acima da qual o ar se faz presente na estrutura do solo. O teor de umidade residual, correspondente a um valor de umidade a partir do qual aumentos de sucção não produzem variações significativas na umidade (FREDLUND e XING, 1994).

A função de permeabilidade do solo pode ser obtida, de forma aproximada, por meio da medição do teor de umidade volumétrica ou da sucção do solo, no entanto, essa determinação é complexa, pois envolve equipamentos especiais, é dispendiosa e demanda muito tempo de execução (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002; GERSCOVICH e GUEDES, 2004; VIEIRA, 2005).

Vários pesquisadores propuseram equações analíticas, experimentais e estatísticas para representar matematicamente as relações existentes entre a função de permeabilidade do solo à água, por meio do uso da curva de retenção de água, representando uma ferramenta útil nos estudos de determinação de fluxo de água em solos não saturado (GARDNER, 1858; BROOKS e COREY, 1968; CAMPBELL, 1974;

MUALEM, 1976; van GENUCHTEN, 1980; FREDLUND *et al.*, 1994). A Tabela 8 mostra as principais equações dos modelos propostos.

**Tabela 8: Determinação de permeabilidade não saturada usando modelos matemáticos**

Modelo (Referencias)	Equação	Variáveis
Gardner (1958)	$K = \frac{K_{sat}}{1 + a \times \left(\frac{\psi}{\rho_w \times g}\right)^n}$	K <sub>sat</sub> = perm. saturada Ψ = sucção a e n = parâmetros de ajuste ρ <sub>w</sub> = densidade da água g = aceleração da gravidade
Brooks and Corey (1968)	$K(\psi) = K_{sat} \times \left(\frac{\psi b}{\psi}\right)^n \text{ para } \psi > \psi_b$ $K(\psi) = K_{sat} \text{ para } \psi \leq \psi_b$	K <sub>sat</sub> = perm. saturada Ψ <sub>b</sub> = sucção de entrada de ar Ψ = Sucção n = parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$K = K_{sat} \times \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2b+3}$	K <sub>sat</sub> = perm. saturada θ = teor de umidade volumétrico θ <sub>s</sub> = teor de umidade volumétrico para o solo saturado b = parâmetro de ajuste
Mualem (1976)	$K_{rel} = \frac{[1 - (\alpha \times \psi)^{m \times n} \times (1 + (\alpha \times \psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha \times \psi)^n]^{\frac{m}{2}}}$	K <sub>rel</sub> = K/K <sub>sat</sub> M, n, e α = parâmetros de ajuste Ψ = Sucção
van Genuchten (1980)	$K(Se) = K_{sat} \times Se^{0.5} \times \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2$ $Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	K <sub>sat</sub> = perm. saturada θ = teor de umidade volumétrico θ <sub>r</sub> e θ <sub>s</sub> = teor de umidade residual e saturado m = parâmetro de ajuste
Fredlund <i>et al.</i> (1994)	$K(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) d\psi}{\int_{\ln \psi_{eav}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) d\psi}$	y = variável de integração representando o logaritmo da sucção Ψ <sub>eav</sub> = sucção de entrada de ar b = ln(10 <sup>6</sup> kPa) θ = umidade volumétrica θ' = derivada da curva de umidade x sucção

Fonte: GERSCOVICH e GUEDES (2004) e KHIRE *et al.* (1995)

### 2.4.2 Fluxo de gás

Em solos não saturados, a água e as partículas sólidas agem da mesma forma no bloqueio à passagem do ar ou gás. A malha porosa efetiva pela qual passa o ar muda em função do grau de saturação. Essa malha porosa pode ser representada matematicamente pela permeabilidade intrínseca que é a malha de poros por onde o ar circula e depende apenas das propriedades do meio poroso (ABBAS *et al.*, 1999 citado por TEIXEIRA, 2008).

O movimento de gases na matriz de um solo pode ocorrer por processos advectivos ou difusivos. O transporte de gases no solo também pode ser afetado por fenômenos de atenuação devido a reações químicas e microbiológicas. Essas reações se dão em função das características da matriz do solo e do gás. A espessura do perfil do solo também afeta a taxa de transporte, pois quanto maior essa espessura maior possibilidade de interações física (obstáculos a passagem do gás), reação química e/ou biológica (oxidação por micro-organismos).

O movimento de gás por advecção ocorre em função do gradiente de pressão entre dois pontos. Em aterros sanitários esse gradiente é resultado das variações de pressão interna gerada pela decomposição biológica dos resíduos e das variações da pressão atmosférica. O fluxo por advecção pode ser determinado pela Equação 9.

$$J_a = - \frac{\rho \times K_g}{\mu} \times \frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

$J_a$  = fluxo mássico de gás advectivo ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

$\rho$  = densidade do gás ( $\text{kg/m}^3$ )

$K_g$  = coeficiente de permeabilidade do solo ao gás (m/s)

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)

$\partial P / \partial z$  = gradiente de pressão (Pa)

O movimento de gases no solo por difusão ocorre devido a um gradiente de concentração. O fluxo difusivo unidimensional é determinado usando-se a primeira Lei de Fick, como mostrado na Equação 10, onde o sinal negativo indica que o movimento se dá a partir da região de maior para a de menor concentração.

$$J_d = - D_s \times \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

$J_d$  = Fluxo difusivo do gás (kg/m<sup>2</sup>.s)

$D_s$  = Coeficiente de difusão do gás no solo (m<sup>2</sup>/s)

$\partial C/\partial x$  = Gradiente de concentração no meio (kg/m<sup>4</sup>)

Os obstáculos que o gás encontra ao atravessar uma camada de solo não saturado são as partículas do solo e a água. Assim se ocorrer um acréscimo na umidade do solo, o volume de água nos poros vai aumentar, provocando uma diminuição na permeabilidade do solo ao ar, tendo em vista que a quantidade e a continuidade dos poros aerados ficam reduzidas (MACIEL, 2003). Modelos matemáticos fazem a previsão da variação da permeabilidade ao ar em função da saturação, através dos parâmetros da curva de retenção. O modelo de previsão de fluxo de ar, apresentado por van Genuchten (1980), utiliza o conceito de saturação efetiva e parâmetros empíricos obtidos na curva de retenção de água. A saturação efetiva do solo indica o grau de saturação que pode influenciar a percolação dos gases. A determinação da permeabilidade relativa ao ar é então dada pelas Equações 11 e 12.

$$s_e = \frac{(S - S_r)}{(1 - S_r)} \quad \text{Eq. 11}$$

$$K_{rar} = 1 - \left\{ s_e^{0.5} \times \left[ 1 - \left( 1 - s_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \right\} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$s_e$  = Saturação efetiva (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$S$  = Grau de saturação (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$S_r$  = Grau de Saturação na umidade residual (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$K_{rar}$  = Coeficiente de permeabilidade relativo do solo ao ar (adimensional)

$m$  = fator de correlação dependente da distribuição dos poros no solo (obtido na curva de retenção)

De acordo com Hettiaratchi *et al.* (2009) o projeto de sistemas de coberturas que controlem o fluxo de gás em aterros, requer a compreensão de processos físicos, químicos e biológicos que governam a migração do gás. Em camadas de cobertura o fluxo é essencialmente multifásico, envolvendo a fase água e fase gás que inclui o metano, gás carbônico, oxigênio, nitrogênio e vapor d'água. Os autores descrevem um modelo matemático unidirecional (vertical) que leva em consideração reações de oxidação. Nesse modelo verifica-se que a migração do gás é controlada pelo gradiente de pressão entre o gás do aterro e a superfície externa da camada de cobertura, da permeabilidade do solo ao gás e das características tais como presença de micro-organismos metanotróficos e porosidade.

A permeabilidade do solo ao ar e os fatores que afetam a atividade metanotrófica no solo podem ser controlados através de seleção de parâmetros apropriados ao solo (granulometria, porosidade, capacidade de retenção de água, conteúdo de matéria orgânica dentre outros), já que em campo, o controle de pressão não se aplica.

#### **2.4.3 Fatores que influenciam a permeabilidade do solo**

O coeficiente de permeabilidade é uma grandeza que mede a facilidade com que um fluido escoar através de um meio poroso. É uma propriedade que os solos apresentam e pode ser definida como a taxa com a qual um fluido pode escoar através dos seus poros, sendo expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade.

Qualquer fator que exerça influência sobre o tamanho e a configuração dos poros do solo exercerá também influência sobre a permeabilidade. Dentre os atributos físicos do solo que influenciam nos valores de coeficiente de permeabilidade destacam o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura, textura e composição mineralógica do solo, além das características do fluido percolante tais como o peso específico e viscosidade (PINTO, 2005).

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993) as mudanças no índice de vazios em um solo não saturado podem ser pequenas e o efeito na permeabilidade a água pode ser secundário. No entanto o efeito na mudança no grau de saturação (S) pode ser altamente significativo e por isso o coeficiente de permeabilidade é frequentemente descrito como uma função do grau de saturação.

- **Grau de saturação, teor de umidade e sucção**

A permeabilidade de solos não saturados está relacionada com o teor de umidade volumétrico do solo ( $\theta$ ) ou grau de saturação ( $S$ ). Os vazios são preenchidos por água e ar em diferentes proporções, interferindo na área disponível para o fluxo desses componentes. O aumento do grau de saturação é provocado pelo acréscimo do volume de água nos poros. Quanto maior a saturação maior será a facilidade para a infiltração de água e conseqüentemente maior será o coeficiente de permeabilidade à água. Por outro lado, o gás encontrará dificuldades em circular nos vazios devido a diminuição na área disponível para passagem de ar, e conseqüentemente o coeficiente de permeabilidade ao ar será menor, como mostrado na Figura 30.

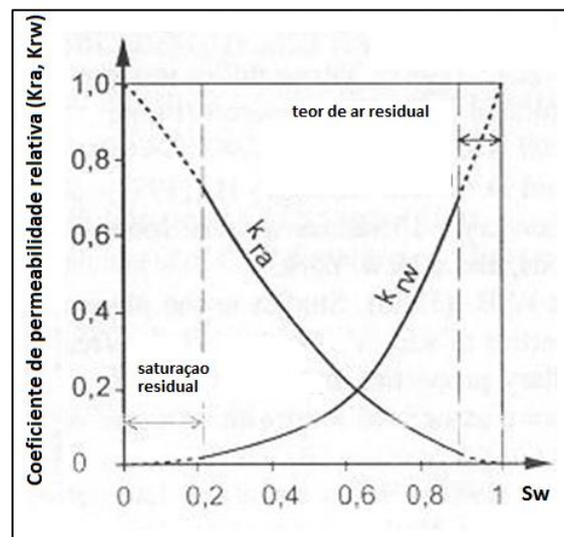


Figura 30: Coeficiente de permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e a água ( $K_w$ ) em função da saturação (WYCKHOFF e BOTSET, 1936 citado em JUCÁ, 2009)

O ar em um solo não saturado pode estar ocluso quando o grau de saturação é relativamente elevado, enquanto que para baixos graus de saturação, a fase ar é predominantemente contínua, variando assim, as leis de fluxo para cada um desses casos (FREDLUND E RAHARDJO, 1993). De acordo com Marinho (1994), a presença de ar nos vazios do solo na forma contínua ou oclusa é função também da trajetória de secagem e umedecimento e da saturação inicial da amostra.

- **Estrutura, mineralogia e fluido percolante**

A estrutura interna de um solo compactado também é uma das principais características que influenciam na permeabilidade tanto ao ar quanto à água. A

estrutura é determinada pela umidade e energia utilizadas no momento da compactação. O solo compactado no ramo seco da curva de compactação possui uma estrutura floculada com orientação aleatória das partículas de argila. Nesse caso apresenta maiores vazios e, portanto, um menor caminho a ser percorrido, aumentando assim a permeabilidade. No ramo úmido a estrutura é dispersa, com as partículas de argila se distribuindo em arranjos paralelos, apresentando menores vazios e caminhos mais tortuosos para percolação, reduzindo assim a permeabilidade (LAMBE, 1958 citado por BOSCOV).

Fatores relativos à mineralogia do solo e ao fluido percolante também influenciam na permeabilidade. A composição mineralógica exerce maior influência em solos argilosos.

A viscosidade do fluido percolante afeta diretamente a permeabilidade, pois varia de acordo com a temperatura. A influência do fluido percolante pode ser eliminada através do uso do conceito de permeabilidade intrínseca, que é definida como aquela relacionada com as propriedades do meio em fazer percolar fluidos por sua estrutura. Esta permeabilidade independe das características ou quantidade do fluido percolante, sendo função apenas das propriedades do solo, tais como: tipo de solo, disposição das partículas, porosidade, índice e distribuição dos vazios, densidade e tensões atuantes. A relação entre a permeabilidade intrínseca ( $K_{int}$ ) e o coeficiente de permeabilidade do solo ao fluido ( $k$ ) é dada pela Equação 13.

$$K_{int} = \frac{\mu \times k}{\rho \times g} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

$K_{int}$  = permeabilidade intrínseca ( $m^2$ )

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)

$k$  = permeabilidade (m/s)

$\rho$  = densidade específica do fluido ( $kg/m^3$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

### **CAPITULO III – MATERIAIS E MÉTODOS**

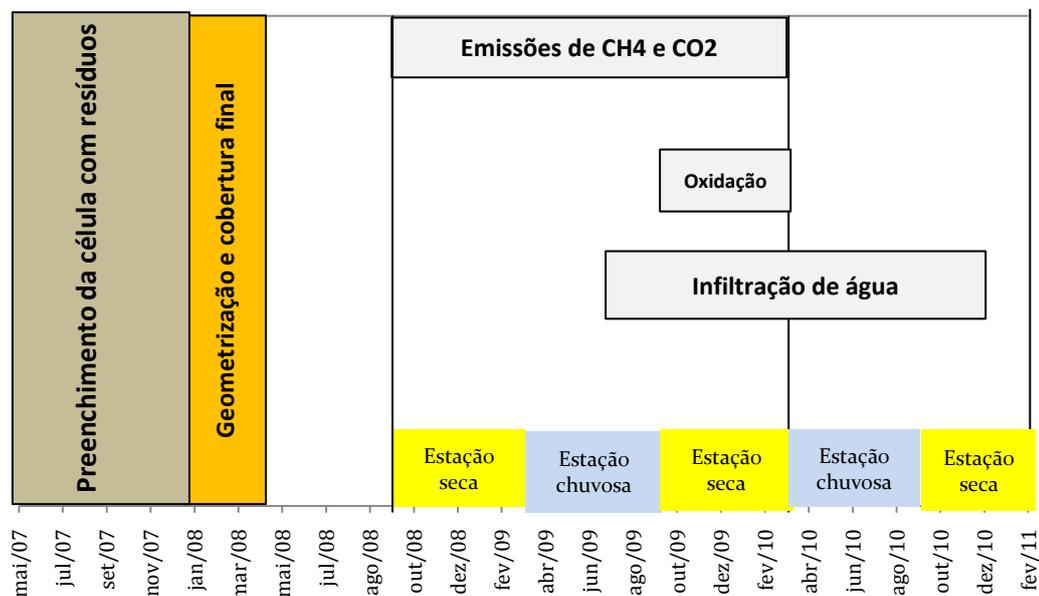
---

Este capítulo descreve o local de estudo, os procedimentos adotados e os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de campo e laboratório realizados durante esta investigação.

As emissões de biogás foram realizadas no período de setembro de 2008 a fevereiro de 2010, através de 107 ensaios de câmara de fluxo. No período de setembro de 2009 a março de 2010, foram medidas, a cada 0,10m de profundidade, em 6 pontos distintos, a concentração de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, com o objetivo de se avaliar qualitativamente a eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub> em cada tipo de camada de cobertura.

Para avaliação de infiltração de líquidos foi instalado um dispositivo de medida de líquido infiltrado (denominado de infiltrômetro), em junho de 2009, em cada tipo de camada de cobertura investigada, além de medição de temperatura e umidade em 3 profundidades. No período de junho de 2009 a dezembro de 2010, as leituras da quantidade de água infiltrada foram feitas diariamente (exceção de sábados e domingos) e as leituras de temperatura e umidade tiveram periodicidade semanal.

Os ensaios de laboratório consistiram na caracterização geotécnica dos materiais empregados no preenchimento do infiltrômetro e de amostras retiradas das coberturas experimentais para caracterização e determinação da curva de retenção de água, da permeabilidade saturada à água, da permeabilidade máxima ao ar, e da capacidade de campo. A Figura 31 mostra um fluxograma sucinto desde o preenchimento da célula com resíduos e das atividades de campo realizadas nesta pesquisa.



**Figura 31: Período de Investigação**

A Célula Experimental, implantada em 2007, faz parte de um projeto de pesquisa que teve por objetivo geral os estudos de geração de energia elétrica através do biogás produzido pela biodegradação dos resíduos sólidos urbanos. Esse foi um projeto pioneiro no Brasil com fins de obtenção de dados confiáveis de geração de biogás em células de resíduos sólidos baseados nas condições climáticas e composição dos resíduos dessa região do Brasil.

A quantidade de resíduos domésticos depositados na célula foi de 36.000 toneladas, compostos de 46,0% de matéria orgânica, 12,4% de papel/papelão, 19,6% de plásticos, 2,5% de madeira, 3,4% de materiais têxteis, 0,8% de borracha e couro, 2,0% de metais, 1,0% de vidro, 3,5% de fraldas descartáveis, 5,5% de côco e 3,6% de outros materiais (pedra, osso, gesso, eletrônicos, etc).

A célula experimental foi instrumentada com equipamentos necessários para o controle da geração de biogás, além de instrumentação para avaliação do comportamento geomecânico tais como piezômetros, termopares e referenciais para controle de recalques.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo de camadas de cobertura foi realizado na célula experimental localizada na área do aterro controlado da Muribeca, que se situa na Região Metropolitana do Recife (RMR), no município de Jaboatão dos Guararapes-PE como mostrado na Figura 32.



Figura 32: Localização do Aterro Controlado da Muribeca (PE) (RODRIGUES, 2009)

Esse aterro ocupa uma área de 60 hectares e funcionou desde 1985 até o encerramento em julho de 2009, como principal local de disposição final de resíduos sólidos urbanos da RMR, recebendo diariamente cerca 2.400 toneladas de resíduos dos Municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes e Moreno. A Figura 33 mostra a localização da célula experimental dentro da área do aterro da Muribeca.

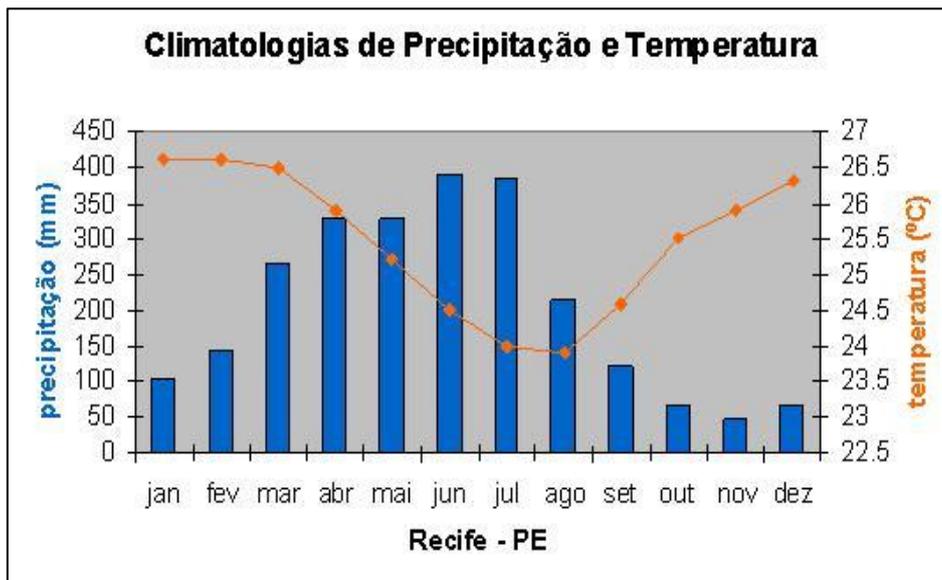


Figura 33: Localização da célula experimental (Foto: Acervo EMLURB em abril/2009)

### 3.2 DADOS CLIMATOLÓGICOS

Os dados climatológicos (precipitação, temperatura do ar, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar) foram obtidos a partir da estação Recife-CURADO/INMET que se localiza a aproximadamente 10 km da célula experimental da Muribeca-PE na latitude  $08^{\circ} 03'S$ , longitude  $34^{\circ}57'W$ , sendo referência para toda Região Metropolitana do Recife/PE.

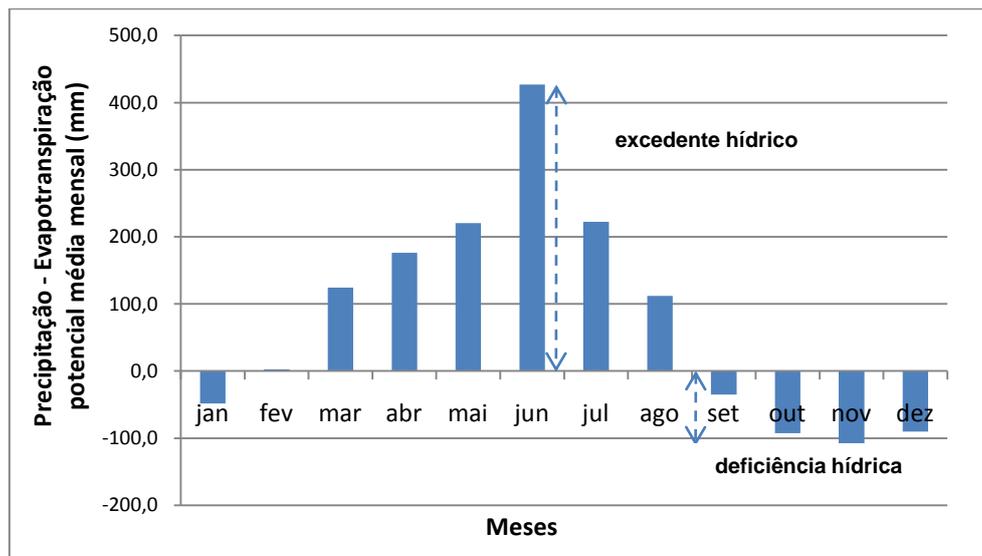
De acordo com dados do INMET/CURADO a precipitação da região é abundante, apresentando um padrão de distribuição irregular ao longo do tempo. A precipitação nessa região litorânea é tipicamente dividida em dois regimes: um período de chuvas, responsável por aproximadamente 78% do total de precipitação anual, com picos máximos no trimestre maio-junho-julho, e um período seco que apresenta aproximadamente 22% da precipitação anual. A Figura 34 mostra os dados da precipitação e temperatura média mensal da série histórica de 1961 a 1990, disponibilizada pelo INMET.



**Figura 34: Precipitação e temperatura mensal em Recife/PE (média da série histórica de 61-90) Fonte: [http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento\\_brasil.shtml](http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento_brasil.shtml). Acesso em: 20 ago 2010**

A temperatura média anual é de 26,3°C, (com média das mínimas verificada no período de 19,3°C e média das máximas de 32,8°C) e umidade média relativa do ar mensal de 83%, com ventos variando de 0,9 a 3,0 m/s concentrados com velocidade máxima nos meses de setembro a dezembro.

Para o período de 2001 a 2008 (dados disponíveis no site do INMET/CPTEC, acesso em 20 de agosto de 2010), a precipitação média anual foi de 2.260,9 mm e a evaporação potencial média anual foi de 1.353,4 mm (3,7 mm/dia de intensidade de evaporação), indicando um excedente hídrico de 907,5 mm como mostrado na Figura 35.



**Figura 35: Excedente hídrico e Deficiência hídrica para Recife/PE (Dados CPTEC de 2001 a 2008)**

Os condicionantes climatológicos no período do estudo foram obtidos da estação Curado-Recife-PE, sendo utilizada a formulação de Thornthwaite modificado por Camargo *et al.* (1999) para determinação da evapotranspiração, que se aplica a qualquer regime de chuvas, em função desse dado não está disponível na estação climatológica. As equações utilizadas para determinação da evapotranspiração foram:

**a) Temperatura média ( $T_{ef}$ ):** amplitude térmica local

$$T_{ef} = 0,36 \times (3 \times T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

$T_{ef}$  = Amplitude térmica local ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{m\acute{a}x}$  = Temperatura máxima mensal ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{m\acute{i}n}$  = Temperatura mínima mensal ( $^{\circ}\text{C}$ )

**b) Índice mensal de calor (I):** parâmetro empírico utilizado para estimar a evapotranspiração. Esse índice foi determinado a partir dos valores médios mensais de temperatura observados entre junho de 2009 a dezembro de 2010 utilizando a formulação proposta aplicando a Equação 15.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \times Tm)^{1,514} \quad \text{Eq. 15}$$

**c) Evapotranspiração Potencial (ETP):** A evapotranspiração foi determinada seguindo-se as equações de Thornthwaite modificadas por Camargo *et al.* (1999):

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,017292 \times I + 0,49239 \quad \text{Eq. 16}$$

$$ETp = 16 \times \left(10 \times \frac{Tef}{I}\right)^a \quad p/ \text{ Tef} \leq 26,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 17}$$

$$ETp = -415,85 + 32,24 \times Tef - 0,43 \times Tef^2 \quad p/ \text{ Tef} > 26,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 18}$$

Onde:

I = índice mensal de calor

a = Função cúbica do índice de calor

ETp = Evapotranspiração Potencial (mm)

Tef = Amplitude térmica ( $^\circ\text{C}$ )

A determinação da Evapotranspiração Potencial mensal foi feita através da correção como mostrado na Equação 19.

$$ETP = ETp \times \frac{N}{12} \times \frac{NPD}{30} \quad \text{Eq. 19}$$

Onde:

ETP = Evapotranspiração Potencial Diária (mm)

N = Fotoperíodo médio do mês em questão (função da localização)

NPD = Número de dias do mês em questão

Para estimativa do escoamento superficial (ES) foi utilizado os valores de coeficientes de escoamento apresentados Pruski *et al.* (2004), levando-se em consideração a inclinação de 1,5% e o tipo de solo utilizado em casa infiltrômetro, como mostrado na Tabela 9. Fenn *et al.* (1975) citado por Lins (2003) também

recomenda esses mesmos valores para qualquer tipo de cobertura, seja com ou sem vegetação.

**Tabela 9: Valores de Coeficiente de escoamento superficial (Pruski *et al.*, 2004)**

	Superfície	Intervalo	Valor Esperado
Cobertura: grama em solo arenoso	Plano (2%)	0,05 a 0,10	0,08
	Declividade Média (2 a 7%)	0,10 a 0,15	0,13
	Declividade alta (7%)	0,15 a 0,20	0,18
Cobertura: grama em solo argiloso	Plano (2%)	0,13 a 0,17	0,15
	Declividade Média (2 a 7%)	0,18 a 0,22	0,20
	Declividade alta (7%)	0,25 a 0,35	0,30

O escoamento superficial foi determinado através da Equação 20, para cada período do ano, considerando as condições de precipitação em estação seca (setembro a fevereiro) e chuvosa (março a agosto).

$$ES = P \times C$$

**Eq. 20**

Onde:

ES = Escoamento superficial (mm)

P = Precipitação (mm)

C = Coeficiente de escoamento superficial (adimensional)

### 3.3 DESCRIÇÃO DA COBERTURA DA CÉLULA EXPERIMENTAL

A camada de cobertura da célula experimental foi executada em fevereiro de 2008, iniciando-se com a geometrização final da massa de resíduos e posteriormente com a execução do platô superior da célula. Durante a execução, o mesmo tipo de solo foi utilizado para compor cada tipo de cobertura experimental a ser estudada e os taludes e bermas. A compactação da cobertura foi feita apenas com trator de esteira de 150 HP, durante o espalhamento do material, não havendo controle de compactação e umidade no momento da execução.

A camada de cobertura final foi executada com três configurações de projeto diferentes, sem separação física entre elas, com as seguintes características: uma

área com uma camada monolítica de solo compactado denominada de camada convencional (CONV), uma área com uma base constituída de pedras rachinha sobreposta de uma camada de solo compactado, denominada de barreira capilar (BAC) e uma área com base de solo compactado sobreposto por uma mistura de solo e composto, em duas proporções, denominada de camada metanotrófica (MET), sendo subdividida em MET01 e MET02.

A Figura 36 mostra algumas etapas da execução, a Figura 37 mostra uma foto do platô superior da célula com as áreas respectivas de cada tipo de cobertura e Figura 38 um perfil esquemático de cada tipo de cobertura, sendo descrito em seguida as características de cada uma delas.



**Figura 36: (a) colocação de pedras rachinha e geotêxtil na base da barreira capilar (b) compactação da camada de solo na barreira capilar (c) regularização para colocação da camada metanotrófica acima do solo compactado (d) compactação da mistura de solo e composto**



Figura 37: Divisões das camadas de cobertura experimentais

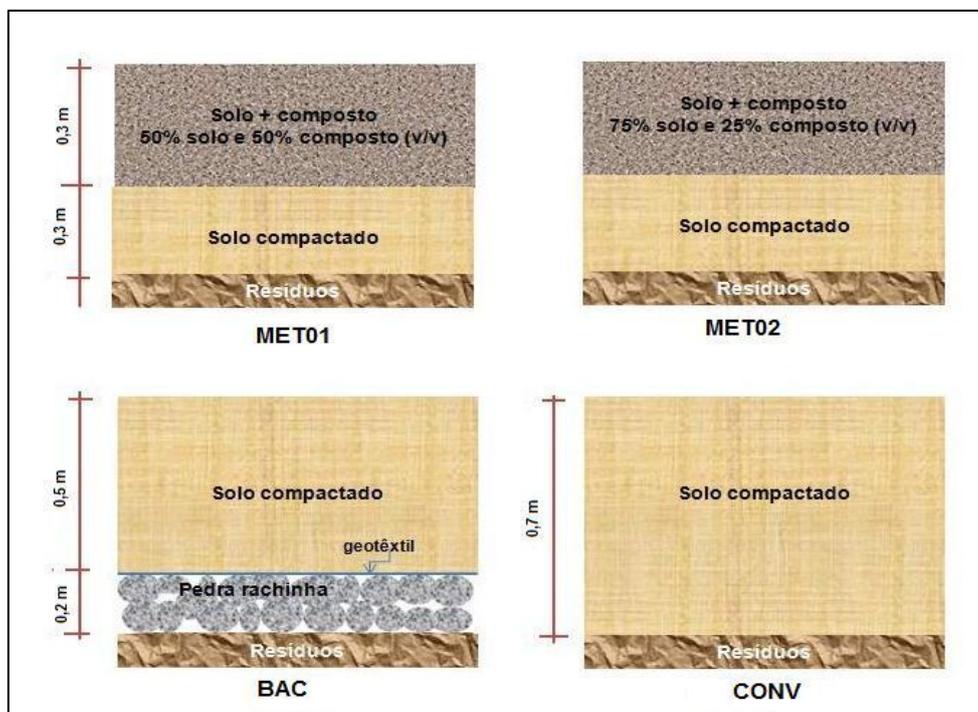


Figura 38: Perfil típico das camadas de coberturas

- **Camada metanotrófica (MET):** camada composta por 0,30 m de solo compactado sobreposto por uma camada de 0,30 m de mistura de solo e composto oriundo da unidade de compostagem existente no aterro, em duas proporções. A subcamada MET01, executada com 50% de solo e 50% de composto (em volume), ocupando uma área de 291,8 m<sup>2</sup> e a subcamada MET02 com uma mistura de 75% de solo e 25% de composto (em volume), ocupando uma área de 298,4 m<sup>2</sup>. Em função da declividade da superfície do aterro, a espessura total da camada varia de 0,40 a 0,75 m.
- **Barreira capilar (BAC):** camada composta por 0,20 m de pedra britada do tipo rachinha (diâmetro médio de 0,10 m), sobreposta por uma camada de solo compactado com espessura de 0,50 m. Na interface entre o solo e a camada de pedra, foi utilizado um geotêxtil tipo tecido-não-tecido ou agulhado RT09 (Bidim<sup>®</sup>), para minimizar o efeito de grande diferença de granulometria entre as pedras e o solo compactado, evitando a perda de material. Em função da declividade da superfície do aterro, a espessura total da camada variou de 0,50 a 0,90 m, ocupando uma área superficial de 500,3 m<sup>2</sup>;
- **Camada convencional (CONV):** camada de 0,70 m de solo compactado, ocupando uma área superficial de 534,8 m<sup>2</sup> e espessura total variando de 0,50 a 0,90 m em função da declividade da superfície do aterro.

A variação de espessura de cada perfil executado foi devida à declividade transversal (1,5%) e longitudinal (0,5%) da cobertura, para o escoamento das águas superficiais, que é feito através de canaletas de concreto ( $\Phi = 0,30$  m) localizadas na parte central do platô superior da célula experimental.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais existentes em cada tipo de camada de cobertura foram caracterizados a partir de amostras de aproximadamente 15 Kg, retiradas em 3 pontos de cada área da cobertura, para serem submetidas aos procedimentos de caracterização física e geotécnica. Todos os materiais foram levados ao laboratório de Solos da UFPE, para caracterização a partir das normas padronizadas da ABNT:

- NBR 6508/84: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos (ABNT, 1984a);
- NBR 7181/84: Análise granulométrica para solos (ABNT, 1984b), com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma NBR 6502/1995 – solos e rochas (ABNT, 1995);
- NBR 6459/84: Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984c);
- NBR 7180/84: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984d)
- NBR 6457/86: Amostra de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização (ABNT, 1986a);
- NBR 7182/86: Solo - Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal (ABNT, 1986b)

#### **3.4.1 Caracterização do solo da área de estudo de infiltração**

O solo utilizado na camada de cobertura foi obtido na própria jazida do aterro. Os materiais existentes na cobertura da célula experimental *in situ* foram caracterizados com amostras retiradas da camada superficial de cada tipo de cobertura para comparação com os materiais utilizados nos infiltrômetros, tendo em vista que estes foram instalados um ano após a execução da camada de cobertura. Foram coletadas 4 amostras de cerca de 15 Kg, durante a execução e controle de compactação de cada dispositivo de medição de infiltração, para avaliar a compatibilidade dos materiais utilizados, com os existentes na camada de cobertura. Todos os materiais foram caracterizados utilizando-se as normas citadas anteriormente.

Uma amostra de cerca de 3 kg de solo foi enviado ao Laboratório de Fertilidade do Solo e Consultoria & Projetos Ltda. (LABFERT) em Recife-PE, para análise química. A amostra foi analisada segundo metodologia descrita pela EMBRAPA (1997) para os seguintes parâmetros: pH, P, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Cu, Zn, Fe, Mn, H<sup>+</sup>, Al<sup>+++</sup>, umidade e matéria orgânica. Da mesma forma, amostras da camada superficial das camadas de coberturas experimental foram encaminhadas ao mesmo laboratório após 2,5 anos para avaliação das modificações das características químicas dos materiais ao longo do tempo.

### 3.4.2 Caracterização do composto e da mistura de solo e composto

O composto utilizado na mistura com o solo na área de estudo de infiltração da camada metanotrófica foi proveniente da unidade de compostagem de podas de árvores existente no Aterro da Muribeca, tendo sido o mesmo material utilizado na camada de cobertura executada. A caracterização da mistura de solo e composto nas proporções (MET01 e MET02) foi feita utilizando-se amostras de 15 kg colocadas para secar ao ambiente, em bandejas. Posteriormente foram realizados os ensaios de determinação de massa específica, granulometria, determinação dos limites de consistência e ensaios de compactação de acordo com as Normas de solo descritas anteriormente. A Figura 39 mostra o material utilizado nos ensaios em laboratório.



**Figura 39: Material utilizado no infiltrômetro da camada metanotrófica (a) composto *in natura* (b) Mistura de solo e composto MET01 em campo (c) e (d) amostras da MET01 e MET02 para análise em laboratório.**

Amostras do composto e da mistura de solo e composto utilizados no infiltrômetro também foram encaminhadas ao Laboratório de Fertilidade do Solo e Consultoria & Projetos Ltda. (LABFERT) em Recife-PE, para análise química. O composto foi analisado segundo as metodologias aplicadas para materiais do tipo

tortas, tais como, resíduos de processos industriais, compostos de mistura de diferentes materiais orgânicos, bagaço moído e cascas de sementes de oleaginosas para os seguintes parâmetros: N, P, K, Na, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn, umidade e matéria orgânica, de acordo com IAA/PLANALSUCAR (1983).

### 3.4.3 Curva de Retenção de água dos solos

A curva de retenção de água do solo, ou curva característica, para o solo e a mistura de solo e composto, foi obtida com o objetivo de se analisar o comportamento de cada material utilizado na camada de cobertura experimental, assim como servir de ferramenta para determinação da função permeabilidade à água e ao ar. O ajuste dos dados das curvas de retenção foi feito utilizando-se o modelo proposto por van Genuchten (1980) através do software Estatística®.

Para obtenção das curvas características utilizou-se o método do papel filtro que foi padronizado pela norma ASTM D5298-92 e descrita por Marinho (1994). Esta técnica tem sido utilizada por inúmeros pesquisadores desde a década de 60 e é baseada na transferência de umidade por capilaridade (sucção matricial) ou na forma de vapor (sucção total) de um material de menor sucção (solo) para um de sucção mais elevada (papel filtro), até que o equilíbrio seja atingido (MACIEL, 2003).

Nessa pesquisa utilizou-se o período mínimo de equilíbrio indicado por Marinho (1994) de 7 dias e o papel adotado foi o Whatman nº 42 que apresenta umidade inicial no estado seco de aproximadamente 6%, permitindo determinações de sucção de zero até 29 MPa. A curva de calibração utilizada para o papel filtro foi a proposta por Chandler *et al.* (1992) conforme as Equações 21 e 22.

$$\log \psi = 8,84 - 0,0622 \times w_f \quad \text{Para } w_f \leq 47\% \quad \text{Eq. 21}$$

$$\log \psi = 6,06 - 2,48 \times \log w_f \quad \text{Para } w_f > 47\% \quad \text{Eq. 22}$$

Onde:  $\psi$  = sucção (kPa) e  $w_f$  = umidade gravimétrica do papel filtro (%)

Tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso, em cada ponto de medição, se obtém a curva de sucção *versus* umidade. O procedimento do ensaio de sucção foi realizado em amostras de solo retiradas em campo, em fevereiro de

2010. As amostras foram coletadas da parte superficial de cada camada de cobertura, na profundidade de 0 a 0,15 m, sendo realizada inicialmente uma limpeza da superfície.

Para a camada metanotrófica, foi removida a vegetação da área antes da coleta das amostras. Retirou-se três amostras da camada convencional e barreira capilar (uma nas proximidades do infiltrômetro), três amostras da camada metanotrófica do tipo MET01 (uma nas proximidades do infiltrômetro), três amostras na MET02. As amostras foram retiradas, em anéis metálicos com diâmetro de 0,07 m e altura de 0,03 m, posteriormente envolvidas em filme plástico e papel alumínio e conservadas em caixa térmica do tipo isopor para preservação de umidade, e imediatamente encaminhadas ao laboratório. A Figura 40 apresenta a retirada das amostras em campo.



**Figura 40: Coleta de amostras para ensaios de curva característica (a) posicionamento do anel, (b) anel metálico cravado na camada convencional (c) e (d) anéis cravados nas camadas MET01 e MET02.**

As amostras foram preparadas em laboratório para realização do ensaio de curva de retenção. Inicialmente os corpos de prova foram regularizados no anel,

retirando-se o excesso de solo com a ajuda de uma espátula, para tornar plana a superfície a ser estudada e também para utilizar esse excesso para se determinar o teor de umidade de campo. O procedimento do ensaio seguiu as seguintes etapas:

- a) colocação de pedras porosas em bandejas com água para percolação da amostra;
- b) colocação de papel filtro para permitir a percolação entre a pedra porosa e a amostra;
- c) percolação da amostra por pelo menos 24h ou até que se observe umidade na face superior da amostra;
- d) retirada do conjunto para pesagem inicial (anel e solo);
- e) colocação cuidadosa de papel filtro whatman n<sup>o</sup>. 42 em contato direto com o solo em uma das extremidades, para medição da sucção matricial;
- f) envolvimento da amostra e papel filtro com várias camadas de filme plástico (pvc) e revestimento com papel alumínio. colocação em caixa isolante térmica (do tipo isopor) garantindo-se que os anéis não entrem em contato com a umidade e a luz do ambiente externo, deixando-os em repouso por 7 dias;
- g) após o tempo de repouso, cuidadosamente retira-se o papel filtro de cada amostra com uma pinça metálica, e imediatamente coloca-se em balança de precisão de 0,0001g para determinação de peso úmido do papel (esse procedimento deve levar poucos segundos para evitar a perda de umidade do papel por evaporação);
- h) o conjunto anel e amostra são pesados para determinação da umidade do solo no equilíbrio e deixados em repouso para perda de umidade;
- i) o papel filtro é então colocado em cápsulas e levados para secagem em estufa para a uma temperatura de 105°C por 24 horas;
- j) após as 24h, o conjunto cápsula e papel filtro seco são colocados em um dessecador com sílica e transportadas rapidamente, para pesagem em balança de precisão;
- k) determinação da umidade do papel filtro e a respectiva sucção do solo utilizando-se as equações propostas por Chandler *et al.*(1992), citadas anteriormente.
- l) periodicamente o conjunto solo e anel são pesados para estimativa de perda de cerca de 3% de umidade. Repete-se a partir da etapa **(e)** dando-se prosseguimento ao ensaio por cerca de 10 semanas, até que o corpo de prova atinja uma umidade residual.

A Figura 41 mostra as etapas de montagem e percolação dos corpos de prova e na Figura 42 a execução completa do ensaio.



**Figura 41: Preparação dos corpos de prova para ensaio de curva de retenção: (a) pedras porosas para saturação por percolação (b) e (c) regularização do corpo de prova (d) corpo de prova MET01 (e) colocação dos corpos de prova para saturação por meio de percolação (f) saturação dos corpos de prova**



**Figura 42: Etapas do ensaio de curva de retenção: (a) pesagem inicial do corpo de prova (b) colocação do papel filtro (c) envolvimento com filme plástico (d) envolvimento com papel alumínio e colocação em caixa térmica durante 7 dias (e) pesagem do papel filtro (f) colocação do papel filtro em cápsulas para secagem e determinação de umidade**

#### **3.4.4 Ensaio de Permeabilidade**

Esses ensaios foram realizados com o objetivo de medir a permeabilidade saturada de cada tipo de material e estimar a permeabilidade não saturada. Para realização de ensaio de permeabilidade retirou-se de cada camada 3 amostras, uma delas nas proximidades dos infiltrômetros, em moldes de PVC de 0,10 m de diâmetro e 0,15 m de altura. Os moldes foram previamente besuntados internamente com

vaselina para facilitar a extração. Na Figura 43 observa-se a retirada das amostras da cobertura da célula experimental.



**Figura 43: Coleta de amostras para ensaio de permeabilidade (a) Limpeza do terreno (b) cravação (c) e (d) amostra da camada convencional (e) e (f) amostra da camada MET01 (g) e (h) amostra da camada MET02**

Depois de retirada do solo, as amostras foram envolvidas com filme plástico e papel alumínio para preservação das características até a execução o ensaio. Os

corpos foram regularizados e medidas as dimensões com paquímetro digital, como pode ser visto na Figura 44.



**Figura 44: Preparação do corpo de prova para ensaio de permeabilidade (a) amostra acondicionada (b) retirada do corpo de prova do molde (c) corpo de prova da camada convencional (d) medidas do corpo de prova**

O ensaio foi feito segundo a norma ASTM D5084-10 (ASTM, 2010), em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE, seguindo-se os procedimentos adotados por Maciel (2003) e Mariano (2008), e mostrado na Figura 45:

- colocação tanto na base quanto no topo do corpo de prova um conjunto de pedras porosas e papel filtro em contato como solo, com posicionamento na parte superior de uma tampa de acrílico denominado “top cap” onde são conectadas as mangueiras de drenagem;
- encamisamento do corpo de prova, com uma membrana e ligas de borracha, para melhorar a fixação e oferecer segurança lateral do corpo de prova, evitando seu contato lateral com a água;
- colocação do corpo de prova dentro da célula de acrílico;

- conexão da célula de acrílico ao aparelho através das tubulações, e posterior abertura da válvula lateral, permitindo a entrada de água até encher a célula, verificando se no final não existem bolhas de ar na superfície.
- aplicação de uma pressão confinante de 50 kPa e remoção de ar das pedras porosas e das linhas das tubulações, drenando o sistema com água destilada até que todas as bolhas de ar desapareçam das tubulações;
- preenchimento de água o canal da bureta até que as três buretas estejam com o nível desejado;
- procede-se a desaeração da bureta removendo a entrada de ar, estando o canal desaerado quando não houver bolhas de ar perceptíveis;
- aumento da pressão confinante para 108 kPa até a saturação;
- fechamento das válvulas de entrada de pressão no topo e na base do corpo de prova, e em seguida posicionam-se as válvulas de comando em “pressure” (no equipamento) para então serem aplicadas as pressões de base e de topo.
- abrem-se todas as válvulas de entrada de pressão e em 24 horas verifica se o corpo de prova está saturado, considerando o critério de saturação quando o volume de água que entra pela base da amostra é igual ao volume que sai pelo topo, na aplicação de um gradiente de pressão constante de 30 kPa (geralmente a saturação se dá em média de 1 a 2 dias);
- após ser constatado que o corpo de prova encontra-se saturado, realiza-se o ensaio de permeabilidade propriamente dito;
- inicialmente fecham-se as válvulas de pressão de topo e de base;
- coloca-se um gradiente de fluxo ascendente de 30 kPa;
- abrem-se as válvulas de topo e de base da célula e mede-se o tempo necessário para percolar  $5 \text{ cm}^3$  pela amostra;
- repete-se o procedimento até que se tenha pelo menos três leituras de tempo com variação de até  $\pm 5\%$

A partir dos resultados do ensaio determina-se o coeficiente de permeabilidade saturada ( $K_{\text{sat}}$ ) utilizando-se a Equação 23:

$$K_{\text{sat}} = \frac{V \times L}{\Delta P \times t \times A_{\text{cp}}} \quad \text{Eq. 23}$$

Onde:

$K_{\text{sat}}$  = coeficiente de permeabilidade à água (m/s)

$V$  = Volume do líquido percolado ( $\text{m}^3$ )

$L$  = Altura do corpo de prova (m)

$\Delta P$  = Variação da Pressão (m)

$t$  = Tempo necessário para percolar o volume de 5 ml (s)

$A_{\text{cp}}$  = Área do Corpo de Prova ( $\text{m}^2$ )



**Figura 45: Ensaio de permeabilidade à água: (a) montagem do corpo de prova (b) colocação de membrana (c) colocação de corpo de prova na célula (d) entrada de água para aplicação de pressão confinante (e) realização do ensaio (f) corpo de prova após ensaio**

Posteriormente colocou-se a amostra para perder umidade e em seguida secar em estufa a 65°C até peso constante, para se determinar a permeabilidade máxima ao ar. A metodologia de montagem do corpo de prova no equipamento seguiu os mesmos procedimentos adotados para a determinação da permeabilidade saturada, trocando-se o fluido confinante e percolante por ar atmosférico. As pressões aplicadas pelo permeâmetro foram oriundas de um compressor de ar e são reguladas no quadro de comando do equipamento. Para cada amostra foram feitas 3 leituras de vazão de ar, adotando-se a média dos resultados para a determinação da permeabilidade ao ar. A leitura da vazão de ar percolada através da amostra, para cada gradiente de pressão aplicado, foi feita diretamente em um rotâmetro modelo série 1900 da AppliTech, tubo 2300, com faixa de leitura 0 a 10 NI/h e erro de 5%.

Para determinação da permeabilidade ao ar utilizou-se a Equação 13 e a equação formulada a partir da Lei de Darcy que considera o efeito da compressibilidade do fluido.

$$k_{int} = \frac{2 \times v \times \mu \times L \times P_s}{(P_e^2 - P_s^2)} \quad \text{Eq. 24}$$

Onde:

$K_{int}$  = Permeabilidade intrínseca do fluido (m<sup>2</sup>)

$v$  = Velocidade de percolação do fluido (m/s)

$\mu$  = viscosidade dinâmica do ar (Pa.s)

$L$  = comprimento da amostra (m)

$P_e$  = Pressão de entrada (Pa)

$P_s$  = Pressão de saída (Pa)

Igualando-se as equações 13 e 24 se determinou a permeabilidade ao ar máxima, referente à amostra seca, e a partir dos parâmetros de ajustes obtido na curva de retenção de água, a partir do modelo de van Genuchten (1980), determinou-se a curva teórica de permeabilidade ao ar. A Figura 46 mostra o ensaio de permeabilidade ao ar realizado na amostra da camada convencional com o medidor de vazão ao lado do permeâmetro.



**Figura 46: Ensaio de permeabilidade ao ar com amostra CONV**

### **3.4.5 Umidade de Capacidade de Campo**

Em aterro de resíduos sólidos, a estimativa da capacidade máxima de retenção de água pelo solo da camada de cobertura (umidade de capacidade de campo) é de grande importância nos estudos de infiltração. A umidade de capacidade de campo pode ser estimada a partir da curva de retenção de água como citado em Alcântara (2007), no entanto não há um consenso sobre o valor da tensão associada à capacidade de campo, tendo muitos trabalhos utilizado tensões de 33 kPa e 10 kPa. De acordo Maia *et al.* (2005) a umidade de capacidade de campo ( $W_{cc}$ ) é determinada pela metodologia da EMBRAPA (1997) que considera a umidade de capacidade de campo como a umidade do solo na tensão de 10 kPa.

Para efeitos de comparação determinou-se a umidade de capacidade de campo conforme metodologia utilizada por Lins (2003), tendo em vista que não existe norma padronizada na área de engenharia civil. Essa metodologia consiste em determinar a umidade de um corpo de prova submetido à saturação, após cessar a drenagem. Os corpos de prova foram retirados do campo, em moldes de PVC de 0,10 m de diâmetro, similares aos que foram usados para os ensaios de permeabilidade, regularizados e colocados em um recipiente com água sobre um colchão de brita de

aproximadamente 0,15 m, para favorecer a saturação da amostra através do processo de percolação. A amostra encontrava-se saturada quando, em sua superfície, a água estava presente, como observado na Figura 47, levando em média de 24 a 48 horas para atingir essa condição.



**Figura 47: Amostras saturando para determinação da capacidade de campo**

Depois de saturada, colocou-se a amostra sobre uma peneira, deixando-se drenar livremente a água retida no solo, e imediatamente concluída a drenagem (observando-se que não existia água livre) determinou-se a umidade de uma amostra da camada intermediária, para obtenção da umidade na capacidade de campo.

### **3.5 INSTRUMENTAÇÃO DAS CAMADAS DE COBERTURAS**

#### **3.5.1 Medição de Infiltração**

Para medição do líquido infiltrado foi instalado em junho de 2009, em cada cobertura experimental, um dispositivo denominado de infiltrômetro, que foi preenchido com material das mesmas características da respectiva camada. Os infiltrômetros foram confeccionados em chapa de ferro galvanizado com 2 mm de espessura, com tratamento contra ferrugem, capacidade de acumulação de água de 18 litros, em forma de pirâmide invertida na base.

A área interna da base do infiltrômetro é de 0,3364 m<sup>2</sup>, e altura das paredes laterais é de 0,05 m para os infiltrômetros instalados na camada metanotrófica e convencional, e de 0,45 m para o instalado na barreira capilar, devido a presença da

camada de pedras. Na base interna dos infiltrômetros foi colocada tela de aço galvanizado com abertura de 1 mm, intertravada, para evitar flexão durante o preenchimento com solo. Acima da tela, foi colocado geotêxtil tecido não tecido do tipo BIDIM® RT09, com a finalidade dar suporte para camada de finos, evitando assim a perda de material. Cada infiltrômetro tem na base uma saída em tubulação de ferro que é conectada a uma curva de 90° com diâmetro de 25 mm, sendo posteriormente feita a junção com uma tubulação de PVC. Os infiltrômetros foram instalados de maneira que a base com a tela coincidissem com o nível de resíduo existente na célula, como mostrado na Figuras 48 a 50.

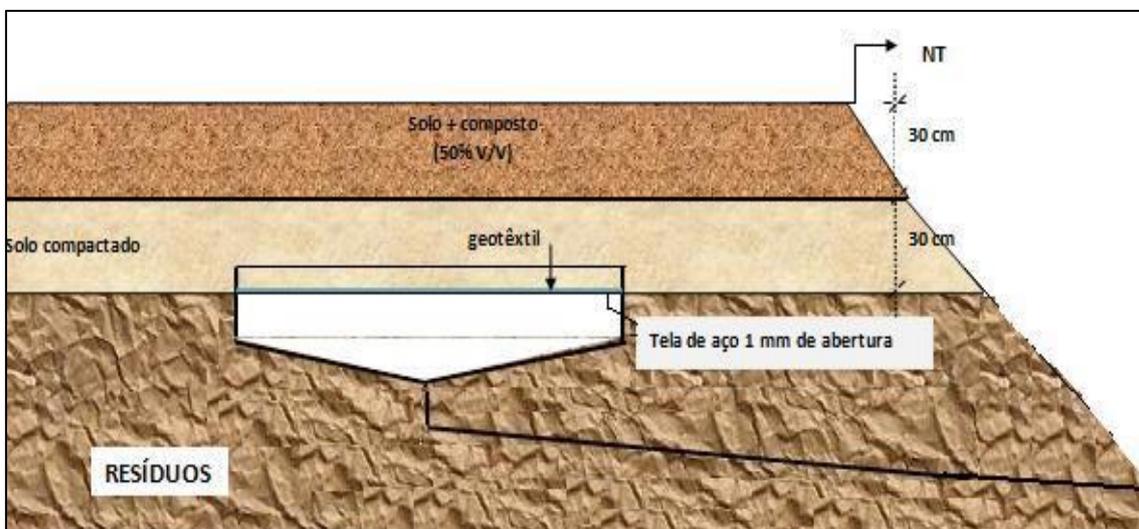


Figura 48: Perfil do infiltrômetro instalado na camada metanotrófica (MET01)

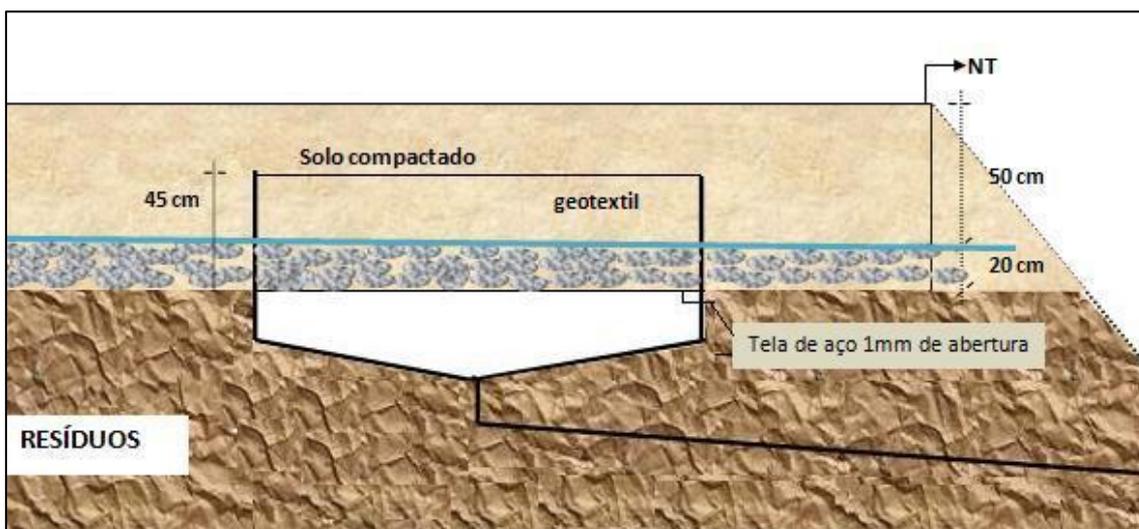
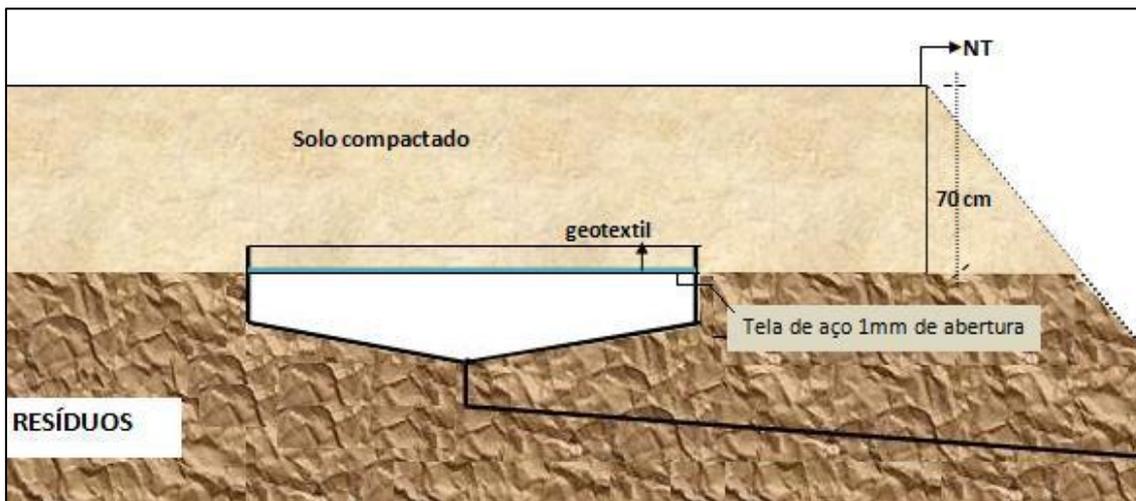


Figura 49: Perfil do infiltrômetro instalado na barreira capilar (BAC)

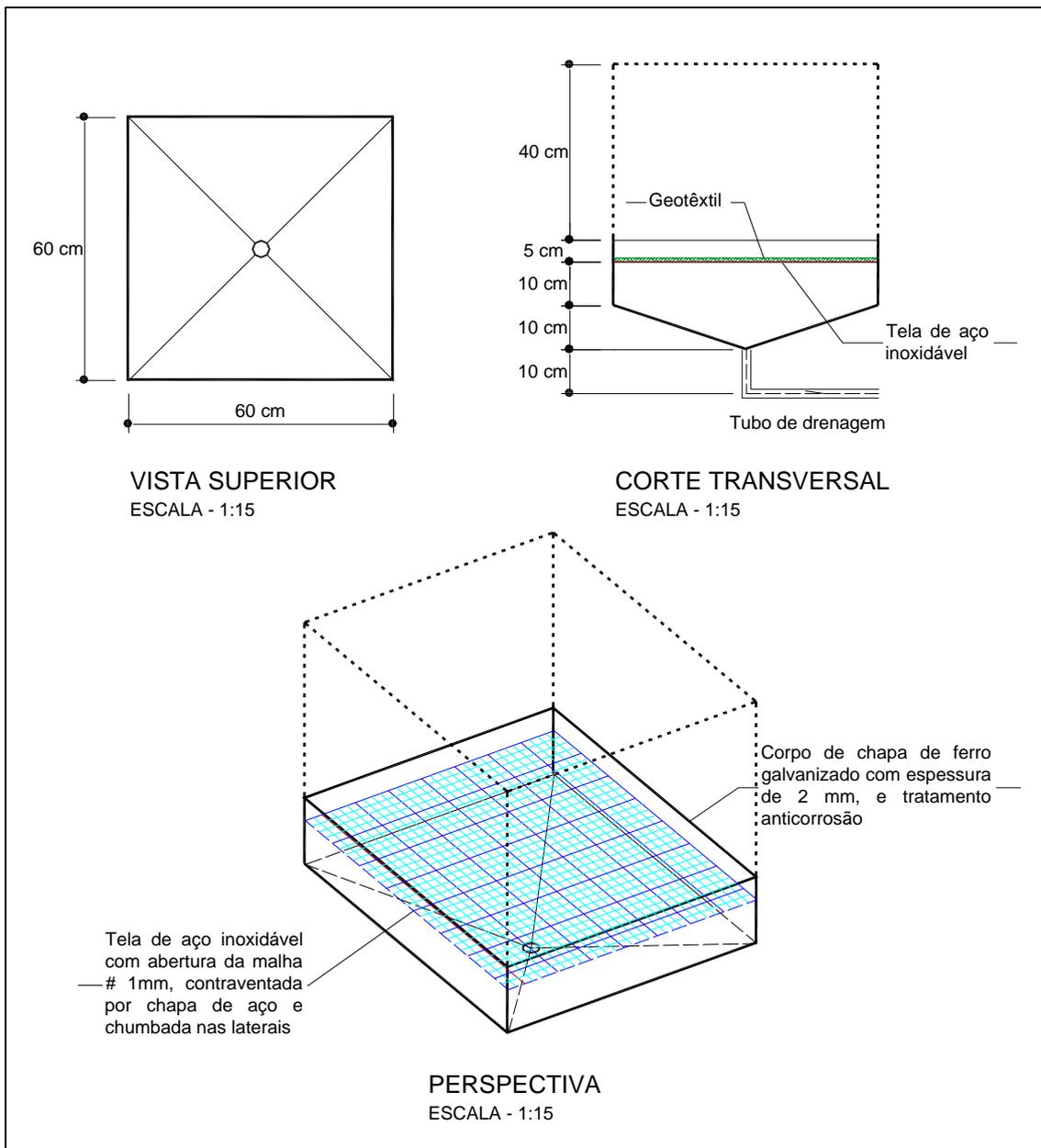


**Figura 50: Perfil do infiltrômetro instalado na camada convencional (CONV)**

A declividade da tubulação é voltada para uma saída no talude mais próximo, sendo fechada com registro de PVC na extremidade, para medição da quantidade de água infiltrada diariamente. A Figura 51 mostra alguns detalhes do infiltrômetro em fotos e a Figura 52 mostra o desenho esquemático do infiltrômetro padrão.



**Figura 51: Detalhes do infiltrômetro instalado na barreira capilar (a) tela na base (b) base para captação de água em formato de pirâmide invertida (c) vista lateral (d) vista superior**



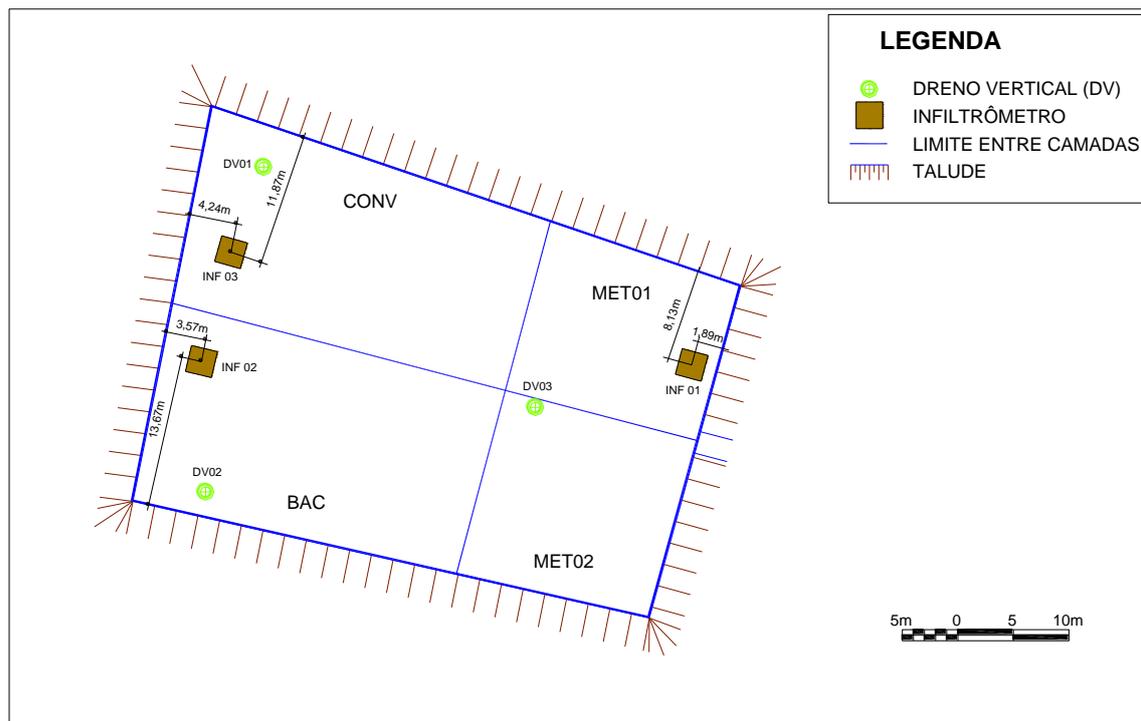
**Figura 52: Detalhe esquemático do infiltrômetro instalado**

Como os infiltrômetros foram instalados um ano após a execução da camada de cobertura, se fez necessário uma escavação de uma área mínima de 1,5 m x 2,0 m para a sua fixação, onde se acompanhou a compactação do material para que tivesse as características da respectiva camada existente.

A compactação da área de instalação dos infiltrômetros foi feita manualmente com um soquete de ferro, com base de 0,2 m x 0,2 m e peso de 10 kg, em camadas

de 0,05 m. A cada 20 cm de compactação foi retirado um anel de 0,07 m de diâmetro e 0,03 m de altura para avaliação da umidade e do peso específico alcançado na compactação.

Os infiltrômetros são identificados pelo tipo de camada de cobertura em INF01 (camada metanotrófica) INF02 (barreira capilar) e INF03 (camada convencional) e a localização na célula experimental está mostrada esquematicamente na Figura 53, onde DV representam os drenos verticais de coleta de biogás existentes na célula.



**Figura 53: Localização dos infiltrômetros na célula experimental**

#### **a) Infiltrômetro da Camada Metanotrófica (MET01)**

A instalação do infiltrômetro nessa camada foi iniciada no dia 20 de maio de 2009 e em virtude das chuvas, só foi concluída em 26 de maio. Foi realizado o nivelamento da área para que a espessura final da camada fosse igual a 0,60 m, representando a profundidade média da camada metanotrófica. A Figura 54 apresenta algumas etapas da execução da instalação.



**Figura 54: Instalação do infiltrômetro da camada metanotrófica (a) fixação da base (b) compactação ao redor da base (c) compactação da camada inferior (d) mistura de solo e composto (50%) (e) compactação da camada superior (f) conclusão da instalação**

### **b) Barreira Capilar (BAC)**

A instalação do infiltrômetro dessa camada foi iniciada no dia 18 de maio de 2009. Inicialmente o equipamento possuía a mesma altura interna de 0,05 m, prosseguindo-se o preenchimento conforme *lay out* da barreira capilar em campo, ou seja, 0,20 m de pedras rachinha e geotêxtil tecido não tecido acima das pedras e então uma camada compactada de 0,50 m de solo. Devido a grande precipitação no período constatou-se imediatamente que essa configuração não seria adequada haja vista quando a camada atingisse a saturação haveria uma drenagem livre devido a captação de água de uma área superior a área do infiltrômetro em virtude da camada de pedras ser superior a altura do infiltrômetro. Foi providenciado um prolongamento

da parede lateral e reinstalado o infiltrômetro em 11 de junho de 2009, ficando com altura final de 0,45 m.

O preenchimento do infiltrômetro a partir do nível dos resíduos foi de 0,20 m de pedras rachinha sobrepostas com 0,50 m de solo compactado, com separação na interface entre os dois materiais de um geotêxtil, sendo a mesma configuração existente na célula experimental. O controle de compactação dessa camada foi procedido da mesma forma que a camada metanotrófica com retirada de amostra e medição da umidade de campo. A Figura 55 mostra as etapas de instalação do INF02 com uma visão geral da camada após instalação concluída.



**Figura 55: Instalação do infiltrômetro da barreira capilar (a) colocação do geotêxtil (b) bloco capilar com pedra rachinha (c) preenchimento e compactação interna (d) e (e) compactação da camada superior (f) camada finalizada**

### c) Camada convencional (monolítica)

A instalação do infiltrômetro foi iniciada no dia 14 de maio de 2009 sendo concluído em 3 dias. A espessura final da camada de cobertura acima desse infiltrômetro foi de 0,70 m representando a espessura média da camada convencional, sendo compactada da mesma forma que as anteriores. A Figura 56 mostra algumas etapas de instalação do INF03.



**Figura 56: Instalação do infiltrômetro da camada convencional (a) colocação de geotêxtil (b) compactação (c) compactação dos 20 cm finais (d) infiltrômetro instalado e camada reconstituída**

Para medição de infiltração diária, um registro de PVC de 25 mm foi colocado no final da tubulação localizada no talude mais próximo. Diariamente (exceto sábados e domingos) o registro era aberto e medido o volume infiltrado em provetas de plástico graduadas, como mostrado na Figura 57.



**Figura 57: Medição de água infiltrada (a) tubulação de saída (b) medição com proveta**

A partir das relações de forma do infiltrômetro se determinou diariamente a altura de água infiltrada através da Equação 25:

$$H_i = (V/A) \quad \text{Eq. 25}$$

Onde:

$H_i$  = altura de água infiltrada no período de um dia (mm)

$V$  = volume diário de água infiltrada medido ( $\text{mm}^3$ )

$A$  = área de captação do infiltrômetro ( $\text{mm}^2$ )

A partir da precipitação diária a taxa de infiltração por tipo de camada foi determinada pela Equação 26:

$$\% \text{ infiltrado} = (H_i/P) \times 100 \quad \text{Eq. 26}$$

Onde:

$H_i$  = altura de água infiltrada (mm)

$P$  = precipitação (mm)

### 3.5.2 Medição de temperatura e umidade do solo

A medição de temperatura e umidade em profundidade foi feita, partir de junho de 2009, diretamente em sensores instalados de umidade volumétrica (EC5-DECAGON DEVICES) e de temperatura (conector e fio termopar tipo k) instalados em

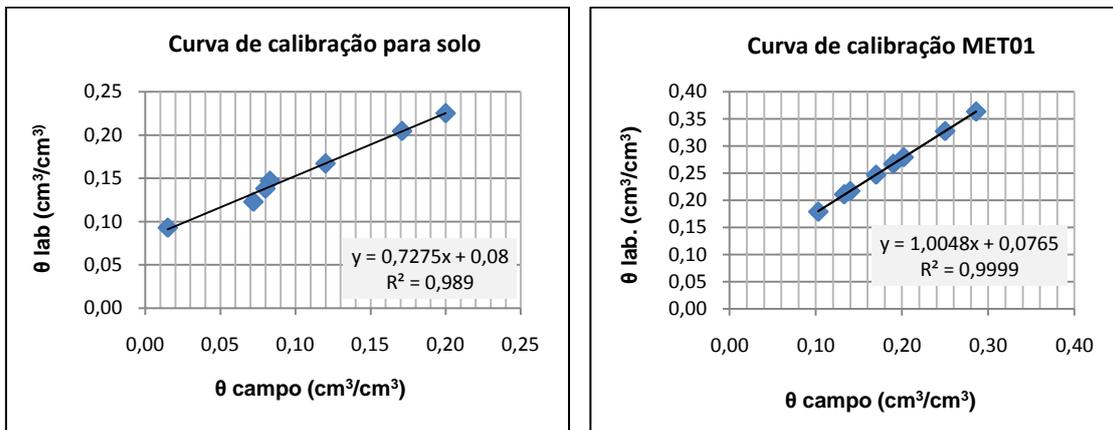
3 profundidades nas camadas metanotrófica e convencional, e em 2 profundidades na barreira capilar, (a cada 0,20 m). Os sensores foram instalados nas proximidades dos infiltrômetros citados anteriormente, com frequência de leitura semanal. A Figura 58 mostra a instalação dessa instrumentação.



**Figura 58: Instrumentação para medidas de umidade e temperatura (a) conector tipo “k” (b) sensor de umidade e temperatura (c) escavação para instalação (d) recompactação da camada de cobertura (e) sensores inseridos no solo (f) testes de medição de umidade**

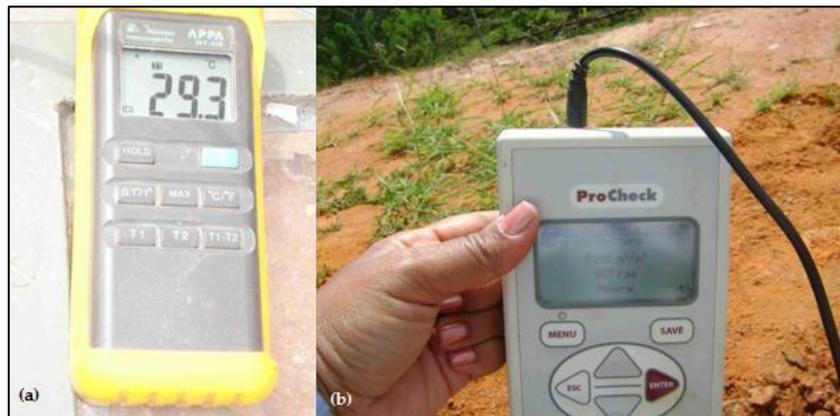
Os sensores de umidade volumétrica utilizados tem acurácia de medição de  $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para todos os solos com condutividade até  $8 \text{ dS/m}$ , e calibração de  $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ( $\pm 2\%$ ). A resolução do sensor é de  $0,001 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de umidade volumétrica para

solos minerais e 0,25% em meios de cultura. Como recomendado pelo manual do equipamento foi realizada a calibração dos sensores a partir de medidas de umidade em campo e coleta de amostra indeformada em anel metálico, de cada tipo de material (solo e mistura de solo e composto). As amostras foram embaladas em filme plástico e papel alumínio e conservadas em caixas térmicas de isopor e imediatamente encaminhadas ao laboratório para determinação de umidade. A partir dos dados de umidade e densidade seca determinou-se a umidade volumétrica de cada amostra, correlacionando-se assim com as leituras realizadas em campo no mesmo local da retirada das amostras. Dessa forma traçou-se a curva de calibração para a camada de solo e para a camada com mistura de solo e composto, como mostrado na Figura 59, que foram utilizadas nas leituras de umidades de campo, com periodicidade semanal.



**Figura 59: Curva de calibração dos sensores de umidade volumétrica EC-5**

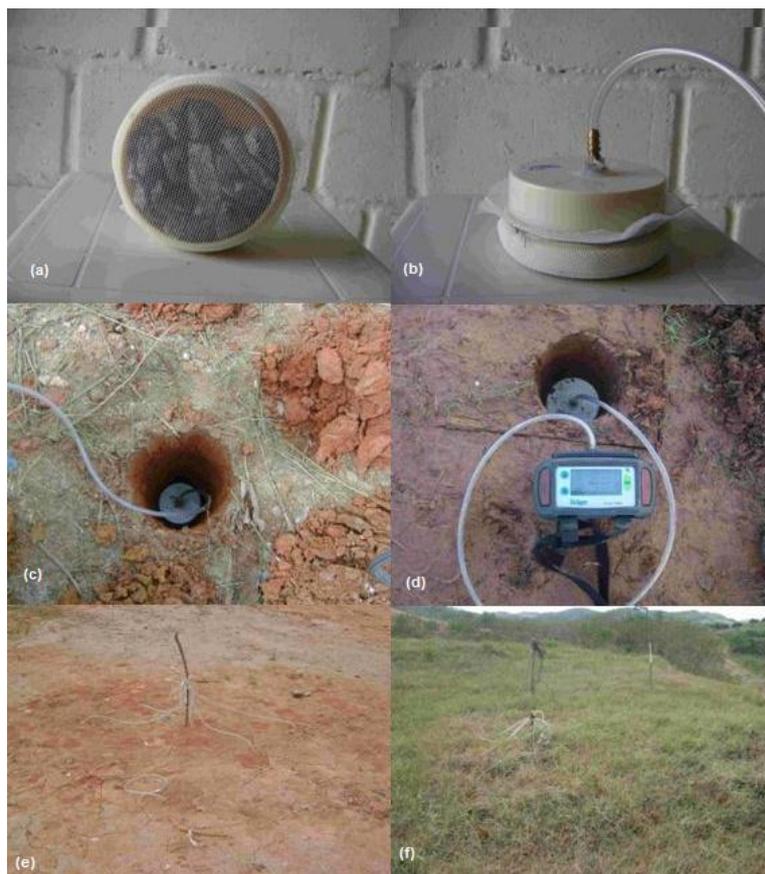
A medição de umidade volumétrica foi feita com equipamento modelo ProCheck da DECAGON DEVICES com 1 canal de entrada, capacidade de armazenamento de 1Mg (5.000 leituras) interface serial e medição de umidade de 0 a 100%. A medição de temperatura foi feita em termômetro digital modelo APPA Mt-520 de sensibilidade de 0,1°C. O terminal de entrada deste aparelho é para termopar tipo K e a faixa de leitura varia de -50°C a 1.300°C. A Figura 60 mostra esses dois equipamentos utilizados.



**Figura 60: (a) Termômetro e (b) medidor de umidade**

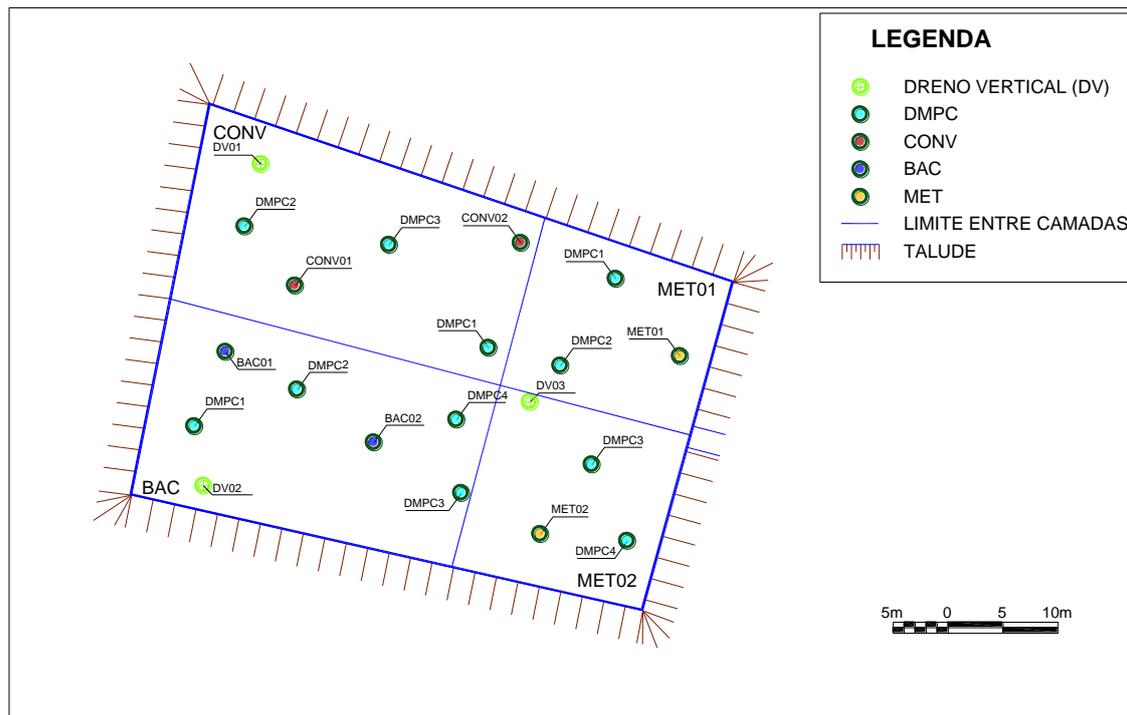
### **3.5.3 Medição de Pressão e Concentração de biogás**

Para monitorar a concentração e pressão do biogás desde a base da camada de cobertura (interface solo/resíduo) até a superfície, foram instalados Dispositivos de Medição de Pressão e Concentração (DMPC) em cada camada de cobertura. Esses dispositivos foram confeccionados em conexão de PVC (Cloro de Polivinila) do tipo CAP, com diâmetro nominal de 100 mm, utilizado em sistemas de esgotos prediais. Os CAP's foram perfurados na face plana para adaptação, através de rosqueamento e colagem com silicone, de um bico em latão, onde foi conectada uma mangueira de PVC com diâmetro interno de 5,0 mm. Para evitar obstrução com solo, o CAP foi preenchido com brita nº3 e colocado uma tela de arame galvanizado com abertura de 1,0 mm para proteção, como desenvolvido por Maciel (2003). A Figura 61 mostra as etapas de montagem do dispositivo DMPC.



**Figura 61: Instrumentação para medidas de concentração de biogás em profundidade (a) colocação de brita e tela na base do CAP (b) conexão de bico de latão e mangueira (c) colocação do conjunto de CAP e mangueira no solo (d) teste com medição de concentração (e) DMPC instalados na camada convencional (f) DMPC instalados na camada metanotrófica**

Em cada camada experimental foram instalados dispositivos DMPC na interface do solo com o resíduo. Para medição de concentração em profundidade foi instalado 2 perfis, com colocação de DMPC a cada 0,10 m, desde a superfície até a base da camada de cobertura, sendo esses perfis denominados de MET01, MET02, BAC01, BAC02, CONV01 e CONV02, conforme apresentado em planta na Figura 62.



**Figura 62: Localização da instrumentação para medidas de concentração e pressão em profundidade.**

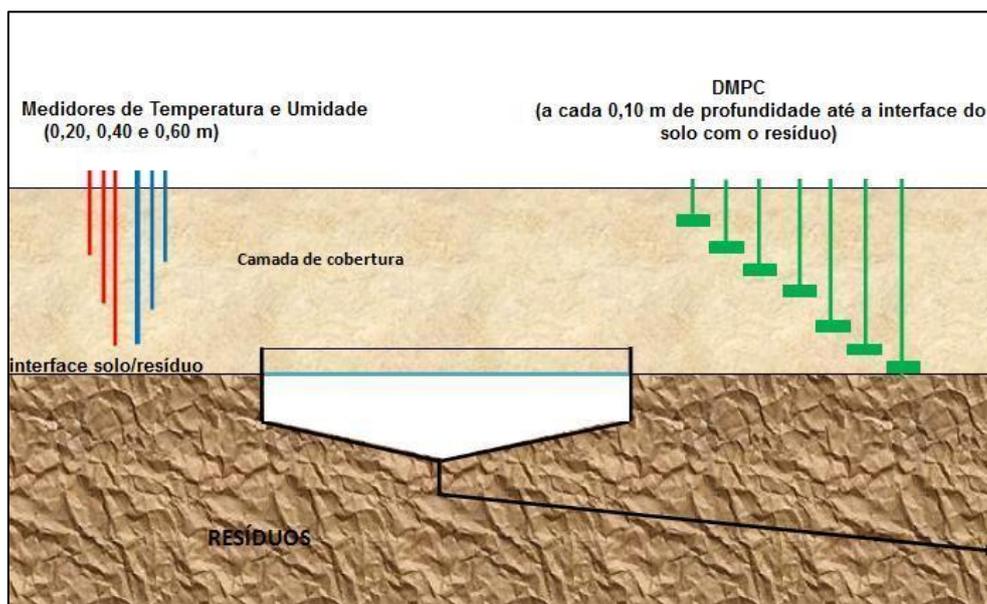
A medição da pressão dos gases foi feita com o manômetro digital portátil Dwyer modelo 477-2 com faixa de leitura de 0 a 10 kPa, sensibilidade de 3,0 Pa, propício às baixas pressões, como encontradas em camada de cobertura de aterros de RSU. As medições de concentração do biogás em % de volume de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, e H<sub>2</sub>S foram realizadas utilizando-se um analisador de gases, modelo X-am 7000 da marca Dräger, baseada na absorção de cada espécie no infravermelho. As faixas de leitura e limites de quantificação de cada gás medido pelo equipamento são mostradas na Tabela 10.

**Tabela 10: Características do equipamento utilizado para medição de concentração de Biogás**

Parâmetro	Faixa de Medição	Limite de Quantificação	Faixa de Erro do Equipamento
CO <sub>2</sub>	0 – 100%	0,1%	± 2,0%
CH <sub>4</sub>	0 – 100%	0,1%	± 5,0%
O <sub>2</sub>	0 – 25%	0,1%	± 5,0%
H <sub>2</sub> S	0 – 500 ppm	1 ppm	± 1,0%

O equipamento era aferido periodicamente na UFPE através do procedimento interno de autocalibração do aparelho mediante utilização de três cilindros com concentrações distintas de  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  de 40/60%, 50/50% e 65/35% em volume.

As leituras de pressão e concentração de biogás em cada um dos DMPC na interface do solo/resíduos tiveram periodicidade quinzenal. Inicialmente era feita a leitura da pressão, e posteriormente se conectava o detector de gás e esperava-se 3 minutos, no mínimo, para estabilização e assim proceder a leitura das concentrações do biogás. Nos perfis MET01, MET02, BAC01, BAC02, CONV01 e CONV02, as concentrações de biogás eram medidas quinzenalmente, quando da realização de ensaios para determinação de fluxo de biogás em cada tipo de camada de cobertura. Os perfis de temperatura, umidade e concentração típicos são representados esquematicamente na Figura 63.



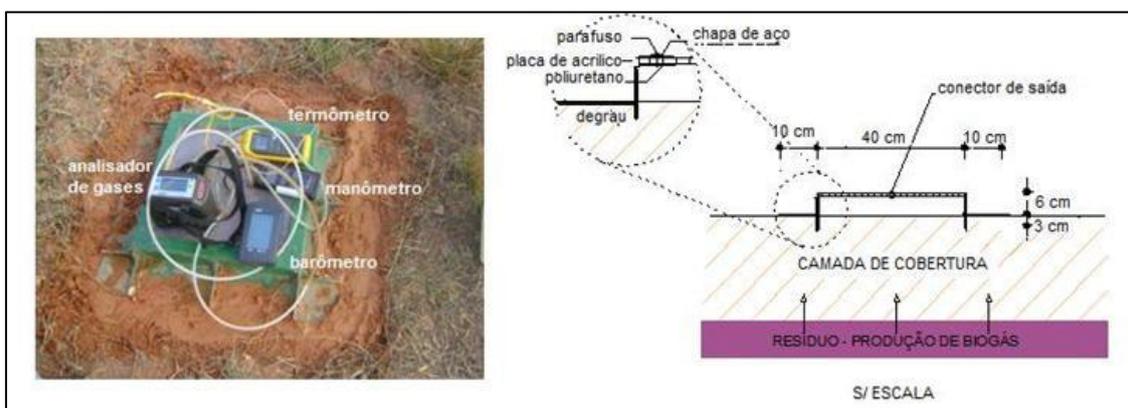
**Figura 63: Perfil esquemático da instrumentação para medidas de temperatura, umidade e concentração de biogás em profundidade**

Os resultados das medições de infiltração foram analisados em função das características de cada material de cobertura e a sua variação com o tempo, procurando-se identificar quais os fatores que influenciaram nas taxas de infiltração.

### 3.6 MEDIÇÃO DE FLUXO DE BIOGÁS

As determinações dos fluxos dos gases  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  em cada tipo de cobertura da célula experimental foram realizadas utilizando-se a metodologia do ensaio com câmara de fluxo estática adaptada de Maciel (2003). Essa metodologia consiste na cravação de uma câmara no solo da cobertura e na posterior medição da concentração dos gases no interior da câmara, com medições também de temperatura interna e externa, pressão interna e externa, ao longo do tempo.

A câmara de fluxo utilizada é a mesma descrita por Maciel (2003) com adaptações realizadas pelo próprio autor (diminuição da profundidade de cravação de 0,10 para 0,03 m), com o objetivo de tornar mais rápido o processo de cravação da placa no solo e evitar maiores perturbações na área de investigação. A câmara foi construída com lateral de aço galvanizado de 2 mm de espessura, com topo em acrílico cristal com 8 mm de espessura, fixado na parte metálica com dois parafusos em cada lateral e vedado com espuma de poliuretano de alta densidade. No topo da câmara existem duas conexões de saída (tipo encaixe rápido) onde, por meio de uma mangueira flexível de polietileno, são conectados os equipamentos de medição de gases e de pressão. A câmara também possui entradas para adaptação de equipamento para medição da temperatura interna do gás. A câmara de fluxo e os equipamentos utilizados no ensaio são mostrados na Figura 64.



**Figura 64: Equipamentos utilizados nos ensaios de câmara de fluxo**

Para a realização do ensaio, a câmara é cravada em local previamente determinado, precedido de um nivelamento e limpeza do terreno. Em seguida os equipamentos são acoplados e as medições dos parâmetros são feitas em intervalos

de tempo pré-estabelecidos (5 a 10 minutos), durante um período mínimo de 30 a 60 minutos. Os equipamentos utilizados nesse ensaio são os descritos anteriormente (termômetro, barômetro, manômetro e analisador de gases). A instalação da câmara de fluxo segue o seguinte procedimento:

- A câmara é colocada no local do ensaio e pressionada contra o solo para fixação de forma que a cravação seja vertical, com os conectores de saída abertos de maneira que não ocorra acúmulo de gases no interior da câmara;
- Após a fixação se conectam os equipamentos e vedada as laterais da câmara com solo;
- A leitura da concentração dos gases na câmara de fluxo estática inicia-se logo após a sua cravação e este momento é considerado o instante inicial de cada ensaio.

A determinação do fluxo de gás na camada foi realizada por meio da avaliação do volume de CH<sub>4</sub> aprisionado no interior da câmara com o tempo, ou seja, a emissão de CH<sub>4</sub> está relacionada com a velocidade de aumento da concentração do gás no interior da câmara, com os volumes ajustados para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). A Equação 27 representa a forma de determinação do fluxo volumétrico nos ensaios e câmara de fluxo estática.

$$J = V_p/A \times (\Delta C/\Delta t) \quad \text{Eq. 27}$$

Onde:

J = fluxo volumétrico (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/s)

V<sub>p</sub> = Volume útil da câmara de fluxo (m<sup>3</sup>)

A = área de solo coberto pela câmara (m<sup>2</sup>)

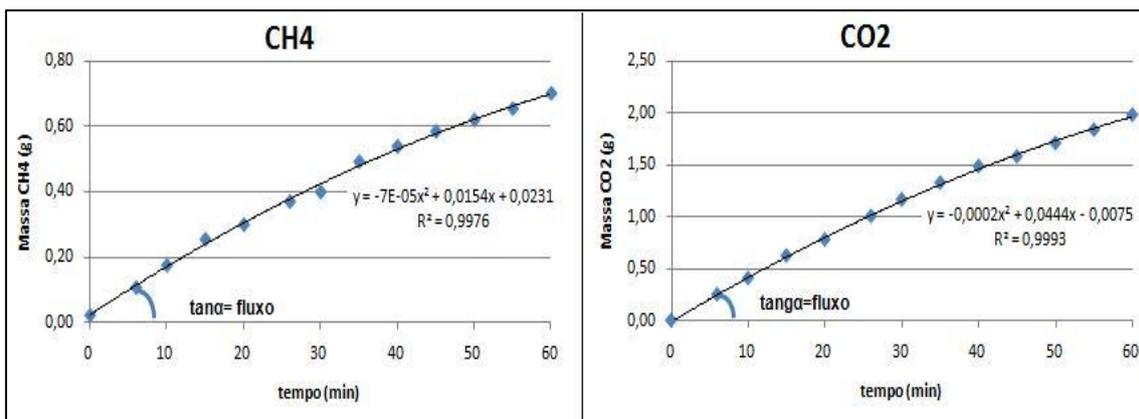
ΔC/Δt= Variação da concentração do gás (% vol.) com o tempo (s)

Para transformação dos fluxos de cada biogás, em fluxo mássico, as curvas foram convertidas através das densidades dos gases e corrigidas em função das leituras de temperatura interna.

Os ensaios para se determinação de fluxo de CH<sub>4</sub> tiveram duração de cerca de 1 hora, com o fluxo determinado no intervalo inicial da curva, a fim de se obter a taxa

máxima de fluxo do gás pela camada de cobertura. Essa condição simula a camada de cobertura de aterros que fica em contato com a atmosfera e, conseqüentemente, ocorrem os gradientes máximos de pressão e concentração (MACIEL, 2003).

As taxas de fluxo e coeficiente linear de determinação ( $R^2$ ) foram determinados em todos os testes, sendo considerados válidos os ensaios que apresentaram valores de coeficientes acima de 0,9. A Figura 65 mostra a forma de determinação do fluxo de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ .



**Figura 65: Determinação do fluxo de gases a partir de ensaios de câmara de fluxo**

Após cada ensaio de câmara de fluxo foi coletada uma amostra em anel metálico para determinação da umidade e peso específico aparente do solo em campo, de cada camada superficial. O anel era envolvido com filme plástico, identificado e envolvido novamente com papel alumínio e armazenado em caixa de térmica (isopor) para preservar suas características até a chegada ao laboratório. A Figura 66 mostra as etapas de coleta do material em campo.



**Figura 66: Coleta de amostra pra determinação de umidade e peso específico (a) retirada de anel da camada convencional (b), (c) e (d) retirada de anel da camada metanotrófica**

Os ensaios de campo para determinação das emissões de biogás foram realizados de setembro de 2008 a fevereiro de 2010 abrangendo períodos secos e chuvosos. No início dos estudos o sistema de extração da célula experimental ainda não estava em operação, e posteriormente, para que se estabelecessem as mesmas condições nos demais ensaios de fluxo, o compressor foi desligado no dia do ensaio.

Os ensaios foram realizados em três períodos distintos compreendendo estações secas e chuvosas para se avaliar a influência das condições climatológicas no fluxo de biogás. A Tabela 11 apresenta a quantidade de ensaios realizados em cada período e por tipo de camada.

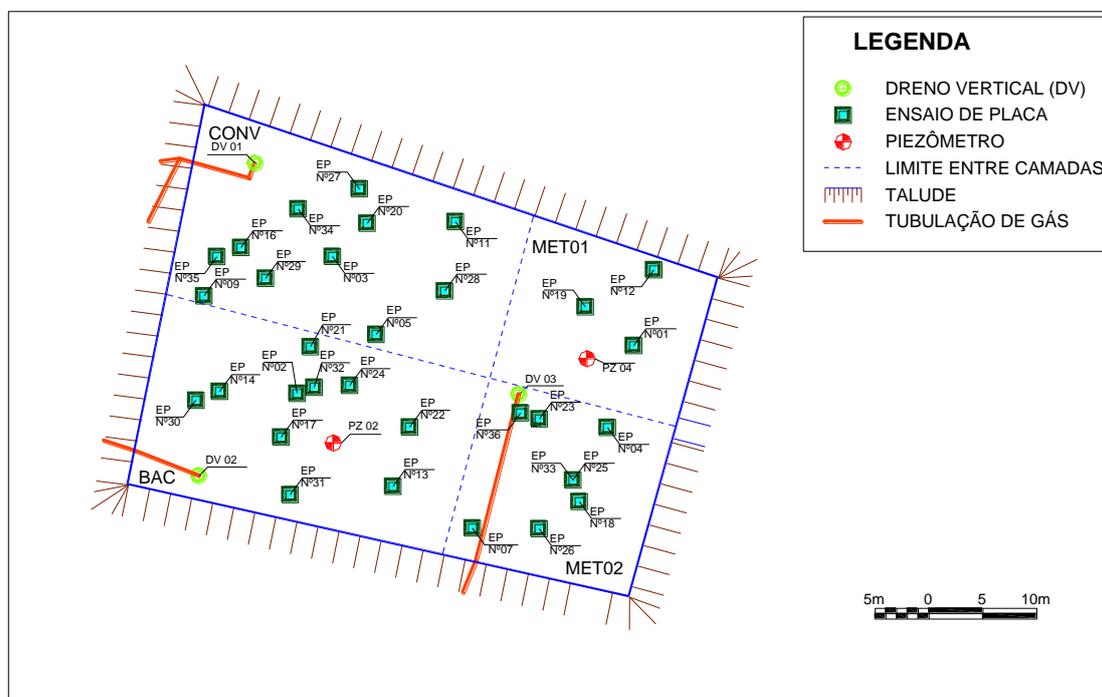
**Tabela 11: Quantidade de ensaios de câmara de fluxo**

Período	MET		BAC	CONV	TOTAL
	MET01	MET02			
Setembro/08 a fevereiro/09	03	08	10	11	32
Março/09 a agosto/09	05	03	08	09	25
Setembro/09 a fevereiro/10	07	10	15	18	50
<b>TOTAL</b>	<b>15</b>	<b>21</b>	<b>33</b>	<b>38</b>	<b>107</b>
	<b>36</b>				

A quantidade de ensaios está de acordo com o que determina a Agência Ambiental do Reino Unido (ENVIRONMENTAL AGENCY, 2004), para áreas inferiores a 5.000 m<sup>2</sup>, como é o caso da cobertura experimental.

No período de setembro de 2008 a fevereiro de 2009 foi realizado um total de 32 ensaios de câmara de fluxo, compreendendo um período de baixas precipitações. No período de março a agosto de 2009 foi realizado um total de 25 ensaios de câmara de fluxo. O menor número de ensaios se deve a chuvas intensas que dificultaram a realização dos mesmos. No período de setembro de 2009 a fevereiro de 2010 foi realizado um total de 50 ensaios de câmara de fluxo.

Desses 50 ensaios de fluxo, 24 foram realizados também com objetivo de avaliar, em 6 perfis verticais (2 em cada camada), a variação de concentração de biogás ao longo da profundidade, em conjunto com os ensaios de fluxo. Na camada convencional e barreira capilar os perfis se diferenciavam em termos de presença ou não de vegetação. As Figuras 67, 68 e 69 mostram a localização dos ensaios realizados nos três períodos distintos, em cada camada de cobertura, com indicação da subdivisão de cada área e localização de drenos vertical de gás e piezômetros existentes no platô superior da célula.



**Figura 67: Localização dos ensaios de fluxo realizados entre setembro de 2008 a fevereiro de 2009**

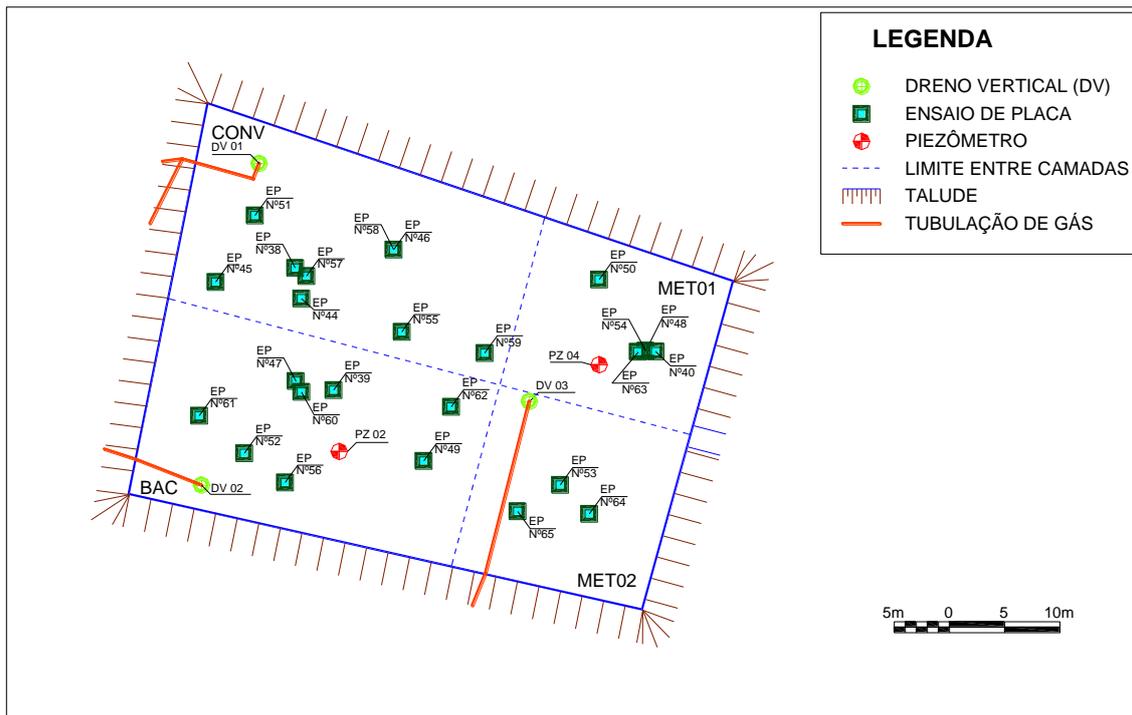


Figura 68: Localização dos ensaios de fluxo realizados entre março de 2009 a agosto de 2009

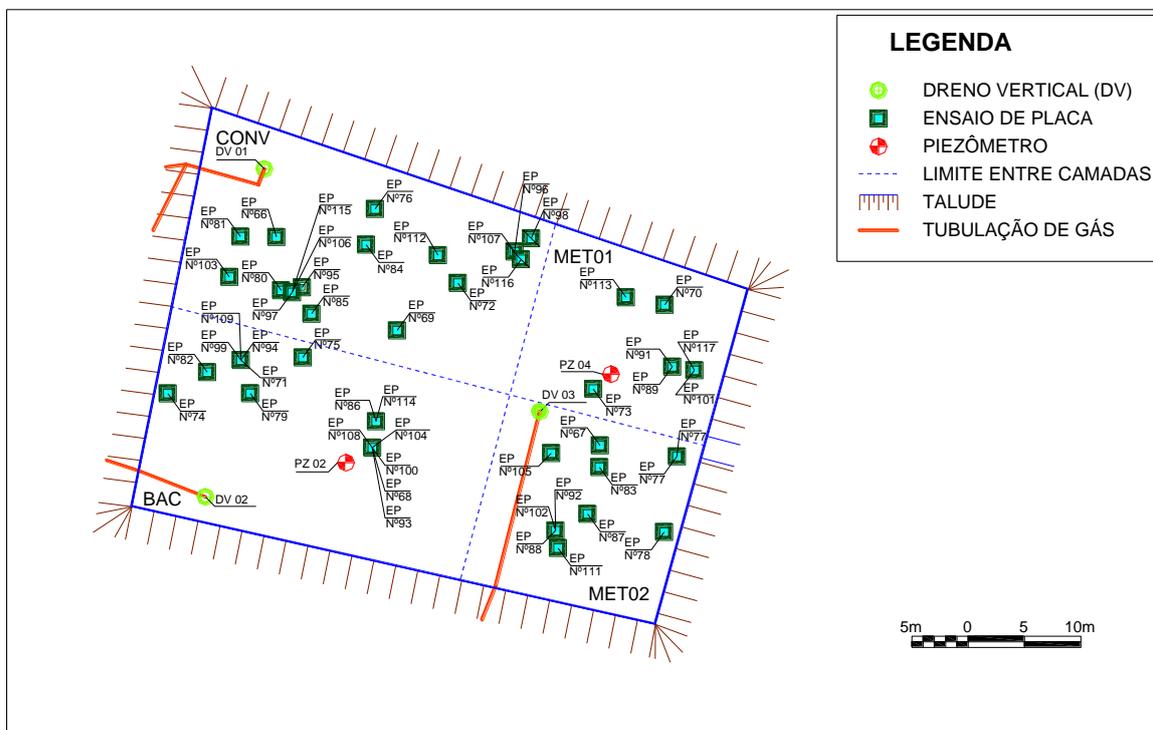


Figura 69: Localização dos ensaios de fluxo realizados entre setembro de 2009 a fevereiro de 2010

Os resultados dos ensaios de fluxo de  $\text{CH}_4$  realizados em cada uma das camadas de cobertura foram agrupados com as características do solo no momento do ensaio, as concentrações de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  sob a cobertura (interface solo/lixo), quando estas foram medidas diretamente no dispositivo tipo DMPC, ou em locais próximos aos ensaios (no máximo a 2 m), o gradiente de pressão entre a massa de resíduo e atmosfera, e a pressão atmosférica no dia do ensaio visando avaliar a influência desses fatores nas emissões de biogás.

O grau de saturação para a camada entre 0,30 m e 0,60 m de profundidade, foi determinado a partir das características das amostras de solo em campo, quando se realizava coletas de solo em profundidade, e a partir de setembro de 2009, a partir das leituras de umidade nos sensores.

A data de realização dos ensaios não seguiu um calendário específico, observando-se, quando fosse possível, um ensaio mensal em cada camada, em dias ensolarados ou de preferência sem chuva que foram agrupados por período de acordo com as estações secas e chuvosas.

Para análise inicial dos dados obtidos, foi utilizado o programa Microsoft Excel 2007® no desenvolvimento das análises básicas dos diferentes parâmetros, bem como para elaboração de gráficos diversos. Posteriormente foi utilizado o software Statistic® para as análises de estatísticas descritivas de cada tipo de cobertura, assim como para uma representação gráfica dos dados, com objetivo de possibilitar uma melhor visualização do conteúdo dos dados e tabelas, através de diagrama de caixa (Box Plots). Esse tipo de gráfico apresenta os valores centrais dos dados e alguma informação a respeito da amplitude deles, além de ser possível observar os desvios em relação ao valor central (desvio padrão no caso de médias, e quartis no caso de medianas, que são medidas de posição que dividem a distribuição em quatro partes).

### **3.7 ESTIMATIVA DE OXIDAÇÃO DE METANO**

Para a estimativa da eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  em cada perfil instrumentado, foi utilizada as medidas de concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  desde a interface de solo/resíduos (base da camada de cobertura) até 0,10 m de profundidade, no período de setembro de 2009 a março de 2010, com metodologia adaptada de Roncato (2009) e Gebert *et al.* (2011), para medições em campo.

Em cada cobertura experimental foi instalado 2 perfis com dispositivos para medição de concentração de biogás (DMPC) a cada 0,10 m, desde a superfície até a base da camada de cobertura denominados conforme foi apresentado no item 3.5.3 e Figura 63, totalizando 6 perfis de medição de concentração. Na camada convencional e barreira capilar foi instalado um perfil de dispositivos DMPC em um local sem vegetação e outro perfil em um local com vegetação, enquanto na camada metanotrófica foi instalado um perfil na MET01 e outro perfil na MET02. A Tabela 12 apresenta um resumo da instrumentação utilizada na avaliação da estimativa de eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$ , com as respectivas características.

**Tabela 12: Instrumentação para medida de temperatura e umidade do solo, e concentração de biogás em cada perfil de cobertura experimental**

Tipo de camada/ Característica	Profundidade da instrumentação		
	Temperatura	Umidade	Pressão e Concentração de biogás
MET01 h=0,60 m	0,20, 0,40 e 0,50 m	0,20, 0,40 e 0,55 m	0,10, 0,20, 0,30, 0,40 e 0,60 m
MET02 h=0,55 m	0,25 m	0,25 m	0,10, 0,20, 0,30, 0,40 e 0,55 m
BAC01 h=0,70 m	0,20 e 0,40 m	0,20 e 0,40 m	0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50 e 0,70 m
BAC 02 h=0,60 m	0,20 m	0,20 m	0,10, 0,20, 0,30, 0,40 e 0,60 m
CONV01 h=0,70 m	0,20, 0,40 e 0,60 m	0,20, 0,40 e 0,60 m	0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,60 e 0,70 m
CONV2 h=0,80 m	0,40 m	0,40 m	0,20, 0,40, 0,60 e 0,80 m

Para se determinar a taxa de respiração da mistura de solo e composto foi feito medições em duas caixas de fluxo preenchidas com materiais de mesmas características dos materiais utilizados na célula experimental. Essas caixas foram utilizadas por Purificação (2009) em experimento para avaliar crescimento de micro-organismos metanotróficos em biocoberturas.

A concentração de  $\text{CO}_2$  foi medida em 3 profundidades, no perfil instalado na caixa de fluxo preenchida com solo e composto, cujas características são similares às da camada MET01 em campo. Essas concentrações em profundidade foram deduzidas nas leituras encontradas em campo, na respectiva profundidade, para minimizar os erros inerentes a metodologia, devido à presença de matéria orgânica no

solo. Da mesma forma também se procedeu a mesma investigação em uma segunda caixa de fluxo preenchida apenas com solo compactado.

A taxa de  $\text{CO}_2$  gerada pela respiração do solo devido a presença de matéria orgânica, foi feita em uma câmara de fluxo adaptada com um CAP de PVC de 150 mm, altura determinada de 0,047 m e volume de 0,831 litros. As medições foram feitas após 6 meses sem alimentação de  $\text{CH}_4$ , sendo inicialmente verificado se havia vestígios de biogás na câmara inferior de distribuição das caixas de fluxo.

Como se esperava fluxo relativamente baixo as medições de concentração de  $\text{CO}_2$  foram realizadas a cada 10 minutos na primeira hora e posteriormente a cada hora, até 8 horas de ensaio. Os equipamentos foram desconectados, fechando-se os dispositivos de saída com presilhas por 24 horas. Após esse tempo foi então medida a concentração de  $\text{CO}_2$  e obtendo-se assim o fluxo devido à respiração em função da presença de matéria orgânica no material (solo+composto). O mesmo procedimento também foi realizado na caixa que continha apenas solo, porém não foi detectado fluxo devido às características do material (solo) apresentar baixo teor de matéria orgânica.

A Figura 70 mostra as caixas de fluxo que foram utilizadas para avaliar concentração de  $\text{CO}_2$  em profundidade devido, assim como o ensaio de câmara de fluxo estática para medir a taxa de geração de  $\text{CO}_2$ .



**Figura 70: Detalhe das caixas de fluxo (a) vista geral (b) colocação de medidores de concentração em profundidade (c) instrumentação para medidas de temperatura e umidade (d) ensaios de determinação de taxa de respiração de  $\text{CO}_2$  no substrato**

A estimativa de eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub> foi feita com base na variação de concentração de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> medida desde a interface do solo com o resíduo (base da camada de cobertura) até 0,10 m de profundidade da superfície, sendo a eficiência total determinada pelo valor acumulado. As equações seguiram a metodologia descrita em Roncato (2009) e Gebert *et al.* (2011) onde:

$$\% \text{Biogás}_{(0,1m)} = [\% \text{CH}_{4(0,1m)} + \% \text{CO}_{2(0,1m)} - \% \text{CO}_{2(\text{resp})}] / 100 \quad \text{Eq. 28}$$

$$\% \text{CH}_{4\text{não oxidado}(0,10m)} = \% \text{CH}_{4(0,10m)} / \% \text{Biogás}_{(0,10m)} \quad \text{Eq. 29}$$

$$\% \text{CH}_{4\text{oxidado}(0,10m)} = \% \text{CH}_{4(\text{base})} - \% \text{CH}_{4\text{não oxidado}(0,10m)} \quad \text{Eq. 30}$$

Onde:

$\% \text{Biogás}_{(0,10m)}$  = % de biogás existente a 0,10 m de profundidade (considerando apenas CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>);

$\% \text{CH}_{4(0,10m)}$  = concentração de CH<sub>4</sub> medido a 0,1 m de profundidade;

$\% \text{CO}_{2(0,10m)}$  = concentração de CO<sub>2</sub> medido a 0,10 m de profundidade;

$\% \text{CO}_{2(\text{resp})}$  = concentração de CO<sub>2</sub> obtido nos ensaios de respiração na profundidade de 0,10 m (usado apenas na MET01);

$\% \text{CH}_{4\text{não oxidado}(0,10m)}$  = % de CH<sub>4</sub> na profundidade de 0,10 m em relação ao biogás existente nessa profundidade;

$\% \text{CH}_{4(\text{base})}$  = % CH<sub>4</sub> na base da camada de cobertura (considerando apenas CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>);

$\% \text{CH}_{4\text{oxidado}(0,10m)}$  = % de CH<sub>4</sub> oxidado desde a base da camada de cobertura até 0,10 m.

A partir do percentual de CH<sub>4</sub> oxidado na profundidade de 0,10 m se encontrou a eficiência de oxidação acumulada como sendo:

$$E_{fox} = \frac{\% \text{CH}_{4\text{oxidado}(0,10m)}}{\% \text{CH}_{4\text{base}}} \quad \text{Eq. 31}$$

Todos os valores das concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> são concentrações volumétricas (%). Uma planilha em Excel foi utilizada para determinar o % de variação

de CH<sub>4</sub> em cada ensaio realizado como mostrado na Tabela 13, com um respectivo exemplo.

**Tabela 13: Planilha de determinação de % variação de CH<sub>4</sub> da base até superfície**

data	Campo					CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> (A/B)	Variação de % em profundidade				
	Profundida de (cm)	CO <sub>2</sub> (%) (A)	CH <sub>4</sub> (%) (B)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (resp) (%) (C)		%Biogás D= (A+B-C)/100	%CO <sub>2</sub> E=(A-C)/D	%CH <sub>4</sub> F=B/D	%CH <sub>4</sub> <sub>oxi</sub> G=F'-F	Efox (%) G/F'
	-0,1										
	-0,2										
	-0,3										
	-0,4										
	-0,5										
	solo/resíduo	A'	B'				X= (A'+B')/100		F'= B'/X		
data	Campo					CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> (A/B)	Variação de % em profundidade				
	Profundida de (cm)	CO <sub>2</sub> (%) (A)	CH <sub>4</sub> (%) (B)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (resp) (%) (C)		%Biogás D= (A+B-C)/100	%CO <sub>2</sub> E=(A-C)/D	%CH <sub>4</sub> F=B/D	%CH <sub>4</sub> <sub>oxi</sub> G=F'-F	Efox (%) G/F'
10/dez	-0,1	24,5	15,0	6,2	1,8	1,63	37,7	0,6	0,4	0,2	33,2
	-0,2	26,0	22,0	4,0	2,0	1,18	46,0	0,5	0,5	0,1	19,7
	-0,3	28,0	40,0	2,7	0,0	0,70	68,0	0,4	0,6	0,0	1,3
	-0,4	38,0	55,0	0,5	0,0	0,69	93,0	0,4	0,6	0,0	0,7
	-0,5	38,0	55,0	0,5	0,0	0,69	93,0	0,4	0,6	0,0	0,7
	solo/resíduo	38,0	56,0	0,5	0,0	0,68	94,0	0,4	0,6	0,0	0,0

Paralelamente as leituras de concentração também foram realizadas as leituras de umidade e temperatura, além de algumas coletas de amostras de solo a cada 0,10 m para determinação de pH e sólidos voláteis. Todas essas determinações tiveram como objetivo avaliar a influência desses fatores com % de variação de CH<sub>4</sub> encontrado e tentar estabelecer diferenças entre os perfis estudados.

Uma avaliação da presença de micro-organismos metanotróficos foi feita no mês de junho de 2009 a partir de amostras de solo das camadas de cobertura (CONV, BAC, MET01 e MET02) que foram coletadas para análises de biologia molecular no Laboratório da Ecologia Molecular Microbiana (LEMM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O teste do tipo DGGE (Eletroforese em Gel de Gradiente Desnaturante), é uma técnica molecular aplicada na determinação direta da diversidade genética de populações microbianas complexas. Essas análises foram realizadas para verificar se haviam diferenças na estrutura de comunidade de bactérias metanotróficas existentes no solo, em cada uma das camadas de cobertura, sendo a metodologia descrita por Purificação (2009).

As amostras foram coletadas em locais previamente identificados em cada camada de cobertura, onde se realizaram ensaios de determinação de fluxo de biogás

no mês de junho de 2009. Após cada ensaio de fluxo, um tubo de aço inox de diâmetro interno de 20 mm previamente limpo e seco foi introduzido no solo e a cada 0,10 m de profundidade foi coletada uma amostra de solo, sendo armazenado em sacos plásticos do tipo *zip*, identificado e enviado imediatamente ao laboratório. O material foi analisado para metanotróficas grupo I.

A extração de DNA foi feita utilizando o kit de extração *FastDNA® SPIN Kit for Soil*, da BIO101 (Califórnia, EUA). Através da eletroforese em gel de agarose os fragmentos de DNA puderam ser separados de acordo com o seu tamanho como descrito em Purificação (2009)

Os resultados foram apresentados sob a forma de dendrogramas, que é uma representação gráfica da aplicação de um algoritmo de *clustering*. Esta ferramenta estatística agrupa dados originários de uma matriz de similaridade, gerando uma ordenação hierárquica ascendente.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo estão apresentados os resultados e discussões da pesquisa desenvolvida no âmbito da camada de cobertura da Célula Experimental da Muribeca-PE. Inicialmente serão apresentadas as condições climáticas observadas no período de estudo, ou seja, de setembro/08 a dezembro/10. Em seguida serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório referentes à (i) caracterização dos solos utilizados no infiltrômetro para estudo de infiltração, comparando-os com os existentes em cada tipo de cobertura (ii) curva de retenção de água (iii) permeabilidade e (iv) capacidade de campo, dos materiais *in situ*. Posteriormente serão apresentados os resultados referentes a infiltração de água, emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, e avaliação de oxidação de CH<sub>4</sub> em cada camada de cobertura da célula experimental que foram realizadas os ensaios de campo.

### 4.2 CONDICIONANTES CLIMATOLÓGICOS

O estudo de alguns condicionantes climáticas se deu com objetivo de avaliar a influência dessas variáveis nos processos de infiltração, emissão de biogás e oxidação de CH<sub>4</sub>. Esses processos serão analisados em períodos de excedentes hídricos (períodos chuvosos) e períodos de deficiência hídrica (períodos secos).

A Tabela 14 apresenta os valores mensais de precipitação, evapotranspiração, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, temperatura ambiente e velocidade do vento obtidos da Estação Meteorológica do Curado/INMET no período de setembro/2008 a dezembro/2010 e estimativa da evapotranspiração potencial calculada a partir da metodologia proposta por Thornthwaite modificada por Camargo *et al.* (1999) como descrito no Capítulo III.

Vale ressaltar que a análise conjunta dos parâmetros climáticos com os resultados obtidos na investigação de campo será realizada para cada tipo de processo investigado (infiltração, emissão de biogás e oxidação de CH<sub>4</sub>) no decorrer deste Capítulo.

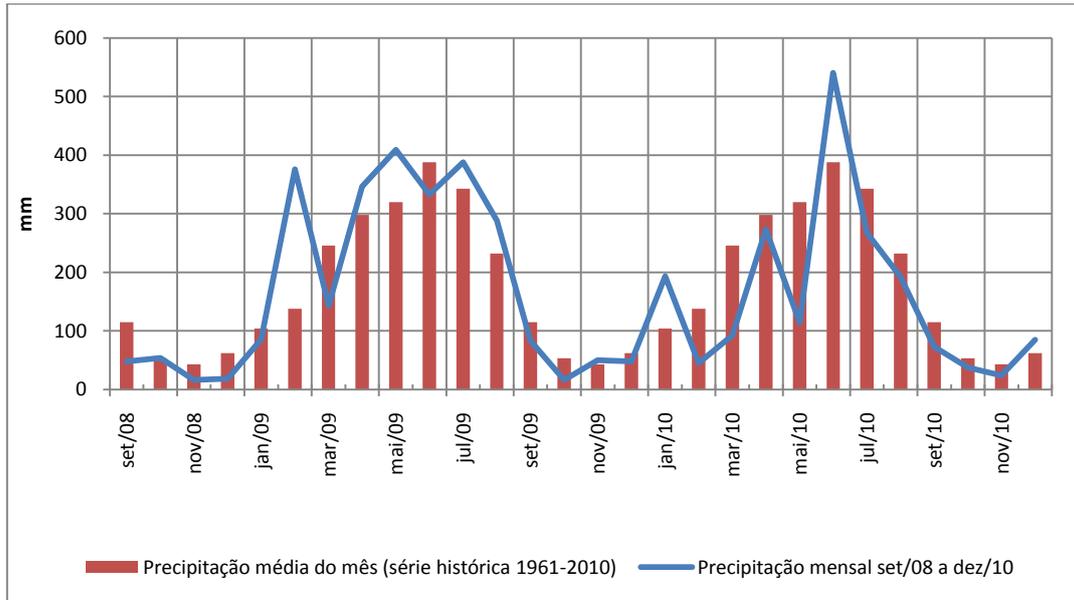
Tabela 14: Dados climáticos - período de set/08 a dez/10

Mês/ano	P (mm)	Etp* (mm)	P-E (mm)	P atm (kPa)	U (%)	T <sub>média</sub> (°C)	Vel. Vento (m/s)
Set/08	47,6	120,8	-73,2	101,5	78,0	25,9	2,2
Out/08	53,6	147,9	-94,3	101,4	74,9	26,5	2,8
Nov/08	16,0	142,4	-126,4	101,2	69,3	27,1	2,7
Dez/08	18,3	142,7	-124,4	101,1	68,9	27,5	2,8
Jan/09	85,2	148,5	-63,3	101,2	70,0	28,6	2,8
Fev/09	376,1	104,0	272,1	101,0	78,8	26,9	1,6
Mar/09	143,0	150,2	-7,2	101,0	73,4	28,6	1,9
Abr/09	343,6	155,2	191,4	101,1	81,9	27,5	1,1
Mai/09	409,4	147,5	261,9	101,1	83,1	26,7	1,1
Jun/09	333,0	114,6	218,2	101,4	84,1	26,0	1,7
Jul/09	387,8	110,9	276,9	101,4	82,5	25,6	1,7
Ago/09	288,4	115,6	172,8	101,5	78,4	25,8	2,1
Set/09	83,3	120,8	-37,5	101,5	76,0	26,6	2,2
Out/09	16,3	141,5	-125,2	101,2	68,3	27,7	2,3
Nov/09	49,9	143,9	-94,0	101,2	68,2	28,0	2,7
Dez/09	47,8	141,5	-93,7	101,2	70,6	28,6	2,4
Jan/10	193,4	128,0	65,4	101,2	78,3	27,7	1,7
Fev/10	45,2	132,1	-86,9	101,1	74,9	28,6	2,2
Mar/10	92,7	161,9	-69,2	101,1	72,7	29,3	1,8
Abr/10	273,3	149,6	123,7	101,1	80,5	28,2	1,7
Mai/10	114,2	150,3	-36,1	101,2	80,9	27,4	1,5
Jun/10	543,9	133,4	410,5	101,2	80,9	27,4	1,5
Jul/10	267,6	112,7	154,9	101,5	82,0	25,4	1,8
Ago/10	191,6	108,6	83,0	101,6	81,1	24,8	2,0
Set/10	72,7	101,4	-28,7	101,6	74,1	26,0	2,5
Out/10	37,4	140,2	-102,8	101,3	70,6	27,1	2,4
Nov/10	23,9	138,6	-114,7	101,1	66,8	28,1	2,5
Dez/10	84,9	146,5	-61,6	101,0	69,0	28,3	2,3

*P = Precipitação; Etp = Evapotranspiração Potencial ( determinada através do método de Thornthwaite modificado por Camargo et al., 1999); Patm = Pressão Atmosférica; U = umidade relativa do ar; T<sub>méd</sub>= temperatura média.*

#### 4.2.1 Precipitação e Evapotranspiração Potencial

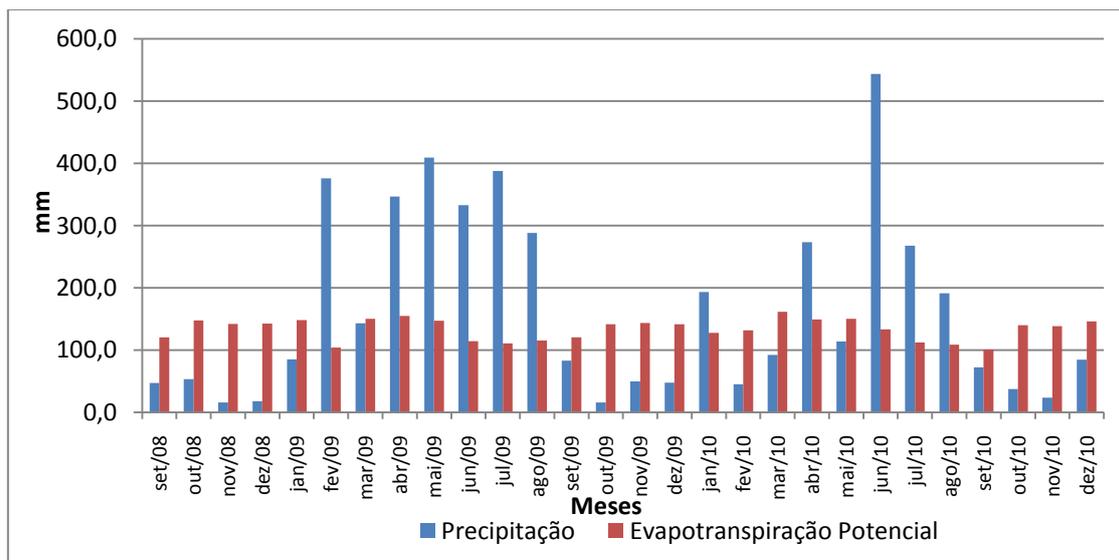
A Figura 71 mostra a precipitação verificada no período de monitoramento e a média mensal observada na série histórica de 1961 a 2010.



**Figura 71: Precipitação mensal e média mensal da série histórica (1961-2010)**

Verifica-se que houve no período da pesquisa, precipitações muito acima da média histórica nos meses de fevereiro de 2009 e janeiro e junho de 2010, e muito abaixo da média nos meses de fevereiro, março e maio de 2010.

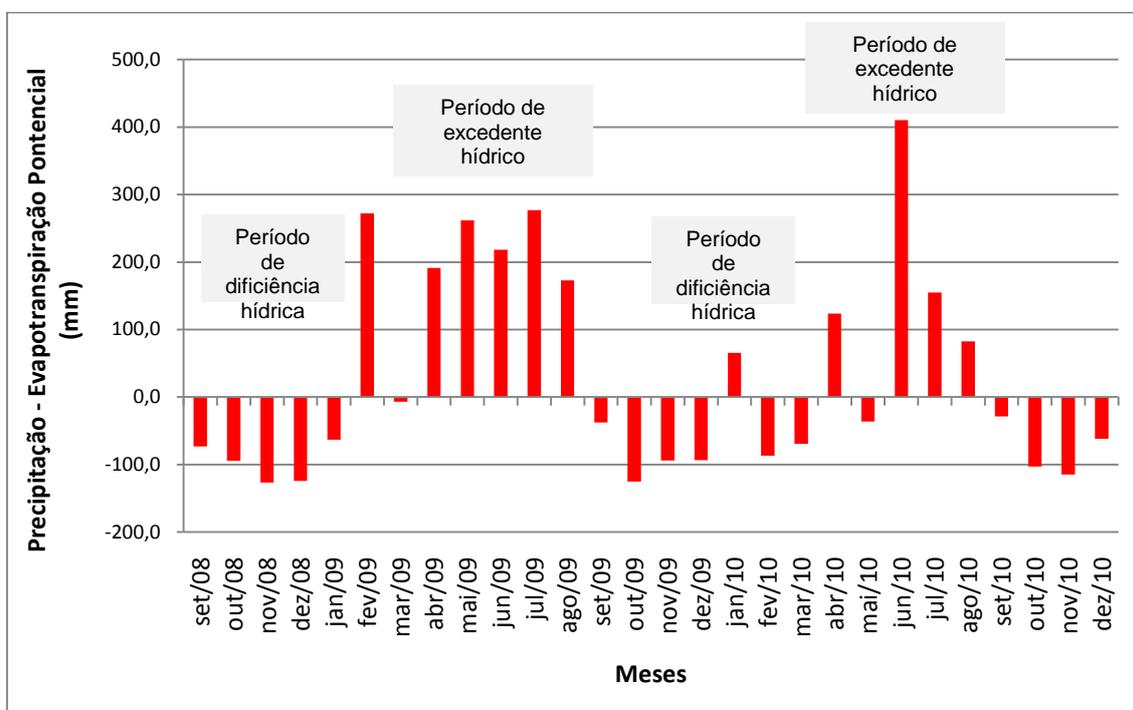
A Figura 72 mostra a distribuição da precipitação mensal e a evapotranspiração potencial estimada pelo Método de Thornthwaite modificado por Camargo *et al.* (1999) no período de setembro/2008 a dezembro/2010.



**Figura 72: Precipitação e Evapotranspiração Potencial**

No período da pesquisa a precipitação mensal variou de 16,3 mm na estação de seca a 543,9 mm na estação chuvosa, com uma precipitação máxima diária de 149,7 mm, ocorrida em 18 de junho de 2010.

No ano de 2009 a precipitação mensal acumulada foi 2.566,6 mm e a evapotranspiração potencial estimada foi de 1.594,3 mm, com excedente hídrico de 972,3 mm. Para o ano de 2010 a precipitação mensal acumulada foi de 1.940,8mm e a evapotranspiração potencial estimada foi de 1.603,3 mm, com excedente hídrico de 337,5mm, bem inferior ao verificado no ano anterior. A Figura 73 mostra a diferença entre a precipitação e evapotranspiração entre setembro/2008 a dezembro/2010.

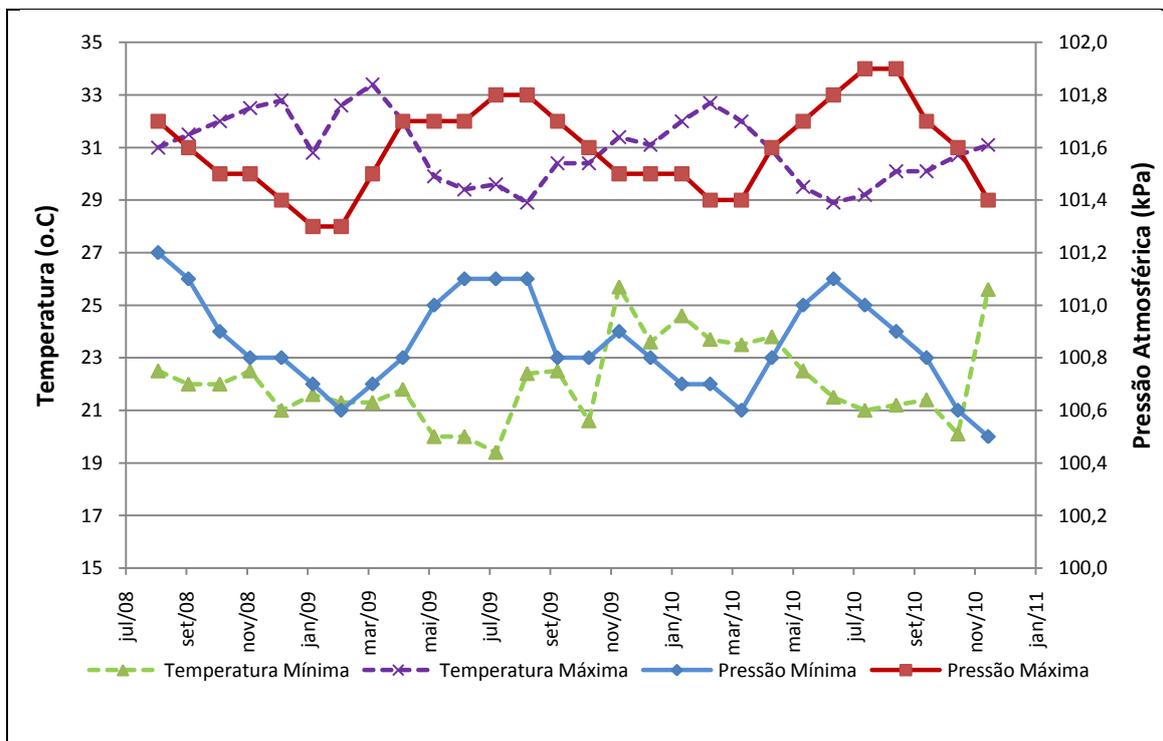


**Figura 73: Balanço Hídrico no período monitorado**

Em 28 meses de monitoramento, 17 meses apresentam deficiência hídrica (comum na região, para os meses de setembro a janeiro), porém, como os índices de precipitação nos meses chuvosos (maio a julho) foram bem superiores à evapotranspiração potencial, o balanço hídrico resultou em um excedente hídrico no período monitorado.

#### 4.2.2 Temperatura e Pressão Atmosférica

As variações de temperatura e pressão no período de monitoramento das camadas de cobertura são mostradas na Figura 74.



**Figura 74: Variações de pressão e temperatura entre setembro/08 a dezembro/10**

Verifica-se que no período de monitoramento das camadas de cobertura, a temperatura mensal mínima variou entre 19,4<sup>o</sup>.C e 25,7<sup>o</sup>.C e a temperatura mensal máxima variou entre 28,9<sup>o</sup>.C a 33,4<sup>o</sup>.C. A pressão mínima mensal variou de 100,5 kPa a 101,2 kPa e a máxima variou de 101,3 kPa a 101,9 kPa. As variações nas condições atmosféricas tais como temperatura e pressão são fatores que influenciam nos processos de emissões de biogás em aterros, como mostrado por Christophensen e Kjeldsen (2001), Stern *et al.* (2007), Franzidis *et al.* (2008), dentre outros.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA COBERTURA

#### 4.3.1 Características geotécnicas

O composto utilizado na mistura com o solo tem densidade natural de 0,59 ton/m<sup>3</sup> e uma umidade natural média de 53,4%. A Figura 75 mostra as curvas granulométricas dos materiais *in situ*, do solo usado na área dos infiltrômetros e a granulometria do composto, e a Tabela 15 apresenta os resultados da caracterização dos materiais e do composto.

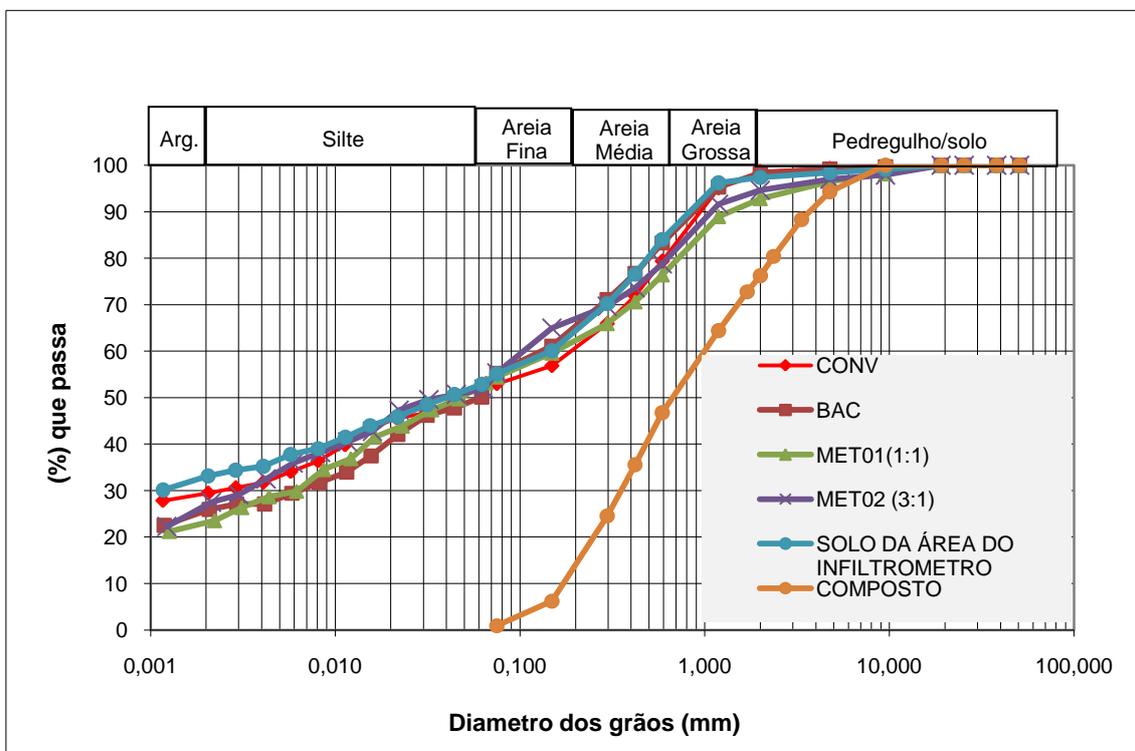


Figura 75: Curva granulométrica das camadas de cobertura da célula experimental, do solo usado no infiltrômetro e do composto

**Tabela 15: Caracterização dos materiais utilizados em cada tipo de camada de cobertura**

Análise		CONV	BAC	MET01	MET02	INFIL	COMP	
Ensaio de Laboratório	Granulometria	%argila	29	25	23	27	33	0
		%silte	23	24	29	25	19	1
		%areia fina	8	15	10	15	11	12
		%areia média	20	19	15	12	21	32
		%areia grossa	19	15	16	16	13	31
		%pedregulho	1	2	7	5	3	24
		<0,0075mm (%)	53	55	54	55	55	1
	Limites de consistência	LL (%)	42	43	52	50	48	-
		LP (%)	29	31	39	33	25	-
		IP (%)	13	13	12	17	23	-
	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,1	16,6	13,0	14,6	16,2	-	
	$W_{\text{óti}}$ (%)	19,9	19,0	22,9	18,4	19,8	-	
	Massa específica dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,2	26,3	24,5	25,3	26,2	-	
	$K_{\text{sat}}$ (m/s)	$1,5 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	-	
	Kar (m/s)	$4,0 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-7}$	-	-	
	$W_{\text{cc}}$ (%)	22,2	20,4	28,7	24,0	19,8	-	
<b>Classificação Sistema Unificado</b>		<b>ML</b>		<b>MH</b>		<b>CL</b>	-	
Ensaio de campo	$\gamma_{d\text{méd}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,1	14,9	12,3	13,5	-	5,9	
	Porosidade média (n)	0,43	0,43	0,52	0,49	-	-	
	Grau de Compactação <i>in situ</i> (%)	93,6	90,6	95,4	93,4	-	-	

CONV= camada convencional; BAC = barreira capilar; MET01 = camada superficial da metanotrófica 01; MET02 = camada superficial da metanotrófica 02; INFIL= área dos infiltrômetros; COMP = composto seco em estufa;  $W_{\text{cc}}$ =Umidade de capacidade de campo; Grau de compactação em relação ao solo compactado; ML = silte de baixa plasticidade; MH = Silte de alta plasticidade; CL = argila de baixa plasticidade.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e com os parâmetros apresentados na Tabela 15 os materiais utilizados na camada de cobertura convencional e na barreira capilar apresentaram características de solos siltosos com baixa compressibilidade (ML), com massa específica seca máxima variando de 16,1 kN/m<sup>3</sup> a 16,6 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 19,0% a 19,9%, com índices

de atividade de argila de normal a inativa. Esse resultado está compatível com a caracterização da jazida usada para execução da camada de cobertura da célula experimental apresentada por Maciel (2009).

Para os solos das camadas MET01 e MET02, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e com os dados mostrados na Tabela 15, os materiais apresentaram características de solos siltsos com alta compressibilidade (MH), com massa específica seca máxima de 13,0 kN/m<sup>3</sup> a 14,6 kN/m<sup>3</sup> respectivamente e umidade ótima de 22,9% a 18,4%. Observa-se que a adição de composto ao solo nas duas proporções conferiu ao material, uma diminuição na massa específica dos grãos e no peso específico aparente seco máximo. Por outro lado aumentou a porosidade total, a permeabilidade saturada e a capacidade de campo e a plasticidade do material.

O solo utilizado para preenchimento dos infiltrômetros se caracterizou por uma granulometria bem aproximada do solo da camada convencional, porém com maior percentual de argila. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e com os parâmetros apresentados na Tabela 15 o solo foi classificado como argila de baixa plasticidade (CL).

Nas áreas onde foram instalados os infiltrômetros foi realizado um controle de compactação para se estabelecer comparações com a camada de cobertura existente, tendo em vista que os mesmos foram instalados um ano após a execução da camada de cobertura. Para a camada MET01 o grau de compactação atingido foi de 96,8% na região da mistura de solo e composto (0,30 m superficiais), sendo esse grau de compactação similar a compactação média de campo encontrada nessa camada, no período de setembro de 2008 a março de 2010 que foi de 95,4%.

Na área do infiltrômetro da barreira capilar o grau de compactação atingido durante a execução foi de 91,0% e nos ensaios de campo dessa camada a média do grau de compactação foi de 90,6%. Na área do infiltrômetro da camada convencional o grau de compactação atingido foi de 92,0% e nos ensaios de campo a média foi de 93,6%. Dessa forma a compactação do solo na área dos infiltrômetros instalados possui similaridade com a compactação verificada *in situ*, sendo, portanto representativo das camadas de cobertura existente.

Os materiais apresentaram índice de plasticidade (IP) acima de 10% e quando compactados apresentaram permeabilidade saturada na faixa entre 10<sup>-8</sup> a 10<sup>-9</sup> m/s (exceto a MET01) sendo considerados adequados para utilização em camadas de

cobertura de aterros, de acordo com Qian *et al.* (2002), National Academy of Sciences (2007) e Daniel (1993) citado por Castilhos Junior (2003). No entanto, esses solos quando submetidos a variações grandes de temperatura, podem apresentar fissuras que são ocasionadas pela evaporação da água intersticial e conseqüentemente contração volumétrica, como mencionado por Alcântara (2007). É necessário, portanto, o monitoramento constante das variações de umidade do solo para que se evite a formação de caminhos preferenciais por essas fissuras, que podem causar emissão descontrolada de biogás para atmosfera em camadas de cobertura.

#### 4.3.2 Características físico-químicas

Os materiais utilizados nas camadas de cobertura (solo, composto e mistura de solo e composto) foram analisados quimicamente com resultados apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16: Análise físico-química do material da camada metanotrófica**

Parâmetro (unidade)	Área do infiltrômetro (2009)			Material <i>in situ</i> (2010)	
	Solo	Composto <i>in natura</i>	MET01	MET01	MET02
pH	5,2	8,16	7,61	7,6	5,8
Umidade (%)	-	67,05	31,40	10,6	3,8
M.O. (g/kg)	5,6	159,6	116,4	61,0	52,6
C (g/kg)	3,2	89,7	65,4	34,3	29,6
N (g/kg)	-	6,70	2,70	8,00	5,30
P (g/kg)	0,00	1,60	1,30	2,00	2,40
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	0,1	102,3	122,8	15,3	12,8
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	0,1	0,1	0,3	0,7	0,5
Ca <sup>++</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	0,7	12,0	2,2	4,5	2,4
Mg <sup>++</sup> (cmol <sub>c</sub> /kg)	0,1	1,6	1,6	1,5	0,7
Fe (g/kg)	0,18	0,30	0,64	0,36	0,38
Mn (g/kg)	0,01	0,10	0,08	0,01	0,01
Zn (mg/kg)	1,2	24,0	28,0	0,6	1,1
Cu (mg/kg)	1,4	32,0	28,0	0,4	0,6
CTC (cmol <sub>c</sub> /kg)	2,1	-	-	8,2	5,8
Relação C/N	-	13,4	24,2	4,3	5,5

Obs.: Unidades do Sistema Internacional e precisão decimal adotadas pelo Centro Nacional de Pesquisa de Solos/EMBRAPA (IBGE, 2007)

Observa-se que o composto *in natura* utilizado na mistura de solo apresentou uma relação carbono/nitrogênio (C/N) inferior a 18 e um pH básico acima de 7,5, o que demonstra um composto estabilizado, de acordo com Bidone e Povinelli (1999) e Tsutya *et al.* (2001) e que esse composto proporcionou à mistura ao solo aumento na quantidade de nutrientes.

Como pode ser visto na Tabela 16, após um ano, a mistura de solo e composto teve suas características químicas alteradas, provavelmente devido às trocas existentes entre os elementos químicos e as raízes das plantas que se estabeleceram na superfície das duas camadas (MET01 e MET02), assim como a possível lixiviação de matéria orgânica ao longo do perfil do solo. Essas alterações ao longo do tempo podem influenciar no desempenho com relação aos processos que levem em consideração essas características, tais como oxidação de CH<sub>4</sub>, tendo em vista que há uma relação entre teor de matéria orgânica e presença de nutrientes com a capacidade de oxidação dos materiais como mostrado por Boeckx *et al.* (1996), Huber-Humer *et al.* (2009), Scheutz *et al.* (2009) e Gebert *et al.* (2010).

#### **4.3.3 Curva de retenção de água**

As curvas obtidas para as amostras de solo utilizado na camada convencional, barreira capilar e para a camada metanotrófica com as respectivas proporções de mistura de solo e composto (MET01 e MET02), estão apresentadas na Figuras 76 e 77.

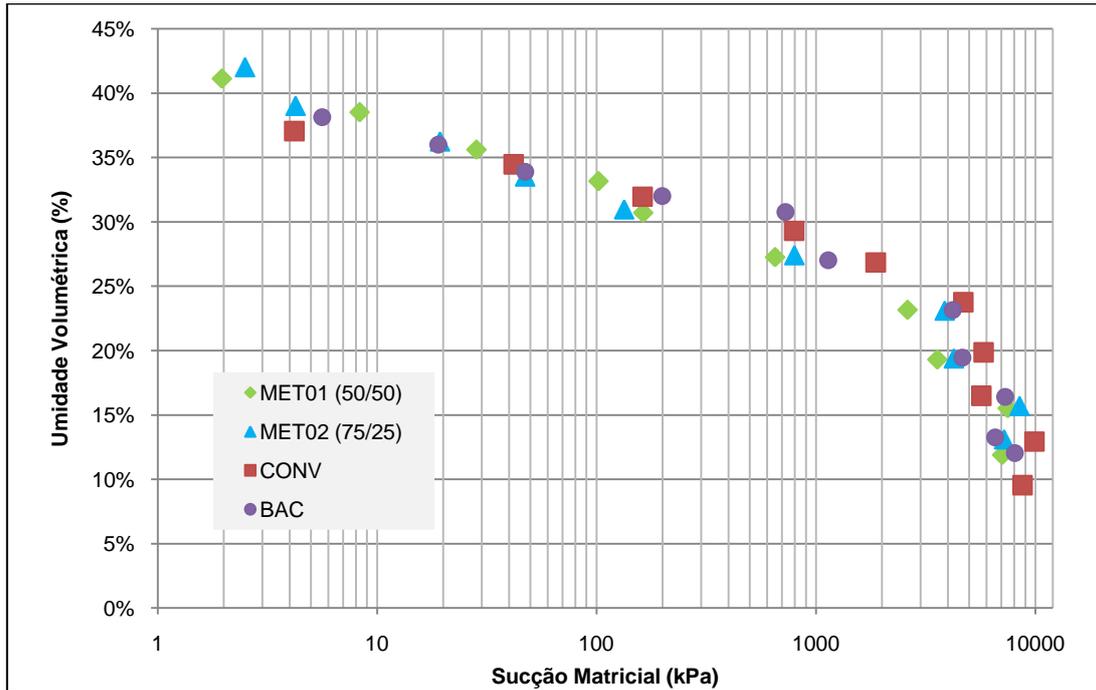


Figura 76: Curva de retenção de água (Umidade Volumétrica x Sucção Matricial)

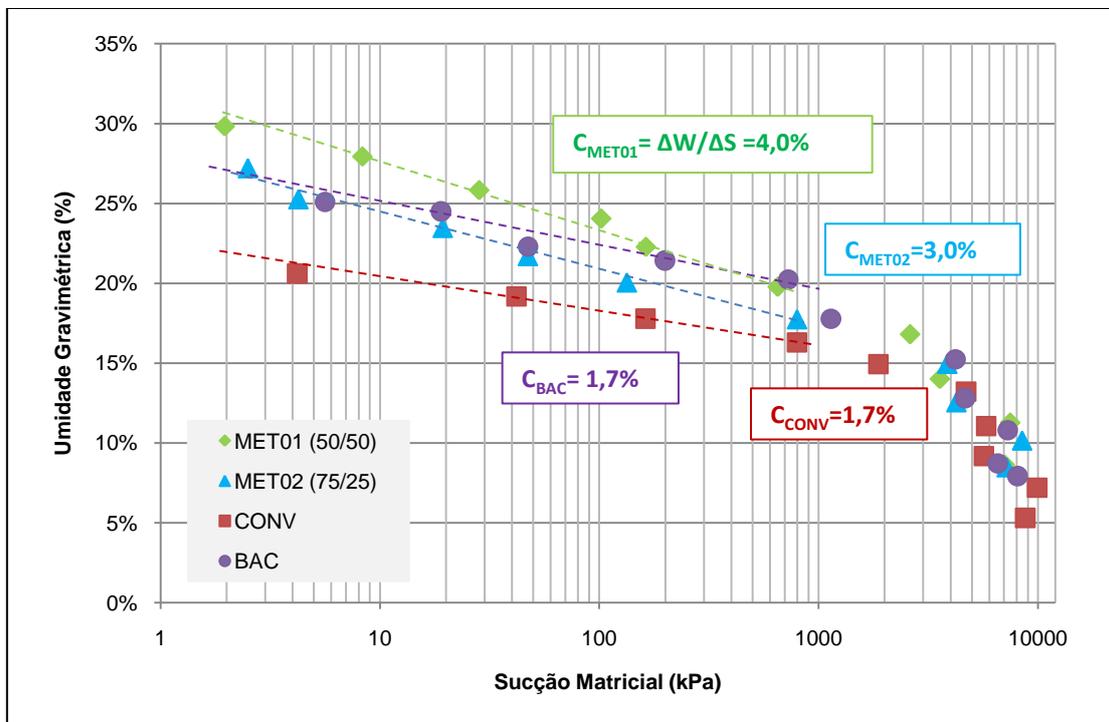


Figura 77: Curva de retenção de água (Umidade Gravimétrica x Sucção Matricial)

As curvas de retenção apresentaram um formato previsto para curva de retenção de solos finos. De acordo com a relação entre variação de umidade e sucção ( $C = \Delta w / \log \Delta S$ ), observa-se na Figura 77 que a MET01 apresenta maior capacidade diferencial de umidade do que a MET02, a BAC e a CONV respectivamente.

Para a faixa inicial da curva umidade gravimétrica *versus* sucção matricial que apresenta uma linearidade (sucção de até 1.000 kPa), mostrada na Figura 77, a camada convencional e barreira capilar apresentaram variação de umidade gravimétrica de aproximadamente 5% e 8% respectivamente. Já as camadas alternativas MET01 e MET02, apresentam nessa mesma faixa de variação de sucção, uma variação de umidade de gravimétrica foi aproximadamente 13% e 11% respectivamente. Ou seja, as camadas alternativas do tipo metanotrófica possuem uma característica de perda ou ganho de umidade mais rápido para a mesma faixa de variação de sucção, do que a camada convencional e barreira capilar.

De acordo com Jucá (1993) o valor de C depende das propriedades do solo (textura e limites de consistência), variações de umidade e efeitos da histerese nas amostras, sendo equivalente à capacidade de retenção de umidade. No caso das camadas MET01 e MET02 a adição de composto aumentou o limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), confirmando assim a relação entre a capacidade de retenção com esses limites, como demonstrado também por Jucá (1990). A Figura 78 mostra a relação entre que LL e LP das quatro amostras e a capacidade diferencial de umidade, respectivamente.

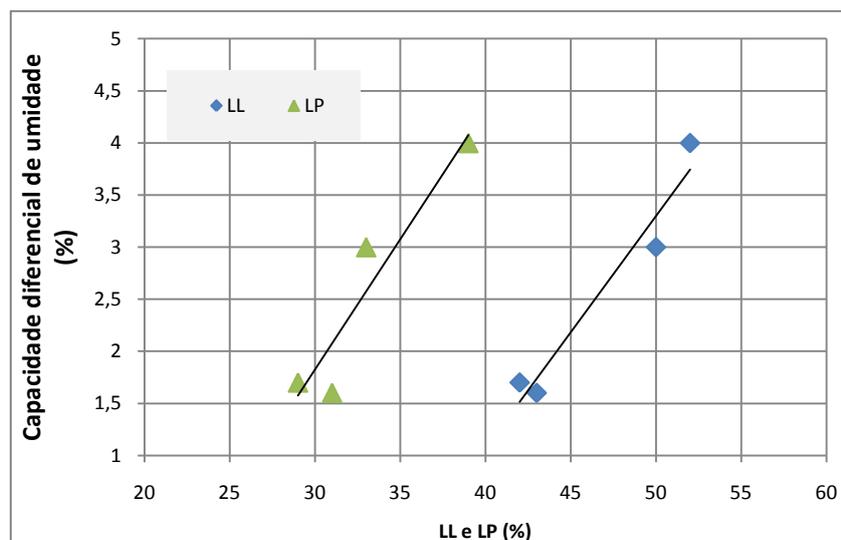
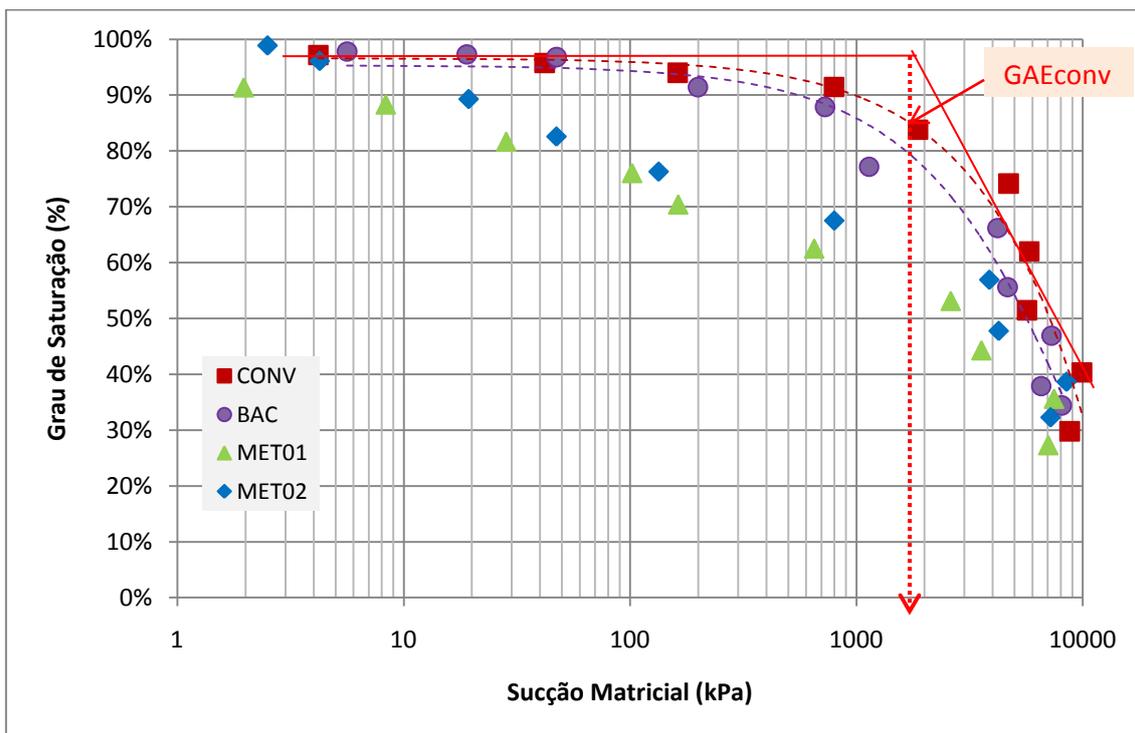


Figura 78: Relação de Capacidade diferencial de umidade com as características do solo

Como as camadas de cobertura foram executadas ao mesmo tempo, com o mesmo solo, a adição de composto alterou, portanto, as características das camadas metanotróficas, como mencionado por Emerson e McGarry (2003). Esses autores afirmam que a porosidade do solo aumenta com aplicação de matéria orgânica devido ao aumento das cargas negativas do solo, aumentando assim a capacidade de retenção de água, principalmente nos solos arenosos.

Esta característica é importante, principalmente devido às variações climatológicas que são impostas às camadas de cobertura de aterros em função de variações de saturação ao longo de períodos secos e chuvosos e que vão influenciar tanto nos processos de infiltração que impactam a geração de lixiviados quanto no de emissão de biogás.

A Figura 79 mostra a relação entre saturação e sucção matricial de cada material a fim de se avaliar o comportamento de cada material frente a variações de saturação.



**Figura 79: Variação do Grau de Saturação com a sucção matricial do solo**

De acordo com a Figura 79, estimou-se uma sucção de entrada de ar (ponto de mudança acentuada na curva de dessaturação do solo denominado de ponto de

entrada generalizada de ar – GAE) para o solo da camada convencional, na sucção de 1.800 kPa e grau de saturação de 87%. Para a barreira capilar, a sucção de entrada de ar foi estimada em aproximadamente 1.200 kPa e o grau de saturação de 85%. Esses resultados são bastante aproximados dos encontrados por Maciel (2003) para uma argila de alta plasticidade (CH) usada na cobertura n°. 8 do aterro controlado da Muribeca, onde o GAE obtido através da curva de retenção de água foi de 87% e 84% respectivamente para amostras moldadas na umidade ótima.

Os materiais das camadas MET01 e MET02 possuem estruturas distintas do solo da camada convencional e da barreira capilar, devido à adição do composto. A curva de saturação (Figura 79) apresenta uma variação rápida desde o início do processo de secagem devido à presença de poros de tamanhos variados. Esse formato dificulta a determinação do ponto exato de entrada de ar, revelando um material onde o fluxo de ar por processos físicos se verifica continuamente desde o início da diminuição da saturação.

As curvas de retenção de cada material foram ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980), com a finalidade de se obter os parâmetros de ajuste cada material, e assim se estimar a permeabilidade ao ar e a água. Para determinação da saturação efetiva (Ver Tabela 8), adotou-se a saturação residual igual a menor saturação determinada em cada amostra.

No processo de modelagem utilizou-se o programa “STATISTICA®”, adotando-se um número de iterações máximo de 100, com critério de convergência  $10^{-6}$ . O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi acima de 0,91. Essas correlações mostram uma boa consistência dos resultados experimentais com a estimativa do modelo. Foi testado o modelo de Brooks e Corey (1964) que não apresentou ajuste satisfatório e o modelo de Fredlund *et al.* (1994), que teve comportamento semelhante ao modelo de van Genuchten (1980), confirmando a aplicabilidade desses dois modelos para solos brasileiros, conforme menciona Gerscovich e Sayão (2002). As curvas ajustadas são mostradas na Figura 80 e a Tabela 17 mostra os parâmetros de ajuste obtidos para cada tipo de material.

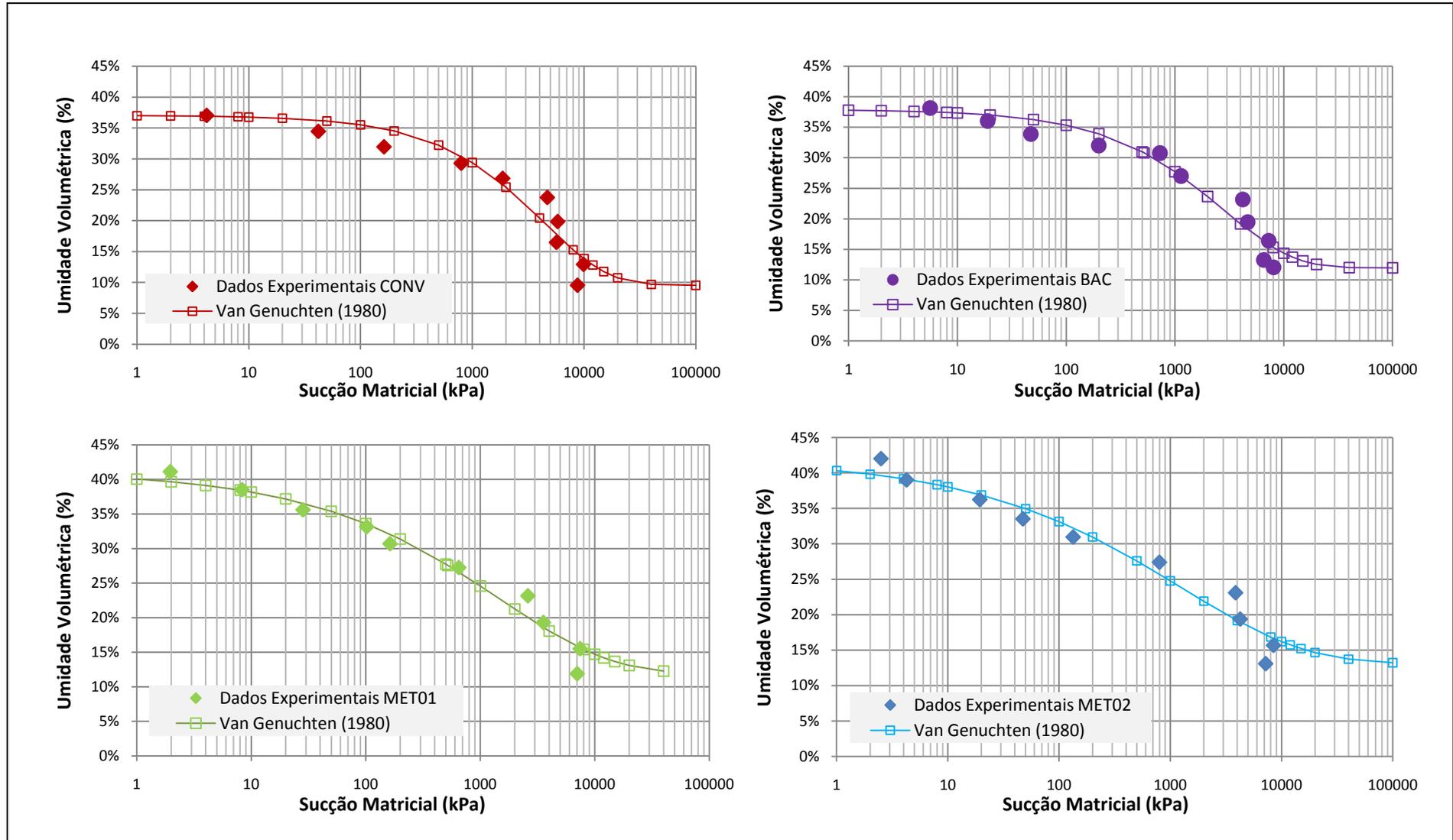


Figura 80: Curvas de retenção de água ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980)

**Tabela 17: Parâmetros de ajustes gerados através do modelo de van Genuchten (1980) para as curvas de retenção de água**

Camada	Parâmetro	Valor gerado	R <sup>2</sup>
CONV	a	$-0,97 \times 10^{-7}$	0,91
	n	0,756421	
	m	353,375	
BAC	a	$-0,67 \times 10^{-7}$	0,94
	n	0,679859	
	m	343,132	
MET01	a	$-0,26 \times 10^{-9}$	0,96
	n	0,448433	
	m	749,588	
MET01	a	$-0,50 \times 10^{-8}$	0,95
	n	0,393596	
	m	111,094	

#### 4.3.4 Permeabilidade

##### 4.3.4.1 Permeabilidade à água

Os resultados da permeabilidade saturada das amostras coletadas em campo foram mostrados na Tabela 15. Embora não tenha havido controle de compactação durante a execução, a amostra da camada convencional (CONV) apresentou permeabilidade à água ( $1,5 \times 10^{-9}$  m/s) inferior à da barreira capilar (BAC) ( $4,4 \times 10^{-8}$  m/s), sugerindo uma melhor compactação na camada convencional, como foi constatado nos ensaios de campo. A compactação *in situ* da CONV foi de 93,6% enquanto a BAC apresentou compactação *in situ* de 90,6%. A menor compactação na BAC pode ser atribuída à presença de pedras na base, dificultando o controle na execução. Dessa forma a permeabilidade à água da BAC foi 30 vezes superior que a da CONV, embora elas tenham sido executadas com solo oriundo do mesmo local, com características granulométricas e limites de consistência muito semelhantes.

A quantidade de composto adicionado ao solo modificou as características de permeabilidade pelo fato de alterar a estrutura do solo. A MET01 apresentou permeabilidade à água de  $2,8 \times 10^{-6}$  m/s, sendo 30 vezes superior a MET02 que teve permeabilidade de  $9,2 \times 10^{-8}$  m/s, e 63 vezes superior a BAC. Com relação à camada convencional de solo compactado, a MET01 apresentou permeabilidade a água superior em 1000 vezes.

A permeabilidade não saturada foi estimada a partir do modelo de van Genuchten (1980) utilizando os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água, de acordo com a Equação mostrada na Tabela 8, sendo determinada para cada material através das Equações 32 a 35.

$$K(Se)_{CONV} = 1,5 \times 10^{-9} \times Se^{0,5} \times \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{353,375}} \right)^{353,375} \right]^2 \quad \text{Eq. 32}$$

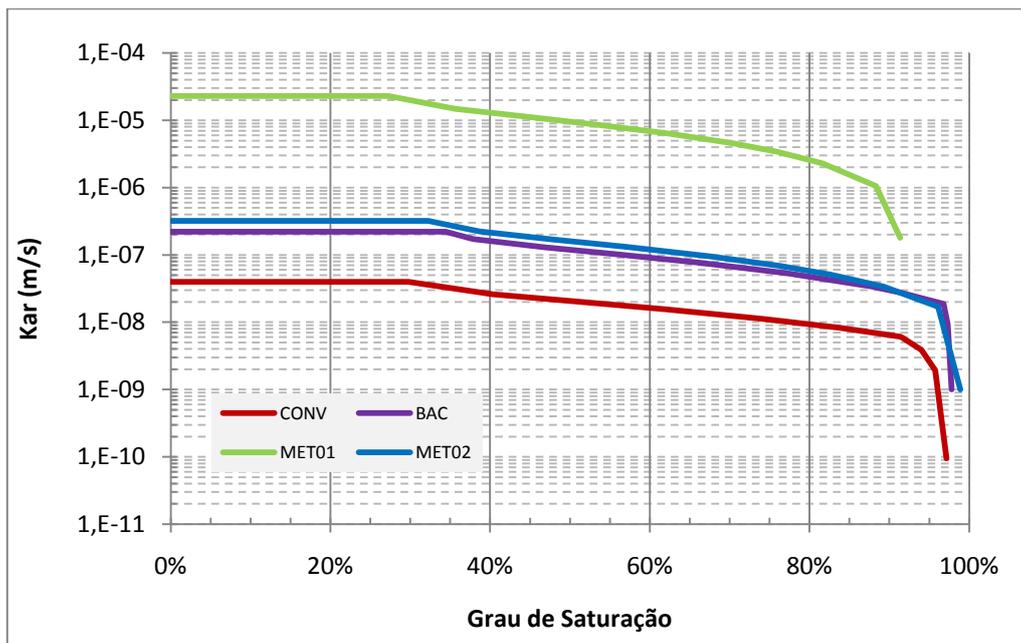
$$K(Se)_{BAC} = 4,4 \times 10^{-8} \times Se^{0,5} \times \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{343,132}} \right)^{343,132} \right]^2 \quad \text{Eq. 33}$$

$$K(Se)_{MET01} = 2,8 \times 10^{-6} \times Se^{0,5} \times \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{749,588}} \right)^{749,588} \right]^2 \quad \text{Eq. 34}$$

$$K(Se)_{MET02} = 9,2 \times 10^{-8} \times Se^{0,5} \times \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{111,094}} \right)^{111,094} \right]^2 \quad \text{Eq. 35}$$

#### 4.3.4.2 Permeabilidade ao ar

A curva de permeabilidade ao ar em função do grau de saturação, utilizando os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980) é mostrada na Figura 81, para os quatro materiais.



**Figura 81: Curva teórica de Permeabilidade ao ar x grau de saturação**

De uma maneira geral o modelo mostrou um comportamento padrão de diminuição de permeabilidade ao ar em função do aumento do grau de saturação para todos os materiais. A camada convencional e barreira capilar apresentam um comportamento de queda brusca de permeabilidade ao ar, para saturação acima de 90%. Para grau de saturação abaixo desse valor o solo permite passagem de ar de forma contínua. Na curva da Figura 80 o ponto de entrada de ar foi estimado em 85% para a CONV e 87% para a BAC. Conclui-se, portanto que, de acordo com as características apresentadas pelos dois materiais (solo tipo ML), o grau de saturação a partir do qual o ar tende a se tornar ocluso, impedindo o fluxo, deve estar compreendido entre 85% e 90%, o que corresponde para esses dois materiais a um conteúdo volumétrico de ar de aproximadamente 5%.

Fredlund e Rahardjo (1993) mencionam que a fase ar se torna contínua para graus de saturação abaixo de 85%, com o fluxo iniciando a partir desse ponto, e que para graus de saturação acima de 90% a fase ar torna-se oclusa e o fluxo de ar acontece apenas por processos de difusão. Mariano (2008) verificou decréscimo rápido de permeabilidade ao ar para graus de saturação acima de 75% em dois solos do tipo SC e CL. Outros autores também verificaram comportamento semelhante com diminuição rápida na passagem de ar a partir de saturação de 85% para em um solo argiloso e de 80% em para um solo argilo-arenoso do aterro da Muribeca (LOUSIEU *et al.* 2002; MACIEL e JUCÁ 2000).

Os materiais com mistura de solo e composto também apresentaram um comportamento de decréscimo de permeabilidade ao ar com aumento da saturação, no entanto para a MET01 há uma tendência de decréscimo mais rápido do que a MET02 na faixa entre 30% a 90% de saturação, sendo o conteúdo volumétrico de ar para o grau de saturação de 90% de aproximadamente 30% para MET01. Para a mistura MET02, o comportamento é similar aos materiais com solos sem adição de composto.

A Tabela 18 apresenta resumidamente o grau de saturação correspondente ao GAE obtidos através da curva de sucção do solo (Figura 79) e na curva de permeabilidade gerada a partir do ajuste do modelo de van Genuchten (1980). Os materiais com composto apresentaram dificuldade de visualização do GAE nas duas curvas analisadas.

**Tabela 18: Ponto de entrada generalizada de ar estimado nos ensaio de sucção e de permeabilidade**

Material/camada	GAE	
	Curva de retenção	Curva de permeabilidade*
CONV	85%	90%
BAC	87%	92%
MET01	-	90%
MET02	-	95%

\* curva ajustada com parâmetros do modelo de van Genuchten

A obtenção das curvas de permeabilidade a partir dos parâmetros obtidos no modelo van Genuchten (1980) é relativamente simples. Nesse caso específico o objetivo foi fazer a previsão do comportamento da curva de permeabilidade ao ar com vistas a avaliar os ensaios de fluxo de biogás. A aplicabilidade de modelos empíricos para estimativas de permeabilidade devem ser avaliadas a partir da modelagem dos dados de campo para validar as estimativas teóricas. É necessário, portanto, a continuidade dos estudos avaliando-se outros modelos, e um maior número de amostras, principalmente nos materiais com adição de composto que apresentam características físicas e químicas diferenciadas dos materiais sem adição de composto.

### 4.3.5 Umidade de Capacidade de campo

A umidade de capacidade de campo determinada a partir da curva de retenção de água para sucção matricial de 10 kPa, como citado em Maia *et al.* (2005) (Figura 77) e em laboratório, conforme metodologia utilizada em Lins (2003), são mostradas na Tabela 19.

**Tabela 19: umidade de capacidade de campo**

<b>Material</b>	<b>Maia <i>et al.</i> (2005)</b>	<b>Lins (2003)</b>
CONV	21%	22,2%
BAC	25%	20,4%
MET01	28%	28,7%
MET02	24%	24,0%

Observou-se que os valores de umidade de capacidade de campo foram bastante aproximados para as duas metodologias, com exceção da amostra da barreira capilar. Isso pode ser decorrente da utilização de duas amostras coletadas em locais diferentes nessa camada, para a execução dos ensaios, o que resultou nessa maior diferença.

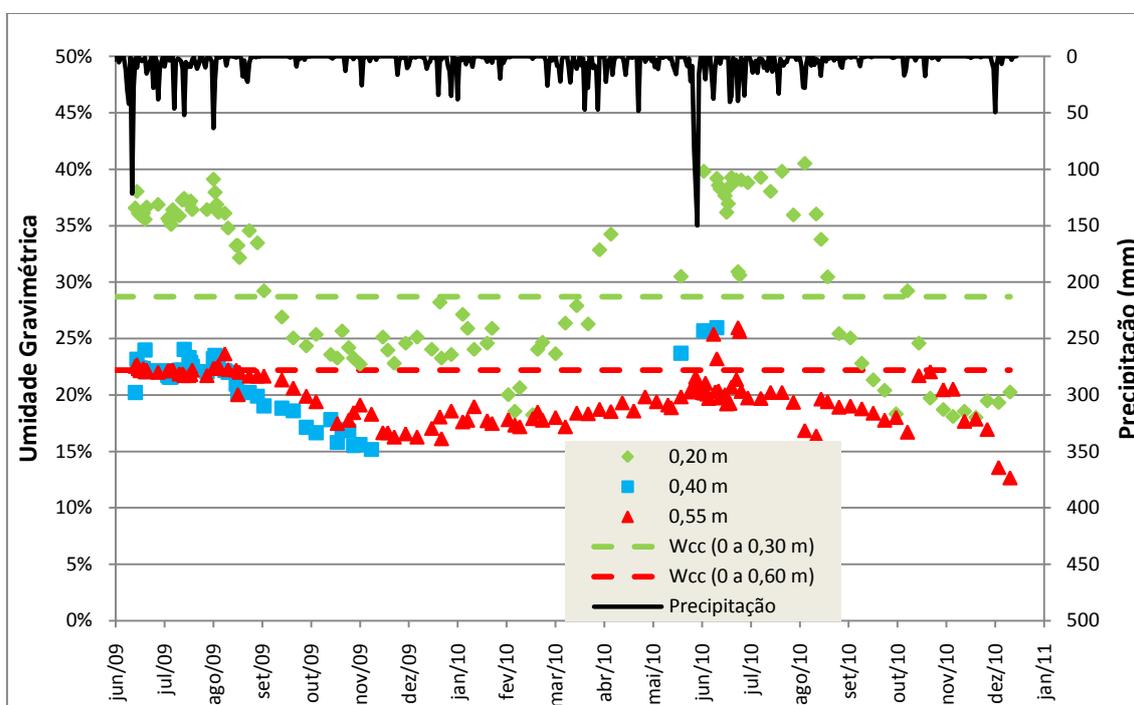
A determinação de umidade de capacidade de campo baseada na saturação da amostra e posterior drenagem, com determinação imediata da umidade da parte central da amostra, apresentou um resultado compatível quando comparado com a metodologia utilizada na área de agronomia, para a tensão de 10 kPa. Este comportamento é de grande importância tendo em vista que nem sempre é possível se fazer a curva de retenção de água, além de que, dependendo da metodologia a ser utilizada, a determinação é demorada, demanda equipamentos de precisão e procedimento criterioso. Assim sendo a metodologia utilizada como alternativa é bastante simples e pode determinar com precisão a umidade de capacidade de campo, com a utilização de equipamentos existentes em laboratórios de solos, necessitando-se, portanto normatizar essa metodologia para área da engenharia civil.

## 4.4 INFILTRAÇÃO NA CAMADA DE COBERTURA

### 4.4.1 Camada Metanotrófica (MET01)

#### 4.4.1.1 Umidade em profundidade

Figura 82 mostra a umidade medida nas três profundidades a partir da superfície da cobertura, para o perfil MET01 no período estudado, onde  $w_{cc}$  representa a umidade de capacidade de campo, em conjunto com a precipitação do período.



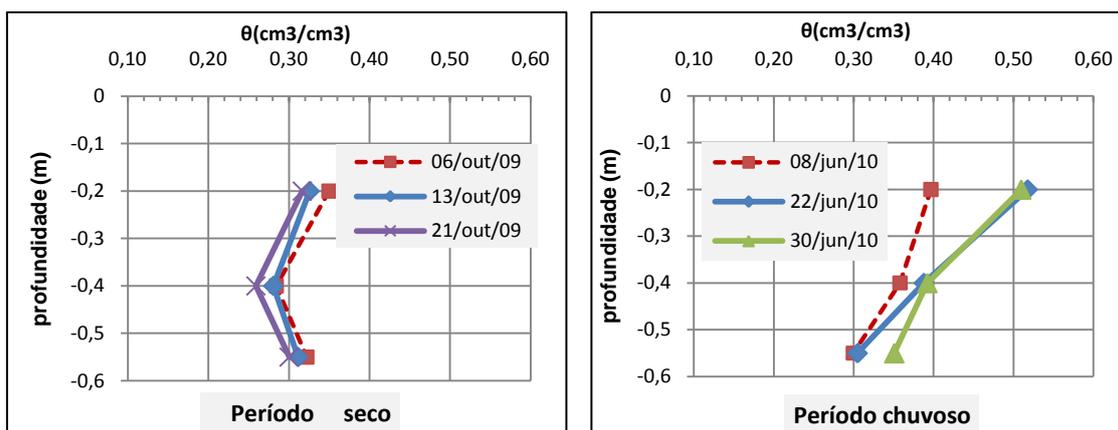
**Figura 82: Variação do teor de umidade no perfil MET01**

O sensor de umidade na profundidade de 0,40 m apresentou problemas nos primeiros quatro meses de uso e a partir desse período foram feitas apenas algumas medições pontuais através de coletas de amostras de solo com determinação de umidade em laboratório.

Na Figura 82 observa-se que as maiores variações de umidade se deram na camada superficial (solo com mistura de composto), da ordem de 18,0% a 40,5% com maiores umidades nos períodos chuvosos (março a agosto), assim como uma perda rápida de umidade por evapotranspiração potencial em períodos mais secos

(setembro a fevereiro). A camada superficial sofre grande influência dos condicionantes climatológicos com grande variação de umidade, devido à característica demonstrada na curva de retenção de água de ganho ou perda de água mais rápido, enquanto que a camada de solo compactado apresenta uma tendência de menor variação de umidade.

A Figura 83 mostra as variações de umidade volumétrica do mês de menor precipitação no período monitorado (outubro/09) e de maior precipitação (junho/10). O mês de outubro de 2009 as chuvas foram de pequena duração e magnitude, espaçadas, com maior precipitação diária de 9 mm e um acumulado de 16,3 mm. Em junho de 2010 as chuvas foram intensas, de grande duração e magnitude, com máxima diária de 149,7 mm, sendo o acumulado até dia 08 de junho de 39,1 mm, até 22 de junho de 456,7mm e até o final do mês foi de 543,9 até, salientando-se que entre 16 e 18 de junho ocorreu um elevado índice pluviométrico de 348,5 mm.

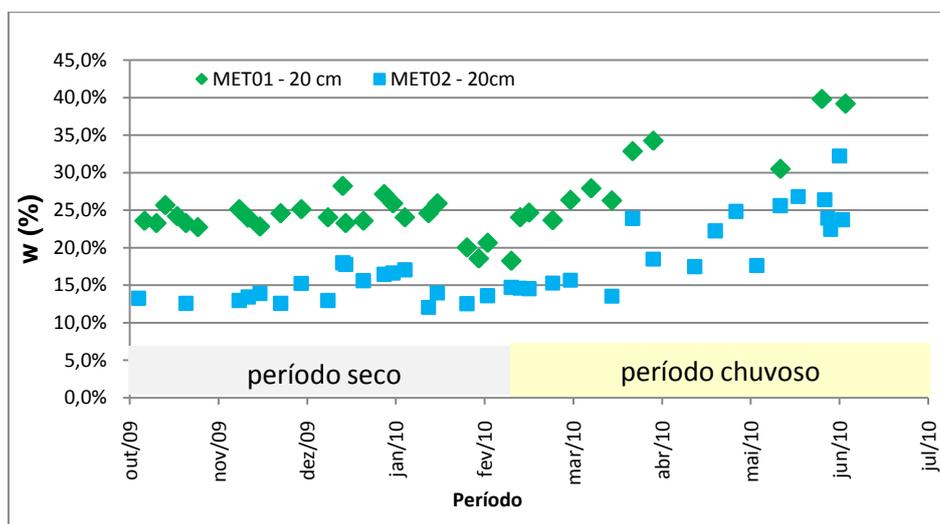


**Figura 83: Umidade volumétrica em profundidade em período seco e chuvoso no perfil MET01**

No período de menores precipitações observa-se um comportamento de diminuição de umidade ao longo do tempo, tendo em vista que a quantidade de água precipitada não é suficiente para aumentar a umidade do solo, devido a evaporação, com tendência a uma uniformidade no perfil devido a baixa disponibilidade hídrica para o fenômeno de evapotranspiração potencial estimado no período seco. Esse comportamento também foi observado por Engler e Lier (2004) em perfis de solo no campo.

Para o período de maior precipitação observa-se um comportamento similar de aumento de umidade em função da precipitação ao longo do tempo nas duas camadas, porém, na camada de solo compactado (camada entre 0,3 e 0,6 m) a variação de umidade é mais lenta, em função da permeabilidade ser bem inferior ( $1,5 \times 10^{-9}$  m/s) do que a da camada com composto ( $2,8 \times 10^{-6}$  m/s). Dessa forma, mesmo com as altas precipitações ocorridas até 22 de junho de 2010, a umidade na profundidade de 0,55 m permaneceu constante e somente após esse período houve mudança de umidade do solo, aumentando sua permeabilidade e consequentemente o fluxo de água. Esse resultado está de acordo com a característica apresentada na curva de retenção dos materiais, onde, para a mesma faixa de sucção (0 a 1.000 kPa), a MET01 apresenta um ganho de umidade mais rápido do que a camada de solo compactado (CONV).

A fim de avaliar a influência do percentual de composto adicionado ao solo na retenção de umidade e nos processos de fluxo de biogás, foi instalado um sensor de umidade no perfil MET02, no período de novembro de 2009 a junho de 2010. A Figura 84 mostra o comportamento da umidade na profundidade de 0,20 m na camada MET01 e MET02, no período de outubro de 2009 a junho de 2010, compreendendo parte de um período seco e de um período chuvoso.



**Figura 84: Teor de umidade a 0,20 m de profundidade nos perfis MET01 e MET02**

Verifica-se na Figura 84 que a camada com maior proporção de composto MET01, apresentou sempre umidade superior à da MET02, indicando que a maior

quantidade de composto na MET01 promoveu uma maior capacidade de armazenamento de umidade ao longo do período monitorado, tanto em períodos secos (outubro/09 a fevereiro/10) quanto em períodos chuvosos (março a junho/10).

Na camada MET01 se estabeleceu uma vegetação caracterizada por gramíneas logo após o início da execução, recobrando 100% o platô superior e taludes adjacentes, a partir de janeiro de 2009, com profundidade de raízes de aproximadamente 0,10 m a 0,15 m. Na MET02, a área coberta com essa vegetação foi de aproximadamente 85%, nos períodos chuvosos, e em períodos mais secos observaram-se áreas completamente sem vegetação, com presença de fissuras de grande magnitude, que se fechavam à medida que acontecia alguma precipitação. As Figuras 85 e 86 mostram as condições de vegetação nas camadas MET01 e MET02.



**Figura 85: Presença de vegetação na camada de cobertura MET01**



**Figura 86: Fissuras e presença de vegetação na camada de cobertura MET02**

A maior densidade de vegetação na MET01 do que na MET02 se deve a quantidade de composto adicionado ao solo. O composto enriqueceu o solo com nutrientes como pode ser visto nas características químicas que foram mostradas na Tabela 16, onde as concentrações de N, P e K são maiores nas camadas MET01 e MET02 do que no solo sem composto. As variações de umidade no perfil MET01 superiores às da MET02 são decorrentes tanto das diferenças nas das características físicas do solo (maior porosidade e maior capacidade de retenção de água na MET01 do que na MET02) quanto da maior densidade de vegetação. A vegetação tem capacidade de extrair água do solo através da transpiração das plantas nos períodos secos, e favorecer a manutenção de umidade em períodos mais chuvosos.

#### **4.4.1.2 Infiltração MET01**

A Tabela 20 apresenta os dados de precipitação e infiltração para o infiltrômetro da MET01, no período monitorado e a Figura 87 mostra a variação diária da infiltração e a precipitação.

Tabela 20: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da MET01

Mês	Precipitação (mm)	Infiltração	
		(mm)	(%)
Junho/2009	333,00	114,19	34,29%
Julho/2009	387,80	50,71	13,08%
Agosto/2009	288,40	48,84	16,94%
Setembro/2009	83,30	0,02	0,02%
Outubro/2009	16,30	0,29	1,75%
Novembro/2009	49,90	0,34	0,68%
Dezembro/2009	47,80	0,47	0,98%
Janeiro/2010	193,40	0,22	0,11%
Fevereiro/2010	45,20	0,21	0,46%
Março/2010	92,70	0,73	0,79%
Abril/2010	273,30	2,38	0,87%
Mai/2010	114,20	2,38	2,08%
Junho/2010	543,90	23,03	4,23%
Julho/2010	267,6	0,00	0,00%
Agosto/2010	191,20	0,00	0,00%
Setembro/2010	72,70	0,00	0,00%
Outubro/2010	37,4	0,31	0,84%
Novembro/2010	23,90	0,11	0,44%
Dezembro/2010	84,8	0,00	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>3.146,80</b>	<b>243,9</b>	<b>7,75%</b>

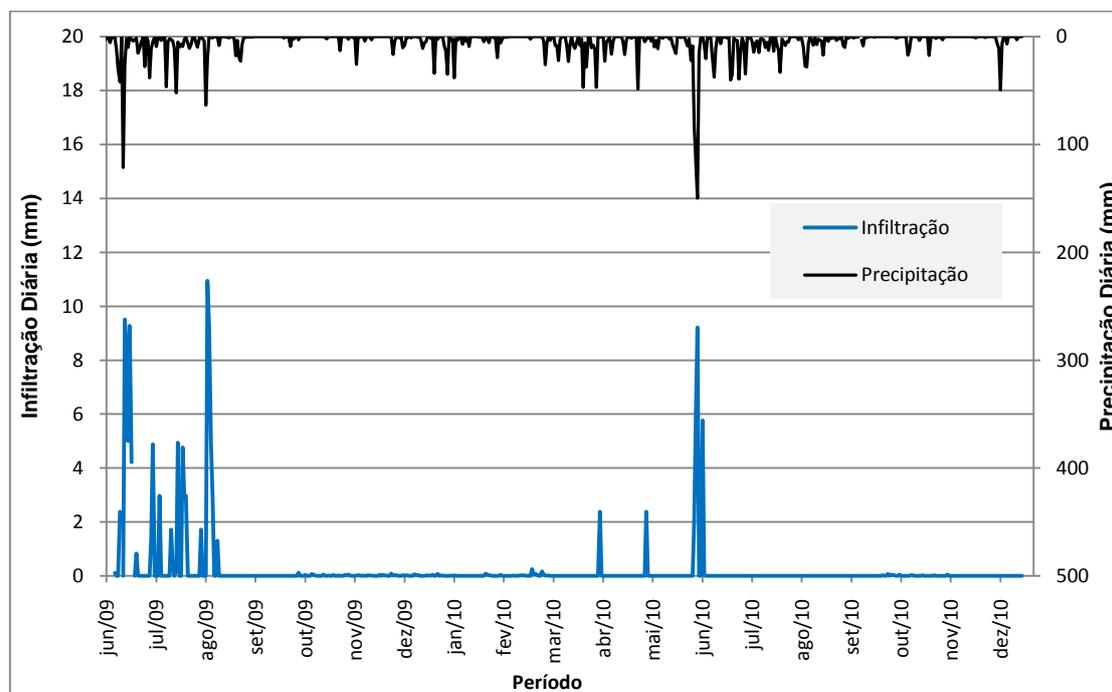


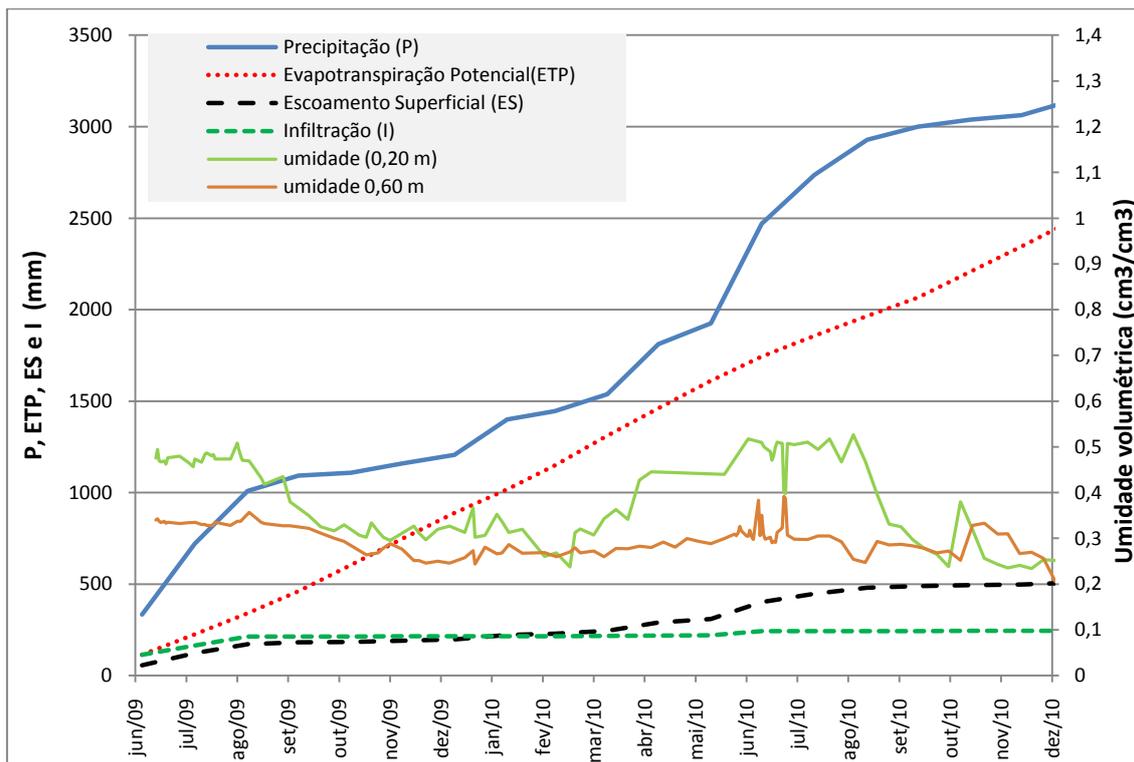
Figura 87: Precipitação e infiltração no infiltrômetro da camada metanotrófica MET01

No período monitorado a MET01 apresentou grau de saturação variando entre 45% a 100% para a profundidade de 0,20 m e de 44,5% a 91,2% na camada de solo compactado (0,3 a 0,6 m). De acordo com a Figura 87, verifica-se que a infiltração inicial através da MET01 se deu em função da incidência de chuvas de grande intensidade com mais de 100 mm/dia no período da instalação do infiltrômetro, resultado em umidades acima da capacidade de campo e conseqüentemente causando a infiltração. Com a diminuição das precipitações, a partir do mês de setembro de 2009 até março de 2010, a infiltração caiu consideravelmente, com medidas insignificantes nesse período.

Medições acima de 1 mm/mês só foram registradas no período chuvoso seguinte, iniciando-se a partir de abril de 2010. Essas infiltrações foram medidas para períodos onde a precipitação diária se situava acima de 50 mm e quando, tanto a umidade da camada superficial de solo e composto, quanto a de solo compactado, superavam as respectivas umidades de capacidade de campo.

Para o ano de 2010, onde já tinha se estabelecido um regime contínuo, entre a estação seca e a chuvosa, a infiltração medida foi de 29,4 mm, valor inferior ao recomendado pela USEPA de até 30 mm/ano para climas úmidos (com Precipitação/Evapotranspiração  $>0,50$ ). Na região litorânea onde se localiza a cobertura experimental essa relação foi de 1,7, entre os anos 2000 e 2008, segundo dados da estação climatológica do CURADO.

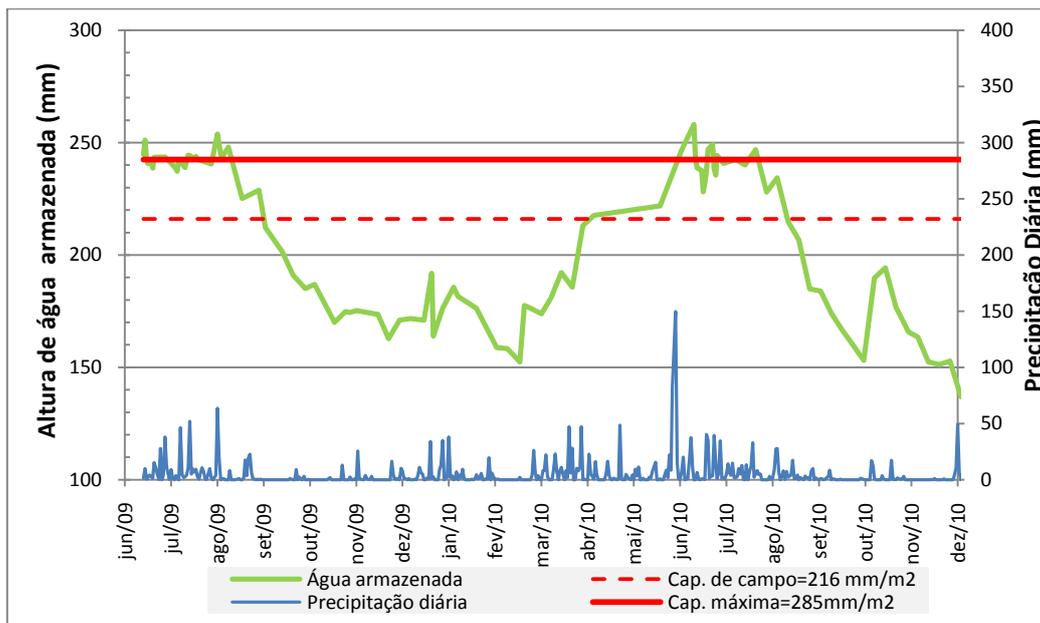
A Figura 88 mostra o balanço hídrico no perfil MET01 considerando a estimativa de evapotranspiração potencial da região, e adotando-se coeficiente de escoamento superficial para cada período do ano (seco ou chuvoso), sem considerar escoamento lateral, tendo em vista que a base da camada de cobertura é aproximadamente horizontal.



**Figura 88: Balanço hídrico da camada metanotrófica MET01 no período de junho de 2009 a dezembro de 2010**

No período seco registrado a partir de setembro de 2010 verificou-se uma diminuição substancial na umidade superficial, com valores inferiores aos medidos no período seco anterior (setembro de 2009 a fevereiro de 2010). No entanto, a camada de solo compactado não sofreu variações significativas, fazendo com que a MET01 apresentasse, portanto, baixas infiltrações, e se enquadrasse nas taxas recomendadas pela USEPA.

A Figura 89 mostra a altura de água armazenada na MET01 durante o período monitorado, considerando a altura máxima de 285 mm/m<sup>2</sup>, em função das características do material utilizado e da configuração geométrica da camada.



**Figura 89: Precipitação diária e variação de altura de água armazenada no perfil MET01**

Observa-se que a altura de água não excedeu a capacidade de armazenamento, mesmo em períodos de altos índices pluviométricos. Para precipitações acima de 50 mm a camada apresentou aumento de umidade, atingindo a sua capacidade de campo, a partir da qual se mediram infiltrações acima de 1mm/mês. Na região da MET01 se formaram depressões de maior magnitude do que na MET02, BAC e CONV, em virtude de recalques mais acentuados que foram observados visualmente, sendo comum se verificar acúmulo de água na vegetação.

Poucos estudos com camada metanotrófica estão relacionados com a avaliação de infiltração, sendo este tipo de camada mais estudada como alternativa para minimização de emissões de  $\text{CH}_4$ . Geralmente as camadas metanotróficas estão associadas com outro tipo de camada de cobertura para equacionar, tanto o problema de emissões de gases, quanto de infiltração de águas, por apresentar alta capacidade de armazenamento de água.

Os resultados obtidos na camada MET01 estão coerentes com os mencionados por Hupe *et. al.*, (2003) que investigaram a influência de camadas de composto misturado ao solo para redução de infiltração, com proporção de 30% e 20% em volume, e espessura de 0,30 m a 0,50 m. Os autores observaram uma excelente eficiência quanto à redução de infiltração, sendo essa camada com proporções de composto semelhantes à MET02, e espessura total de 1,50 m, que é bem superior à estudada na MET01 que é de 0,60m.

As camadas de solo com composto, por ter uma grande capacidade de armazenar água, também são usadas para proteger outros tipos de camada de cobertura quanto a instabilidades de fluxo, como o caso de barreiras capilares. Além disso, sabe-se que a vegetação também protege o solo de erosões tanto as causadas pelo vento quanto pela chuva. Berger *et al.* (2009) incluíram uma camada superficial de proteção acima do solo compactado com finalidade de proteger uma barreira capilar de altas taxas de infiltração, avaliando-se também a influência do tipo de vegetação no processo de evapotranspiração. Os autores concluíram após 10 anos de estudos que a evapotranspiração é maior em áreas com plantação de arbustos do que com plantação de gramíneas, minimizando a infiltração, em virtude da variação no balanço hídrico.

#### 4.4.2 Barreira Capilar (BAC)

##### 4.4.2.1 Umidade em profundidade

Os sensores de umidade e temperatura em profundidade foram instalados em setembro de 2009. Anteriormente a esse período foram coletadas três amostras do solo para análise em laboratório. A Figura 90 que mostra a variação da umidade no período monitorado, com a indicação da umidade de capacidade de campo ( $W_{cc}$ ).

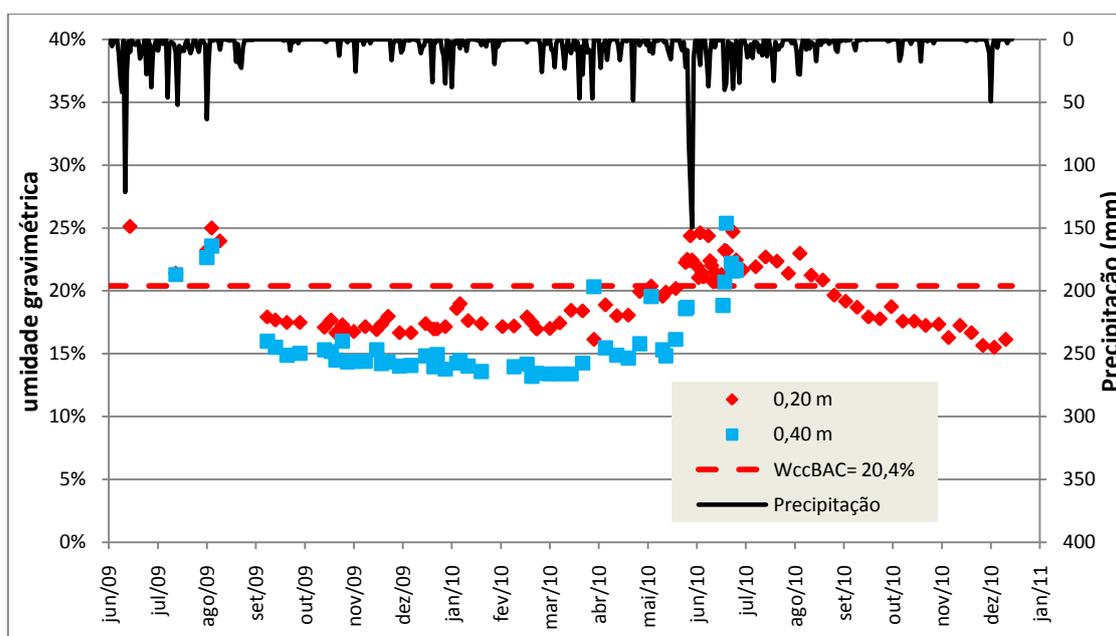
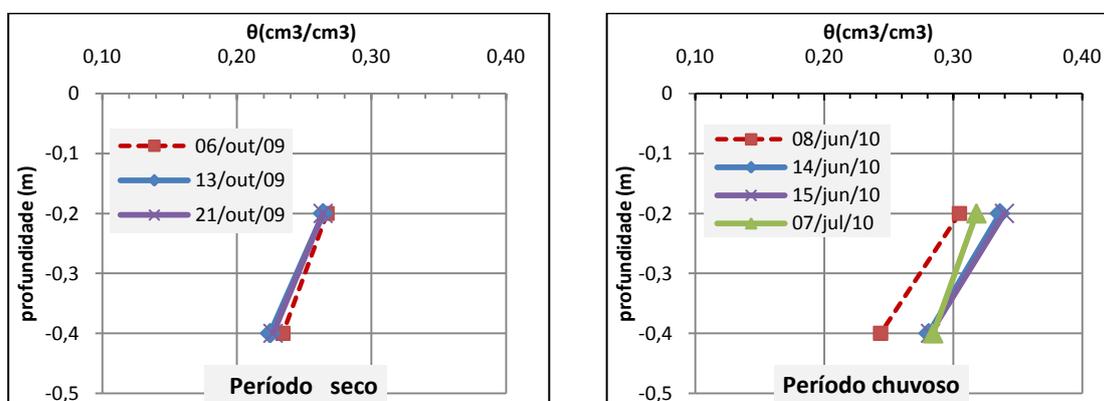


Figura 90: Variação de umidade no perfil BAC01 (sem vegetação)

Nesse período a umidade variou de 15,5% a 25,1% na camada superficial e de 13,2% a 25,4% na profundidade de 0,40 m, sendo essas variações um pouco inferiores às observadas na MET01. Como o sensor na profundidade de 0,40 m da BAC apresentou defeito em meados de junho/10, assim como o da MET01, a distribuição de umidade ao longo de diferentes períodos secos e períodos chuvosos da barreira capilar não puderam ser claramente determinados. Verifica-se que em períodos secos a umidade superficial é superior à da profundidade de 0,40 m, sugerindo a formação de uma camada de armazenamento de água na parte superficial da BAC, e para altas precipitações a umidade tende a ser constante no perfil. Essa camada de armazenamento pode ter sido propiciada pela presença do geotêxtil na interface solo/pedra, que possui uma permeabilidade semelhante a de uma areia média/grossa ( $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  m/s, conforme catálogo do fabricante), tendo em vista que as pedras rachinhas de grande granulometria funcionam como dreno, já que não retém água.

A Figura 91 mostra as variações de umidade volumétrica do mês de menor precipitação no período monitorado (outubro/09) e no mês de maior precipitação (junho/10).



**Figura 91: Umidade volumétrica em profundidade em período seco e chuvoso no perfil BAC01**

Em períodos secos o perfil apresentou umidade volumétrica praticamente constante ao longo do tempo, com diminuição ao longo da profundidade. Em períodos chuvosos a umidade volumétrica variou à medida que ocorria precipitação e se

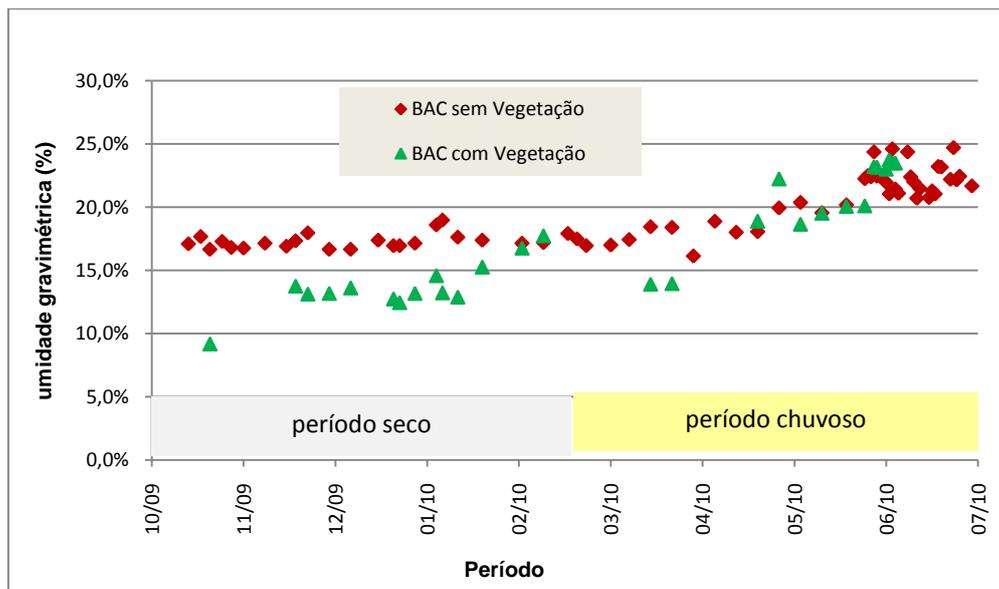
observou que, com a diminuição da precipitação, a camada mais superficial perdia umidade mais rapidamente, devido a disponibilidade hídrica para a evaporação.

Uma vegetação com mesmas características da camada metanotrófica (gramíneas) se desenvolveu desde o início do ano de 2009, em 85% da área da barreira capilar, sendo menos intensa nas proximidades da divisão com a camada convencional e no talude lateral de menor dimensão, permanecendo no restante do período monitorado, inclusive em meses de baixa precipitação, como é mostrado na Figura 92.



**Figura 92: Presença de vegetação na camada de cobertura tipo barreira capilar**

No período de novembro de 2009 a junho de 2010 foi instalado um sensor de umidade na profundidade de 0,20 m, em uma área da barreira capilar com presença de vegetação (na parte central), com o objetivo de se avaliar a influência da vegetação nesse tipo de camada de cobertura. A Figura 93 mostra o comportamento da umidade na profundidade de 0,20 m no perfil BAC01 (sem vegetação) e no perfil BAC02 (com vegetação) nesse período.



**Figura 93: Teor de umidade a 0,20 m de profundidade nos perfis BAC01 e BAC02**

Observa-se que a presença de vegetação influenciou na variação de umidade ao longo de estações secas e chuvosas. Na estação seca a umidade superficial do perfil com vegetação, é inferior a do perfil sem vegetação, igualando-se em períodos de precipitação mais intensa. O perfil BAC02 apresentou características de camada evapotranspirativa, removendo umidade nos períodos mais secos e retendo a umidade nos períodos chuvosos, em função da presença da vegetação, enquanto que o perfil sem vegetação apresentou menor variação de umidade para o mesmo período.

#### 4.4.2.2 Infiltração na BAC

A Tabela 21 apresenta a precipitação e a infiltração mensal no período monitorado, no infiltrômetro da barreira capilar, e a Figura 94 apresenta a variação diária da infiltração e da precipitação.

Tabela 21: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da BAC

Mês	Precipitação (mm)	Infiltração	
		(mm)	(%)
Junho/2009	333,00	25,96*	7,79%
Julho/2009	387,80	287,19**	74,06%
Agosto/2009	288,40	173,68**	60,22%
Setembro/2009	83,30	0,01	0,01%
Outubro/2009	16,30	0,00	0,00%
Novembro/2009	49,90	0,27	0,54%
Dezembro/2009	47,80	0,00	0,00%
Janeiro/2010	193,40	0,58	0,30%
Fevereiro/2010	45,20	0,01	0,02%
Março/2010	92,70	0,00	0,00%
Abril/2010	273,30	0,00	0,00%
Mai/2010	114,20	0,00	0,00%
Junho/2010	543,90	18,86	3,47%
Julho/2010	267,60	4,84	1,81%
Agosto/2010	191,20	6,22	3,26%
Setembro/2010	72,70	0,01	0,02%
Outubro/2010	37,40	0,00	0,00%
Novembro/2010	23,90	0,06	0,25%
Dezembro/2010	84,80	0,00	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>3.146,80</b>	<b>517,70</b>	<b>16,45%</b>

\*Início das medições em 13/06/2009 ; \*\*Detectado vazamento no infiltrômetro

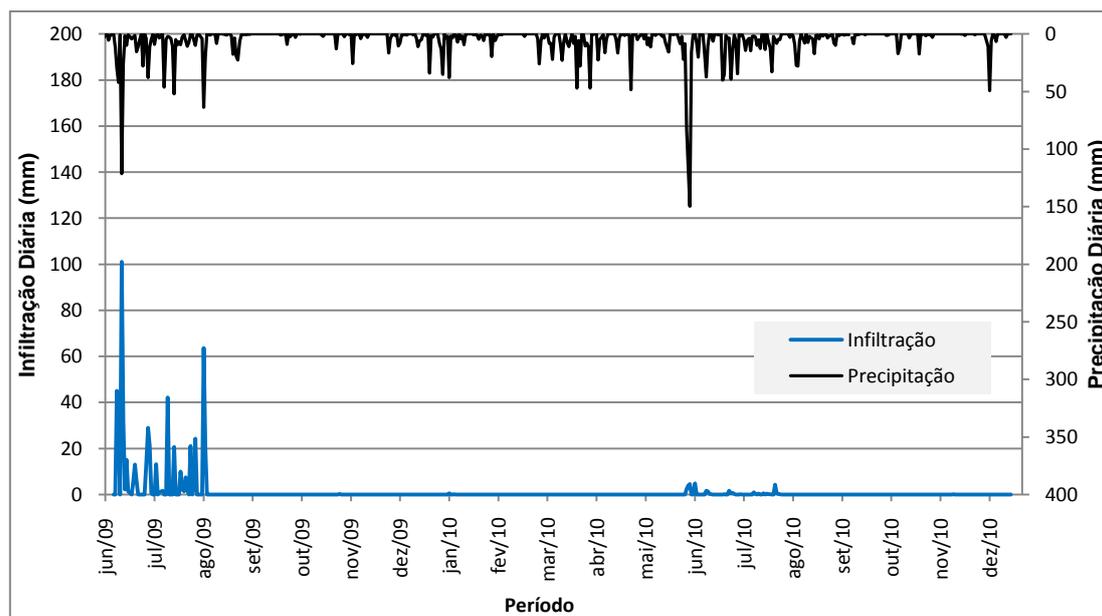


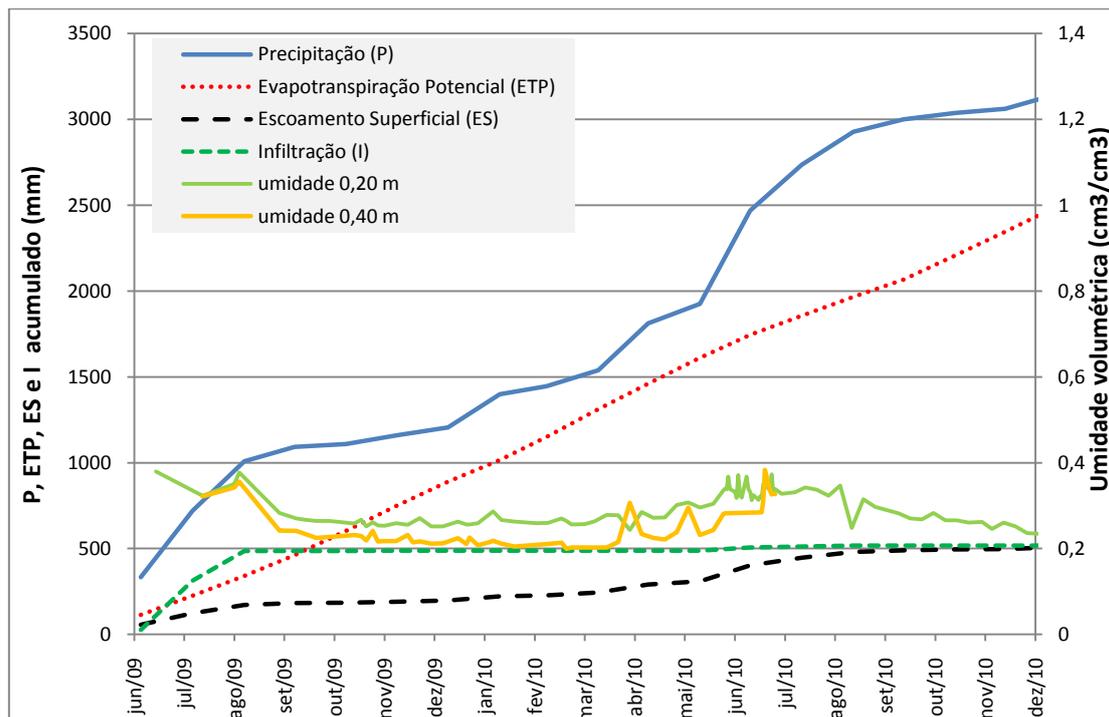
Figura 94: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da Barreira Capilar (BAC01)

O desempenho da BAC no período avaliado foi marcado pela alta taxa de infiltração nos meses iniciais em função de chuvas de grande intensidade, em curto período de tempo (109 mm/dia), ocorridas na região fazendo com que rapidamente a umidade atingisse a capacidade de campo. Além disso, se identificou vazamento na base do infiltrômetro, sendo necessária sua remoção e conserto, para continuidade das medições de volume infiltrado. A partir de setembro de 2009 a barreira capilar diminuiu significativamente a infiltração, até meados de junho de 2010 quando houve uma precipitação de 348,5 mm acumulados em três dias, dando início a infiltração. No entanto, em valores bem inferiores aos do ano anterior. As infiltrações ocorreram nos períodos que a camada inferior, que fazia interface com o geotêxtil e o bloco capilar (pedra rachinha), atingiu a umidade de capacidade de campo de 20,4% e drenando para a base de pedras. A taxa de infiltração medidas no período chuvoso de 2010 foi inferior às medidas no mesmo período do ano de 2009, em decorrência de um menor excedente hídrico, como mostrado na Figura 73, no início desse capítulo.

Verifica-se que, embora situada em região com excedente hídrico, a barreira capilar proposta apresentou infiltração no ano de 2010 de 30,6 mm, funcionando bem próximo da máxima recomendada pela USEPA de 30 mm para climas úmidos, onde  $P/E > 0,50$ .

Para regiões onde as precipitações sejam bem distribuídas durante o ano e que promovam uma frente de saturação inferior à espessura da camada de 0,50 m, a barreira capilar com as características apresentada deve funcionar adequadamente. É necessária a continuidade dos estudos por um período maior de tempo para que se avaliem outros ciclos climatológicos e assim se possa afirmar acerca do desempenho da BAC, frente às variações do clima e modificações na estrutura do solo.

A Figura 95 mostra o balanço hídrico da BAC com as mesmas considerações feitas para estimativa de evapotranspiração da região, e adotando-se coeficiente de escoamento superficial para cada período do ano (seco ou chuvoso), sem considerar escoamento lateral, tendo em vista que não há inclinação na base da camada de cobertura.

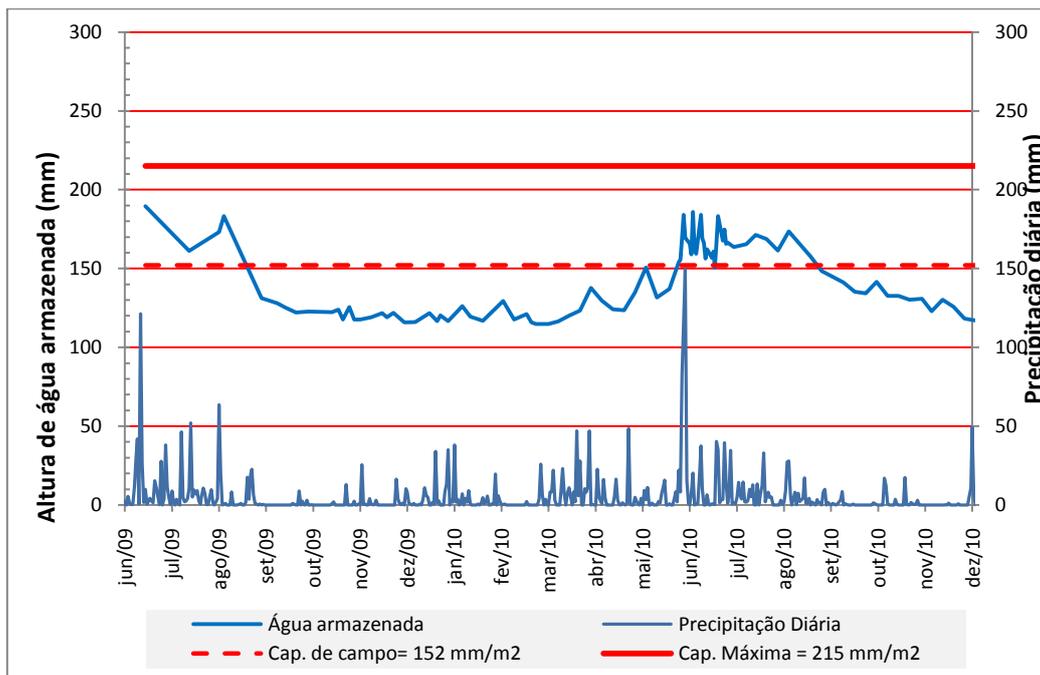


**Figura 95: Balanço hídrico no perfil BAC01, no período de jun/09 a dez/10**

Basicamente a infiltração ocorreu em períodos que a umidade volumétrica em todo perfil da camada se situou acima de  $0,31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Abaixo dessa umidade, a camada de cobertura foi capaz de armazenar a água devido ao efeito da capilaridade existente por diferença de permeabilidade entre o solo fino, o geotêxtil e bloco capilar (pedra rachinha).

Como pode se observar a umidade volumétrica na camada superficial no segundo período seco monitorado permaneceu em níveis similares aos registrados no período seco anterior. Isso se deve ao tipo de material da BAC que perde umidade mais lentamente do que a MET01, como mostrado na curva de retenção, sofrendo menores interferências das condições climáticas, mesmo com uma espessura inferior.

A Figura 96 apresenta a altura de água armazenada na barreira capilar durante o período monitorado. A altura máxima é de  $215 \text{ mm/m}^2$ , considerando as características do material utilizado.



**Figura 96: Precipitação diária e variação de volume armazenado no perfil BAC01**

Na Figura 96 também se verifica que a altura de água não excedeu a capacidade de armazenamento, mesmo em períodos de altos índices pluviométricos. Da mesma forma que a MET01, em períodos de precipitações diárias acima de 50 mm a barreira respondia com aumento de umidade, atingindo sua capacidade de campo, onde se mediram infiltrações acima de 4 mm/mês. Como a capacidade de perda de umidade do solo da barreira capilar é inferior ao da MET01, essa camada passava mais dias drenando do que a camada metanotrófica. Poucos pontos de acúmulo de água se formaram nas proximidades do perfil instalado, e em amostragens de rotina observou-se que a camada de material fino estava próxima à saturação, nos meses de altas precipitações.

Da mesma forma que aconteceu com a BAC em estudo, Hupe *et. al.* (2003) investigaram barreiras capilares, concluindo que ela foi sobrecarregada durante os períodos de intensa precipitação causando quebra de sucção (descontinuidade). Gee *et al.* (2006) afirmam que uma das desvantagens da barreira capilar é a existência de fluxos instáveis quando saturadas, implicando em altas taxas de fluxo para dentro do aterro. Berger *et al.* (2009) testando barreiras capilares incluiu uma camada superficial de proteção acima do solo compactado para proteger a barreira de altas taxas de infiltração, o que podemos concluir que uma camada de mistura de solo e composto

acima da barreira capilar provavelmente poderia minimizar significativamente, a quebra de sucção na BAC, melhorando seu desempenho.

A taxa infiltração medida na BAC no início do funcionamento são superiores às medidas por Albright *et al.* (2004) em clima úmido, em uma barreira capilar que infiltrou de 33 a 55 mm/ano, e aproximada às de uma camada evapotranspirativa que infiltrou de 123 a 160 mm/ano. No segundo ano de funcionamento a infiltração de 30,5 mm se aproxima da infiltração medida por Suzuki *et al.* (2005) em uma barreira capilar em local de clima úmido.

#### 4.4.3 Camada Convencional (CONV)

##### 4.4.3.1 Umidade em profundidade

A Figura 97 apresenta a variação da umidade gravimétrica medida nas três profundidades para o período monitorado, onde  $w_{cc}$  representa a umidade relativa à capacidade de campo.

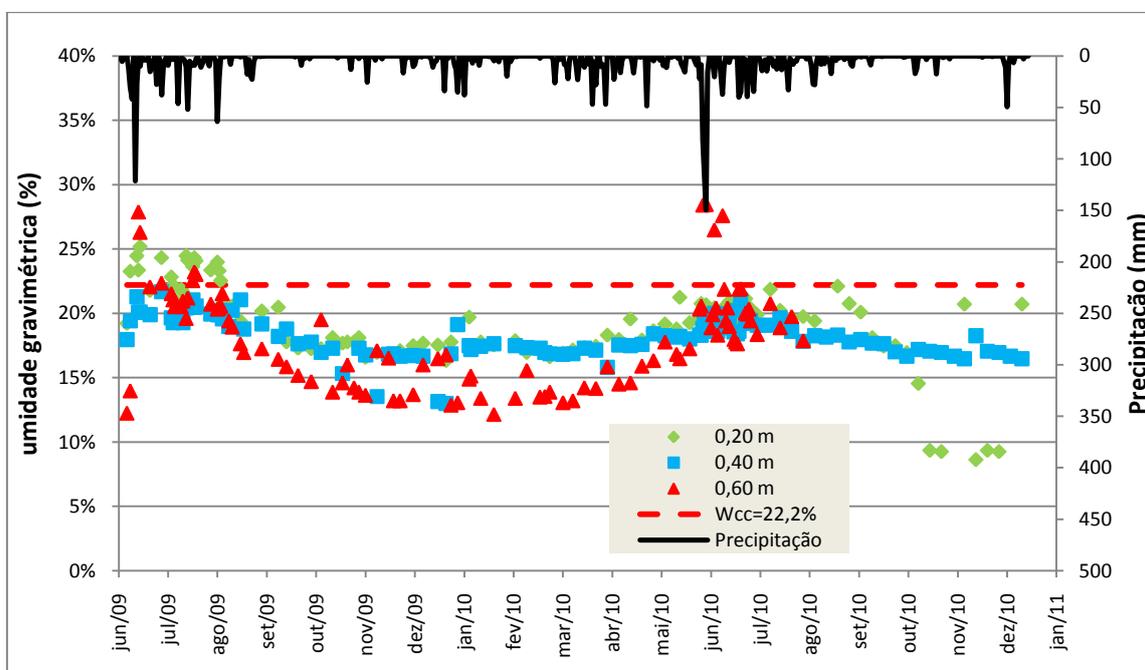
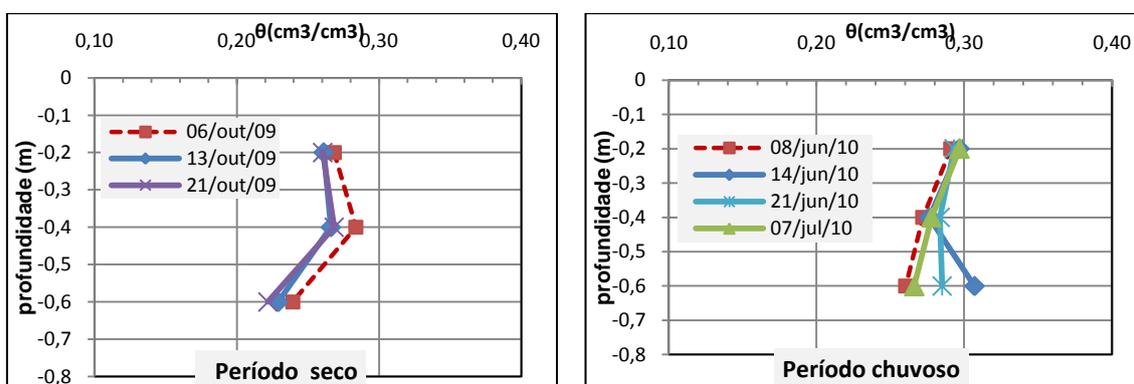


Figura 97: Variação de umidade no perfil CONV01 sem vegetação

A umidade da camada de cobertura convencional variou de acordo com as variações climatológicas, apresentando menores teores de umidade em relação às demais perfis estudados, ao longo do período monitorado. Nesse período a umidade variou de 8,6% a 25,2% na camada mais superficial (0,20 m), de 13,0% a 21,7% na profundidade de 0,40 m e de 12,1% a 28,8% em 0,60 m. Os eventos de umidade elevada nos períodos chuvosos seguiam as precipitações de grande intensidade, porém observa-se que essa camada esteve em quase 100% dos dias monitorados, com umidade abaixo da capacidade de campo em todo perfil. É provável que a partir de outubro de 2010 o sensor na profundidade de 0,20 m tenha apresentado problemas tendo em vista que as medições nessa profundidade são geralmente similares à profundidade de 0,40 m para os períodos secos, como se vê na Figura 97, e nesse segundo período se verificou uma grande variação.

A Figura 98 mostra a variação do perfil de umidade volumétrica na camada convencional sem vegetação, no mês de menor precipitação e no de maior precipitação, no período monitorado.



**Figura 98: Umidade volumétrica em profundidade em período seco e período chuvoso no perfil CONV01**

Em períodos secos o perfil apresentou umidade volumétrica praticamente constante ao longo do tempo, com diminuição ao longo da profundidade. Em períodos chuvosos a umidade volumétrica também apresenta o mesmo comportamento com aumento de umidade no perfil a partir de ocorrência de precipitações, até atingir uma umidade constante e rapidamente com decréscimo após diminuição de chuvas.

Nos períodos mais secos (setembro a dezembro) a camada convencional apresentou fissuras superficiais, em função da maior evaporação nesse período.

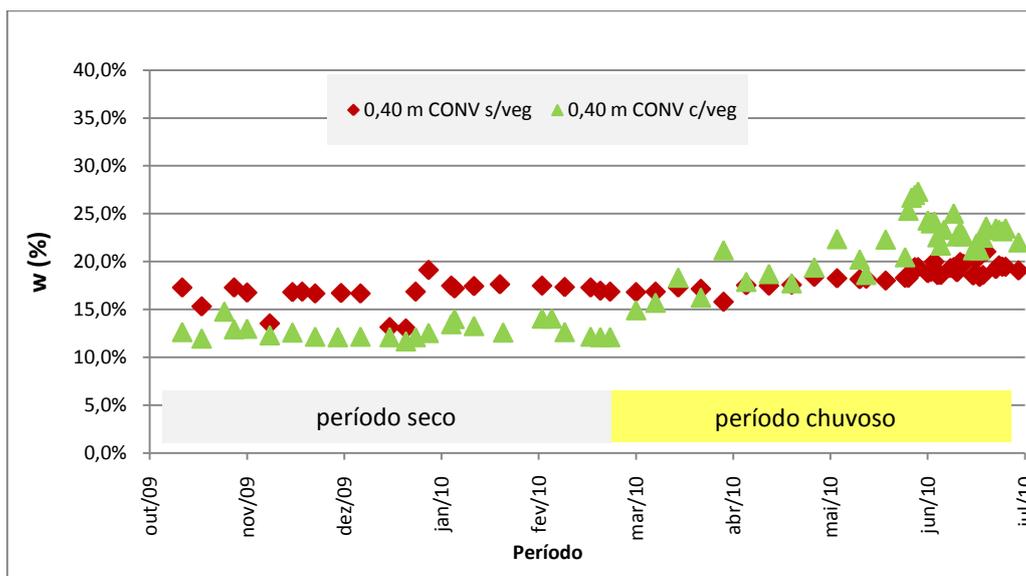
Essas fissuras eram rapidamente fechadas quando ocorriam novas precipitações como pode ser observado na Figura 99.



**Figura 99: Fissuras superficiais e ausência de vegetação na camada convencional**

Cerca de 30% da área da camada convencional foi coberta com vegetação, porém de forma espaça, com maior densidade no final do ano de 2009, na interface com a camada metanotrófica, provavelmente devido à proximidade com áreas mais úmidas e em uma área onde houve temporariamente a deposição de composto na superfície.

No local onde se desenvolveu a vegetação foi instalado um sensor de umidade na profundidade de 0,40 m, que funcionou no período de novembro de 2009 a junho de 2010, com o objetivo de se avaliar a influência da vegetação na camada convencional. A Figura 100 mostra o comportamento da umidade na profundidade de 0,40 m no perfil CONV01 (sem vegetação) e no perfil CONV02 (com vegetação) nesse período.



**Figura 100: Teor de umidade a 40 cm de profundidade em perfil CONV01 e CONV02**

Observa-se claramente a influência da vegetação na variação de umidade, e da mesma forma que na barreira capilar, a vegetação removeu umidade nos períodos mais secos e reteve umidade em períodos mais chuvosos, e na camada sem vegetação, a umidade sofreu menores variações, sendo praticamente constante ao longo do tempo, embora com altas precipitações verificadas no período chuvoso entre maio e julho de 2010. A transpiração das plantas é o fenômeno que justifica a maior variação de umidade entre períodos secos e chuvosos para áreas com vegetação.

#### 4.4.3.2 Infiltração

A Tabela 22 apresenta os dados mensais de precipitação e a infiltração medida no infiltrômetro da camada convencional no período monitorado e a Figura 101 apresenta a variação diária da infiltração.

Tabela 22: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da CONV

Mês	Precipitação (mm)	Infiltração	
		(mm)	(%)
Junho/2009	333,00	43,98	13,2%
Julho/2009	387,80	0,25	0,1%
Agosto/2009	288,40	0,00	0,0%
Setembro/2009	83,30	0,00	0,0%
Outubro/2009	16,30	0,00	0,0%
Novembro/2009	49,90	0,00	0,0%
Dezembro/2009	47,80	0,00	0,0%
Janeiro/2010	193,40	0,00	0,0%
Fevereiro/2010	45,20	0,00	0,0%
Março/2010	92,70	0,00	0,0%
Abril/2010	273,30	0,00	0,0%
Mai/2010	114,20	0,00	0,0%
Junho/2010	543,90	0,35	0,1%
Julho/2010	267,60	0,00	0,0%
Agosto/2010	191,20	0,00	0,0%
Setembro/2010	72,70	0,00	0,0%
Outubro/2010	37,4	0,00	0,0%
Novembro/2010	23,90	0,00	0,0%
Dezembro/2010	84,8	0,00	0,0%
<b>TOTAL</b>	<b>3.146,80</b>	<b>44,58</b>	<b>1,4%</b>

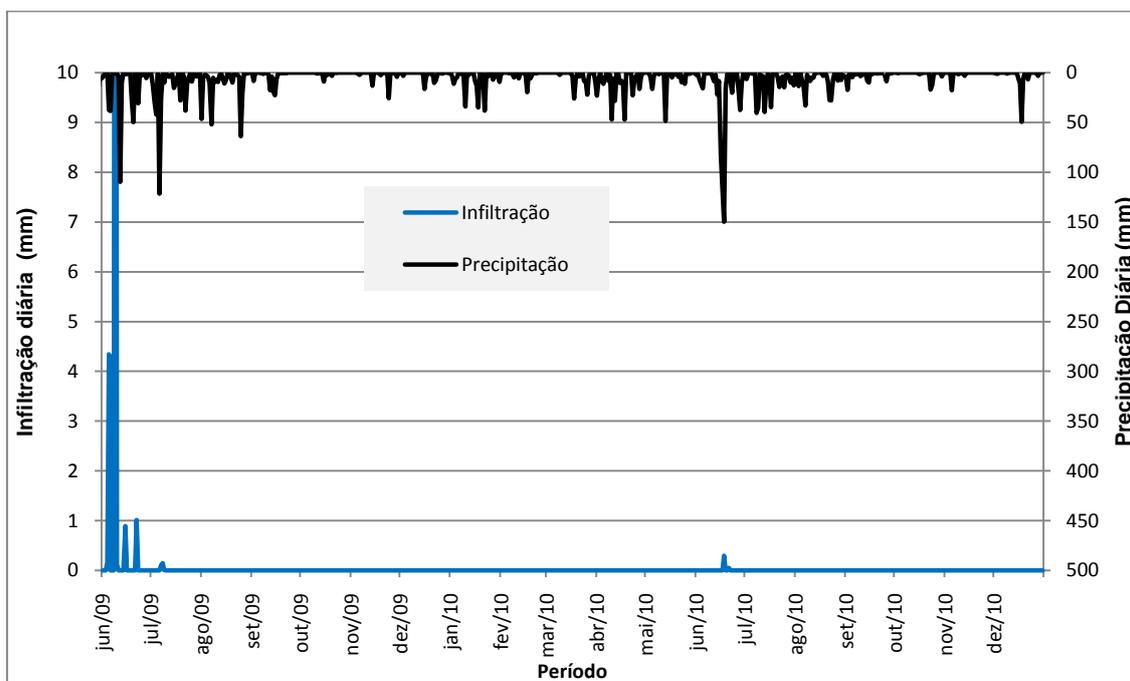
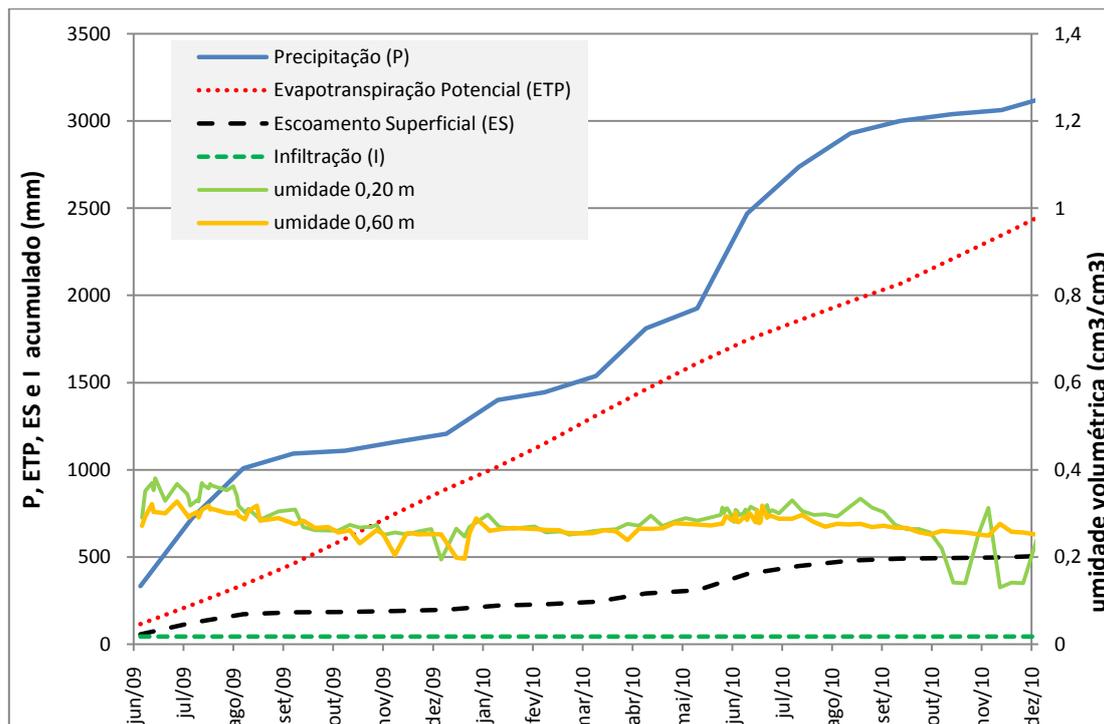


Figura 101: Precipitação e Infiltração no infiltrômetro da camada convencional

O desempenho da camada convencional foi caracterizado por pequenos eventos de infiltração. O primeiro registro se deu após 10 dias da instalação do infiltrômetro, em um período onde se registraram chuvas de alta intensidade em curto espaço de tempo (109 mm/dia) durante a execução tendo o solo atingido rapidamente a umidade de capacidade de campo como foi mostrado na Figura 97 através da indicação da respectiva umidade.

A partir do mês de setembro seguiram-se períodos de deficiência hídrica, sem registros de infiltração devido ao aumento das taxas de evaporação e diminuição drástica de precipitação nesse período. A infiltração verificada no mês de junho de 2010 foi de 0,35 mm mesmo sendo registrada uma precipitação de alta intensidade, somando-se 348,5 mm em três dias. No mês de janeiro 2010, houve aumento da umidade devido ao aumento da precipitação, resultando em um balanço hídrico positivo de 65,4 mm, porém a camada não atingiu a umidade de capacidade de campo, não havendo infiltração. A camada convencional tem espessura de solo compactado de 70 cm, sendo a mais espessa dos três perfis estudados e em todo ano de 2010 a infiltração medida no infiltrômetro foi de 0,35 mm, estando de acordo com a recomendação da USEPA, de no máximo 30 mm anuais, para locais de clima úmido ( $P/E > 0,50$ ).

A Figura 102 mostra o balanço hídrico da CONV com as mesmas considerações feitas para estimativa de evapotranspiração da região, adotando-se coeficiente de escoamento superficial para cada período do ano (seco ou chuvoso), sem considerar escoamento lateral, tendo em vista que não há inclinação na base da camada de cobertura.

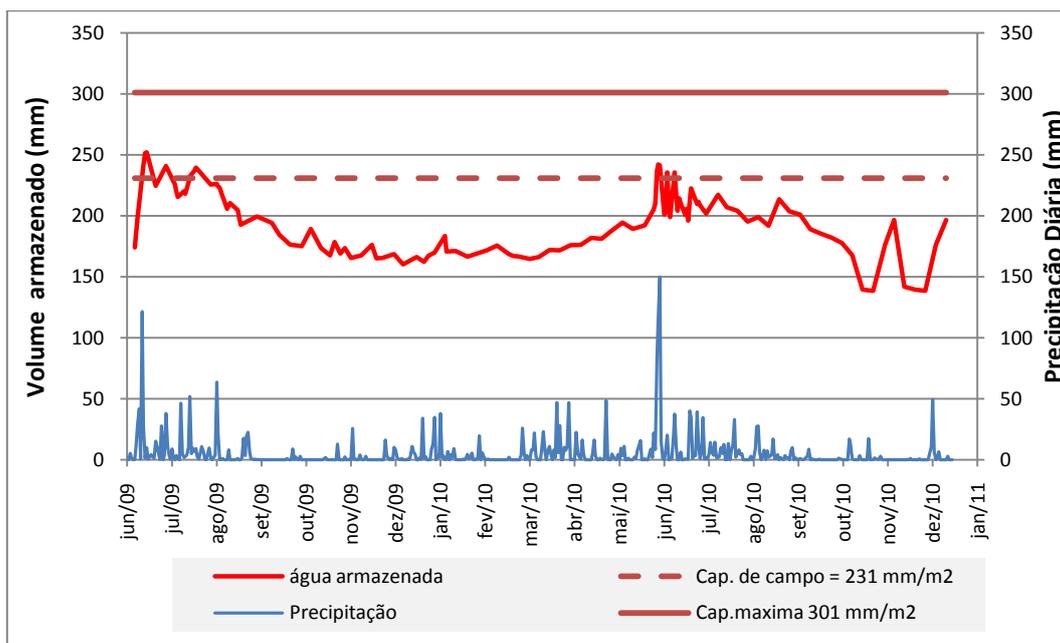


**Figura 102: Balanço hídrico do perfil CONV01 no período de jun/09 a dez/10**

A infiltração se deu basicamente no início do monitoramento como descrito anteriormente, quando a umidade do solo em todo perfil estava acima de  $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . A camada de cobertura não apresentou infiltração até o mês de junho de 2010 quando houve chuvas intensas acima de 300 mm acumuladas em três dias consecutivos.

Problemas no sensor de umidade na profundidade de 60 cm impediram medições no período de setembro a dezembro de 2010, mas como pode se observar há uma tendência de diminuição acentuada de umidade na camada superficial no segundo período seco monitorado, com medidas inferiores às registradas no período seco anterior, justificando assim a infiltração inferior ao ano de 2009.

A Figura 103 apresenta o volume de água armazenada na camada convencional durante o período monitorado sendo o volume máximo de armazenamento na camada de  $301 \text{ mm}/\text{m}^2$ , considerando as características do material utilizado e a configuração geométrica da camada.



**Figura 103: Precipitação diária e variação de volume armazenado no perfil CONV01**

A camada convencional passou todo o período monitorado sem atingir sua capacidade máxima de armazenamento, e que a altura de água excedeu a capacidade de campo, em apenas alguns períodos e por um curto espaço de tempo, o que mostra que essa camada (CONV) esteve sempre com menor quantidade de água que as demais.

Comparando-se o comportamento de infiltração da CONV com camadas de cobertura de argila compactada em regiões úmidas do sudeste dos Estados Unidos analisadas por Albright *et al.* (2006), o percentual de infiltração foi de mesma magnitude, no início do período analisado (cerca de 1%). Com a continuidade dos estudos, os autores observaram um aumento nas taxas de infiltração para 11% da precipitação, demonstrando mudanças nas características dos materiais ao longo do tempo. O mesmo comportamento de perda de desempenho ao longo de 20 anos de estudos, em cobertura de solos compactados, também foi constatado por Berger *et al.* (2009) em região da Alemanha com relação precipitação/evapotranspiração de 1,50 a 1,65. Os pesquisadores atribuem essas mudanças com a formação de fendas geradas pelas raízes de plantas que alcançaram a base da camada, além da dessecação do solo. No período de 18 meses de estudos englobando dois ciclos chuvosos não foi verificado aumento de infiltração na área em estudo da célula experimental.

#### 4.4.4 Desempenho das camadas de cobertura com relação à infiltração

De uma maneira geral, as três configurações de camadas de cobertura instalada na célula experimental apresentaram infiltrações de acordo com suas características e da influência do regime pluviométrico da região. As maiores infiltrações nas camadas alternativas à camada convencional foram decorrentes da maior permeabilidade saturada apresentada pela MET01 e em função da quebra de sucção em momentos de precipitação intensa de longa duração, na barreira capilar, como foi mostrado na Tabela 14.

A infiltração medida acumulada no período monitorado, em cada camada de cobertura, é mostrada na Figura 104 conjuntamente com a precipitação acumulada.

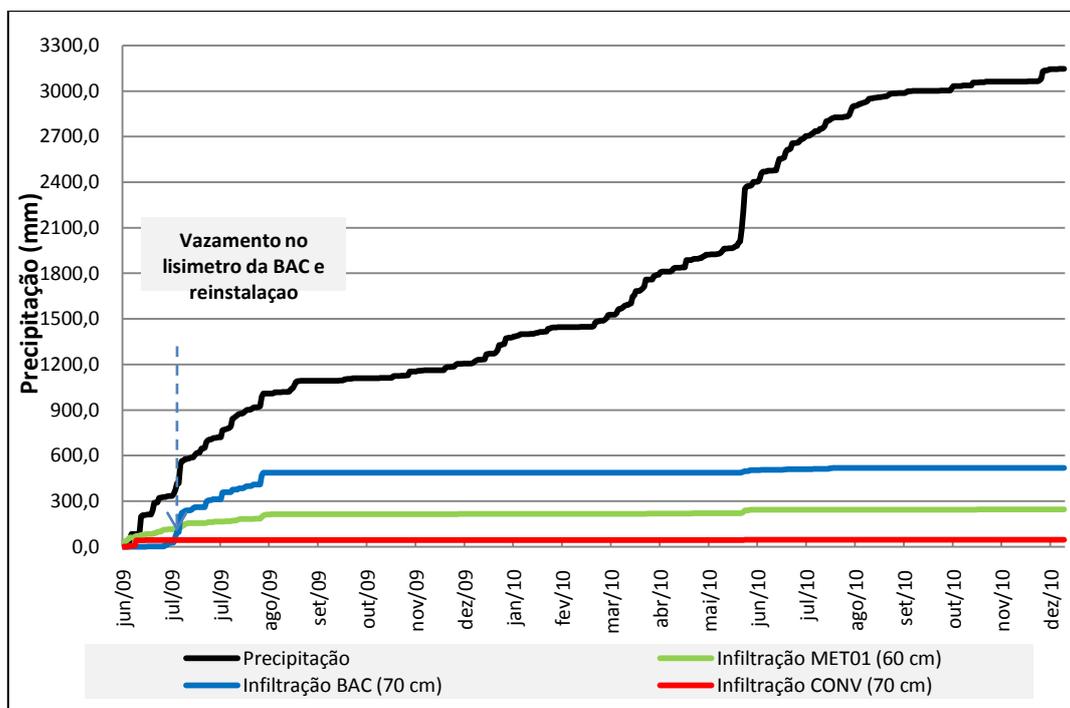


Figura 104: Precipitação e Infiltração acumulada

Verifica-se que, embora com configurações diferentes, as camadas alternativas apresentaram de agosto de 2009 a dezembro de 2010, desempenho muito semelhantes, com infiltrações superiores à camada convencional. Considerando o ano de 2010, onde o regime de funcionamento já havia se estabelecido, as camadas alternativas apresentaram um desempenho satisfatório, a despeito das variações de espessura, com infiltrações medidas de 29,8 mm e 30,6 mm para a camada

metanotrófica e barreira capilar respectivamente, próximas às recomendadas pela USEPA para regiões de clima úmido.

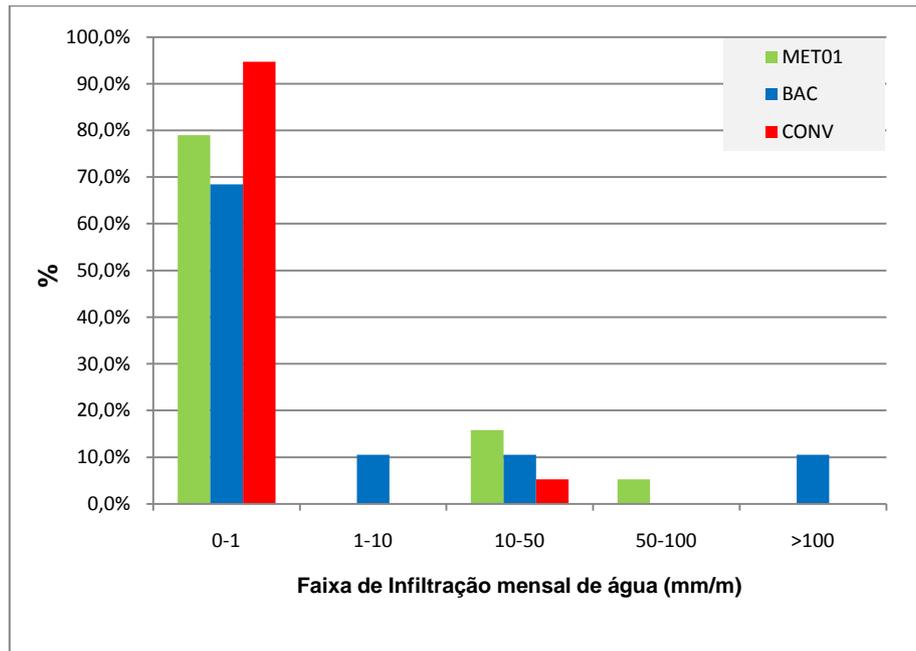
Tendo em vista que as camadas de cobertura têm espessuras diferentes, a Tabela 23 apresenta os resultados das infiltrações mensais normalizadas em relação à espessura média de cada cobertura, na área de cada infiltrômetro.

**Tabela 23: Infiltração mensal normalizada pela espessura da camada**

Mês	Infiltração normalizada pela espessura (mm/m)		
	MET	BAC	CONV
Junho/09	68,51	18,17	30,78
Julho/09	30,43	201,04	0,18
Agosto/09	29,30	121,58	0,00
Setembro/09	0,01	0,01	0,00
Outubro/09	0,17	0,00	0,00
Novembro/09	0,20	0,19	0,00
Dezembro/09	0,28	0,00	0,00
Janeiro/10	0,13	0,41	0,00
Fevereiro/10	0,12	0,01	0,00
Março/10	0,44	0,00	0,00
Abril/10	1,43	0,00	0,00
Mai/10	1,43	0,00	0,00
Junho/10	13,82	13,20	0,24
Julho/10	0,00	3,39	0,00
Agosto/10	0,00	4,36	0,00
Setembro/10	0,00	0,01	0,00
Outubro/10	0,19	0,00	0,00
Novembro/10	0,06	0,04	0,00
Dezembro/10	0,00	0,00	0,00

A análise dos resultados confirma que no período avaliado as camadas MET01 e BAC apresentaram infiltração superior do que a camada convencional nos períodos de maior índice pluviométrico.

Para melhor representação da infiltração no período analisado, tendo em vista a amplitude dos valores medidos (desvio padrão bem acima da média), apresenta-se na Figura 105, a distribuição da taxa mensal normalizada com a espessura, por cada camada de cobertura.

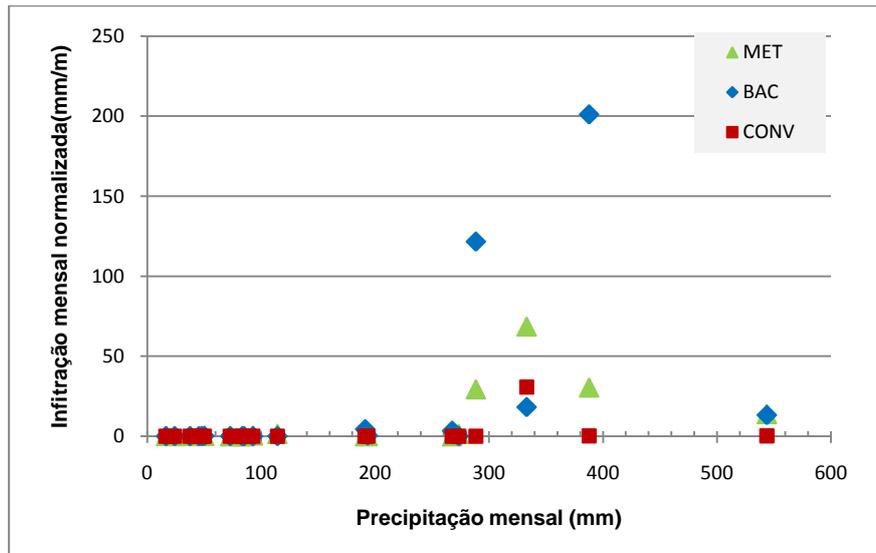


**Figura 105: Distribuição da taxa mensal de infiltração normalizada pela espessura, em cada camada de cobertura**

As medidas de infiltração se situaram dentro da faixa de 0 a 1 mm/m/mês, em 68% das medidas na barreira capilar, 79% na camada metanotrófica e 94% da camada convencional, com picos de infiltração de 10 a 50 mm/m verificados nas camadas alternativas, em meses de excedente hídrico superior a 400 mm, durante o período monitorado.

Considerando o ano de 2010, onde o regime de funcionamento das camadas de cobertura já havia se estabelecido e tendo passado por duas estações chuvosas, as camadas alternativas apresentaram o mesmo desempenho, com 75% das medidas entre 0 a 1 mm/m, 17% entre 1 a 10 mm/m e 8% entre 10 a 15 mm/m, e a camada convencional com 100% das medidas entre 0 a 1 mm/m.

A Figura 106 mostra a relação entre a precipitação mensal e infiltração normalizada.

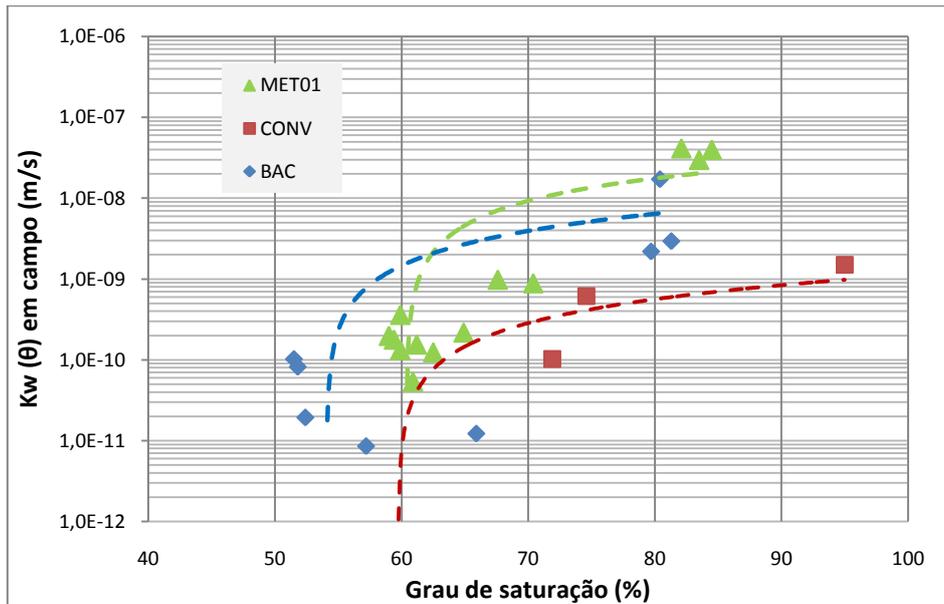


**Figura 106: Precipitação mensal e infiltração mensal normalizada pela espessura**

Verifica-se que as maiores medidas de infiltração se deram nos meses com precipitação acumulada acima de 280 mm e que, excluindo-se os picos iniciais da BAC (devido aos problemas de vazamento), as camadas alternativas apresentaram um bom desempenho, tendo em vista que é desejável uma umidade no interior do aterro para que se estabeleça um ambiente propício para a biodegradação dos resíduos, pois para baixos teores de umidade a estabilização é lenta, prejudicando projetos de exploração econômica.

#### 4.4.5 Permeabilidade em função da saturação

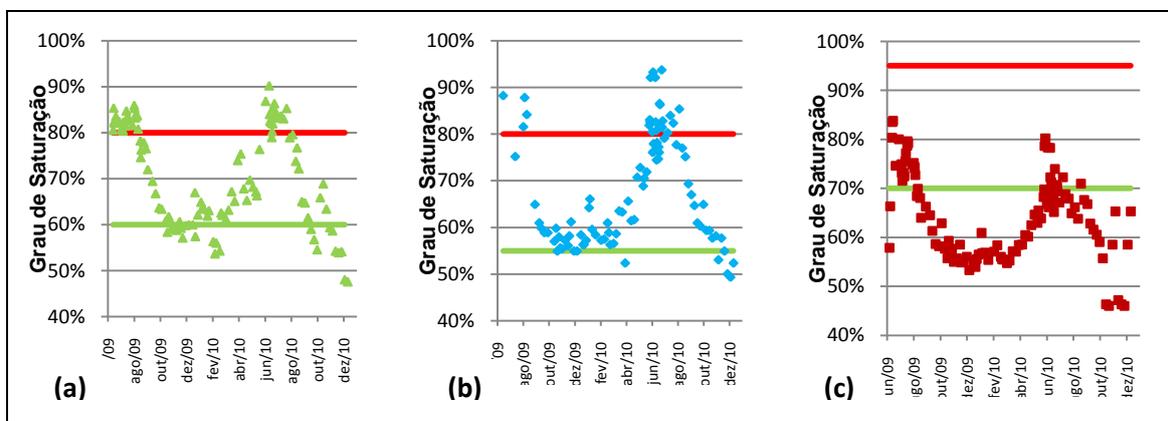
A permeabilidade efetiva de campo ( $K_{ef}$ ) foi determinada a partir da relação entre a altura de água infiltrada em um período determinado e o período de tempo durante o qual a drenagem foi medida e relacionada com a saturação da camada de cobertura no período. Foi feita a simplificação como proposto em Albright *et al.* (2006) assumindo um equilíbrio de fluxo vertical e gradiente hidráulico unitário. A Figura 107 mostra os resultados para as três camadas, com as respectivas linhas de tendência.



**Figura 107: Variação de permeabilidade efetiva em função do grau de saturação médio da camada de cobertura**

Observa-se uma tendência de diminuição significativa de permeabilidade à água para grau de saturação médio inferiores a 60% para a camada convencional e MET01 e de 55% para a barreira capilar (BAC). Para a permeabilidade máxima à água, a camada convencional atinge valores máximos somente com grau de saturação acima de 95%, enquanto a camada metanotrófica (MET01) e a barreira capilar (BAC), com grau de saturação entre 80% e 85%.

A Figura 108 mostra a variação de saturação média das camadas de cobertura com indicação da saturação referente à permeabilidade máxima e mínima.



**Figura 108: Saturação média e indicação de saturação para permeabilidade máxima e mínima (a) MET01 (b) BAC e (c) CONV**

De acordo com esses resultados conclui-se que as infiltrações medidas na barreira capilar e na camada metanotrófica foram decorrentes de, na maior parte do tempo, a saturação média dessas camadas situarem entre o valor mínimo e o valor máximo, sugerindo infiltração apenas nos períodos quando a camada atingia a saturação máxima, onde de fato se mediram as infiltrações de maior magnitude (nos meses de junho a agosto). A camada convencional apresentou grau de saturação, em grande parte do período monitorado, abaixo do valor onde a permeabilidade à água é mínima, por isso, esteve em quase todo o tempo sem apresentar infiltração, e que as infiltrações medidas foram de pequena magnitude e em curtíssimo espaço de tempo.

#### 4.4.6 Integridade das camadas de cobertura no período monitorado

A avaliação da integridade dos perfis estudados com relação à infiltração pode ser feita pela variação de condutividade hidráulica ou da relação entre a umidade e a infiltração, sugerindo ou não a presença de caminhos preferenciais na área de estudo. A Tabela 24 mostra os resultados da variação na condutividade hidráulica efetiva de campo ( $K_{ef}$ ), do primeiro período chuvoso para o segundo.

**Tabela 24: Variação de condutividade hidráulica do primeiro para o segundo período chuvoso**

CAMADA	Ksat	Kef (campo)	
		1º. período chuvoso	2º. período chuvoso
MET01*	$8,5 \times 10^{-7}$ m/s	$4,0 \times 10^{-8}$ m/s	$9,4 \times 10^{-9}$ m/s
BAC	$4,4 \times 10^{-8}$ m/s	$4,0 \times 10^{-8}$ m/s	$5,9 \times 10^{-9}$ m/s
CONV	$1,5 \times 10^{-9}$ m/s	$2,2 \times 10^{-8}$ m/s	$1,0 \times 10^{-10}$ m/s

\* considerando a permeabilidade saturada da mistura de solo com composto e do solo compactado com 0,30 m respectivamente.

Embora não tenha se observado incremento de condutividade hidráulica de um período chuvoso para outro, não se pode afirmar que não houve modificações na estrutura do infiltrômetro, com possibilidade de formação de caminho preferencial. Nesse caso, a diminuição ao invés de aumento de condutividade hidráulica (média dos valores medidos em cada período), pode estar relacionada com a diminuição de precipitação entre os dois períodos chuvosos, refletindo-se em menores taxas de infiltração, como é mostrado na Tabela 25.

Tabela 25: Taxa de Infiltração em quatro períodos monitorados

PERÍODO	P (mm)	E (mm)	P-E (mm)	Taxa de infiltração		
				MET01	BAC	CONV
Mar/09 a Ago/09	1.905,2	794,0	1111,5	21,18%*	48,24%*	4,38%*
Set/09 a Fev/10	435,9	807,8	-371,9	0,35%	0,20%	0,00%
Mar/10 a Ago/10	1.482,9	816,5	666,8	1,92%	2,02%	0,02%
Set/10 a Dez/10	218,8	526,7	-307,8	0,19%	0,03%	0,00%

\* Infiltração medida apenas de junho a agosto de 2009

De outra maneira, avaliando-se a relação entre a infiltração diária e a umidade volumétrica medida no dia anterior, pode-se sugerir a existência de caminhos preferenciais, quando não há correlação entre esses dois parâmetros. De acordo com Albright *et al.* (2006) é mais provável que ocorra fluxo preferencial decorrente de grandes precipitações, e como sugerido, foram incluídos apenas dados relacionados aos dias onde a precipitação foi superior a 10 mm. A umidade relacionada para essa análise foi a da camada de solo compactado na camada mais profunda e a Figura 109 mostra os resultados para as três camadas de cobertura.

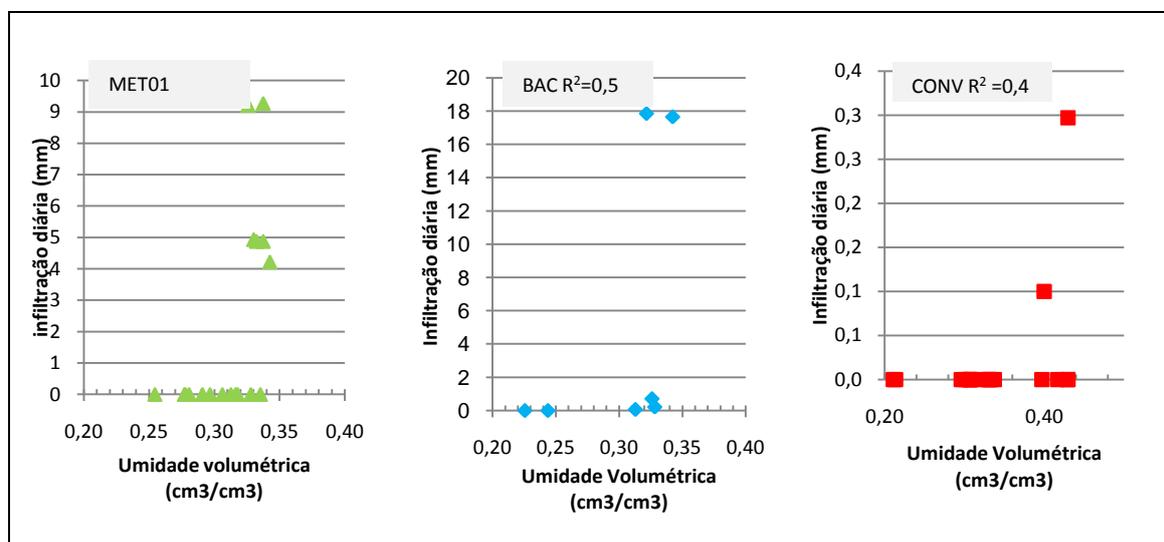


Figura 109: Infiltração diária em função de umidade volumétrica para precipitação acima de 10 mm/dia

Observa-se que a área de estudo da MET01 e da BAC apresentaram coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,6 e 0,5 respectivamente entre os dados analisados, sugerindo que não houve formação de caminhos preferenciais na área de estudo, tendo em vista que são considerados resultados de correlação moderada positiva por

Santos (2007), valores acima de 0,5. Durante escavações para reparo na tubulação da base do infiltrômetro da BAC, observou-se a integridade com ausência de fissuras internas que poderia conduzir a fluxos preferenciais como pode ser observado na Figura 110.



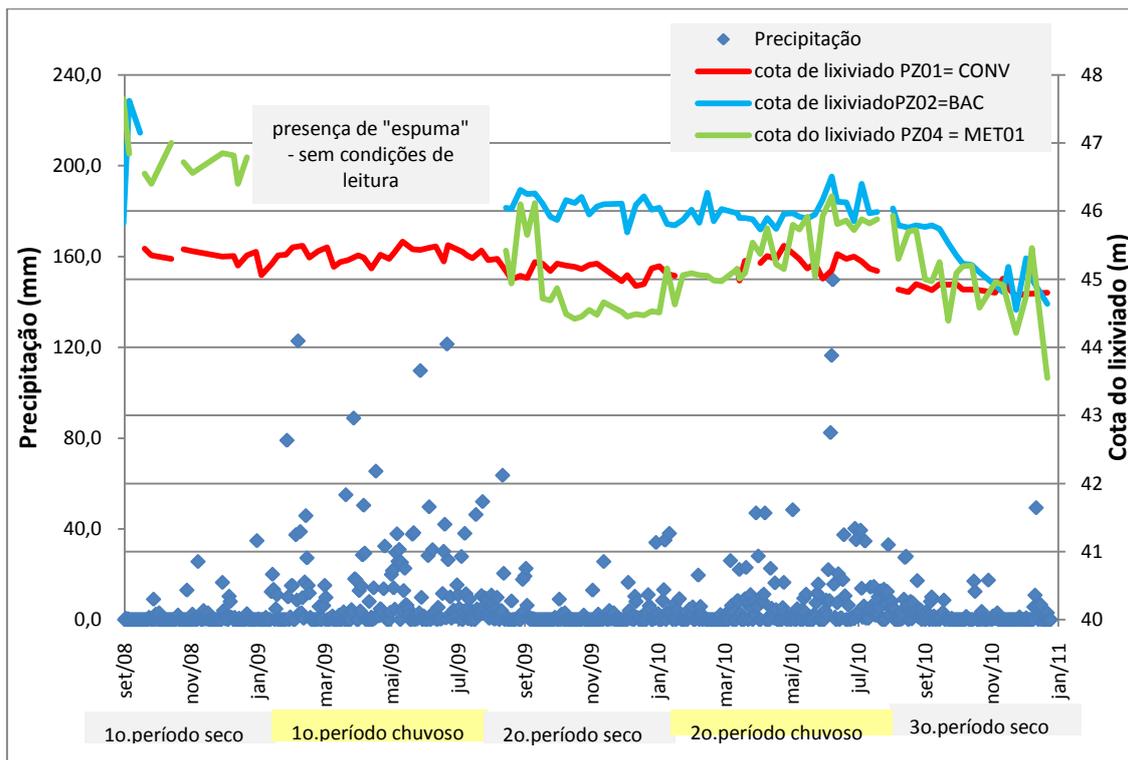
**Figura 110: Aspecto do infiltrômetro da barreira capilar quando removido para conserto**

A área de estudo que apresentou menor coeficiente de correlação entre os três perfis analisados foi a CONV, sugerindo a possibilidade de caminhos preferenciais. No entanto, nesse período os sensores na referida profundidade apresentaram oscilações no momento da leitura indicando possíveis erros de leitura.

#### **4.4.7 Influência da infiltração no nível de lixiviados**

A célula experimental não possui divisões físicas internamente, em função da cobertura. Dessa forma não foi possível fazer uma análise detalhada da influência direta de cada tipo de cobertura na geração de lixiviados. Com relação ao nível de líquidos lixiviados, pode se estabelecer uma relação deste nível com a infiltração em cada tipo de camada, em função das medições de altura do nível de líquidos nos piezômetros existentes (instalados para o monitoramento geoambiental da célula).

Considerou-se a cota do lixiviado equivalente às determinadas a partir das medições de nível nos piezômetros PZ01, PZ02 e PZ04, que se localizavam na camada convencional, barreira capilar e camada metanotrófica MET01 respectivamente. A variação na altura de lixiviado em função da precipitação sugere a influência da infiltração de cada camada, como pode ser visto na Figura 111.



**Figura 111: Precipitação e variação de altura de lixiviado em piezômetros localizados nas camadas de cobertura**

Verifica-se que no primeiro período chuvoso, entre fevereiro e setembro de 2009, a região da camada convencional não apresentou variações significativas na cota de lixiviado, enquanto que nas camadas MET01 e BAC não foi possível realizar a medição de altura de lixiviado, em virtude da presença de “espuma” na saída do piezômetro e borbulhamento no interior do mesmo, sugerindo altas taxas de infiltração nessa região. De um modo geral observa-se que os piezômetros localizados nas camadas MET01 e BAC apresentaram maior variação na cota de lixiviados do que na camada convencional no período monitorado. Essa variação se deu em consequência da infiltração que foi influenciada pelas variações de precipitação principalmente na camada metanotrófica, onde as variações de nível de lixiviados estão claramente associadas à precipitação.

No terceiro período seco (a partir de setembro de 2010) observa-se uma diminuição mais significativa no nível de lixiviados, principalmente na região da barreira capilar, com o nível na região da camada metanotrófica retornando aos valores do período seco anterior. Verifica-se uma tendência de diminuição de nível de lixiviados na região das camadas alternativas, de maior magnitude, do que na região da camada convencional.

De um modo geral pode se observar que as precipitações registradas na região onde se localiza a célula experimental influenciaram no nível de líquidos no interior da mesma, principalmente na área das camadas alternativas, onde se mediram maiores infiltrações nos períodos chuvosos. A precipitação se constitui como o principal fator na geração de lixiviados e por isso a infiltração em camadas de cobertura deve ser controlada a partir das características do solo que se utiliza na camada de cobertura.

As variações de altura de lixiviado no interior da célula também podem ser justificadas pela heterogeneidade dos resíduos e diferenças de densidade de uma região para outra dentro da massa de resíduos, criando diferentes caminhos de fluxo horizontais e verticais. As variações de nível de lixiviados em aterros também foram identificadas por Catapreta (2008) no estudo do aterro experimental de Belo Horizonte-MG.

O nível elevado de lixiviados no interior da célula pode ser decorrente de falhas ou colmatação no sistema de drenagem de base de lixiviado, ou mesmo devido às características dos piezômetros utilizados que não se mostraram adequados para monitorar os níveis de líquidos na célula experimental uma vez que foram concebidos para avaliar de forma simultânea as pressões de gases e líquidos na massa de resíduos, conforme citado por Maciel (2009), porém forneceram indicações de variações comparativas entre as três áreas de cada camada de cobertura.

## **4.5 EMISSÕES DE BIOGÁS**

### **4.5.1 Emissões de biogás na camada metanotrófica (MET)**

Na camada MET01 o grau de compactação (GC) medido nos locais dos ensaios, variou de 82,6% a 116,6% com média de 95,9% e na MET02 o grau de compactação variou de 72,6% a 105,3%, com média de 93,4%. As Tabelas 26 e 27 apresentam os resultados das medidas de campo para a camada metanotrófica separada por subtipo MET01 e MET02 e a Figura 112 mostra os resultados de fluxo de CH<sub>4</sub> na camada metanotrófica MET01 e MET02 juntamente com os dados de precipitação.

Tabela 26: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica – Camada MET01

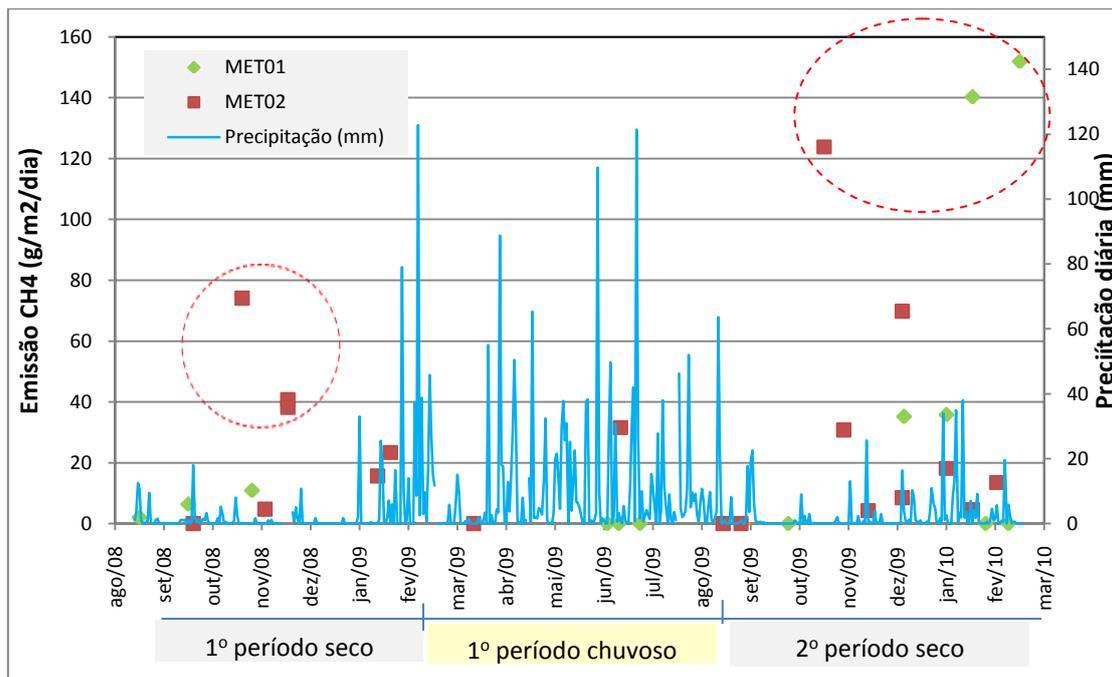
Período/ Ensaio	Data	E (m)	CH <sub>4</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)	w (%)	GC (%)	S (%)		Contato solo/resíduo			ΔP (Pa)	Pressão Atm. (kPa)	
							0,10 m	>0,30 m	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>			
1º período seco	EP01	04/09/2008	0,60	2,1	47,0	33,4*	82,6	73,8	87,4	54,0	42,0	1,0	-	100,0
	EP12	07/10/2008	0,60	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	100,8
	EP19	12/11/2008	0,60	10,9	80,2	11,0	86,1	34,1	51,5	7,3	6,2	14,7	-	100,6
1º Período chuvoso	EP40	28/03/2009	0,60	0,0	nd	21,8	96,5	72,0	-	-	-	-	-	100,4
	EP48	18/06/2009	0,60	0,0	0,00	22,6	91,3	52,3	-	38,0	27,0	7,0	-	100,5
	EP50	25/06/2009	0,65	0,0	38,0	32,2	100,7	91,2	89,0	57,0	40,0	0,7	-	100,1
	EP54	08/07/2009	0,60	0,0	0,00	38,4	93,9	93,9	93,6	35,0	25,0	7,9	-	100,9
	EP63	28/08/2009	0,55	0,0	16,9	20,5	116,6	82,1	79,0	44,0	35,0	3,4	-	101,0
2º período seco	EP70	09/09/2009	0,60	0,0	0,0	25,9	97,3	88,2	77,6	53,0	33,0	0,8	-	100,7
	EP73	07/10/2009	0,50	0,0	58,1	11,8	91,3	65,7	73,7	52,0	37,0	1,0	0	100,9
	EP89	17/12/2009	0,60	35,2	130,5	20,0	89,8	59,0	57,7	52,0	39,0	0,8	6	100,7
	EP91	12/01/2010	0,60	35,8	297,6	22,3	97,1	59,7	56,7	53,0	40,0	0,3	3	100,6
	EP101	28/01/2010	0,60	140,3	405,0	13,0	90,9	29,8	62,4	57,0	39,0	0,5	51	100,5
	EP113	19/02/2010	0,65	0,0	100,8	18,5	105,4	72,5	62,4	8,8	23,5	0,7	0	100,7
	EP117	26/02/2010	0,60	151,9	644,7	15,2	102,8	51,0	61,5	54,0	33,0	0,5	48	100,3

EP = nomenclatura utilizada para identificar o ensaio de placa; E = Espessura da camada (no local do ensaio); w = umidade gravimétrica (base seca); \*umidade determinada nos primeiros 10 cm da camada; GC= grau de compactação; S=Grau de saturação; ΔP = gradiente de pressão; Patm = Pressão atmosférica

Tabela 27: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica - Camada MET02

Ensaio/ Camada	Data	E (m)	CH <sub>4</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)	w (%)	GC (%)	S (%)		Contato solo/resíduo			ΔP (Pa)	Pressão Atmosf. (kPa)	
							0,10 m	>0,30 m	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>			
1º período seco	EP04	04/10/2008	0,45	6,4	54,9	14,2	-	24,7	40,5	3,4	2,8	20,5	-	101,1
	EP07	07/10/2008	0,65	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	101,0
	EP18	06/11/2008	0,50	74,1	100,6	15,8	98,9	53,0	-	-	-	-	-	100,7
	EP23	20/11/2008	0,45	4,7	44,0	11,3	72,6	20,5	-	-	-	-	-	100,4
	EP25	04/12/2008	0,50	40,8	115,8	7,6	105,3	29,6	30,7	55,0	41,0	0,9	-	100,6
	EP26	04/12/2008	0,65	38,3	111,4	8,4	92,9	24,6	-	-	-	-	-	100,5
	EP33	28/01/2009	0,50	15,7	98,4	8,5	86,3	29,9	31,7	36,0	30	4,6	-	100,6
	EP36	05/02/2009	0,45	23,4	61,7	20,9	97,1	67,3	-	-	-	-	-	100,4
1º per. chuvoso	EP53	26/06/2009	0,55	31,6	124,8	20,1	89,4	54,2	51,0	58,0	41,0	0,6	-	100,9
	EP64	28/08/2009	0,55	0,0	16,6	26,6	87,4	95,5	89,4	54,0	35,0	1,4	-	100,8
	EP65	28/08/2009	0,60	0,0	0,0	21,9	104,9	80,4	-	55,0	27,0	1,3	-	100,7
2º período seco	EP67	08/09/2009	0,45	0,0	124,6	17,3	91,3	54,7	74,9	55,0	39,0	0,4	-	100,9
	EP77	29/10/2009	0,40	123,8	343,5	3,6	92,7	10,4	32,2	23,0	15,2	3,2	0	100,3
	EP78	10/11/2009	0,50	30,8	92,1	7,0	96,6	22,2	39,9	15,5	13,0	10,8	0	100,7
	EP83	25/11/2009	0,50	4,3	67,8	19,6	87,9	50,6	-	23,0	28,0	4,5	0	100,7
	EP87	16/12/2009	0,55	8,5	71,7	13,4	95,5	41,4	40,3	18,0	24,0	2,0	0	100,6
	EP88	16/12/2009	0,55	69,8	193,1	14,1	94,2	42,4	39,7	12,6	18,0	8,9	3	100,4
	EP92	12/01/2010	0,55	18,1	99,6	17,9	86,2	44,8	50,3	27,0	31,0	3,8	6	100,5
	EP102	28/01/2010	0,55	4,5	100,2	15,7	102,9	58,0	-	18,0	28,0	1,6	0	100,5
	EP105	05/02/2010	0,55	0,0	60,7	15,1	90,2	68,2	64,5	20,5	30,0	0,8	3	100,6
EP111	12/02/2010	0,55	13,5	99,9	12,7	103,6	34,4	-	35,0	30,0	0,5	6	100,4	

EP = nomenclatura utilizada para identificar o ensaio de placa; E = Espessura da camada (no local do ensaio); w = umidade gravimétrica (base seca); GC= grau de compactação; S=Grau de saturação; ΔP = gradiente de pressão; Patm = Pressão atmosférica



**Figura 112: Precipitação e emissões de CH<sub>4</sub> na MET01 e MET02**

Observa-se que os dois tipos de cobertura metanotrófica apresentaram emissões de CH<sub>4</sub> de até 75 g/m<sup>2</sup>.dia no primeiro período seco que coincidiu com baixas precipitações e com o período inicial de instalação das camadas de cobertura, onde houve predominância de menores emissões CH<sub>4</sub> pela MET01. No segundo período seco a MET01 apresentou fluxos de maior magnitude, atingindo emissões de até 151 g/m<sup>2</sup>.dia, sugerindo perda de desempenho ao longo de ciclos umedecimento e secagem.

No primeiro período seco o maior fluxo de CH<sub>4</sub> medido na MET01 foi de 10,9 g/m<sup>2</sup>.dia, apresentando em alguns pontos baixa concentração de biogás no contato solo/resíduo. O menor fluxo de biogás do ensaio EP01 se deve a esse ensaio ter sido realizado no início da estação seca, onde o grau de saturação acima de 85% na camada de base de solo compactado condicionou menor permeabilidade ao ar, como visto na curva de permeabilidade, onde para saturação entre 85% a 90% o fluxo caiu drasticamente, logo esse fato permitiu a maior retenção do biogás, do que no EP19.

No o EP12 onde não foi feita determinação das características do solo, sua localização nas proximidades do ensaio EP70 realizado no período seco seguinte, mostra grau de compactação de 97,3%, bem superior aos apresentados pelos ensaios EP01 e EP19 que apresentaram fluxo de biogás.

Na camada MET02 ocorreram os dois maiores fluxos de  $\text{CH}_4$  medidos no primeiro período seco (EP18 e EP25 indicados na Figura 114) de  $74,1 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$  e  $40,8\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ , respectivamente. Esses maiores fluxos de biogás na MET02 foram registrados entre os meses de novembro e dezembro de 2008, quando se observou o maior déficit hídrico na região no período e se localizaram na parte central da camada, com espessura entre 0,50 m a 0,55 m, com solo bastante ressecado e pouca vegetação, ao contrário das características da MET01, no mesmo período. Além disso, nessa região foram observadas fissuras de grandes dimensões, como pode ser visto na Figura 113, concentradas em uma única região, o que pode explicar os maiores fluxos de biogás medidos nessas proximidades.



**Figura 113: Fissuras na camada MET02 em 04.12.2008 (primeiro período seco)**

Observa-se que no período seco, onde predominam baixos teores de umidade (maiores sucções), o solo apresenta grau de saturação baixo e, portanto, maior permeabilidade ao ar, como foi mostrado na curva teórica de permeabilidade ao ar, justificando o fluxo de biogás apresentado pelas camadas metanotróficas MET01 e MET02 nesse período.

No período chuvoso (de março a agosto de 2009) à alta precipitação, o balanço hídrico foi positivo e acima de 100 mm em mais de 80% do tempo, promovendo maiores umidades em todo perfil da camada de cobertura, e, portanto, não se detectou fluxo de  $\text{CH}_4$  na camada MET01. Nesse período, o solo da MET01 nos locais dos ensaios, apresentou grau de compactação acima de 90% e saturação acima de 89% na camada com composto, nos ensaios com fluxo nulo (EP50 e EP54), onde a permeabilidade ao ar é mínima para essa faixa de saturação, como foi visto no

comportamento da curva de permeabilidade ao ar. No ensaio EP63, a camada com composto e a camada de base em solo compactado apresentavam um grau de saturação acima de 79% e um elevado grau de compactação (>110%), impedindo o fluxo.

No período chuvoso a MET02 apresentou fluxo de CH<sub>4</sub> de até 31,1 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo bem inferior aos apresentados no período seco, devido ao maior teor de umidade medidos no solo. No local onde foi medido fluxo de CH<sub>4</sub> (EP53) localiza-se uma área sem vegetação como é mostrado na Figura 114, onde também se deram os maiores fluxos no período seco anterior na MET02, e as fissuras mostradas na Figura 113. Observa-se também que nos ensaios onde aparece fluxo de biogás, seja de CH<sub>4</sub> ou de CO<sub>2</sub>, o grau de compactação é inferior a 90%.



**Figura 114: Vegetação na camada MET01 e MET02 em 28.04.2009**

Nesse período os teores de umidade superficial variaram de 20,5% a 38,4% na MET01 e de 20,2% a 26,6% na MET02, mostrando uma menor variação na camada com menor quantidade de composto, devido à menor retenção de água por esse material, como foi mencionado na curva de retenção de água. Toda a área da camada MET01 apresentou vegetação enquanto em alguns pontos da MET02 a vegetação era mais escassa, como é visto na Figura 114.

No segundo período seco monitorado (setembro de 2009 a fevereiro de 2010), o fluxo de biogás medido apresentou valores superiores ao do primeiro período seco. Foram realizadas quatro medidas de fluxo em conjunto com medidas de pressão e concentração em profundidade em um perfil instalado na camada MET01 em local

com intensa vegetação, e quatro medições em perfil instalado na camada MET02, com menor densidade de vegetação.

Nesse segundo período seco o fluxo de  $\text{CH}_4$  na MET01 variou de 0,0 a 151,9  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  e de  $\text{CO}_2$  foi de 0,0 a 644,7  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ . A umidade superficial variou de 11,8% a 25,9% para a MET01, confirmando uma variação nos teores de umidade inferior ao primeiro período seco, decorrente de uma maior deficiência hídrica (-371,2 mm).

Os ensaios EP70, EP73 e EP113, foram realizados em locais aleatórios na camada MET01, onde existia intensa vegetação. Esses ensaios apresentaram fluxo de  $\text{CH}_4$  nulo. Nos ensaios EP70 e EP73 as concentrações no contato solo/resíduo foram típicas de biogás de aterros de RSU, com concentração de  $\text{CH}_4$  da ordem de 53%, enquanto que no EP113 a concentração foi muito baixa.

Os ensaios EP89 e EP91 apresentaram fluxos de  $\text{CH}_4$  de mesma magnitude (35,20  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  e 35,84  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  respectivamente), com baixo gradiente de pressão durante os ensaios (6 e 3 Pa) e grau de saturação médio de aproximadamente 60% tanto na camada de solo compactado quanto na de composto. Nas mesmas imediações, o EP101 e EP117 apresentaram fluxos de  $\text{CH}_4$  de 140,3  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  e 151,9  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  respectivamente. Esses maiores fluxos apresentados foram condicionados por alta concentração de biogás, menor grau de saturação conduzindo a maior permeabilidade ao ar nos dois materiais, além de maior gradiente de pressão na interface solo/resíduo (51 Pa e 48 Pa).

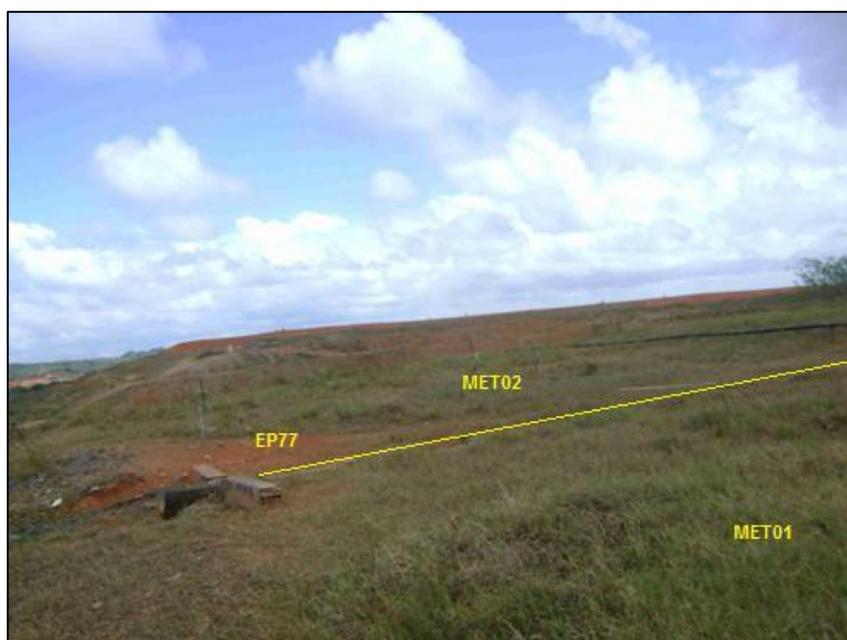
No segundo período seco o fluxo de  $\text{CH}_4$  na camada MET02 o variou de 0,0 a 123,8  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  com umidade de 3,6% a 19,6%. Dos dez ensaios realizados, oito apresentaram fluxos de  $\text{CH}_4$  de até 20,0  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ . Salienta-se que as concentrações de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  no contato solo/resíduo também foram menores nessa região, com gradiente de pressão de até 6 Pa, o que pode justificar fluxos mais baixos do que a MET01, nesse período.

Os ensaios EP67 e EP105 não apresentaram fluxo de  $\text{CH}_4$ , enquanto os ensaios EP83, EP87 e EP102 apresentaram fluxo de  $\text{CH}_4$  abaixo de 10  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  com concentrações de biogás no contato solo resíduo abaixo de 23% de  $\text{CH}_4$  e 30% de  $\text{CO}_2$  e um gradiente de pressão nulo em todos os ensaios.

Os ensaios EP92 e EP111 apresentaram fluxos de  $\text{CH}_4$  de magnitude semelhante de 18,1  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  e 13,5  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  respectivamente, com mesma espessura de camada e mesmo gradiente de pressão (6 Pa) e os ensaios EP78 e EP88

apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> de 30,8 g/m<sup>2</sup>.dia e 69,8 g/m<sup>2</sup>.dia respectivamente, com maior presença de O<sub>2</sub> na base da camada indicando fissuras na região do ensaio, e portanto maiores fluxos de CH<sub>4</sub>.

O ensaio EP77, apresentou maior fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no período de 123,8 g/m<sup>2</sup>.dia e 343,5 g/m<sup>2</sup>.dia respectivamente, embora apresente baixas concentrações de biogás no contato solo/resíduo. Esse fluxo pode ser atribuído a uma menor espessura da camada (40 cm) pelas proximidades com a calha central, aliada a uma baixíssima umidade no dia do ensaio. Nesse ensaio também foi verificado fissuras nas proximidades e falta de vegetação no entorno do ensaio como pode ser visto na Figura 115.



**Figura 115: Aspectos das camadas MET01 e MET02 e ensaio EP77 (29.10.09)**

Também pode se observar que, embora com baixas precipitações verificadas no período (a exceção de janeiro/10), a MET01 esteve com sua área completamente coberta com vegetação, enquanto a MET02 apresentou áreas descobertas e aproximadamente 85% da área com vegetação, como pode ser visto na Figura 116.



Figura 116: Camada metanotrófica em 28.01.2010

A Figura 117 é mostra a curva teórica de permeabilidade ao ar em função da saturação, para cada material que compõe a camada MET01, e a relação entre a emissão de  $\text{CH}_4$  e a saturação no momento dos ensaios nessa camada, para camada superficial (verde) e para a camada inferior de solo compactado (vermelho) com indicação dos ensaios de maior magnitude.

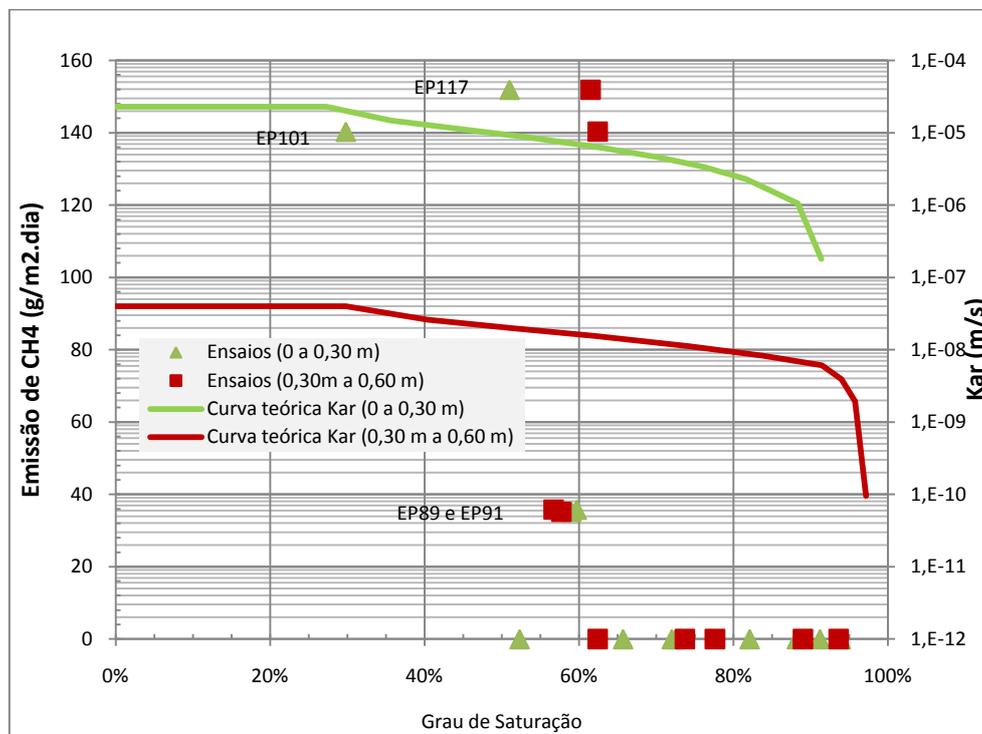
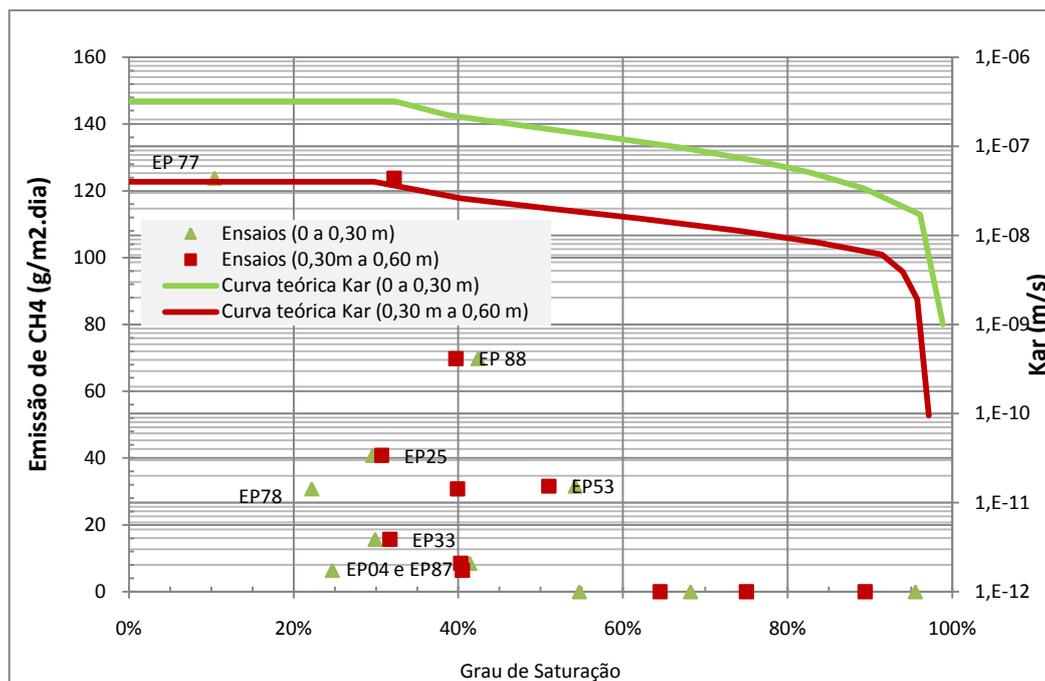


Figura 117: Variação de Emissão de  $\text{CH}_4$  e permeabilidade ao ar (teórica) com o grau de saturação na camada MET01

Observa-se que de um modo geral que na MET01 as maiores emissões se deram quando tanto a camada superficial quanto a de base se encontrava com grau de saturação abaixo de 62%. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 27 e a Figura 117 verificou-se que, em 83% dos casos onde a emissão de CH<sub>4</sub> foi nula, o grau de saturação na camada de base se encontrava acima de 75%, sendo um indicativo que a camada de solo compactado funcionou como uma barreira inicial ao fluxo, propiciando então uma vazão menor para ser retida e/ou oxidada na camada superficial que tem mistura de solo e composto.

A Figura 118 mostra a curva teórica de permeabilidade ao ar em função da saturação, para cada material que compõe a camada MET02, e a relação entre a emissão de CH<sub>4</sub> e a saturação no momento dos ensaios nessa camada (pontos verdes - camada superficial e pontos vermelhos camada de solo compactado) com indicação dos ensaios de maior magnitude.



**Figura 118: Variação de Emissão de CH<sub>4</sub> e permeabilidade ao ar (teórica) com o grau de saturação na camada MET02**

Da mesma forma que a MET01, observa-se que de um modo geral as maiores emissões de CH<sub>4</sub> na MET02 foram medidas para grau de saturação no perfil do solo inferior a 60%. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 28 e a Figura

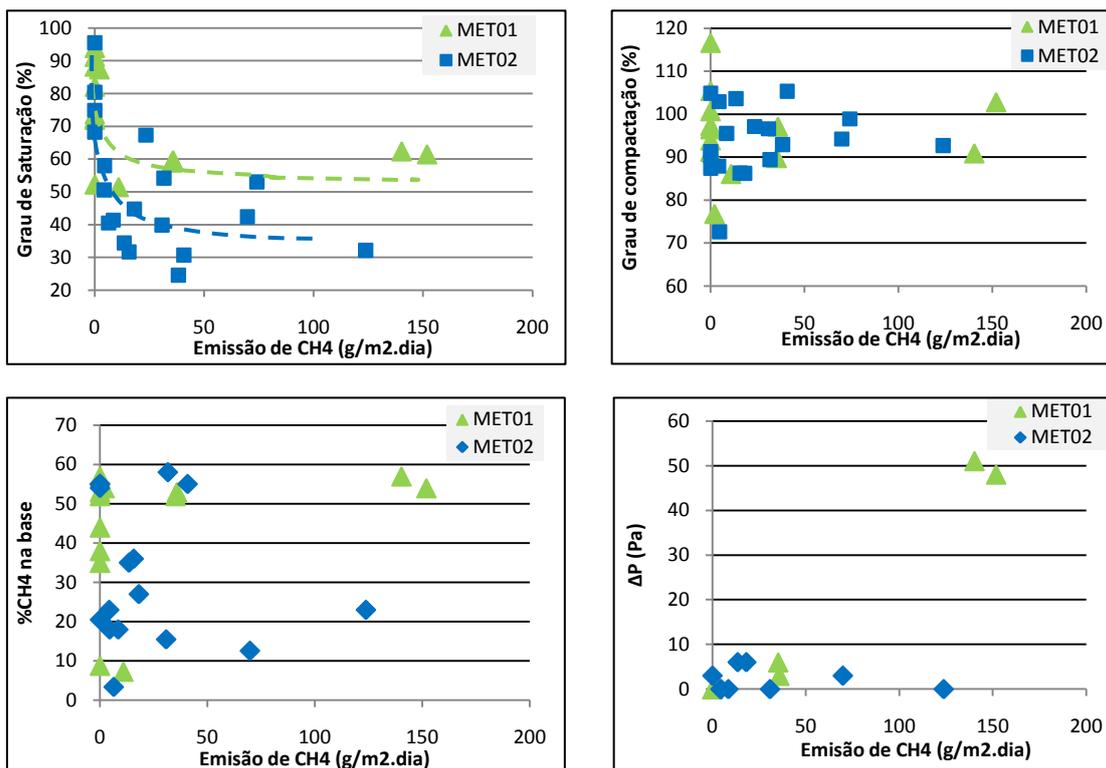
120 a emissão de CH<sub>4</sub> foi nula quando se tinha grau de saturação da camada de base (solo compactado) acima de 75% ou concentração de CH<sub>4</sub> na base de 20%.

As emissões de CH<sub>4</sub> medidas na superfície das camadas MET01 e MET02, de até 151 g/m<sub>2</sub>.dia estão dentro da faixa de variação apresentada por Huber-Humer (2004), de 0,2 a 173,9 g/m<sup>2</sup>.dia, em experimentos com materiais similares às MET01 e MET02 (0,30 m de composto de lodo de esgoto sobreposto à 0,30 m de solo compactado), embora nesse experimento houvesse extração forçada de biogás, que favorece menores as emissões. Também são inferiores às apresentadas pelos mesmos autores para camadas compostas com 0,40 m de composto de lodo de esgoto sobre 0,30 m de cascalho.

Bogner *et al.* (1995) também apresentou emissões de CH<sub>4</sub> a acima das medidas nas camadas MET01 e MET02, mesmo utilizando camada com espessura superior 0,60 m. Da mesma forma, as emissões medidas nas camadas MET01 e MET02 são bem inferiores aos apresentados por Maciel (2003) em camada de solo compactado em período chuvoso, que variou de 102 a 363 g/m<sup>2</sup>.dia.

Verifica-se, portanto que o comportamento das camadas metanotróficas decorre da associação dos dois tipos de materiais, onde a camada de solo compactado, na parte inferior da camada, funcionou como uma barreira inicial ao fluxo. Para períodos secos além do grau de saturação da camada com composto, outros fatores podem ter exercido influência nas emissões de CH<sub>4</sub> tais como gradiente de pressão e oxidação de CH<sub>4</sub>. Para períodos chuvosos, grau de saturação acima de 85% apresentados, tanto na camada com composto quanto na camada de solo compactado, impediram o fluxo nas configurações MET01 e na MET02, enquanto para que para a configuração MET02 o maior fluxo medido foi de 31 g/m<sup>2</sup>.dia quando os materiais apresentavam saturação por volta de 50%, indicando que, mesmo em baixa saturação, a presença de composto exerceu influência na redução de emissões de CH<sub>4</sub>.

A Figura 119 mostra a relação entre emissões de CH<sub>4</sub> e os principais fatores de influência nas emissões de CH<sub>4</sub>: grau de saturação, grau de compactação, concentração de CH<sub>4</sub> na base e gradiente de pressão.



**Figura 119: Variação de grau de saturação, grau de compactação, concentração de CH<sub>4</sub> na base e gradiente de pressão com as emissões de CH<sub>4</sub> nas camadas MET01 e MET02**

Os fatores que apresentaram tendência de melhor correlação com as emissões na MET 01 foi o grau de saturação e o gradiente de pressão (-0,40 e 0,98 respectivamente). Verifica-se que nos dois tipos de camada metanotrófica, o grau de saturação apresentou uma tendência de maiores emissões de CH<sub>4</sub> para menores graus de saturação. Para saturação acima de 65%, pequena ou nenhuma emissão de CH<sub>4</sub> foi medida, tanto na MET01 e MET02. Para grau de saturação inferior a esse valor outros fatores influenciaram conjuntamente nas taxas de emissão tais como gradiente de pressão acima de 50 Pa e concentração de CH<sub>4</sub> na base acima de 50%. Provavelmente isso se deve a menor porosidade dessa camada que permite maiores trocas gasosas com o meio ambiente, sofrendo maior influência das variações de pressão e temperatura.

Com relação ao CO<sub>2</sub> as camadas metanotróficas apresentaram fluxo durante todo o ano, com variações de 0 a 80,2 g/m<sup>2</sup>.dia na MET01 e de até 115,8 g/m<sup>2</sup>.dia na MET02, no primeiro período seco. Mesmo no período chuvoso foi medido fluxo de CO<sub>2</sub> nas duas camadas metanotróficas e no segundo período seco houve aumento substancial de fluxo de CO<sub>2</sub> na camada MET01, atingindo valores de até 644,7

g/m<sup>2</sup>.dia e de até 343,5 g/m<sup>2</sup>.dia na MET02. Em média as emissões de CO<sub>2</sub> são 8 vezes superior a de CH<sub>4</sub> na MET01 e 6,6 vezes na MET02.

Park e Shin (2001), Maurice e Laverkgevinsk (2003) e Christhopsen *et al.* (2000) também confirmam medidas emissões de CO<sub>2</sub> durante todas as estações do ano em cobertura de aterros e que, de uma maneira geral, as emissões de CO<sub>2</sub> em períodos chuvosos são inferiores às do período seco, tanto devido a diminuição de fluxo em função de maiores umidades, quanto pela diminuição da atividade de oxidação como citado por Boeckx *et al.*, (1996) e Borjesson e Svensson (1997).

#### 4.5.2 Emissões de biogás na barreira capilar (BAC)

A barreira capilar apresentou em todo o período monitorado umidade superficial variando em função dos condicionantes climatológicos com maiores umidades medidas na camada superficial. A Figura 120 mostra as características da camada com a presença da vegetação que foi se estabelecendo desde o início do monitoramento, a Tabela 28 apresenta os resultados dos dados de campo medidos na barreira capilar e a Figura 121 mostra a variação do fluxo de CH<sub>4</sub> na barreira capilar (BAC).



Figura 120: Presença de vegetação na barreira capilar em diversos períodos

Tabela 28: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica – Barreira Capilar (BAC)

Ensaio/ Camada	Data	E (m)	CH <sub>4</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>2</sup> .dia)	w (%)	GC (%)	S (%)		Concentração no contato solo/resíduo			ΔP (Pa)	P Atm. (kPa)	
							0,10 m	> 0,30 m	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>			
1º. Período seco	EP02	20/09/2008	0,65	4,9	0,0	15,8	107,7	59,8	72,4	25,0	12,4	15,5	-	101,1
	EP13	10/10/2008	0,65	63,4	119,1	-	-	-	-	-	-	-	-	100,8
	EP14	23/10/2008	0,75	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	101,0
	EP17	06/11/2008	0,70	1,8	0,0	14,2	94,4	55,3	-	-	-	-	-	100,8
	EP21	19/11/2008	0,60	41,7	112,3	11,1	98,7	48,6	-	-	-	-	-	100,2
	EP22	19/11/2008	0,60	20,2	43,5	6,3	85,6	19,6	-	-	-	-	-	100,3
	EP24	03/12/2008	0,55	0,0	35,5	5,0	86,7	17,3	17,2	35,0	26,0	8,1	-	100,2
	EP30	17/12/2008	0,80	0,0	0,0	10,0	81,2	42,5	47,6	7,2	23,5	2,2	-	100,5
	EP31	17/12/2008	0,80	11,6	87,6	9,6	78,6	37,2	29,8	13,6	14,0	12,6	-	100,3
	EP32	28/01/2009	0,65	0,0	0,0	14,7	99,2	66,9	55,7	19,0	19,0	11,0	-	100,6
1º. Período chuvoso	EP39	27/03/2009	0,60	6,7	nd	12,5	98,8	55,0	-	-	-	-	-	100,4
	EP47	18/06/2009	0,60	0,0	0,0	14,9	96,0	60,6	-	6,8	6,0	18,0	-	100,5
	EP49	25/06/2009	0,60	0,0	29,0	22,6	91,5	82,0	-	-	-	-	-	100,9
	EP52	26/06/2009	0,75	0,0	0,0	24,8	88,4	83,0	-	-	-	-	-	100,9
	EP56	09/07/2009	0,75	0,0	0,0	25,1	83,2	73,6	69,3	-	-	-	-	100,9
	EP60	27/08/2009	0,75	0,0	0,0	19,4	95,3	77,6	88,1	54,0	36,0	1,4	-	101,0
	EP61	27/08/2009	0,80	0,0	0,0	24,8	92,6	92,3	93,2	58,0	24,5	1,3	-	101,0
	EP62	27/08/2009	0,50	0,0	0,0	21,1	95,5	84,7	82,8	34,0	23,0	7,1	-	100,9

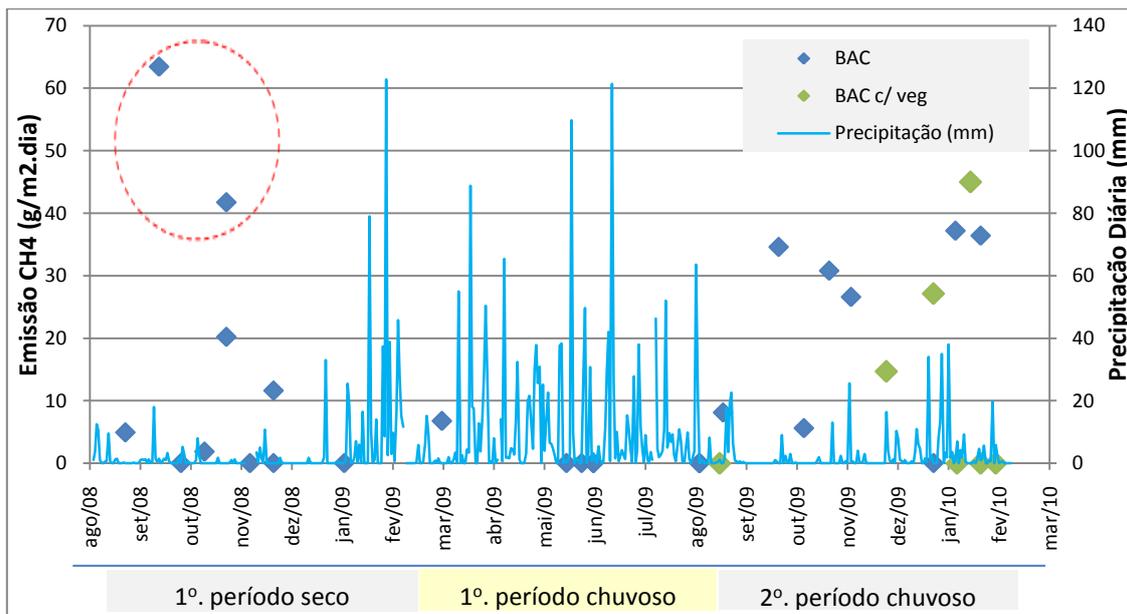
Tabela 28: Continuação

Ensaio/ Camada	Data	E (m)	CH4 g/m <sup>2</sup> .dia	CO2 g/m <sup>2</sup> .dia	w (%)	GC (%)	S (%)		Concentração no contato solo/resíduo			ΔP (Pa)	P Atm. (kPa)	
							0,10 m	>0,30 m	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>			
<b>SEM VEGETAÇÃO</b>														
2º. Período seco	EP71	10/09/2009	0,70	8,1	22,4	15,4	90,1	53,6	-	56,0	40,0	0,8	-	101,
	EP74	13/10/2009	0,80	34,6	83,1	16,0	73,6	36,8	42,2	55,0	39,0	0,7	-	100,7
	EP75	28/10/2009	0,60	5,6	0,0	9,0	89,1	60,0	52,7	13,6	17,5	4,4	0	100,4
	EP79	12/11/2009	0,70	30,8	75,6	7,8	85,2	23,9	47,6	53,0	34,0	0,7	0	100,5
	EP82	25/11/2009	0,70	26,6	49,0	15,1	85,0	53,6	47,2	17,0	25,0	8,0	-	100,8
	EP94	13/01/2010	0,70	0,0	99,8	16,9	90,1	59,3	52,2	38,0	31,0	0,6	0	100,7
	EP99	26/01/2010	0,70	37,0	205,6	15,2	85,1	46,8	47,4	55,0	39,0	2,7	12	100,5
	EP109	10/02/2010	0,70	36,3	233,9	13,2	90,9	61,1	47,7	56,0	38,0	0,5	9	100,1
<b>COM VEGETAÇÃO</b>														
2º. Período seco	EP68*	08/09/2009	0,60	0,0	0,0	20,1	96,8	83,9	87,2	45,0	35,0	1,6	-	100,6
	EP86*	16/12/2009	0,70	14,6	32,3	13,0	88,2	43,2	42,9	17,5	20,5	9,3	48	100,7
	EP93*	13/01/2010	0,60	27,1	66,2	11,6	88,2	38,4	36,3	40,0	33	1,8	0	100,8
	EP100*	27/01/2010	0,60	0,0	0,0	17,6	86,9	47,4	56,6	8,4	18,5	5,8	9	100,5
	EP104*	04/02/2010	0,60	45,0	148,2	14,1	98,6	61,6	-	33,5	33,0	0,6	6	100,6
	EP108*	10/02/2010	0,60	0,0	0,0	17,6	90,9	61,4	-	15,4	18,5	9,3	0	100,2
	EP114*	19/02/2010	0,70	0,0	0,0	15,4	94,9	64,5	51,5	32,0	31,0	0,8	24	100,7

EP = nomenclatura utilizada para identificar o ensaio de placa; E = Espessura da camada (no local do ensaio); w = umidade gravimétrica (base seca); GC = grau de compactação; S = Grau de saturação; ΔP = gradiente de pressão; Patm = Pressão atmosférica

\*Ensaio realizado no perfil com vegetação (0,40 m de solo + 0,20 m de pedras)

Obs.: para os ensaios na camada com vegetação os sensores estavam instalados na profundidade de 0,25 m



**Figura 121: Precipitação e emissões de CH<sub>4</sub> na BAC**

O grau de compactação (GC) verificado nos locais dos ensaios da barreira capilar variou de 73,6% a 107,7% com média de 90,6%. Como pode ser visto na Figura 123, em todos os períodos monitorados, a BAC apresentou emissões de até 63,4 g CH<sub>4</sub> /m<sup>2</sup>.dia, com valores inferiores que as emissões medidas na camada MET01 e MET02. A presença das pedras na interface com os resíduos funcionou como um dreno horizontal, minimizando as concentrações de biogás na interface pedra/geotêxtil/solo. Como pode se verificar, no segundo período seco a barreira capilar manteve seu desempenho, apresentando emissões de CH<sub>4</sub> de mesma magnitude, inferior às apresentadas no primeiro período seco, com tendência de maiores emissões no segundo período seco localizadas nas áreas sem vegetação.

Os teores de umidade superficial no primeiro período seco (setembro de 2008 a fevereiro de 2009) variaram de 5,0% a 15,8% com uma média de umidade no período de 10,8% e desvio padrão de 3,9%. Embora essa camada tenha apresentado umidade superficial média inferior às camadas MET01 e MET02 no mesmo período, a dispersão dos teores de umidade foi inferior, o que provocou menor efeito em termos de contração do solo, pois não foram observadas fissuras de grande magnitude como na MET02.

Dos dez ensaios realizados no primeiro período seco, apenas dois pontos apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> acima de 40 g/m<sup>2</sup>.dia. Nesse período não foram medidos os gradientes de pressão e em apenas 50% dos ensaios foram medidas as

concentrações de biogás na base da cobertura. Observa-se que os maiores fluxos de  $\text{CH}_4$  se deram nas proximidades da calha central (EP21, localizado em área sem vegetação, com fluxo de  $41,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ ) e na divisão da barreira capilar com a camada metanotrófica (EP13 com fluxo de  $\text{CH}_4$  de  $63,4 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$  e EP22 com fluxo de  $20,2 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ ). Os demais ensaios apresentaram fluxos nulo ou de até  $11,6 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ . Provavelmente a descontinuidade da presença das pedras na base da cobertura nos ensaios EP13 e EP22, e a menor espessura no EP21, devido à inclinação da cobertura em direção à calha, geraram caminhos preferenciais para o biogás.

Embora não se tenha dados do solo no ensaio EP13, ele se localiza nas proximidades do EP49 realizado posteriormente, que apresentou grau de compactação de 91,5%, em uma região com fissuras e pouca vegetação. Dessa forma os maiores fluxos medidos na BAC, no primeiro período seco, estão associados a um menor grau de compactação e de saturação. Nesse período a saturação na camada foi inferior a 72% e, tendo em vista o comportamento da curva de permeabilidade, nessa faixa de saturação, a permeabilidade ao ar se aproxima do valor máximo, com maior passagem de ar. Nos locais onde não se mediu fluxo observou-se maior espessura da camada e concentração de biogás no contato solo resíduo inferior a 35%.

No período chuvoso, compreendido entre março a agosto de 2009, a barreira capilar apresentou fluxo de  $\text{CH}_4$  apenas no mês de março, de  $6,75 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$  no ensaio EP39, quando o grau de saturação era de 55%, sendo nulo os demais fluxos medidos.

Nesse período, devido ao excedente hídrico de mais de 1.000 mm, como foi mostrado na Tabela 14, a barreira capilar apresentou grau de saturação acima de 80% em 75% dos ensaios realizados, o que provavelmente condicionou fluxos nulos, tendo em vista que se observa na curva de permeabilidade ao ar que para saturação entre 65% e 90%, há uma tendência de redução da permeabilidade ao ar para incrementos pequenos de umidade, e que, acima de 90% a passagem de ar é minimizada drasticamente impedindo a passagem de ar.

No ensaio EP47, embora a umidade superficial tenha se situado abaixo de 20%, o fluxo foi nulo, provavelmente devido à baixa concentração de biogás na base da camada (6,8%). Nesse período a barreira capilar também apresentou área coberta com vegetação, porém com regiões descobertas, principalmente na área próxima da calha central.

No segundo período seco, o fluxo de  $\text{CH}_4$  na barreira capilar variou de 0 a 45,0  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ . Foram realizados oito ensaios no perfil sem vegetação e sete ensaios no perfil com vegetação, além de dois ensaios em locais distribuídos na área da camada, porém nas proximidades do perfil sem vegetação. A Figura 122 mostra as duas áreas mencionadas.



Figura 122: Perfis de medição de concentração e pressão na barreira capilar (a) sem vegetação (b) com vegetação

a) **Área do perfil sem vegetação (BAC01):** Nesse perfil o fluxo de  $\text{CH}_4$  variou de 0,0 a 37,0  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ . O grau de saturação variou entre 55% e 84%, com 75% das medidas abaixo de 59%. O ensaio que apresentou fluxo de  $\text{CH}_4$  nulo (EP94) foi realizado no único mês que houve balanço hídrico positivo (janeiro 2010), com grau de saturação de 60%, grau de compactação de 90,1% e gradiente de pressão nulo. Para os ensaios com fluxo de  $\text{CH}_4$  inferior a 10  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ , as condicionantes podem ser maior umidade no ensaio EP71 e a baixa concentração de biogás na interface pedra/solo no EP75. Os ensaios de maior magnitude (EP74, EP79, EP99 e EP109), com variação de 30,6  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$  a 37,0  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ , foram relacionados com altas concentrações de biogás no contato solo/resíduos e grau de compactação inferior a 90%, principalmente nos

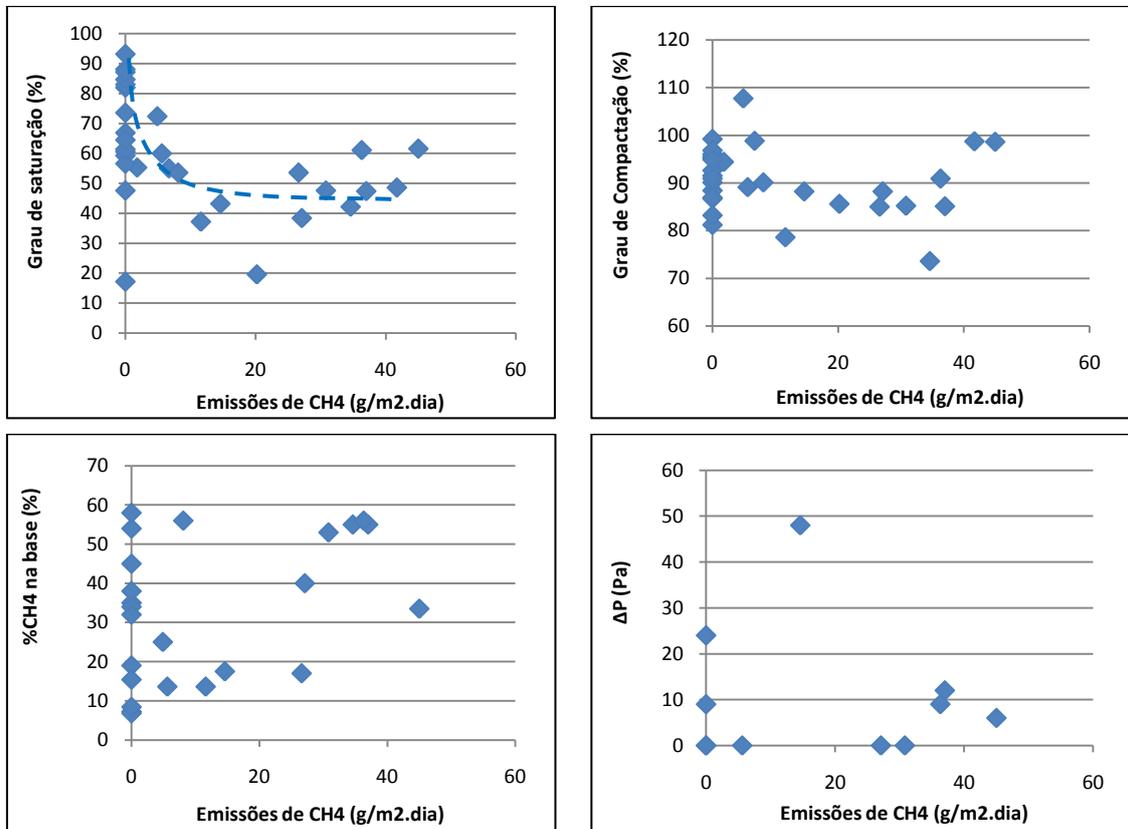
ensaios realizados nas proximidades do talude lateral (GC<85%), onde as dificuldades de compactação geram fluxos laterais, além da presença de fissuras que foram observadas no entorno do local, condicionando assim emissões de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub>.

b) **Área do perfil com vegetação (BAC02):** Nesse perfil o fluxo de CH<sub>4</sub> variou de 0,0 a 45,0 g/m<sup>2</sup>.dia com umidade superficial variando de 15,6% ± 3,0%. Nesse período o sensor de umidade apresentou defeito e em apenas quatro dos sete ensaios foram feitas medidas de umidade em profundidade. A saturação média nesse perfil foi de 51% ± 16%, confirmando maiores variações de umidade em períodos secos para áreas com vegetação devido à evapotranspiração potencial. Dos sete ensaios realizados, quatro não apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub>. Para os ensaios com fluxo nulo os fatores que mais influenciaram foram grau de saturação acima de 65% e grau de compactação acima de 95% no EP68 e EP114, e baixa concentração de CH<sub>4</sub> na interface solo/pedras no EP100 e EP108. O EP93 apresentou fluxo de CH<sub>4</sub> de 27,1 g/m<sup>2</sup>.dia e foi onde se verificou menor grau de saturação no período e alta concentração de biogás no contato solo/pedras. O EP104 foi o que apresentou maior fluxo de CH<sub>4</sub> de 45,0 g/m<sup>2</sup>.dia embora apresente umidade similar a outros ensaios com fluxo menor, sugerindo fissuras nas proximidades, tendo em vista que se deu em período seco. Convém salientar que nesse perfil, as concentrações de biogás medidas são, na maioria das vezes, inferiores às apresentadas no perfil sem vegetação devido às medições serem feitas no dispositivo DMPC localizado na interface pedra/solo, e que em geral, a espessura total da camada é cerca de 0,10 m inferior ao perfil sem vegetação. Mesmo assim, esse perfil apresentou no mesmo período, menores emissões de CH<sub>4</sub> em relação ao perfil sem vegetação.

Com relação às emissões de CH<sub>4</sub> a BAC apresentou variação e 0 até 63 g/m<sup>2</sup>.dia em períodos secos e ausência de fluxo em períodos chuvosos. As emissões medidas são inferiores às apresentadas pelas camadas MET01 e MET02. Verificou-se em alguns pontos que a vegetação pode ter causado caminhos preferenciais, tendo em vista que nas proximidades do perfil BAC02 a espessura da camada de solo compactado foi de apenas 0,40 m. Mesmo assim, a região com vegetação apresentou ausência de fluxo em quatro dos seis ensaios realizados, em um período extremamente seco, enquanto na região sem vegetação, em apenas um ensaio não se detectou fluxo de CH<sub>4</sub>.

A Figura 123 mostra a relação entre emissões de CH<sub>4</sub> e os principais fatores que podem ter influenciado o fluxo de CH<sub>4</sub> tais como o grau de saturação, grau de

compactação, concentração de  $\text{CH}_4$  na base e gradiente de pressão abrangendo áreas com e sem vegetação.



**Figura 123: Fatores relacionados com a emissão de  $\text{CH}_4$  na barreira capilar**

O comportamento da BAC em termos de emissão de  $\text{CH}_4$  foi claramente relacionado com o grau de saturação e a presença de vegetação, como descrito nos resultados citados anteriormente. Para grau de saturação acima de 60% a barreira apresentou emissão abaixo de  $10 \text{ g/m}^2\text{.dia}$ , e acima de 70% ausência de fluxo de  $\text{CH}_4$ . As demais variáveis não apresentaram individualmente tendência a uma correlação com as emissões medidas na BAC.

Não existem muitas informações sobre emissões de biogás em barreiras capilares tendo em vista que elas são associadas a estudos como alternativas às camadas de solo compactado em relação à infiltração de águas. Mais recentemente alguns trabalhos reportam a barreira capilar com a adição de uma camada de solo e composto na superfície visando oxidação de  $\text{CH}_4$  e minimizar as emissões (BERGER *et al.*, 2005, BOHN e JAGER, 2009).

A variação de fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> medida na barreira capilar foi compatível com estudos apresentados na literatura em diversas condições de operação e espessura de solos compactados (JONES e NEDWELL, 1993; CHRISTOPHERSEN *et al.*, 2001; AKERMAN *et al.*, 2007). As emissões medidas de CH<sub>4</sub> nos períodos secos foram inferiores às determinadas em experimentos de campo por Fourie e Morris (2004), Scheutz *et al.* (2007) e Zhang *et al.* (2008), dentre outros autores, que reportam emissões de CH<sub>4</sub> em solos argilosos compactados com variações de -14 até 1.755 g/m<sup>2</sup>.dia.

A faixa de emissão de CH<sub>4</sub> apresentada pela BAC, em todos os períodos, foi inferior às apresentadas por Maciel (2003) e Mariano (2008) para coberturas de solo compactado, envolvendo estações secas e chuvosas, em aterros da mesma região da célula experimental. Já Scheutz *et al.* (2003b) apresentam emissões de CH<sub>4</sub> variando de -0,01 a 10 g/m<sup>2</sup>.dia em camadas semelhante a uma barreira capilar, com 0,80 m de solo argiloso compactado acima de uma camada de 0,40 m de areia, porém com extração de biogás, o que influencia significativamente na minimização das emissões.

Com relação ao CO<sub>2</sub> a barreira capilar apresentou fluxo durante todo o ano com variações de 0 a 119,1 g/m<sup>2</sup>.dia no primeiro período seco e de 0 a 233,9 g/m<sup>2</sup>.dia no perfil sem vegetação, e de 0 a 148,2 g/m<sup>2</sup>.dia no perfil com vegetação, no segundo período seco. No período chuvoso em apenas um ensaio foi medido fluxo de CO<sub>2</sub> de 29 g/m<sup>2</sup>.dia sendo em média as emissões de CO<sub>2</sub> na barreira capilar 2,7 vezes superiores às de CH<sub>4</sub>.

#### **4.5.3 Emissões de biogás na camada convencional (CONV)**

A camada convencional apresentou durante todo o período monitorado uma umidade variando em função dos condicionantes climatológicos, com menores variações de umidade na camada superficial, como também demonstrado na barreira capilar.

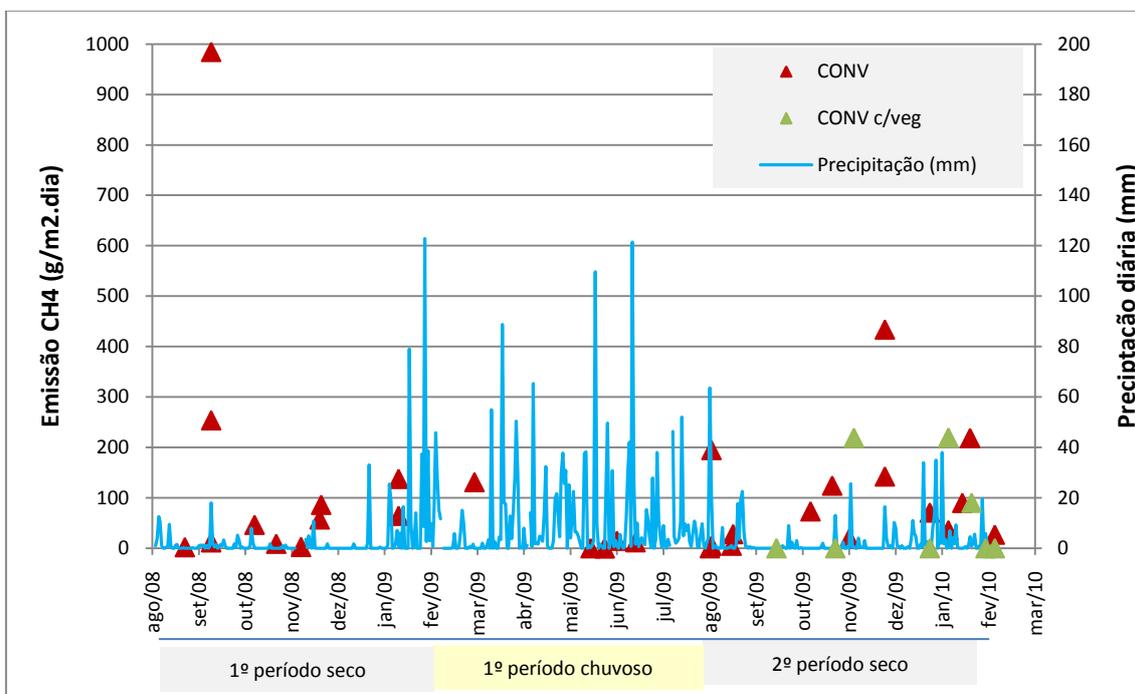
O grau de compactação (GC) determinados nos locais dos ensaios na camada convencional variou de 73,3% a 110,3% com média de 93,6%. Nessa camada, a vegetação se estabeleceu apenas em pontos próximos à camada metanotrófica e só após o primeiro período de chuvas de 2009. A camada convencional apresentou extensas áreas ressecadas e sem vegetação, nos períodos secos, com fissuras

superficiais menores, porém com maior densidade por área que na MET02, e algumas de grande magnitude, como mostrada na Figura 124.



**Figura 124: Camada convencional em períodos secos e presença de fissuras**

A Figura 125 mostra os resultados de fluxo de CH<sub>4</sub> medido durante os três períodos monitorados juntamente com os dados de precipitação, assim como são mostrados na Tabela 29, o fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e os dados da camada no dia do ensaio, para cada período monitorado.



**Figura 125: Precipitação e emissão de CH<sub>4</sub> na camada convencional**

Tabela 29: Fluxo de biogás e parâmetros de solo e pressão atmosférica na camada convencional (CONV)

Ensaio/ Camada	Data	E (m)	CH <sub>4</sub> g/m <sup>2</sup> .dia	CO <sub>2</sub> g/m <sup>2</sup> .dia	w (%)	GC (%)	S (%)		Concentração de biogás sob a cobertura			ΔP (Pa)	P Atm. (kPa)	
							0,10 m	>0,30 m	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>			
1º. Período seco	EP03	20/09/2008	0,70	2,1	6,7	14,1	103,0	46,5	47,5	55,0	40,0	0,9	-	101,1
	EP05	07/10/2008	0,55	253,8	1063,6	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	100,9
	EP09	07/10/2008	0,75	984,7	1899,7	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	101,0
	EP11	07/10/2008	0,70	11,7	37,1	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	100,8
	EP16	04/11/2008	0,75	46,6	147,1	13,2	93,5	46,8	nd	nd	nd	nd	-	100,8
	EP20	18/11/2008	0,75	8,9	35,4	11,4	94,9	42,0	nd	nd	nd	nd	-	100,6
	EP27	04/12/2008	0,80	2,6	36,0	9,5	93,7	49,3	56,0	7,4	7,4	17,6	-	100,2
	EP28	16/12/2008	0,60	57,2	163,1	4,6	92,9	52,8	56,7	55,0	40,0	1,2	-	100,2
	EP29	17/12/2008	0,65	86,2	238,3	10,7	83,1	37,8	37,3	55,0	40,0	1,0	-	100,5
	EP34	05/02/2009	0,85	137,6	262,0	17,0	103,7	79,0	nd	nd	nd	nd	-	100,6
EP35	05/02/2009	0,70	64,3	144,8	20,5	93,5	73,0	nd	nd	nd	nd	-	100,4	
1º. Período chuvoso	EP38	26/03/2009	0,65	131,2	360,3	11,5	94,7	42,2	nd	nd	nd	nd	-	100,3
	EP44	09/06/2009	0,65	0,0	57,4	13,6	95,6	51,0	nd	11,4	9,0	16,6	-	100,5
	EP45	18/06/2009	0,70	0,0	102,7	18,1	85,6	56,9	nd	0,7	0,8	20,6	-	100,8
	EP46	18/06/2009	0,80	0,0	0,0	14,2	93,1	49,9	nd	58,0	41,0	0,6	-	100,7
	EP51	26/06/2009	0,80	14,8	61,8	19,6	95,9	73,9	67,9	nd	nd	nd	-	100,9
	EP55	08/07/2009	0,65	11,9	56,5	20,4	96,8	78,8	72,1	nd	nd	Nd	-	100,8
	EP57	25/08/2009	0,70	0,0	0,0	23,1	97,3	90,4	95,1	56,0	36,0	0,4	-	100,3
	EP58	26/08/2009	0,80	4,8	15,9	23,2	94,1	83,8	79,6	57,0	39,0	0,4	-	100,7
	EP59	26/08/2009	0,55	194,9	381,5	19,2	98,8	78,0	nd	56,0	37,0	0,4	-	100,6

Tabela 29 (Continuação)

Ensaio/ Camada	Data	E (m)	CH4 g/m <sup>2</sup> .dia	CO2 g/m <sup>2</sup> .dia	w (%)	GC (%)	S (%)		Concentração de biogás sob a cobertura			ΔP (Pa)	P Atm (kPa)	
							0,10 m	>0,30 m	%CH4	%CO2	%O2			
<b>SEM VEGETAÇÃO</b>														
2º. Período seco	EP66	08/09/2009	0,80	5,05	18,73	13,2	97,6	51,9	61,0	57,0	38,0	0,6	ND	100,9
	EP69	09/09/2009	0,60	27,99	49,26	8,1	100,3	34,1	-	55,0	35,0	0,6	ND	100,9
	EP76	29/10/2009	0,80	73,24	159,05	6,7	89,5	21,7	-	56,0	39,0	0,5	0	100,4
	EP80	12/11/2009	0,70	124,35	332,29	7,5	93,0	26,3	30,8	56,0	39,0	0,6	0	100,4
	EP81	23/11/2009	0,75	19,31	45,34	7,8	87,3	23,7	54,7	38,0	31,0	6,7	0	100,5
	EP84	16/12/2009	0,70	433,91	526,02	16,7	93,3	59,0	47,7	53,0	39,0	2,7	34	100,7
	EP85	16/12/2009	0,65	142,45	482,32	19,2	84,4	54,4	47,7	38,0	35,0	0,7	0	100,7
	EP95	14/01/2010	0,65	70,88	295,87	17,8	93,8	63,5	60,3	51,0	36,0	0,5	61	100,8
	EP97	26/01/2010	0,65	35,80	99,10	21,0	87,4	64,0	55,9	54,0	37,0	0,5	6	100,5
	EP103	04/02/2010	0,70	90,89	201,26	12,5	110,3	61,9	61,6	41,0	36,0	0,8	0	100,7
	EP106	09/02/2010	0,65	218,83	402,77	18,8	93,6	65,9	61,2	55,0	39,0	0,5	29	100,4
EP115	25/02/2010	0,65	27,00	148,54	13,6	93,6	61,1	61,2	53,0	38,0	0,5	6	100,3	
<b>COM VEGETAÇÃO</b>														
2º. Período seco	EP72*	07/10/2009	0,70	0,00	0,00	8,6	99,2	35,2	-	56,0	39,0	0,6	0	100,9
	EP96*	14/01/2010	0,80	0,00	101,68	13,5	73,3	29,1	26,3	15,4	20,5	6,7	3	100,5
	EP98*	26/01/2010	0,80	43,85	388,66	17,7	85,6	51,7	29,8	22,0	27,0	0,9	16	100,4
	EP107*	10/02/2010	0,80	18,03	133,73	13,8	93,6	41,8	44,0	13,5	19,5	1,7	0	100,4
	EP112*	19/02/2010	0,70	0,00	60,81	17,0	97,8	67,3	50,3	57,0	38,0	0,6	3	100,7
	EP116*	25/02/2010	0,80	0,00	99,97	12,0	93,6	41,8	43,0	26,0	19,0	2,7	0	100,2

\*Ensaio realizado nos perfis com vegetação; w=teor de umidade (base seca); GC grau de compactação S=Grau de Saturação; ΔP=gradiente de pressão; Patm= Pressão atmosférica.

O fluxo de CH<sub>4</sub> na camada convencional variou de 2,10 a 984,7 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo essa camada a que apresentou maior dispersão de fluxos medidos e de maior magnitude e em todos os períodos monitorados, dentre as camadas de cobertura pesquisadas. Embora com maior dispersão verifica-se que, excetuando-se os fluxos pontuais de grande magnitude (>400 g/m<sup>2</sup>.dia), a camada convencional apresenta uma tendência de fluxo de CH<sub>4</sub> de até 250 g/m<sup>2</sup> dia, com desempenho similar ao longo dos dois períodos secos analisados.

Os valores de umidade no primeiro período seco variaram de 4,6% a 20,5% com média de 12,6% ± 4,8%. Os maiores teores de umidade superficial foram observados no EP34 e EP35, realizados no final do período (mês de fevereiro de 2009), onde se deu um comportamento atípico em relação à precipitação, com média mensal bem superior às médias históricas da região. No entanto, essa característica não influenciou para menores medidas de fluxos nessa camada.

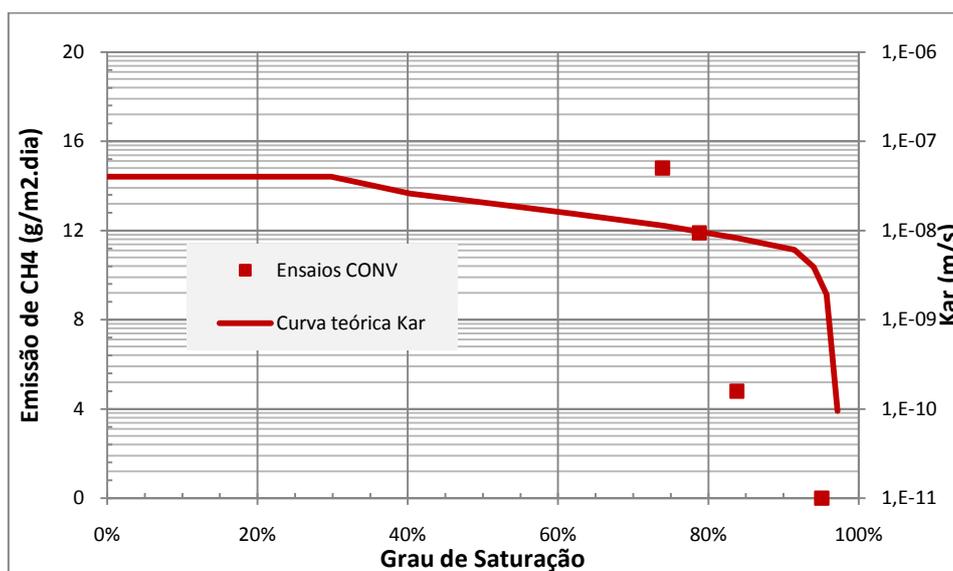
No primeiro período seco os maiores fluxos de CH<sub>4</sub> medidos (>200 g/m<sup>2</sup>.dia) se localizaram nas proximidades da calha central (EP05) onde a espessura é inferior à média da camada, e nas proximidades do talude lateral (EP09), possivelmente condicionado por maiores fluxos nas proximidades do talude. Em alguns momentos dessa pesquisa foram realizados ensaios nos taludes que demonstraram fluxos de biogás bem superiores aos registrados no platô superior da camada de cobertura, condicionados possivelmente pela menor compactação nessa região, como foi observado nos ensaios realizados.

Os menores fluxos de CH<sub>4</sub> foram medidos nos ensaios EP03, onde se verificou um alto grau de compactação no local, e no EP27, onde se observa baixa concentração de biogás no contato solo/resíduo e maior espessura da camada de cobertura. No EP35 o fluxo de 64,3 g/m<sup>2</sup>.dia, em menor magnitude, se deve a maior saturação na camada do que no ensaio EP29, que registrou fluxos de CH<sub>4</sub> de 86,2 g/m<sup>2</sup>.dia devido a baixa saturação do solo. Porém, esses valores ainda são superiores às emissões medidas na barreira capilar e na camada metanotrófica MET01, nesse mesmo período.

No período chuvoso (março a agosto de 2009) a variação de fluxo de CH<sub>4</sub> foi de 0 a 194,9 g/m<sup>2</sup>.dia, bem inferior a do período seco. Nesse período a camada convencional apresentou grau de saturação entre 75% e 90% em aproximadamente 50% dos ensaios realizados. Esse grau de saturação ainda condiciona fluxo de ar através do solo, tendo em vista que o comportamento da curva de permeabilidade

mostra que, apenas para saturação acima de 90% é que passagem de ar é minimizada.

A Figura 126 mostra a curva teórica de permeabilidade ao ar em função da saturação para o solo da camada convencional, e a relação entre a emissão de CH<sub>4</sub> e a saturação no momento dos ensaios nessa camada no período chuvoso, onde se observou as menores emissões de CH<sub>4</sub>.



**Figura 126: Variação de emissão de CH<sub>4</sub> e permeabilidade ao ar (teórica) com o grau de saturação na camada CONV, no primeiro período chuvoso**

A camada convencional apresentou menor saturação ao longo de seu perfil que as camadas metanotróficas e barreira capilar, no período chuvoso. Os ensaios EP51, EP55 e EP58 mostrados na Figura 126 apresentaram fluxos de CH<sub>4</sub> de até 14,8 g/m<sup>2</sup>.dia em locais onde o solo apresentou saturação acima de 70%. Os demais ensaios apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> nulo, em regiões com baixas concentrações de biogás no contato solo/resíduo (EP44 e EP45) e no ensaio EP57, onde a saturação da camada estava acima de 90%. O EP46 não apresentou fluxo de CH<sub>4</sub>, se localizando em ponto com espessura de 80 cm, superior a média encontrada nessa camada, e como houve muitas chuvas nesse período é provável que a saturação na camada tenha apresentado valores acima dos medidos na superfície, impedindo o fluxo.

Os maiores fluxos de biogás foram medidos no ensaio EP38 (131,2 g/m<sup>2</sup>), que apresentou saturação do solo inferior a 50%, e no EP59 (194,9 g/m<sup>2</sup>.dia), situado em

local com espessura de 0,55 m, devido às proximidades com a calha central, saturação inferior a 80% e alta concentração de CH<sub>4</sub> na base da camada.

No segundo período seco, compreendido entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010, o fluxo de CH<sub>4</sub> variou de 0 a 433,9 g/m<sup>2</sup>.dia. Foram realizados dezoito ensaios de fluxo na camada convencional, sendo doze no perfil sem vegetação e proximidades, e seis no perfil com vegetação e em regiões do seu entorno. A Figura 127 ilustra os locais de instalação dos perfis da camada convencional onde se realizaram as medições de fluxo.



**Figura 127: Área dos perfis para medição de concentração e pressão de biogás instalado na camada convencional (a) sem vegetação (b) com vegetação**

a) **Área do perfil sem vegetação (CONV01):** Essa região apresentou a maior variação de fluxo no período, com valores de 5,1 a 433,9 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo saturação média medida nos sensores da camada de 65% ± 11%. Os fluxos de CH<sub>4</sub> serão agrupados por três faixas de emissão de CH<sub>4</sub> em função da maior quantidade de ensaios realizados nessa camada: até 50,0 g/m<sup>2</sup>.dia, de 50 a 100,0 g/m<sup>2</sup>.dia e acima de 100,0 g/m<sup>2</sup>.dia.

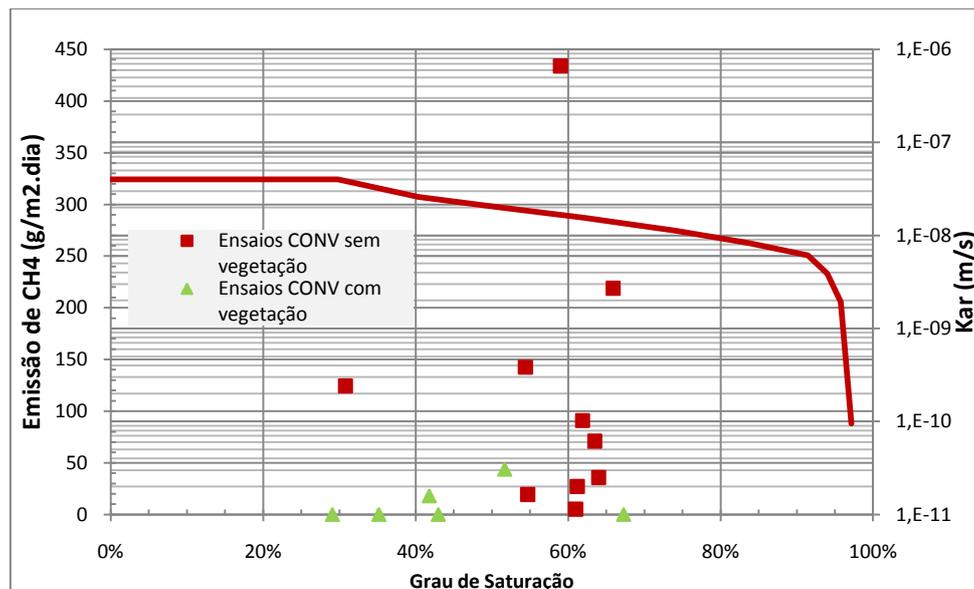
- Até 50,0 g/m<sup>2</sup>.dia: cinco ensaios apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> variando de 0,0 a 50 g/m<sup>2</sup>.dia (EP66, EP69, EP81, EP97 e EP115). Esses ensaios foram realizados com grau de saturação médio em profundidade de 60% ±14% e gradiente de pressão de até 6 Pa.
- De 50,0 a 100 g/m<sup>2</sup>.dia: três ensaios apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> nessa faixa (EP76, EP95 e EP103). O EP76 e EP103 se localizaram próximos aos taludes

laterais onde o fluxo de biogás é maior, além da presença de fissuras nas proximidades, já o EP 95 apresentou maior gradiente de pressão (61 Pa) e espessura inferior à média da camada.

- Acima de 100 g/m<sup>2</sup>.dia: quatro ensaios apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> acima de 100 g/m<sup>2</sup>.dia (EP80, EP84, EP85 e EP106). Nesses ensaios o grau de saturação tanto na superfície quanto em profundidade teve média de 49%±14%, com maiores umidades medidas no final do período seco. O ensaio EP84 apresentou o maior fluxo de CH<sub>4</sub> medido de 433,91 g/m<sup>2</sup>.dia, e se localizou em uma região com fissuras nas suas proximidades e o EP106 com fluxo de 218,33 g/m<sup>2</sup>.dia se localizou na mesma região que outros ensaios anteriores e possivelmente a estrutura da camada estivesse danificada.

b) **Área do perfil com vegetação (CONV02):** Esse perfil apresentou menores emissões de CH<sub>4</sub> do que o perfil sem vegetação, com fluxo de CH<sub>4</sub> medido de até 43,9 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo a saturação média medida nos ensaios de 41%±12%. Esse perfil tem espessura de 0,80 m, vegetação densa e as concentrações de biogás na interface solo/resíduo medidas foram inferiores a 26% de CH<sub>4</sub> em quatro dos seis ensaios realizados. Observa-se que ensaios que apresentaram fluxo de CH<sub>4</sub> (EP98 e EP107) de 43,9 g/m<sup>2</sup>.dia e 18,0 g/m<sup>2</sup>.dia são caracterizados por baixas concentração de biogás e grau de saturação inferior a 52%.

A Figura 128 mostra a saturação dos ensaios medidos na camada convencional, no segundo período seco com indicações de saturação de alguns ensaios realizados no perfil com vegetação.

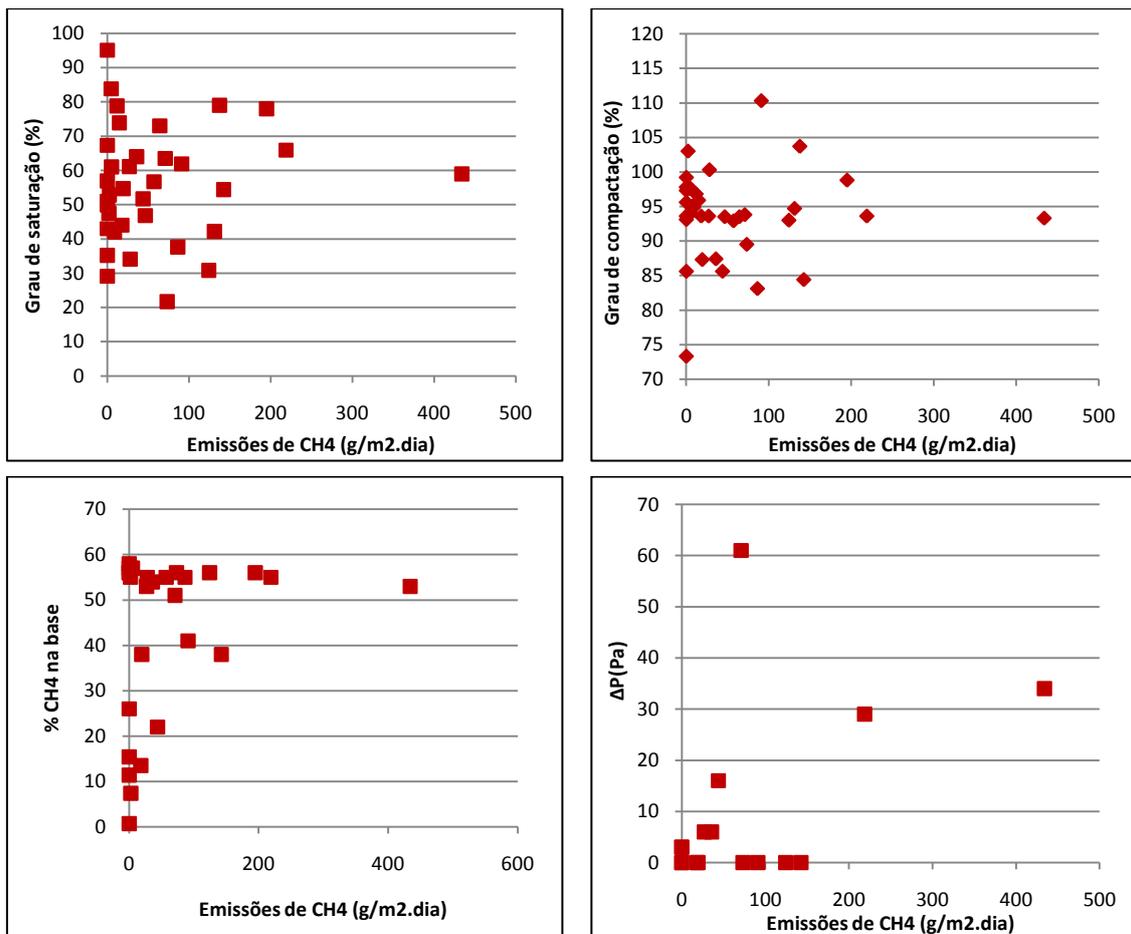


**Figura 128: Variação da permeabilidade ao ar (teórica) e da emissão de  $CH_4$  em área com e sem vegetação com o grau de saturação na camada CONV no segundo período seco**

Verifica-se que como no primeiro período seco, a saturação da camada se situou abaixo de 65%. Mesmo assim a camada com vegetação apresentou fluxo de  $CH_4$  inferiores aos da camada sem vegetação, sendo provável que outros fatores além do grau de saturação tenham influenciado em emissões de  $CH_4$  inferiores a 50  $g/m^2.dia$ .

De um modo geral as emissões de  $CH_4$  da camada convencional apresentaram maior dispersão, com picos acima de 400  $g/m^2.dia$  e 900  $g/m^2.dia$  em períodos mais secos e menores valores em períodos chuvosos. O perfil CONV02 com vegetação densa, maior espessura e baixa concentração de  $CH_4$  na base, apresentou menores emissões do que o perfil sem vegetação, no mesmo período.

A Figura 129 mostra a relação entre emissões de  $CH_4$  e os principais fatores que podem ter influenciado o fluxo de  $CH_4$ : grau de saturação, grau de compactação, concentração de  $CH_4$  na base e gradiente de pressão abrangendo as áreas com e sem vegetação.



**Figura 129: Fatores relacionados com a emissão de CH<sub>4</sub> na CONV no primeiro período seco**

Devido à grande dispersão dos resultados de emissão de CH<sub>4</sub>, a camada convencional apresentou pouca correlação entre o fluxo e os fatores de influência, quando analisados isoladamente. Observa-se uma tendência de fluxo de CH<sub>4</sub> nulo ou em pequenos valores somente para saturação acima de 80%, como foi demonstrado pelos resultados citados anteriormente. Para gradiente de pressão acima de 30 Pa e concentração de CH<sub>4</sub> na base acima de 40% a camada convencional também mostrou uma tendência de maiores emissões, enquanto que o grau de compactação, na faixa de 85% a 105% não apresentou isoladamente correlação com as emissões de CH<sub>4</sub>.

Muitos estudos sobre emissões de biogás em camadas de solo compactado apresentam fluxo de CH<sub>4</sub> nos períodos secos na mesma faixa que os medidos na camada convencional. Abichou *et al.* (2006b) determinaram em camadas de espessura inferior a da camada convencional, emissões de CH<sub>4</sub> variando de -14 até 1.797 g/m<sup>2</sup>.dia em aterros sem extração de biogás. Zhang *et al.* (2007) determinaram

emissões de CH<sub>4</sub> entre -15 a 49 g/m<sup>2</sup>.dia, em aterros com extração de biogás, em camada de solo compactada do tipo arenoso com espessura variando de 0,8 m a 1,2 m. Park e Shin (2001) determinaram em camadas de areia siltosa de mesma espessura da camada convencional, emissões de 0 a 14.797 g/m<sup>2</sup>.dia em aterro com extração de biogás.

As variações na camada convencional também se situa na faixa determinada por Maciel (2003) para períodos chuvoso que variou de 102 a 363 g/m<sup>2</sup>.dia e de Mariano (2008) que determinou emissões de CH<sub>4</sub> de até 401 g/m<sup>2</sup>.dia em solo compactado com espessura variando de 0,25 m a 0,90 m, em aterro sem extração de biogás. As maiores variações de emissão de CH<sub>4</sub> na camada convencional são compatíveis com estudos de Cossu (1997), Tanaka *et al.* (1997) e Chanton e Liptay (2000).

Com relação ao CO<sub>2</sub> a camada convencional apresentou fluxo durante todo o ano, com variações de 0 a 1.899,7 g/m<sup>2</sup>.dia no primeiro período seco e de 0 a 526,0 g/m<sup>2</sup>.dia no perfil sem vegetação e de 0 a 388,66 g/m<sup>2</sup>.dia no perfil com vegetação, no segundo período seco. No período chuvoso foi medido fluxo de CO<sub>2</sub> de até 381,5 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo essas emissões 3,6 vezes superiores às de CH<sub>4</sub>, na camada convencional.

#### **4.5.4 Influência da variação de pressão atmosférica e temperatura nas emissões de CH<sub>4</sub>**

As variações nas emissões das camadas de cobertura foram associadas, em grande parte, ao grau de saturação do solo, que sofreu influências do regime pluviométrico e da presença ou não de vegetação, além das outras variáveis ambientais tais como pressão atmosférica e a temperatura ambiente. A Figura 130 mostra as variações das emissões em função dessas variáveis. Esses dois parâmetros influenciam tanto no gradiente de pressão entre o aterro e o ambiente externo, quanto no gradiente de concentração de biogás, sendo o período crítico para as emissões, os meses de maiores temperaturas (mínimas e máximas) e de menores pressões atmosféricas (mínimas e máximas).

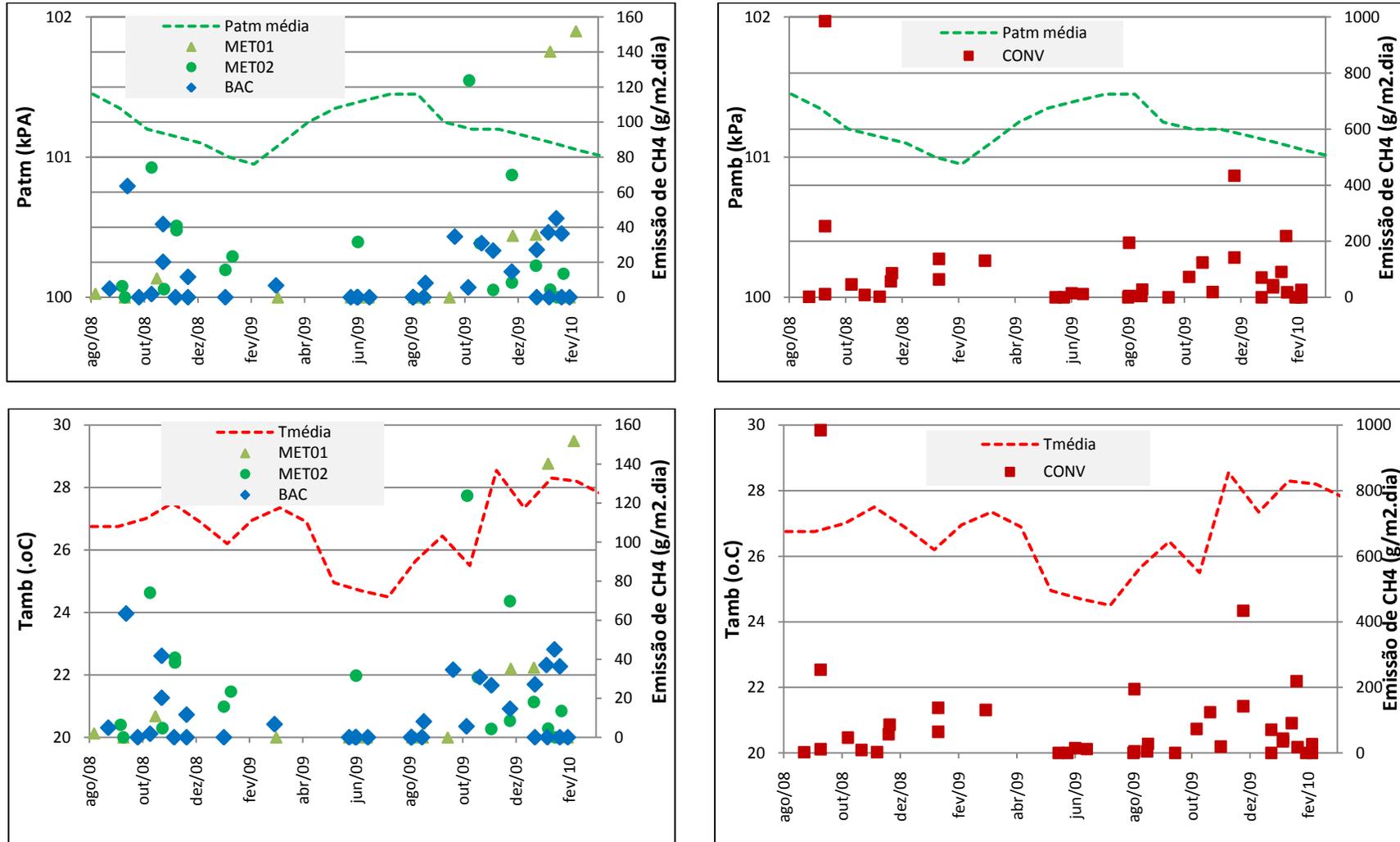


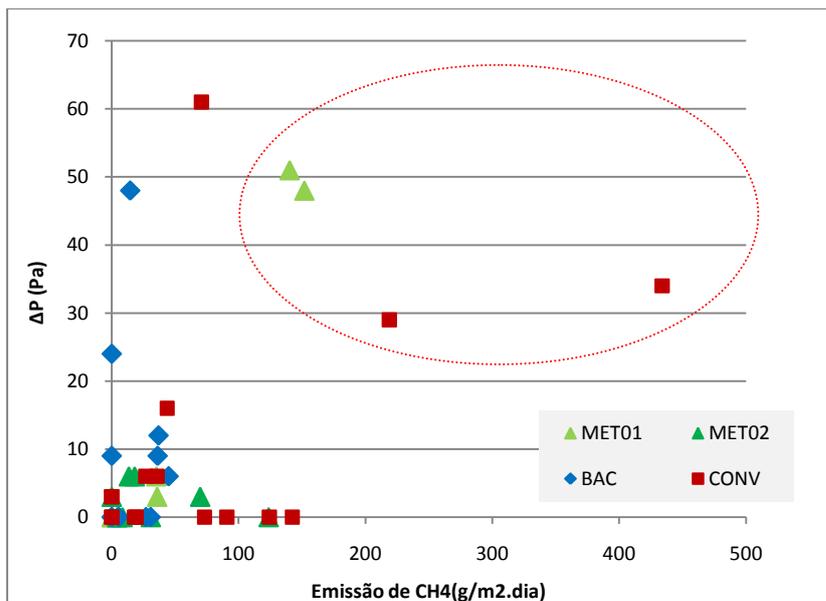
Figura 130: Emissões de CH<sub>4</sub> e variação de Pressão atmosférica e Temperatura ambiente (Tamb)

Na região do Aterro da Muribeca, essas condições coincidem com os meses mais quentes do ano (setembro a fevereiro), sendo um período de menor precipitação, corroborando para maiores emissões de biogás nesse período dado a menores umidades no perfil da camada de cobertura. Este fato, aliado a valores muito baixos de pressões internas de biogás, permite inversões temporárias de gradiente de pressão, gerando fluxos de gases do interior do aterro para o meio externo e em outros momentos, ingresso de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> no aterro.

No período analisado houve variações diárias de pressão atmosférica de até 1,0 kPa e de 9,8 °C de temperatura enquanto as variações mensais foram de 1,1 kPa e de 11,4°C respectivamente. O período crítico para maiores emissões se deu nos meses de maiores temperaturas (mínimas e máximas) e de menores pressões atmosféricas (mínimas e máximas). Na região do Aterro da Muribeca, essas condições coincidem com os meses mais quentes do ano (setembro a fevereiro), denominados nessa pesquisa de período seco, como foi mostrado na Figura 74.

As camadas do tipo metanotrófica e camada convencional apresentaram maior correlação com as variações sazonais de pressão atmosférica e temperatura, do que a barreira capilar. Isso decorre da maior porosidade na camada metanotrófica que permite o gás atravessar o solo por difusão, assim como, a menor saturação medida em todo período, na camada convencional, que proporcionou maior passagem de gás e maiores emissões. Czepiel *et al.* (1996) apresentaram variações de emissão total de aterro de 11,5 para 21 m<sup>3</sup>/min decorrente de uma variação de pressão atmosférica de 1,5 kPa. Em cobertura de solos arenosos grosseiros Kjeldsen (1996) mencionou que, mesmo um gradiente de pressão muito baixo condicionou o fluxo advectivo. A correlação entre emissões de CH<sub>4</sub> e variações na pressão atmosférica são mencionadas também por Borjesson e Svensson (1997), Christophersen *et al.* (2001) e Scheutz *et al.* (2009).

O gradiente de pressão medido nos ensaios do segundo período seco, relacionados com as emissões é mostrado na Figura 131.



**Figura 131: Gradiente de pressão medido nos ensaios de campo no período de setembro de 2009 a fevereiro de 2010**

Observa-se uma tendência de maior correlação entre as emissões de CH<sub>4</sub> com gradiente de pressão no aterro, na camada MET01 e na camada convencional, que podem ter sido provocadas por variação na pressão atmosférica.

#### **4.5.5 Análise das taxas de fluxo de biogás nas camadas de cobertura da célula experimental**

Os resultados mostraram que as camadas alternativas apresentaram menores taxas de fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> em todos os períodos avaliados e que a camada convencional, sem vegetação, apresentou maiores fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. As Figuras 132 e 133 mostram o resumo dos resultados de emissão de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> determinados ao longo desse estudo.

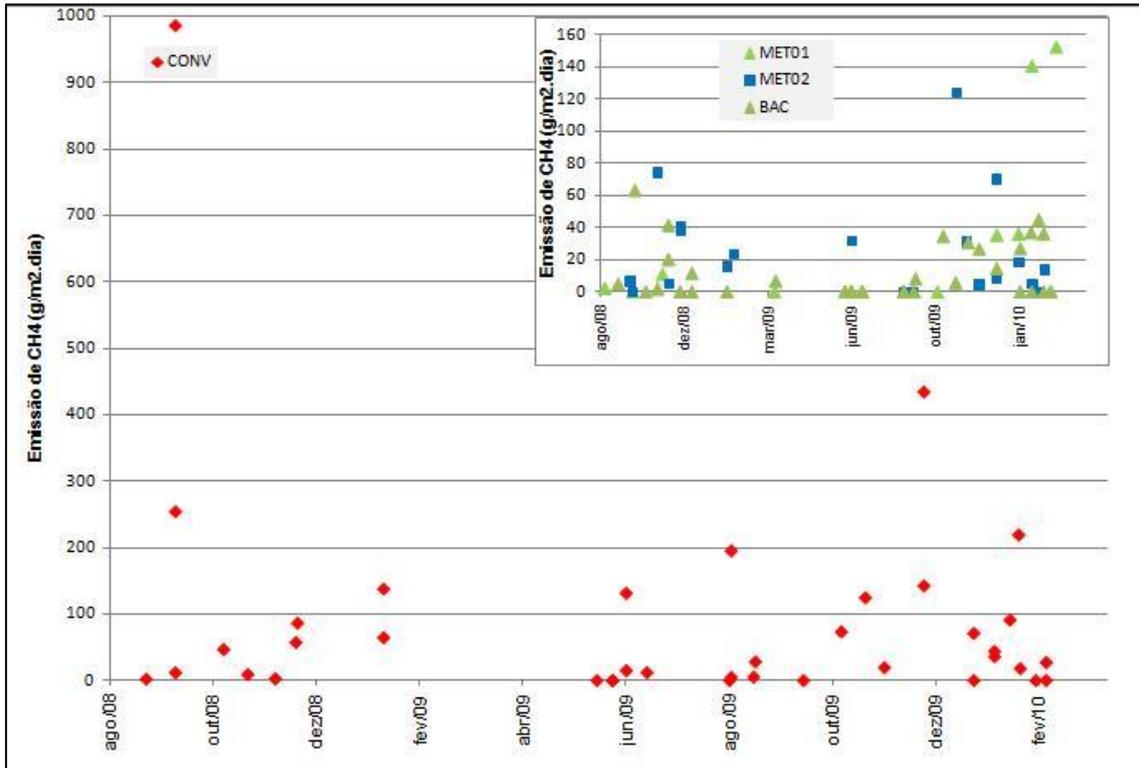


Figura 132: Emissão de CH<sub>4</sub> por camada de cobertura

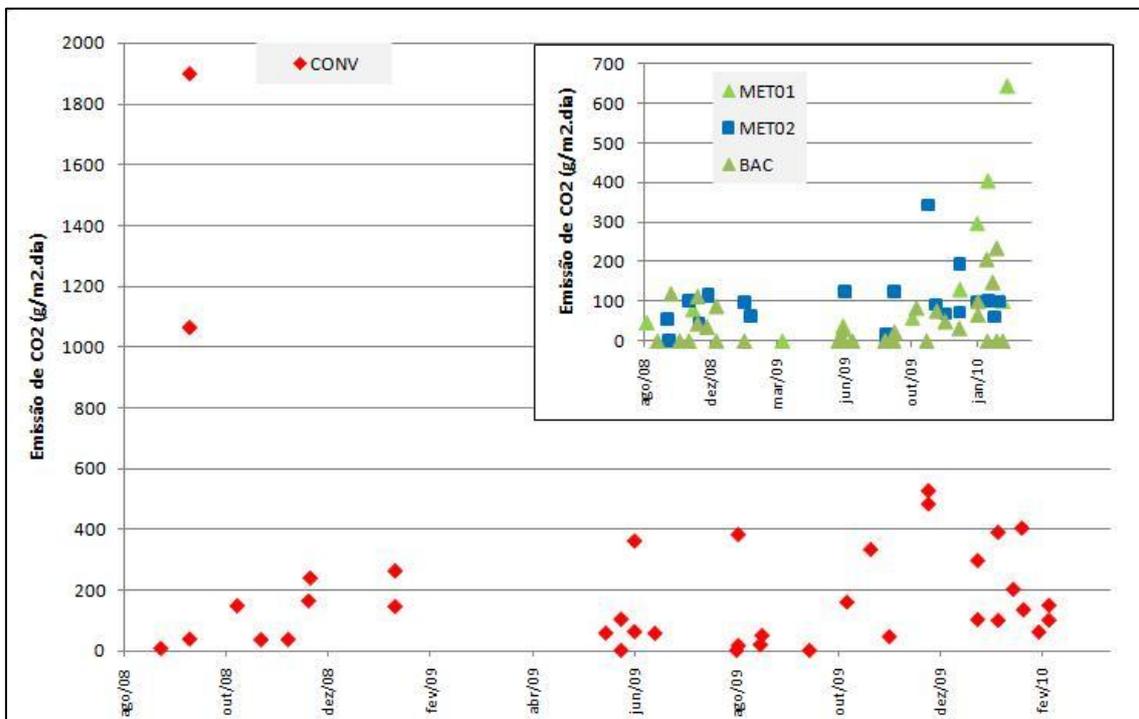
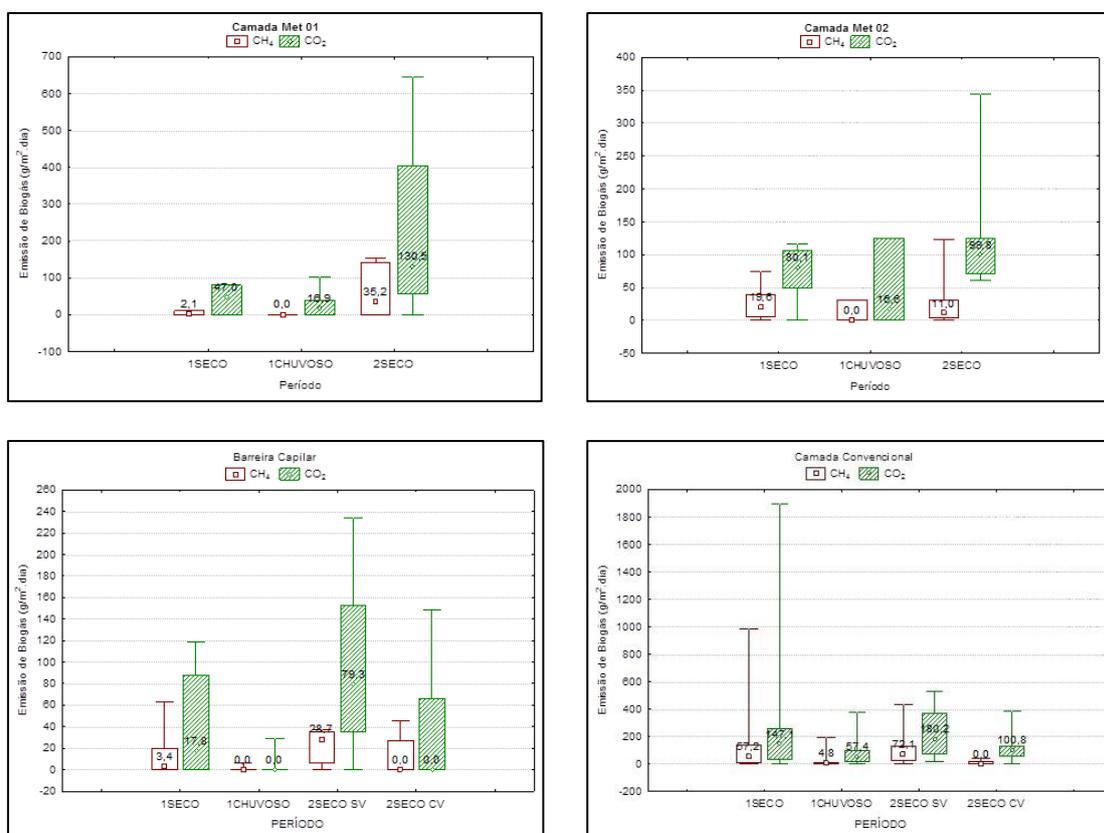


Figura 133: Emissão de CO<sub>2</sub> por camada de cobertura

Observa-se que as emissões de CH<sub>4</sub> na camada de cobertura convencional na célula experimental se concentraram na faixa de 0 a 250 g/m<sup>2</sup>.dia e nas camadas alternativas de 0 a 40 g/m<sup>2</sup>.dia, ou seja a camada convencional ou de referência apresentou emissões 6 vezes superiores às camadas alternativas, embora com maior espessura de solo. Para o CO<sub>2</sub> as variações foram de a 400 g/m<sup>2</sup>.dia na camada convencional e de 0 a 150 g/m<sup>2</sup>.dia nas camadas alternativas.

Devido à dispersão apresentada pelos resultados, se utilizou a mediana como medida estatística para representar o comportamento de cada tipo de cobertura em relação às emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Os resultados são mostrados graficamente através de um diagrama de caixa (*Boxplot*) onde se observa a concentração de 50% dos valores medidos dentro do intervalo da caixa, o intervalo de mínimo e o máximo medido e a mediana. A Figura 134 apresenta os resultados gerais de fluxo de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub>, em cada camada de cobertura, nos períodos estudados, com valores de mediana, onde, nos resultados da barreira capilar e camada convencional, SV significa perfil sem vegetação e CV perfil com vegetação.



**Figura 134: Distribuição dos resultados de Emissão de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> por camada de cobertura e período investigado**

Para se estabelecer um comparativo entre as camadas de cobertura, tendo em vista as diferentes espessuras das áreas analisadas, foi determinada a emissão normalizada pela espessura média medida nos ensaios, a partir da média de emissão de cada tipo de camada. A Tabela 30 apresenta um resumo das variações de emissões de CH<sub>4</sub> medidas nos três períodos em cada tipo de cobertura.

**Tabela 30: Fluxos de metano e gás carbônico normalizado pela espessura (com média)**

Período	Camada	E(m)	Variação Fluxo g/m <sup>2</sup> .dia		Fluxo normalizado pela espessura da camada g/m <sup>2</sup> .dia.m	
			CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Set/08 a fev/09	MET01	0,53	0 a 10,9	0 a 80,2	2,56	24,12
	MET02	0,57	0 a 74,1	0 a 115,8	16,03	43,31
	BAC	0,68	0 a 63,4	0 a 119,1	9,78	27,06
	CONV	0,71	2,1 a 984,7	6,75 a 1899,7	106,88	260,36
Mar a ago/09	MET01	0,60	0	0 a 38,0	0,00	8,22
	MET02	0,58	0 a 31,6	0 a 124,8	4,58	27,32
	BAC	0,68	0 a 6,7	0 a 29,0	0,57	2,82
	CONV	0,68	0 a 194,9	0 a 381,5	27,03	169,29
Set/09 a Fev/10	MET01	0,59	0 a 151,9	0 a 674,7	30,61	137,95
	MET02	0,52	0 a 123,7	60,7 a 343,5	14,21	65,16
	BAC01	0,70	0 a 37,0	0 a 233,9	15,67	67,33
	BAC02	0,63	0 a 45,0	0 a 148,2	7,81	22,20
	CONV01	0,69	5,1 a 433,9	18,7 a 526,0	73,01	158,73
	CONV02	0,78	0 a 43,8	0 a 388,7	8,04	102,03
GERAL	MET01	0,60	25,1±50,7	129,9±190,7	15,1	77,9
	MET02	0,52	24,2±31,6	94,4±72,8	12,6	49,1
	BAC	0,67	12,6±17,4	45,1±63,1	8,4	30,2
	CONV	0,71	88,0±174,6	226,7±346,7	61,6	161,0

*E = espessura média; BAC01 e CONV01 são áreas sem vegetação; BAC02 e CONV02 são áreas com vegetação nas camadas convencional e barreira capilar*

De um modo geral a camada convencional apresentou fluxo de CH<sub>4</sub> quatro vezes superior à camada MET01, cinco vezes superior à camada MET02 e sete vezes superior à barreira capilar.

Como visto anteriormente, os fatores determinantes para redução de emissões de CH<sub>4</sub> em cada tipo de cobertura da célula experimental foi a áreas com presença de vegetação e a áreas com drenagem de biogás na base.

As camadas metanotróficas, que tem área coberta por vegetação em todo período do ano, apresentaram menores emissões de CH<sub>4</sub> quando comparadas à camada convencional sem vegetação. Essas camadas podem apresentar melhores condições para oxidação de CH<sub>4</sub> e, portanto redução de emissão de CH<sub>4</sub>. Observa-se que houve aumento nas emissões entre as duas estações secas, que pode ser decorrente de possíveis modificações nas características da camada tais como possível lixiviação do solo, diminuindo a quantidade de matéria orgânica ao longo do tempo e a presença de fissuras por influência de modificações na estrutura entre estações secas e chuvosas.

A barreira capilar apresentou menor emissão de CH<sub>4</sub> em todos os períodos, e menor dispersão das medidas de emissão. O bloco capilar funcionou como camada de distribuição de gás evitando picos de emissão ou “*hotspots*” e caminhos preferenciais, reduzindo a quantidade de gás a ser percolada pela camada. De um modo geral, a área esteve, em grande parte, recoberta por vegetação, o que pode implicar em maiores taxas de oxidação, associada a uma manutenção de umidade por um período de tempo mais prolongado, minimizando assim as emissões.

A camada convencional apresentou as maiores emissões de CH<sub>4</sub> ao longo de todo o período, apresentando grande dispersão dos resultados. A ausência de vegetação é fator condicionante para menores taxas de oxidação ao longo do perfil, mesmo essa camada apresentando espessura superior de solo compactado que as demais. A Tabela 31 apresenta, de forma resumida, os fatores associados às taxas de emissão de CH<sub>4</sub> em cada tipo de camada de cobertura.

**Tabela 31: Emissão superficial e fatores de influência no fluxo**

Camada	Varição de emissão (g/m <sup>2</sup> dia)	Fatores de influência
MET01	0 a 50	Saturação superior a 85%, compactação acima de 90%.
	> 50	Proximidade de fissuras, gradiente de pressão, saturação menor que 60%.
MET02	0 a 50	Baixa concentração de CH <sub>4</sub> na base, grau de saturação acima de 80%.
	> 50	Saturação inferior a 40%, ausência de vegetação, proximidade de fissuras.
BAC	0 a 50	Baixa concentração de CH <sub>4</sub> na base, grau de saturação acima de 60%, maior espessura.
	> 50	Proximidade de taludes laterais, descontinuidade de pedras na base.
CONV	0 a 50	Grau de compactação acima de 90%, grau de saturação acima de 80%, presença de vegetação.
	50 - 250	Alta concentração de CH <sub>4</sub> na base, grau de compactação inferior a 90%.
	>250	Saturação inferior 60%, existência de gradiente de pressão e área sem vegetação.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DE OXIDAÇÃO DE CH<sub>4</sub>

A avaliação de oxidação de CH<sub>4</sub> foi realizada através da estimativa de eficiência, como mostrado no capítulo de metodologia, a partir da relação entre as concentrações de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> desde a base da camada até 0,10 m da superfície, levando-se em consideração, na camada MET01, a geração de CO<sub>2</sub> em função da presença de composto. A zona onde há variação brusca da relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> foi denominada como zona de oxidação.

A mudança na relação entre a concentração de CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> desde o contato solo/resíduo até a superfície do aterro, sugere presença de reações entre esses dois gases, sabendo-se que a retenção dos gases se dá por processos físico-químicos e microbiológicos.

Foi necessário determinar a quantidade de CO<sub>2</sub> devido à respiração do material *in natura* em função da presença de matéria orgânica no solo, para se deduzir da concentração de CO<sub>2</sub> na camada MET01 (a análise só foi feita para camada com 50% de composto na mistura com o solo). Como na célula experimental há fluxo de CH<sub>4</sub> foi usado um ambiente externo à célula, com as mesmas configurações de campo e executadas com os mesmos materiais e condições de compactação da camada

MET01 e CONV01. Os resultados das medidas feitas em épocas distintas estão mostrados na Tabela 32.

**Tabela 32: Concentração de biogás medida em caixa de fluxo**

Prof (m)	MET01						CONV					
	09/03/10			04/08/09			09/03/10			04/08/09		
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	%O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>
0,10	1,8	0,0	19,5	0,6	0,0	20,9	-	-	-	-	-	-
0,20	2,6	0,0	18,7	0,8	0,0	20,9	0,0	0,0	19,5	0,0	0,0	20,5
0,35	3,0	0,0	18,3	2,0	0,0	20,2	-	-	-	-	-	-

As concentrações de CO<sub>2</sub> medidas no perfil da camada metanotrófica são decorrentes da presença de matéria orgânica, enquanto que no solo da camada convencional não se verificou presença de CO<sub>2</sub> na profundidade medida.

A diferença entre as duas medições da camada MET01 pode ser atribuída às variações ambientais tais como umidade e temperatura, que alteram os processos microbiológicos, afetando assim as reações naturais no meio em cada período. O mês de março é um período ainda seco enquanto que o mês de agosto já é no final da estação chuvosa e as mudanças de temperatura e umidade nesse período alteraram as condições de saturação do solo influenciando nos processos de geração de CO<sub>2</sub> por decomposição de matéria orgânica. Essas concentrações estão compatíveis com as encontrados por Roncato (2009) em dois substratos, ricos em matéria orgânica, utilizados como barreira de oxidação. Para as estimativas de oxidação da camada MET01 foi utilizado o valor encontrado no ensaio do dia 09/03/10, tendo em vista minimizar os efeitos da presença de CO<sub>2</sub> nas determinações de variação de concentração de CH<sub>4</sub>.

#### 4.6.1 Caracterização dos materiais

Coletas de amostras de solo em cada perfil para determinação do pH e sólidos voláteis foram feitas em diferentes momentos no período monitorado, enquanto que as medidas de umidade e temperatura foram lidas nos sensores de campo. Os valores médios com respectivos desvio padrões de pH, sólidos voláteis, umidade e temperatura de cada perfil são apresentados na Tabela 33.

**Tabela 33: Características dos materiais**

Camada	Profundidade (m)	pH	SV (%)	W(%)	T(°C)
MET01	0 a 0,30	7,5±0,5	15,5±2,7	26,4±4,4	37,1±5,2
	0,30 a 0,60	7,5±1,0	10,7±2,9	18,7±2,2	39,0±5,6
MET02	0 a 0,30	7,1±1,0	11,7±2,9	14,5±2,0	33,6±1,8
	0,30 a 0,60	6,9±1,0	9,8±1,7		
BAC01	0 a 0,20	5,4±0,5	7,5±0,5	17,1±1,4	31,9±1,5
	0,20 a 0,50	5,3±0,3	7,2±0,4	14,6±0,7	32,8±1,3
BAC02	0 a 0,20	6,2±1,0	8,2±0,9	13,7±2,0	31,7±1,4
	0,20 a 0,40	6,1±0,7	7,9±0,7		
CONV01	0 a 0,30	6,3±1,0	7,7±1,3	17,9±1,5	30,2±2,1
	0,30 a 0,70	5,7±1,1	7,2±1,4	16,3±2,1	32,1±2,5
CONV02	0 a 0,30	7,4±0,5	9,8±1,9	12,8±0,9	36,8±2,1
	0,30 a 0,80	6,4±0,6	8,8±0,8		

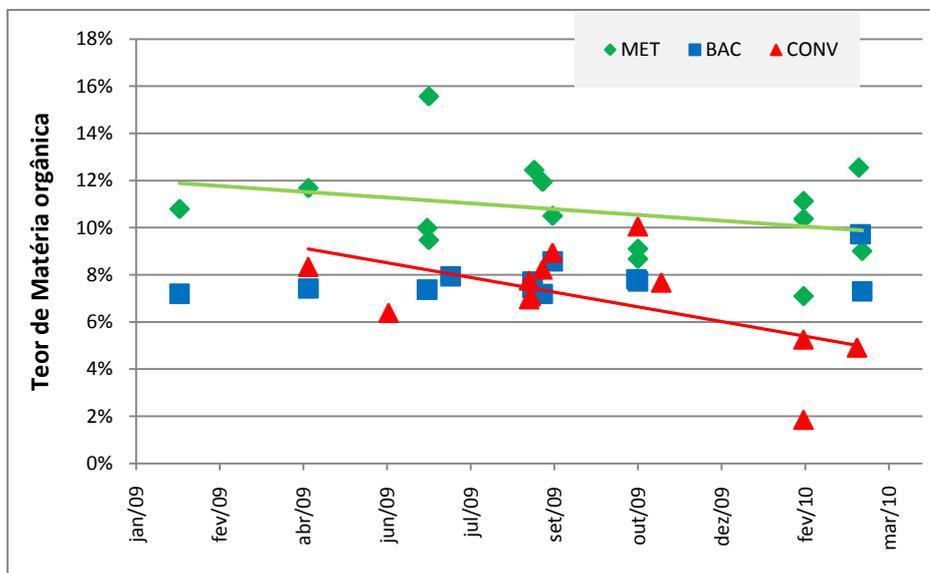
*SV = sólidos voláteis; W = teor de umidade e T = temperatura do solo*

Verifica-se claramente um pH mais alto nas camadas superficiais da MET01 e MET02 assim como nas camadas com vegetação BAC02 e CONV02 em relação as camadas sem vegetação. Com relação à matéria orgânica é possível constatar que a camada metanotrófica apresentou teores superiores na superfície, durante todo o estudo, e que tanto na barreira capilar quanto na camada convencional com vegetação, os teores de matéria orgânica são superiores às respectivas áreas sem vegetação.

Nas camadas de solo compactado abaixo da mistura de solo e composto verificou-se um teor de matéria orgânica superior aos do solo compactado da barreira capilar e da camada convencional, provavelmente decorrente de lixiviação da matéria orgânica existente da mistura de solo e composto para a camada inferior, ao longo do tempo.

Com relação à temperatura, os valores médios nas camadas mais profundas de cada perfil foram superiores que na camada mais superficial, provavelmente devido à proximidade com os resíduos. Em amostras realizadas no período entre 2009 e 2010 se percebeu uma pequena tendência de diminuição no teor médio de matéria

orgânica, principalmente nos perfis da camada metanotrófica e da convencional, como pode ser visto na Figura 135.

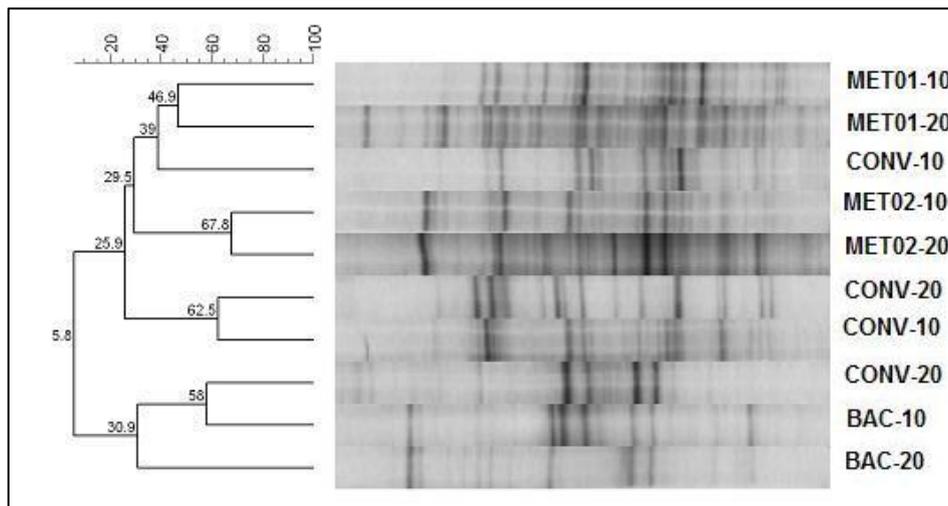


**Figura 135: Variação de teor médio de matéria orgânica ao longo de 2009 e 2010**

Não foi possível determinar a presença de micro-organismos ao longo da pesquisa. No entanto, Purificação (2009) apresentou resultados de um estudo de estrutura de comunidade microbiana para o Grupo I de metanotróficas, dos solos da camada de cobertura da célula experimental, coletados em junho de 2009 (época de chuva).

De acordo com Purificação (2009) os resultados mostraram que em um agrupamento testado com as amostras coletadas na camada convencional e na camada metanotrófica, as amostras mais superficiais (MET01 e MET02) formaram dois grupos bem distintos, com similaridades bem significativas entre as amostras de cada grupo (entre 0,6 e 0,7). Esses grupos apresentaram diferenças dos grupos identificados na camada convencional, que formaram um agrupamento no centro do dendrograma, não apresentando, necessariamente, a formação de um grupo.

Em relação às diferenças de comunidade em profundidade, Purificação (2009) testou agrupamentos para as camadas mais superficiais (0,1 m a 0,2 m) da camada convencional, barreira capilar e camada metanotrófica, onde foi possível perceber uma diferenciação na estrutura da comunidade metanotrófica em relação às demais, como é mostrado na Figura 136.



**Figura 136: Dendrograma para o gel DGGE obtido com produtos PCR das amostras da cobertura experimental da célula experimental (Purificação, 2009)**

De acordo com Purificação (2009) observou-se que, mesmo após um ano de funcionamento, o composto adicionado à camada metanotrófica promoveu uma estrutura de comunidade diferenciada. Isso é decorrente da composição química do material, como foi mostrado nos resultados de caracterização (Tabela 16), onde o teor de matéria orgânica e nutrientes tais como fósforo e potássio das camadas MET01 e MET02 foram bem superiores aos determinados nas amostras de solo sem adição de composto.

Além disso, as camadas MET01 e MET02 apresentaram maior capacidade de retenção de água, como mostrado na curva de retenção de água, e maior porosidade, características mais propícias ao desenvolvimento de vegetação. É interessante ressaltar que o desenvolvimento da vegetação também sugere um aumento na diversidade microbiana do solo, uma vez que a região de contato entre o solo e as raízes das plantas é um lugar onde a quantidade e a diversidade de micro-organismos são maiores do que no solo livre de vegetação, de acordo com Pelczar *et al.* (1997).

#### 4.6.2 Eficiência de oxidação

A estimativa de oxidação de  $\text{CH}_4$  foi determinada como mostrado no Capítulo III através da relação entre as concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  desde a base da camada até 0,1 m da superfície, levando-se em consideração, na camada MET01, a geração de

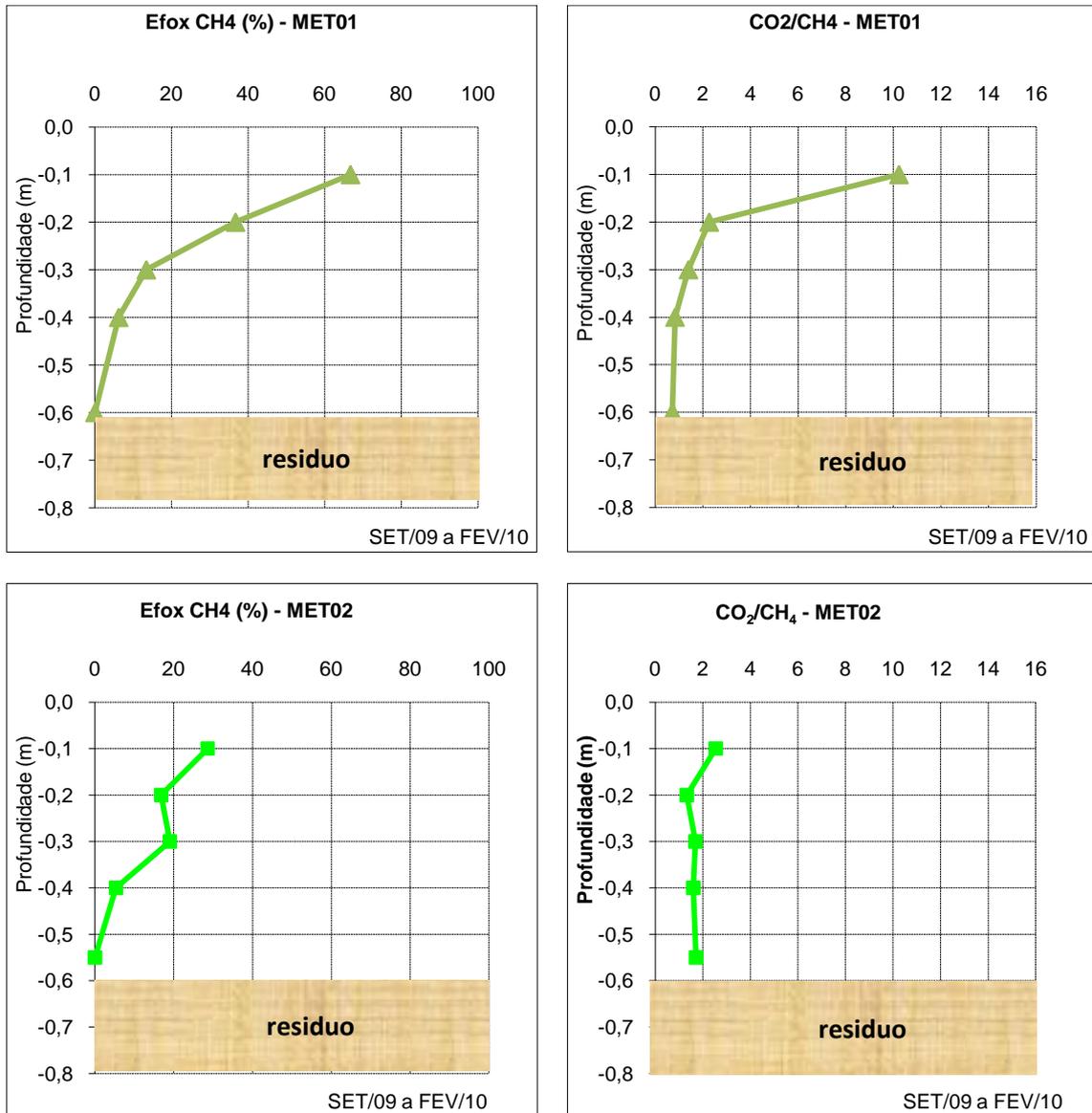
CO<sub>2</sub> em função da presença de composto. A zona onde há variação brusca da relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> foi denominada como zona de oxidação.

A Tabela 34 mostra os resultados das determinações de eficiência de oxidação (Efox) baseada na mudança da relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> desde a base até a superfície para todos os perfis analisados, com as características de cada camada. Em seguida serão mostrados os perfis de média de eficiência de oxidação acumulada e as variações na relação entre a concentração de CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, sugerindo atividade de oxidação, em cada perfil analisado, nas Figuras de 137 a 139.

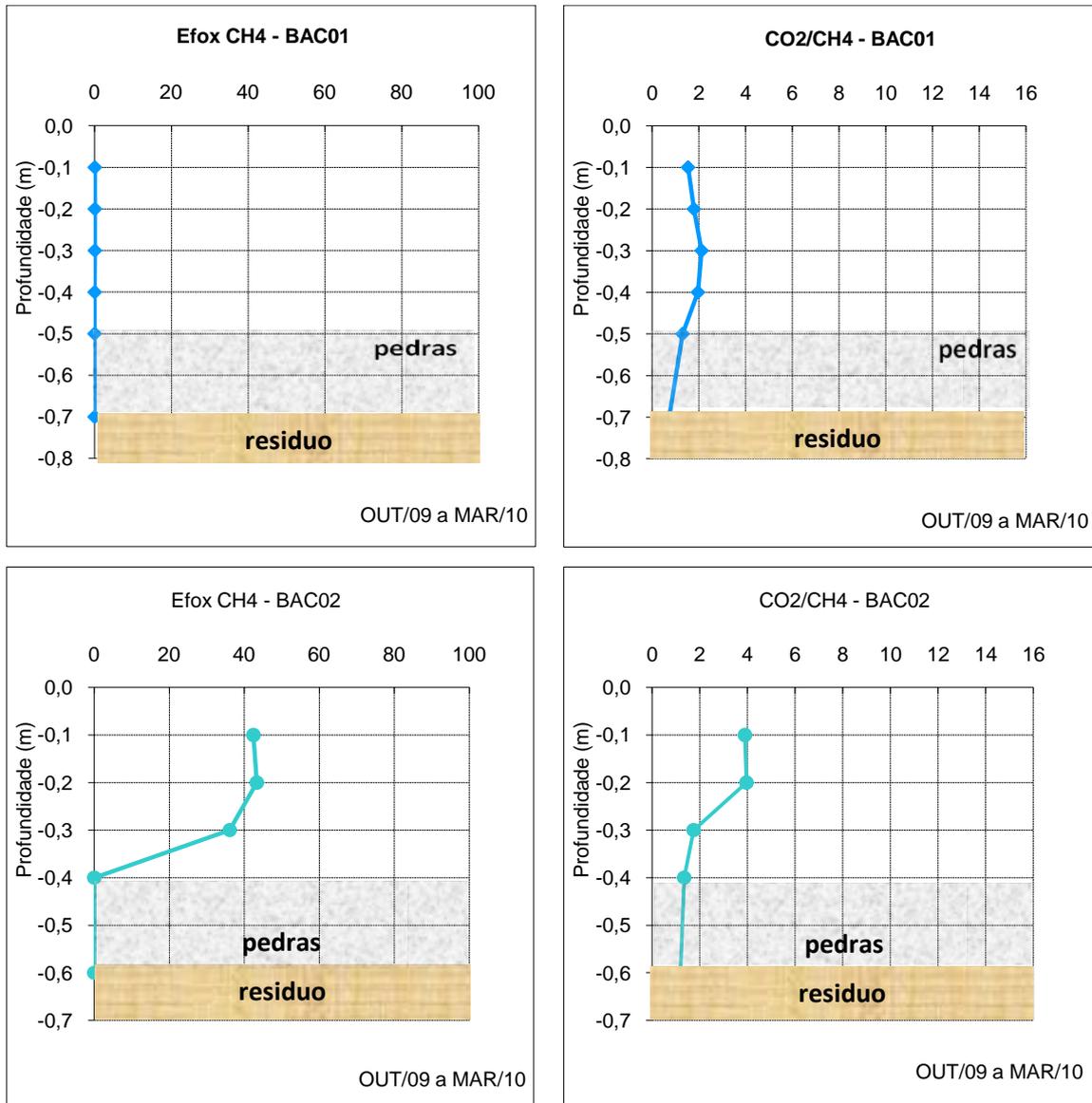
**Tabela 34: Eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub> no período de set/09 a mar/10.**

<b>Perfil/ camada</b>	<b>Característica</b>	<b>Efox (%) CH<sub>4</sub></b>
MET01	0,6 m de profundidade (0,3 m superficiais de (solo + composto na proporção de 1:1 v/v)	64,9±20,5
MET02	0,6 m de profundidade (0,3 m superficiais de (solo + composto na proporção de 3:1 v/v)	17,6±20,7
BAC01	0,7 m de profundidade (0,5 m de solo compactado + 0,20 m de pedras na base) – sem vegetação	4,5±9,3
BAC02	0,6 m de profundidade (0,4 m de solo compactado + 0,20 m de pedras na base) – com vegetação	42,6±28,4
CONV01	0,7 m de profundidade de solo compactado – sem vegetação	21,7±8,8
CONV02	0,8 m de profundidade de solo compactado – com vegetação	58,8±29,3

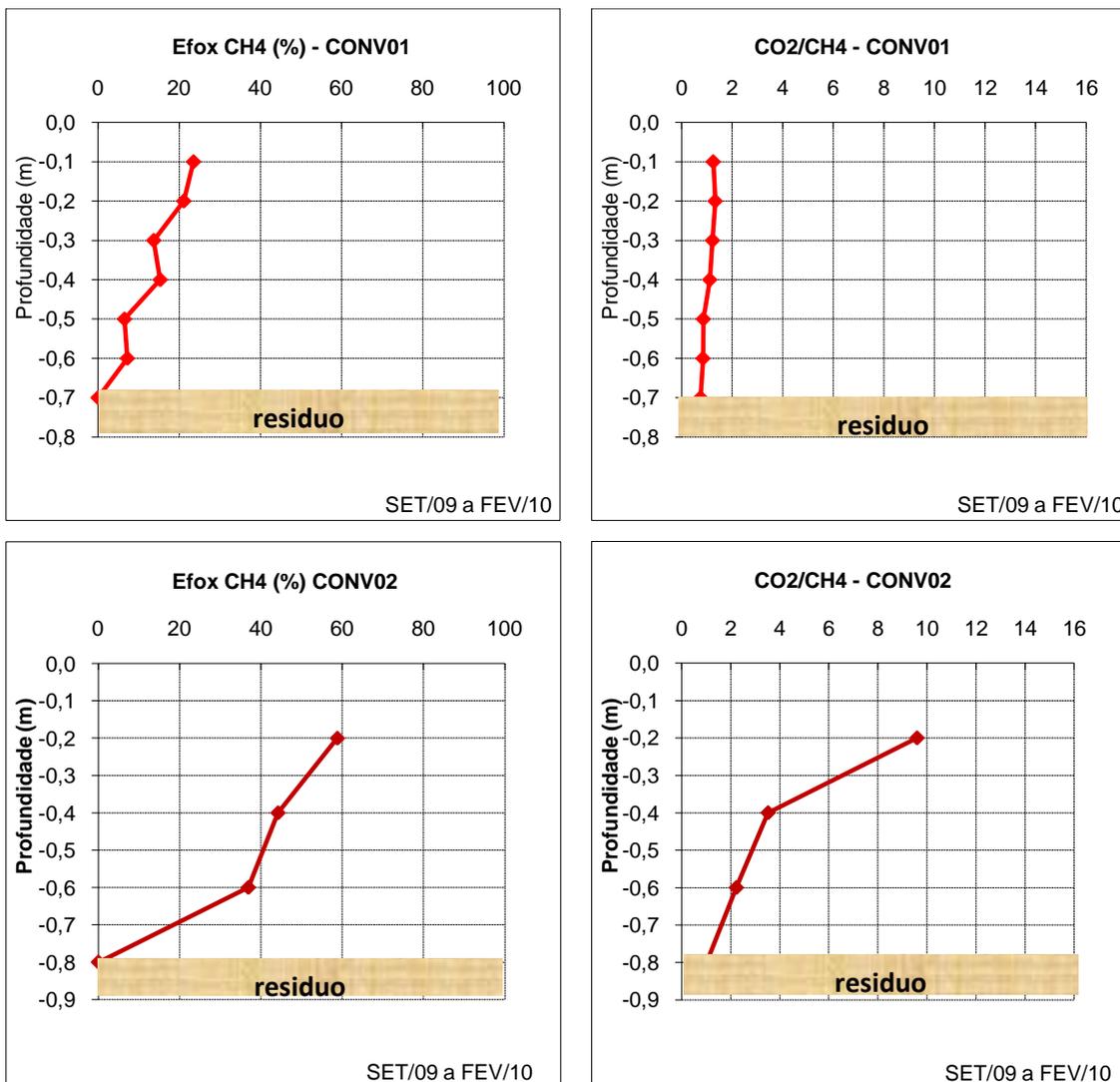
*\*ensaios com oxidação > 0%*



**Figura 137: Eficiência média de oxidação de CH<sub>4</sub> acumulada ao longo da profundidade e variação da relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> da interface solo/resíduo até a camada superficial nas camadas metanotróficas.**



**Figura 138:** Eficiência média de oxidação de  $\text{CH}_4$  acumulada ao longo da profundidade e variação da relação  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  da interface solo/resíduo até a camada superficial na barreira capilar.



**Figura 139: Eficiência média de oxidação de CH<sub>4</sub> acumulada ao longo da profundidade e variação da relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> da interface solo/resíduo até a camada superficial na camada convencional.**

Verificou-se nas medições de campo que todos os perfis apresentaram uma característica padrão de diminuição de concentração de CH<sub>4</sub> desde a interface com o resíduo até a camada superficial de 0,10 m. As variações na relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mostradas nas 137 a 139, demonstram que as camadas MET01, BAC02 e CONV02 apresentaram maiores eficiências de oxidação, como foi mostrado na Tabela 34.

A profundidade onde se observou variações significativas na relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> sugerindo uma zona de oxidação predominantemente entre 0,10 m a 0,30 m nas camadas metanotróficas e barreira capilar e de 0,20 m a 0,40 m na camada convencional.

### **a) Camada metanotrófica**

A camada metanotrófica MET01 apresentou eficiência média de oxidação de 64,9%. Esse nível de eficiência é bastante semelhante com as apresentadas por Abichou *et al.* (2006b), que reportam eficiências de até 64% em coberturas de aterros com variadas espessuras assim como Stern *et al.* (2007) que também reportam eficiências médias de 64% em biocobertura sobreposta a camada de distribuição de gás. Rose *et al.* (2009) determinaram em laboratório eficiência de oxidação média de 44% para materiais com composto de RSU e Roncato (2009) também determinou eficiência de oxidação de 10% a 96% para colunas preenchidas com composto. Huber-Humer e Lechner (2001) determinaram eficiência de oxidação de CH<sub>4</sub> de até 100% em camadas de material de baixa densidade como é o caso da camada MET01.

Nas medições realizadas na MET02, 50% dos resultados não apresentaram redução na relação CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>, levando a estimar-se eficiência de oxidação nula. Os demais resultados apresentaram média de eficiência de 17,8%, porém com grande dispersão. A menor eficiência de oxidação CH<sub>4</sub> da MET02 em relação a MET01 pode estar associada a uma menor atividade de micro-organismos decorrente de baixas concentrações de CH<sub>4</sub> na base, tendo em vista que esse perfil apresentou concentração média de CH<sub>4</sub> na base de apenas 22%, enquanto no perfil MET01 essa concentração média foi de 54%. Esse resultado concorda com Denver *et al.* (2007) que mencionam que a taxa de oxidação de CH<sub>4</sub> depende das condições de vazão e concentração impostas sob a camada de cobertura. Esse perfil também apresentou uma relação CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> na interface solo resíduo acima de 1, sugerindo que pode estar havendo oxidação já no interior do resíduo devido a presença de oxigênio na base, em concentrações acima de 5%, provocada possivelmente por fissuras nas proximidades do perfil, prejudicando as reações de oxidação nesse perfil.

### **b) Barreira capilar (BAC)**

No perfil da BAC01 (barreira capilar sem vegetação) as concentrações de CH<sub>4</sub> na base de pedras variaram de 37% a 58%, e nas primeiras medições a concentração na interface pedra/geotêxtil/solo variou de 17,5% a 23,5%, demonstrando que a camada drenante abaixo da camada de solo compactado, distribuiu o biogás, diminuindo a disponibilidade de CH<sub>4</sub> para reações de oxidação. Embora tenha apresentado umidade dentro da faixa considerada adequada para reações de oxidação, as características do solo, como pH abaixo de 6 (ácido), menor quantidade

de matéria orgânica e ausência de vegetação, condicionaram as menores taxas de oxidação, onde em 75% dos ensaios realizados não mostraram variações na relação  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ , determinando eficiência de oxidação nula. Essa camada também apresentou variação de temperatura inferior às apresentadas pelas camadas MET01 e MET02 sugerindo menor atividade microbiológica.

Na barreira capilar com vegetação (BAC02) as concentrações de  $\text{CH}_4$  na base apresentaram também grande variação, desde 12,8% a 55,0% e da mesma forma que na BAC01, as pedras existentes entre o resíduo e a base de solo compactado funcionaram como uma camada drenante, diminuindo as concentrações de biogás na base da camada de solo. Esse perfil apresentou uma eficiência média de oxidação de 42,6% com grande dispersão dos resultados, porém a presença de vegetação foi o fator determinante para uma maior eficiência média de oxidação, como também mostrado por Humer e Lechener (2003) e Reichenauer *et al.* (2011).

Poucos estudos relacionam barreiras capilares com taxas de oxidação. Geralmente os estudos de laboratório usam uma camada drenante de gás para distribuir melhor a vazão na base, e dessa forma, esses perfis se assemelham a barreira capilar estudada. Berger *et al.* (2005) apresentaram taxas de oxidação em barreiras capilares recobertas com composto da ordem de 80% a 95%, que é bem superior aos apresentados nos perfis BAC01 e BAC02, porém a barreira estudada por esses autores era composta por uma camada de 0,35 m de uma mistura de areia e composto sobreposta a uma camada de 0,85 m de areia acima barreira capilar, com espessura total de 1,60 m, bem superior as espessuras da BAC01 e BAC02. Urmann *et al.* (2007) simulando a cobertura de um aterro em uma coluna com areia grossa de 0,80 m sobreposta a uma camada de brita, determinou taxas de oxidação de até 100%.

### **c) Camada convencional (CONV)**

No perfil sem vegetação (CONV01) as variações na relação  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  foram menores que as apresentadas pela MET01 e BAC02 e de mesma magnitude da MET02. A média de eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  foi de 21,7% com variações de 0 a 31,5%. Esse perfil apresentou menores variações de temperatura, sugerindo baixa atividade microbiológica, possivelmente devido as características do solo com pH ácido, baixo conteúdo de matéria orgânica, ausência de vegetação e fissuras no entorno do perfil que condicionaram a menor eficiência de oxidação.

No perfil com vegetação (CONV02) as concentrações de CH<sub>4</sub> na base da camada apresentaram variações de 13,5% a 57,0%, provavelmente por se situar numa região próxima do talude onde pode haver fugas laterais. O perfil CONV02 apresentou uma eficiência média de oxidação de CH<sub>4</sub> de 58,8% com variações de 15,2% a 94,6%, bem maiores que na camada convencional sem vegetação. A eficiência média do perfil CONV02 foi aproximada da apresentada pela camada MET01, onde foi determinada eficiência de oxidação 64,9%. Na região onde se encontrava perfil CONV02, a vegetação era intensa, ressaltando-se que a espessura de solo nesse local é de 0,80 m (0,10 m superior a CONV01), e em algumas medições nesse perfil, as concentrações de biogás eram muito baixas. Albanna *et al.* (2007) estudaram o efeito da espessura do substrato nas taxas de oxidação e concluíram que quanto maior a espessura da camada maior será o tempo de contato do CH<sub>4</sub> com os micro-organismos, já que quanto maior o volume de solo maior será a população de microbiana. Nesse perfil, o pH e o teor de matéria orgânica são superiores aos apresentados pelo perfil CONV01, além de as temperaturas medidas ao longo das determinações de oxidação serem mais elevadas do que as medidas na CONV01, e bem próximas das medidas na MET01, sugerindo reações de oxidação no perfil CONV02.

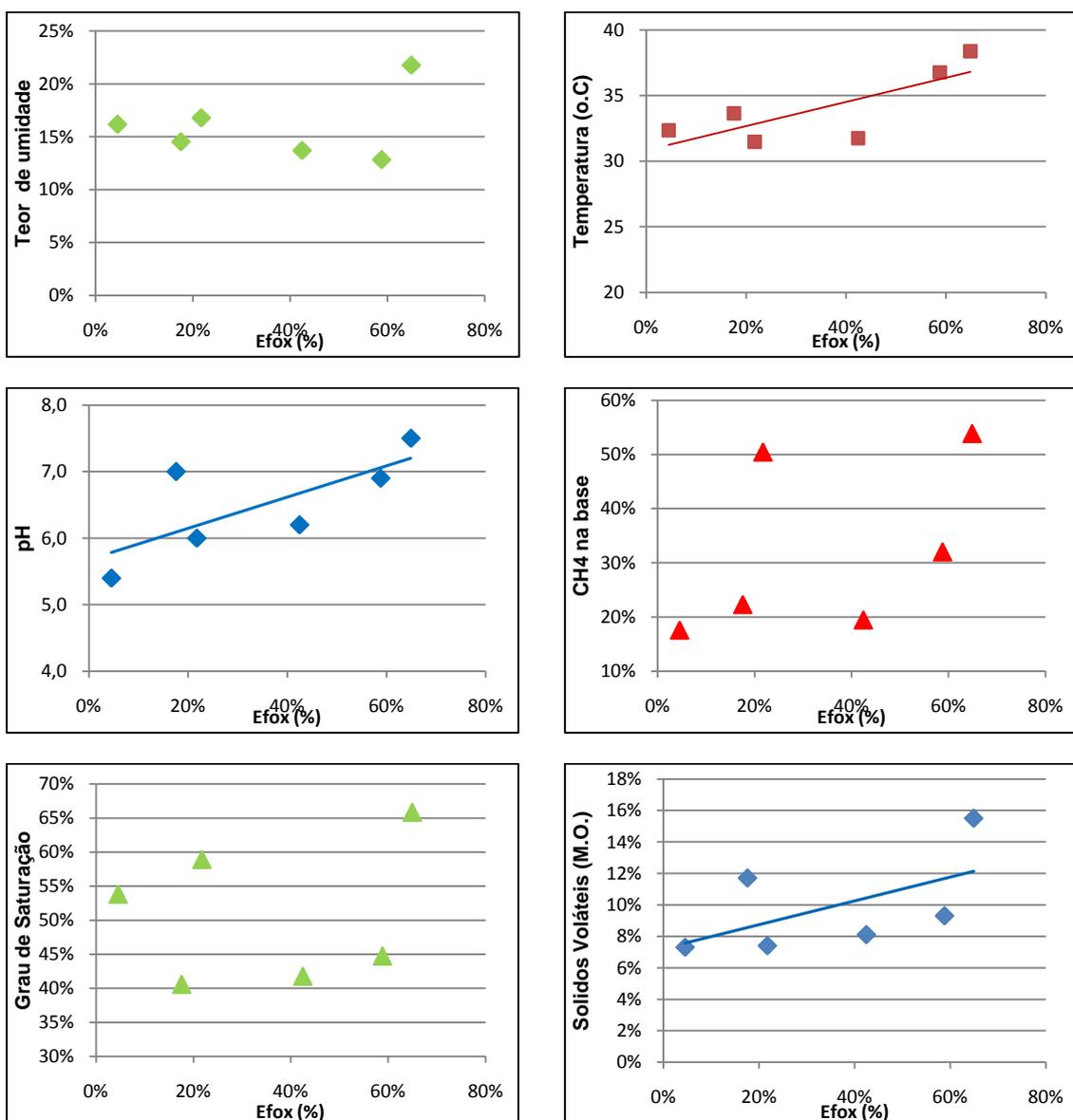
Verifica-se a partir dos resultados que maiores eficiências de oxidação foram determinadas nas camadas com vegetação, sendo esse, portanto um fator determinante para as reações de oxidação, tendo em vista que, na interface solo/raízes das plantas, se promove um meio adequado para desenvolvimento de bactérias, além de que facilita o transporte de oxigênio no solo, como mencionado por Chanton *et al.* (2011) e Bohn e Jager (2009).

As eficiências de oxidação determinadas em campo através do perfil de concentração nas coberturas experimentais são bem próximas das apresentadas por Stern *et al.* (2007), onde, para cobertura de solos ricos em matéria orgânica a eficiência de oxidação é de 40%±9%, em solos argilosos de 22%±5% e em solos de alta permeabilidade, como areias, de 55%±9%.

#### **4.6.3 Fatores de influência na oxidação de CH<sub>4</sub>**

As camadas de cobertura apresentaram características distintas ao longo do período monitorado. Na Figura 140 é mostrada a relação existente entre os principais

fatores que influenciam na oxidação em camadas de cobertura, em função da eficiência determinada no período monitorado. Umidade, temperatura, concentração de  $\text{CH}_4$  na base, foram medidos diretamente em cada camada ao longo do período, sendo representados pela média dos valores medidos. O teor de sólidos voláteis representando matéria orgânica e pH foram determinados em laboratório em amostras coletadas nesse período e o grau de saturação foi determinado a partir das medições de umidade volumétrica nos sensores instalados em cada perfil e as características geotécnicas do material.



**Figura 140:** Eficiência média de oxidação de  $\text{CH}_4$  acumulada ao longo da profundidade e variação da relação  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  da interface solo/resíduo até a camada superficial

Dentre os parâmetros analisados em cada camada, os que apresentaram melhor coeficiente de correlação com a eficiência de oxidação foi a temperatura do solo ( $R^2=0,8$ ), o pH ( $R^2=0,7$ ), o teor de matéria orgânica ( $R^2=0,6$ ). Albanna *et al.* (2010) demonstraram em estudos de laboratório que a temperatura foi o fator que mostrou maior significância nas variações de taxas de oxidação. O teor de umidade mostrou certa tendência com o aumento na eficiência de oxidação, porém com menor correlação. Da mesma forma, Stern *et al.* (2007) mostrou em estudos em biocoberturas e células controle que as taxas de oxidação foram inversamente relacionadas com a umidade do solo e apresentaram uma relação positiva entre a temperatura do solo e a oxidação.

Outro parâmetro relacionado com a eficiência de oxidação foi o conteúdo volumétrico de ar, como mostrado na Figura 141.

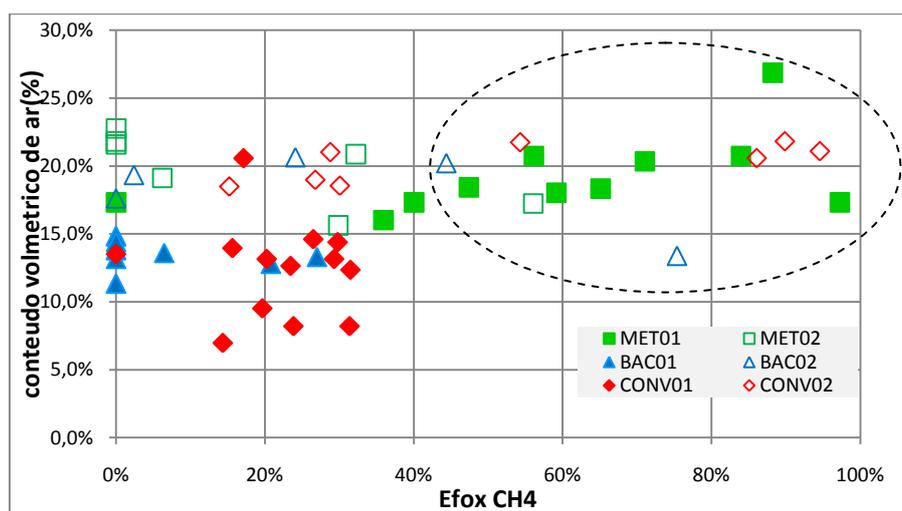


Figura 141: Eficiência de oxidação  $\text{CH}_4$  em função do conteúdo volumétrico de ar

Observa-se que os perfis CONV01 e BAC01 (perfis sem vegetação) apresentaram menor conteúdo volumétrico de ar e ao mesmo tempo menor eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$ , enquanto que os perfis MET01 e CONV02 apresentaram na grande maioria dos ensaios maior conteúdo volumétrico de ar. Verifica-se também uma tendência para maiores eficiências de oxidação de  $\text{CH}_4$  em perfis com conteúdo volumétrico de ar acima de 15%, que favorece a maior entrada de oxigênio e o transporte de biogás, e dessa forma as reações de oxidação, confirmando uma relação entre esse parâmetro e a eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  como reportado por Gebert *et al.* (2010), embora algumas determinações

## **CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS**

---

Com respeito à proteção ambiental, o Brasil não dispõe ainda de uma regulamentação sobre taxas de infiltração de águas ou de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros sanitários. A pesquisa realizada em três tipos camadas de cobertura instaladas na célula experimental do Aterro da Muribeca/PE contribuiu para responder estas questões, com o enfoque nos tipos de materiais e configurações construtivas, como alternativa para futuros projetos. O fluxo de líquidos e gases em cada camada foi também diretamente relacionado com os condicionantes climatológicos, devido à influência dos parâmetros ambientais nas condições de saturação do solo.

Em relação à infiltração as camadas do tipo metanotrófica e barreira capilar apresentaram taxa de infiltração anual bem superior à camada convencional de solo compactado. No entanto, os valores medidos encontram-se próximo aos recomendados pela USEPA para regiões de clima úmido, com taxas de infiltração mensal variando de 0 até 4,2% com relação à precipitação.

Quanto às emissões de CH<sub>4</sub>, as camadas metanotrófica e barreira capilar (com vegetação) apresentaram emissões seis vezes inferiores à camada convencional de solo compactado. Essa solução se constitui em uma alternativa promissora para utilização em cobertura final de aterros, onde não seja viável a instalação de sistemas de extração forçada de biogás, seja por motivos de ordem técnica e/ou econômica, como é o caso da grande maioria dos aterros dos municípios de pequeno e médio porte no Brasil, e em aterros antigos, para evitar emissões de CH<sub>4</sub> após fechamento.

A partir da avaliação do desempenho das camadas experimentais se propõe um dimensionamento de camada de cobertura para aterros sanitários que leve em consideração o uso de uma camada drenante na base, uma camada homogênea intermediária de solo fino, e uma camada de proteção compactada, com mistura de solo e composto. Isso irá favorecer a retenção de umidade em estações chuvosas, o crescimento de vegetação ao longo de todo ano, maiores taxas de oxidação de CH<sub>4</sub> nas estações secas, pelo maior ingresso de O<sub>2</sub> e proteção final da camada de cobertura.

Algumas considerações iniciais com relação aos procedimentos de investigação são necessárias antes da apresentação das conclusões:

- A ausência de controle de umidade e compactação durante a execução da camada de cobertura da célula experimental não permitiu avaliar individualmente, quais os fatores que influenciaram na permeabilidade, em cada camada de cobertura.
- A colocação do infiltrômetro na base da camada de cobertura após um ano de sua execução demandou um esforço muito grande, tanto na execução quanto na manutenção das características das áreas de estudo, para que pudessem ser representativas de cada camada instalada.
- O sensor de umidade instalado no perfil do solo apresentou facilidade de instalação, custo elevado para uma vida útil relativamente pequena, dificultando as medições de umidade necessárias para as análises dos processos de fluxo de água e emissão de biogás em alguns períodos.
- A curva de retenção de água obtida em condições de campo foi de grande importância para as análises do comportamento de cada material em relação ao fluxo de líquido e gás.
- As análises de emissão de  $\text{CH}_4$  foram realizadas sem extração forçada para simular aterros, onde não há qualquer exploração econômica de biogás.
- A metodologia utilizada para determinação de eficiência de oxidação, baseada na medição de perfis de concentração, foi usada como indicativo qualitativo de oxidação de  $\text{CH}_4$  e apresentou relativa facilidade técnica e viabilidade econômica.

## **CONCLUSÕES**

### **Caracterização dos materiais**

1. A camada convencional e barreira capilar executadas com solo de características semelhantes e configurações geométricas diferentes apresentaram curvas de retenção de água com formato coincidente, com pequenas alterações, devido às diferenças de compactação em campo.
2. A adição de composto orgânico ao solo, em duas proporções alterou as características físicas e químicas dos materiais, tais como: diminuição da massa específica dos grãos, do peso específico aparente seco aparente, aumento da

porosidade e conseqüentemente da permeabilidade saturada, aumento na capacidade de armazenamento de água e alteração nos limites de consistência.

3. A mistura de solo e composto na proporção de 1:1, em volume (MET01), aumentou a permeabilidade saturada em 30 vezes, em relação a proporção de 3:1 (MET02) e em 1.000 vezes em relação ao solo compactado.
4. O modelo de van Genuchten (1980) não forneceu uma previsão adequada da variação da permeabilidade não saturada em função da saturação quando comparada com a permeabilidade medida em campo, provavelmente devido a utilização no modelo, das variáveis  $m$  e  $n$  de forma independentes.
5. O comportamento da curva teórica de permeabilidade ao ar mostrou que para as camadas de solo compactado, há um decréscimo rápido de permeabilidade ao ar para grau de saturação acima de 90%. Para os materiais com composto observou-se uma diminuição gradual e linear até a permeabilidade ao ar atingir valores mínimos.

### **Infiltração de água**

O comportamento em relação à infiltração esteve diretamente relacionado com as características construtivas de cada tipo de cobertura, com as características dos materiais e com alguns condicionantes climatológicos, tendo o estudo mostrado que:

1. A camada metanotrófica apresentou maior densidade de vegetação dentre as três camadas de cobertura, e a proporção de composto adicionado ao solo também exerceu influência nas variações de umidade entre estações secas e chuvosas. A MET01 sempre apresentou umidade superior à MET02, em todas as estações, devido a presença de maior quantidade de composto.
2. Para BAC verificou-se que, em períodos secos, a umidade da camada superficial foi sempre superior, sugerindo a formação de uma camada de armazenamento de água. Para períodos de altas precipitações a barreira capilar apresentou tendência de um perfil uniforme de umidade. O geotêxtil presente na interface solo/pedra, que possui uma permeabilidade saturada semelhante à de uma areia média a grossa, funcionou como elemento de mudança de permeabilidade em relação ao solo compactado.
3. O perfil da BAC com vegetação apresentou características de camada evapotranspirativa, com maior variação de umidade entre estações secas e chuvosas do que na BAC sem vegetação. No período seco a umidade superficial

no perfil com vegetação foi sempre inferior a do perfil sem vegetação, igualando-se em períodos de precipitações mais intensa.

4. A camada convencional (CONV) apresentou perfil de umidade praticamente constante ao longo do tempo, com diminuição ao longo da profundidade e com umidade abaixo da capacidade de campo em quase todos os dias monitorados. Essa camada só apresentou infiltração para grandes precipitações (acima de 300 mm acumulados em 3 dias), e mesmo assim a taxa de infiltração mensal foi inferior a 0,1%.
5. As maiores medidas de infiltração foram registradas nas camadas MET01 e BAC, nos meses com precipitação acumulada acima de 280 mm. Nos meses de baixa precipitação, a infiltração foi nula na BAC e CONV, e insignificante na MET01. De um modo geral as taxas de infiltração mensal em relação à precipitação variaram de 0 a 4,2% na MET01 e de 0 a 3,5% na BAC. Essas camadas apresentaram um desempenho satisfatório, mesmo considerando-se menores espessuras de solo em relação à camada convencional. A infiltração anual medida foi de 29,8 mm e 30,6 mm para a MET01 e BAC respectivamente, próximas às recomendadas pela USEPA (30 mm) para regiões de clima úmido.
6. A correlação entre umidade e infiltração na base da camada, medida em dias anteriores a chuvas acima de 10 mm, foi melhor na área de estudo da MET01 e na BAC, sugerindo que não houve formação de caminhos preferenciais. Na área da camada convencional o menor coeficiente de correlação sugere possíveis caminhos preferenciais ou erros de leitura, pois o sensor na referida profundidade apresentou oscilações no mês de alto índice pluviométrico e posteriormente parou de funcionar.
7. A variação de nível de lixiviados medida no interior da célula apresentou relação direta com as variações de precipitação na região das camadas MET01 e BAC, sugerindo a influência da infiltração nessa região onde se observou maior variação do nível de lixiviado ao longo das estações secas e chuvosas, enquanto que na região camada da convencional, o nível de lixiviado foi praticamente constante.

### **Emissões de biogás**

As emissões de CH<sub>4</sub> apresentaram um padrão sazonal e bastante relacionado com as variações climáticas, devido à influência nas condições de saturação do solo e nos processos de oxidação, que conseqüentemente se refletiram nas taxas de emissões de CH<sub>4</sub>. A partir dos resultados deste trabalho pode-se afirmar que:

1. Na estação chuvosa da região Nordeste do Brasil (março a agosto), quando se concentram as maiores precipitações, o fluxo de  $\text{CH}_4$  foi nulo ou de até  $31 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$  nas camadas metanotróficas e barreira capilar, em função do grau de saturação no solo e da influência dos fatores ambientais, como menor temperatura e maior pressão atmosférica.
2. A camada convencional apresentou emissões 6 vezes superior às camadas metanotrófica e barreira capilar, embora com maior espessura de solo. A faixa de variação de emissão de  $\text{CH}_4$  (excluindo-se os picos em função de fissuras) na camada de cobertura convencional, foi de 0 a  $250 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$  e nas demais camadas foi de 0 a  $40 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ .
3. O fator determinante para redução de emissões de  $\text{CH}_4$  foi a presença de vegetação e o grau de saturação acima de 70% nas camadas metanotrófica e barreira capilar e acima de 80% na camada convencional favorecendo a retenção por fenômenos físicos de bloqueio de passagem de ar.
4. A menor emissão de  $\text{CH}_4$  em todos os períodos monitorados pela barreira capilar foi influenciada pela camada de drenagem na base, minimizando as concentrações na interface pedra/geotêxtil/solo e com isso menores vazões impostas na base da camada. Além disso, em quase toda área, a vegetação presente favoreceu aos processos de oxidação, e conseqüentemente menores emissões de  $\text{CH}_4$ .
5. A eficiência em relação às emissões de  $\text{CH}_4$  da camada metanotrófica se deve ao comportamento da camada de solo compactado na base, que minimiza o fluxo em períodos chuvosos e a oxidação na camada com composto, em períodos secos. A camada MET01 seguida dos perfis com vegetação da CONV e da BAC apresentou eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  de 64,9%, 58,8% e de 42,4% respectivamente, em um período seco. Os demais perfis apresentaram grande dispersão dos resultados, com eficiência nula, na maior parte do tempo monitorado.
6. Dentre os parâmetros do solo analisados em cada camada, os que apresentaram melhor coeficiente de correlação com a eficiência de oxidação foram a temperatura na camada, o pH e o teor de matéria orgânica, além da tendência para maiores eficiências de oxidação em perfis com conteúdo volumétrico de ar acima de 15% devido a maior entrada de oxigênio no perfil do solo, favorecendo o transporte de biogás e as reações de oxidação.

A destinação final de resíduos sólidos em aterros sanitários necessita continuamente de pesquisas que envolvam tecnologias na minimização dos impactos

ambientais gerados pela disposição de resíduos. O estudo em diferentes materiais e configuração de projeto contribuiu para o entendimento do desempenho em termos de fluxo de líquido e gás frente às variações climáticas impostas às camadas de cobertura de aterros. Essa pesquisa demonstrou que as camadas de solo compactado, que continuamente são utilizadas nos aterros, precisam incorporar materiais com capacidade de retenção de umidade, e ao mesmo tempo incrementar as taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$ , apresentando infiltração compatível com a umidade necessária aos processos de biodegradação. Dessa forma, as emissões de  $\text{CH}_4$ , em aterros ativos ou em encerramento, podem ser reduzidas por meio de camadas de cobertura que utilizem o conhecimento da engenharia de solos nos seus projetos, minimizando os impactos ambientais e tornando mais atrativo os projetos de implantação de aterros, adequando-os à realidade brasileira.

### **SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS**

1. Dar continuidade as medições de infiltração para avaliar por um período maior de tempo as modificações estruturais nas camadas de cobertura e sua influência na infiltração e nas emissões de biogás.
2. Instalar estação climatológica nas imediações da célula experimental para quantificar evapotranspiração em cada tipo de camada de cobertura, medindo-se também o escoamento superficial em cada área de estudo.
3. Avaliar com uso da modelagem numérica, o comportamento das camadas de cobertura pesquisadas, incluindo efeitos de umidade e temperatura no fluxo de líquido e de biogás, comparando com os resultados obtidos em campo.
4. Simular em laboratório, através de ensaios de colunas, o desempenho das camadas de cobertura em aterros com extração forçada de biogás, observando os aspectos de gradientes de pressão e os fatores internos e externos ao aterro.
5. Utilizar ferramentas estatísticas para avaliar as variações de emissão de  $\text{CH}_4$ , procurando determinar o comportamento de cada tipo de cobertura e a relação entre as emissões e as variáveis de influência.
6. Determinar em laboratório, a taxa de oxidação dos materiais usados na camada experimental, analisando as variações ao longo do tempo.
7. Identificar e quantificar as bactérias metanotróficas em cada cobertura experimental, em dois períodos do ano, avaliando as diferenças em função das características dos materiais e em profundidade.

8. Analisar parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água, dos solos adicionados com composto, testando outros modelos de previsão, para avaliar a adequação a esses materiais.

## REFERENCIAS

- ABICHOU, T.; LANGONI, G. TAWFIC, K.; (2003) **Assessment of Alternative Earthen Final Covers for Florida Landfills**. Report #03-05. 107 p.
- ABICHOU, T.; CHANTON, J.; POWELSON, D.; FLEIGER, J.; ESCORIAZA, S.; YUAN, L.; STERN, J. (2006a). Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. **Waste Management** 26, 1305–1312.
- ABICHOU, T.; CHANTON, J.; POWELSON, D.; FLEIGER, J.; ESCORIAZA, S.; YUAN, L.; STERN, J. (2006b). Characterization of Methane flux and oxidation at Solid Waste landfill covers. **Journal of Environmental Engineering**. Feb. pp. 220-228.
- ABICHOU, T.; MAHIEU, K.; YUAN, L.; CHANTON, J.; HATER, G. (2009) Effects of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover **Waste Management** 29, 1595–1601.
- ABNT (1984a) **Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos** NBR – 6508 (1984) Rio de Janeiro - RJ
- ABNT (1984b) **Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma** NBR - 7181/84
- ABNT (1984c) **Solo – Determinação do Limite de Liquidez** NBR – 6459/84. Rio de Janeiro - RJ
- ABNT (1984d) **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade** NBR – 7180/84. Rio de Janeiro - RJ
- ABNT (1986a): **Amostra de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização** NBR 6457/86. Rio de Janeiro - RJ
- ABNT, (1986b) **Solo - Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal** NBR – 7182/86. Rio de Janeiro - RJ
- ABNT (1992) **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. NBR 8419/92. Rio de Janeiro - RJ.
- ABNT, (1995) **Solos e rochas** - NBR 6502/95. Rio de Janeiro - RJ
- ABNT (1997) **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. NBR 13.896/97. Rio de Janeiro - RJ
- AIT-BENICHO, S.; CABRAL, A. R. PANAROTTO, C. T. (2008) evolution of biodegradation of deinking by-products used as alternative cover material. **Waste Management** v. 28, p 85-96.
- AIT-BENICHO, S.; JUGNIA, LOUIS-B.; GREER, C. W.; CABRAL, A. R. (2009) Methanotrophs and methanotrophic activity in engineered biocovers. **Waste Management** v. 29, p 2509-2517
- AKERMAN, A.; BUDKA, A.; HAYWARD-HIGHAM, S.; OBOUR, O.; RALLU, D. Methane emissions measurements on different landfills, In: **Proceedings Sardinia 2007**, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2007. CD
- ALBANNA, M.; WARITA, M.; FERNANDES, L. (2010) Kinetics of biological methane oxidation in the presence of non-methane organic compounds in de landfill bio-covers. **Waste Management** 30 pp. 219-227.

ALBRIGHT, W. H.; BENSON, C.H.; GEE, G. W.; ROESLER, A. C.; ABICHOU, T. (2004) Field Water Balance of Landfill Final Covers. **Journal of Environmental Quality**. Vol.33: pp. 2317-2332.

ALBRIGHT, W. H.; BENSON, C.H.; GEE, G. W.; ABICHOU, T.; TYLLER, S. W.; ROCK, S.A. (2006) Field Performance of Three Compacted Clay Landfill Covers. **Vadose Zone Journal** 5: 1157-1171.

ALCÂNTARA, P. B. (2007). **Avaliação da influência da composição de Resíduos Sólidos Urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil / Grupo de Resíduos Sólidos. Universidade Federal de Pernambuco Recife-PE.

ALVES, I. R. F. S. (2008) **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia e Geociências. UFPE. 134p

ASTM (2010) D5084-10 - Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. **American Society for Testing and Materials**. Volume 04.08. Soil and Rock (I): D420 - D5876.

BABILOTTE, A.; LAGIER, T.; FIANI, E.; TARAMINI, V. (2010) Fugitive methane emissions from landfills: Field comparison of five methods on a French landfill. **Journal of Environmental Engineering - ASCE**. August. 777-784.

BENDER, M.; CONRAD, R. (1995) Effect of CH<sub>4</sub> concentrations and soil conditions on the induction of CH<sub>4</sub> oxidation activity. **Soil Bio. Biochem**. Vol. 27, No. 12, pp. 1517-1527.

BENSON, C. H; KHIRE, M.V. (1995) Earthen Covers for Semiarid and Arids Climates. In: Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery. ASCE, **Geotechnical Special Publication**. n°. 53, R. Jeffrey Dunn and Udai P. Singh, Eds., New York, N.Y., pp 201-217.

BERGER, J.; FORNE'S, L.V.; OTT, C.; JAGER, J.; WAWRA, B.; ZANKE, U. (2005) Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier. **Waste Management** 25 (2005) 369–373.

BERGER, K.; MELCHIOR, S. (2009) Landfill capping and water Balance of cover systems. In: **Proceedings Sardinia 2009**, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. (1999) **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC/USP. 120p.

BODELIER, P. L. E.; LAANBROET, H. J. (2004) Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. **FEMS Microbiology Ecology** 47 (2004) pp. 265-277.

BOECKX, P.; van CLEEMPUT, O.; VILLARALVO, I. (1996) Methane emission from a landfill and the methane oxidizing capacity of its covering soil. **Soil Biol. Biochem**. Vol. 28, no. 10/11, pp1397-1405.

BOECKX, P.; van CLEEMPUT, O. (1996) Methane oxidation in neutral landfill cover soil – Influence of moisture content, temperature, and nitrogen turnover, **J. Environ. Qual**. 25,178-183.

BOGNER, J.E.; SPOKAS, K.A.; BURTON, E.A.; SWEENEY, R.; CORONA, V. (1995) Landfills as atmospheric methane sources and sinks. **Chemosphere**, 31, pp. 4119–4130.

BOGNER, J.E., SPOKAS, K.A., BURTON, E.A. (1997): Kinetics of Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil: Temporal Variations, a Whole-Landfill Oxidation Experiment, and Modeling of Net CH<sub>4</sub> Emissions. **Environ. Sci. Technol.**, 31, pp. 2504-2514.

BOHN, S.; JAGER, J. (2009) Microbial methane oxidation in Landfill Top covers – process study on an MBT Landfill. In: **Proceedings Sardinia 2009**, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

BORJESSON, G. (1996) Methane oxidation in landfill cover soils. **Doctoral Thesis**, Dept. of Microbiology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.

BORJESSON, G.; SVENSSON B. H. (1997) Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation. **Waste Management and Research**, 15(1), pp. 33-54.

BORJESSON, G.; SUNDH, I; SVENSSON B. H. (2004) Microbial oxidation of CH<sub>4</sub> at different temperatures in landfill cover soils. **FEMS Microbiology Ecology** 48 (2004) 305–312.

BORMA, L. S.; KARAM FILHO, J. (2004) Aspectos teóricos da modelagem do balanço hídrico no sistema solo-planta-atmosfera. In: **5º. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. São Carlos/SP. pp. 217-222.

BOSCOV, M. E. G. (2008) **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos. 248p.

BRANDÃO, V. S.; CECILIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. (2006) **Infiltração de água no solo. 3 ed. Atual e ampl.** – Viçosa: Ed. UFV.

BRASIL (2010) **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicada no D.O.U. em 3.8.2010. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)> Acesso em: 12 set. 2010.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1968) Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. **Journal of the Irrigation and Drainage**. Div. Am. Soc. Civ., vol. 92, n. IR2, p. 61- 66.

CABRAL, A.R.; TREMBLAY, P.; LEFEBVRE G. (2004) Determination of the diffusion coefficient of oxygen for a cover system composed of pulp and paper residues. **Geot. Testing J.**, Vol. 27, No. 2, pp 184-197.

CABRAL, A.R.; ARTEAGA, K.; RANNAUD, D.; AÏT-BENICHO, S.; POUËT, M.F.; ALLAIRE, S.; JUGNIA L-B.; GREER, C. W. (2007) Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier. In: **Proceedings Sardinia 2007**, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

CABRAL, A.R.; MOREIRA, J.F.; ASKRI, M. A.; SANTOS, A.K.; JUGNIA, L.B. (2008) **Engineering landfill covers for methane oxidation: lessons learned**. 5th International Landfill Research Symposium. Colorado.USA.

CABRAL, A.R.; MOREIRA, J.F.; JUGNIA L-B. (2010) Biocover Performance of Landfill Methane Oxidation: Experimental Results. **Journal of Environmental Engineering**. ASCE/aug. 785-793

CAMPBELL, G. S. (1974) A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science** 117, p. 311-314.

CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. (1999) Ajuste do método de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas árido e super úmidos,

baseados na amplitude de temperatura diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. 7 (2), pp.251–257.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. (2003) **Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro. ABES, RiMA. 294 p.

CATAPRETA, C. A. A. (2008) Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da influência do projeto, construção e operação. Belo Horizonte. **Tese de Doutorado** - Universidade Federal de Minas Gerais.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proc. of the Institute of Civil Engineering**, 92, No. 2, pp. 82-89

CHANTON, J. P.; LIPTAY, K. (2000) Seasonal Variation in Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil as determined by an in situ stable isotope technique. **Global Biogeochem. Cycles**, Vol. 14, pp 51-60.

CHANTON, J.; ABICHO, T.; LANGFORD, C.; SPOKAS K.; HATER, G.; GREEN, R.; GOLDSMITH, D.; BARLAZ, M. A. (2011) Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. **Waste Management 31 (2011) 914–925**

CHRISTOPHENSEN, M; KJELDSSEN, P.; HOLST, H.; CHANTON, J. (2001) Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. **Waste Management Research** v. 19; 595-612

COSSU, R; MUNTONI, A.; CHIARANTINI, L.; MASSACCI, G.; SERRA, P.; SCOLLETTA, A. e STERZI, G. (1997). Biogas emission measurements using static and dynamic flux chambers and infrad methods. In: **Proceedings Sardinia 1997**, Sixth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. vol. 4 pp. 103-114.

COSSU, R. (2010) Technical evolution of landfilling. **Waste Management** 30 (2010) p947-948.

CUNHA, A. T.; WEDLAND, E. (2005) Uso de lisímetro para avaliação da infiltração em zona de afloramento da formação Botucatu, na região de São Carlos – SP. In: **Águas Subterrâneas**, v.19, n.2, p.77-90, 2005.

CZEPIEL, P.M.; MOSHER, B.; CRILL, P.M.; HARRISS, R.C.(1996) Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions. **Journal of Geophysical Research**, vol. 101, nºD11, pp. 16.721-16.729.

CZEPIEL, P.M; SHORTER, J.H.; MOSHER, B.; ALLWINE, E.; MCMANUS, J.B; HARRISS, R.C.; KOLB, C.E.; LAMB, B.K. (2003) The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions. **Waste Management** v. 23 593–598.

DANIEL, D. E. (1990) Summary Review of Construction Quality Control for Compacted Soil Liners. In: **Waste Containment Systems; Construction, Regulation, and Performance. Geotechnical Special Publication**, nº. 26. ASCE, R. Bonaparte, ed., New York, NY, pp. 175-189.

De VISSCHER, A.; THOMAS, D.; BOECKX, P.; van CLEEMPUT, O. (1999) Methane oxidation in simulated landfill cover soil environments. **Environmental Science and Technology**, Vol. 33, No. 1, pp 1854-1859.

De VISSCHER, A.; van CLEEMPUT, O. (2003a). Induction of Enhanced CH<sub>4</sub> oxidation in soils: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> inhibition patterns. **Soil Biology and Biochemistry**, 35, pp. 907-913.

De VISSCHER, A.; van CLEEMPUT, O. (2003b). Simulation model for gas diffusion and methane oxidation in landfill cover soils. **Waste Management** . v.23, pp. 581–591.

De VISSCHER, A.; POURCQ, I.; CHANTON, J. (2004). Isotope fractionation effects by diffusion and methane oxidation in landfill cover soils. **Journal of Geophysical Research** v. 109, D18111, 8pp..

DWYER, S. F.(2003) **Water balance measurements and computer simulations of landfill covers**.Ph Thesis. University of New Mexico, Civil Engineering Department. 250 p.

EINOLA, J. M.; KARHU, A. E., RINTALA, J. A. (2008) Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions. **Waste Management**, Vol. 28, No. 1, pp 97-111.

EL-FADEL, M., BOU ZEID, E., CHAHINE, W. & ALAYLI, B. (2002) Temporal Variation Leachate Quality from Pre-Sorted and Baled Municipal Solid Waste with High Organic and Moisture Content. **Waste Management**, v.22, pp. 269-282.

EMBRAPA (1997) EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

EMERSON, W.W.; MCGARRY, D. (2003) Organic carbon and soil porosity. **Australian Journal of Soil Research**, Melborn, v.41,p. 107-118.

ENGLER, M. P. C.; JONG van LIER., Q. (2004) **Método simples para a determinação da condutividade hidráulica em amostras de solo não-saturadas**. 5º. Simpósio Brasileiro de Solos não saturados. São Carlos. SP 39-41.

ENVIRONMENT AGENCY (2004) Guidance on monitoring landfill gas surface emissions, Landfill Directive vol.07, Bristol, UK. Setembro, 2004.

FISCHER, K. (1999) **Gas emissions from Landfills: An overview of issues and research needs**. AFR-REPORT 264. 57p.

FOURIE, A.B.; MORRIS, J.W. F. (2004) Measured gas emissions from four landfills in South Africa and some implications for landfill design and methane recovery in semi-arid climates. **Waste Management Resources** V. 22 pp. 440–453

FRANZIDIS, J-P; HÉROUX, M.; NASTEV, M.; GUY, C (2008) Lateral migration and offsite surface emission of landfill gas at City of Montreal landfill site. **Waste Management & Research**. V. 26: 121-131.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993) **Soil Mechanics for Unsaturated Soils** – Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 486p.

FREDLUND, D.G.; XING, A. (1994), Equations for the soil-water characteristics curve. **Canadian Geotechnique Journal**, Vol.31 (3), pp.521-532.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. (1994), Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnique Journal**, Vol.31(3), pp.533-546.

GARDNER, W. R. (1958) Some Steady-State of the unsaturated Moisture flow equation with application to evaporation from water table. **Soil Science**, no. 85, Vol. 3 pp 282-232.

GEBERT, J., GROENGROEFT, A.; MIEHLICH, G. (2003) Methane oxidation in a biofilter system - influence of water content, temperature and salt concentration. In: **Proceedings Sardinia 2003**, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

GEBERT, J., STREESE-KLEEBOEG, J., (2007) New Approach to Measure in-situ Methanotrophic Activity. Presentation at the **ESF Exploratory Workshop on Mitigation of Methane Emissions Through Microbial Oxidation on Landfills – Evaluation and Quantification Approaches**, Vienna, Austria, 12th–14th December 2007.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; PFEIFFER E-M (2010). Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers. **Soil Biology & Biochemistry**. Article In Press. doi:10.1016/j.soilbio.2010.07.004

GEBERT, J., ROWER, I. U.; SCHARFF, H.; RONCATO, C. D. L. CABRAL, AL. R. (2011) Can soil gas profiles be used to assess microbial CH<sub>4</sub> oxidation in landfill covers? **Waste Management** 31 (2011) 987-994.

GEE, G. W. (2006) Evaluation of Evapotranspirative Covers for Waste Containment in Arid and Semiarid Regions in the Southwestern USA. **Vadose Zone Journal** V.5: p809-812

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A.S.F.J (2002) Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. In: **Unsaturated Soils**. Jucá, de Campos & Marinho (Eds).

GERSCOVICH, D. M. S.; GUEDES, M. N. (2004) Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados. **5º. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. São Carlos-SP. p. 249-253.

GOMES, L. P.; LANGE, L. C.; JUCÁ, J. F. T.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. (2006) Processos e Monitoramento da digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.) **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na Proteção Ambiental de Corpos D'água: prevenção, geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2006

GUIMARÃES, L. J. N.(2006) Aplicação de modelagem em Geotecnia Ambiental. **Notas de Aulas da Disciplina de Geotecnia Ambiental**. PPGE. Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE.

HADJ-HAMOU, T.; KAVAZANJIAN JR., E., (2003) Monitoring and Evaluation of Evapotranspirative Cover Performance. In: **Proceedings Sardinia 2003**, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

HE, R.; RUAN, A.; JIANG, C.; SHEN, D-S (2008) Responses of oxidation rate and microbial communities to methane in simulated landfill cover soil microcosms. **Bioresource Technology**, doi:10.1016 /j.biortech2007.12.066.

HETTIARATCHI J.P.A.; POKHREL, D. (2003) A new approach to quantify methane oxidation in a landfill bio-cover: experience with a pilot scale landfill test cell. In: **Proceedings Sardinia 2003**, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

HETTIARATCHI J.P.A.; PERERA, M.D.N. (2009) **Design of landfill cover systems incorporating soil methanotrophy for methane emission mitigation**. 11p. Disponível em: < <http://www.faculty.ait.ac.th/visu/Data/Publications/conference%20pdf%20files/1995-1999%20pdfs/DESIGN%20OF%20LANDFILL%20COVER%20SYSTEMS%20INCORPORATING%20SOIL%20METHANOT.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2009.

HILGER, H.A.; CRANFORD, D.F.; BARLAZ, M.A. (2000). Methane oxidation and microbial exopolymer production in landfill cover soil. **Soil Biology and Biochemistry** 32, 457–467.

HILGER, H.; HUBER-HUMER, M. (2003) Biotic Landfill Cover Treatments for Mitigating Methane Emissions. **Environmental Monitoring and Assessment**, Vol. 84, No. 1, pp 71-84.

HILGER H. A.; BOGNER, J; ADAMS, B.; HAMM, J.; BESNARD, F.; BODROSSY, L.; OLIVER, J.D. (2007) Bio-tarp: Developing a methanotrophic alternative daily cover to reduce landfill methane emission. In: **Proceedings of Sardinia 2007**, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium.

HUBER-HUMER, M.; LECHNER, P. (1999) Alternative approach to elimination of greenhouse gases from old landfills. **Waste Management Research**, 17 (6): 443-452.

HUMER-HUMER, M.; LECHNER, P. (2001) Microbial Methane Oxidation for the Reduction of Landfill Gas Emissions. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, Vol. Vol. 27, pp No. 3-4.

HUBER-HUMER, M. (2004) **Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost**. PhD Thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, 279 pp

HUBER-HUMER, M.; GEBERT, J.; HILGER, H. A. (2008) Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management & Research**, Vol. 26, No. 1, pp 33-46.

HUBER-HUMER, M.; RÖDER, S.; LECHNER, S.(2009) Approaches to assess biocover performance on landfills. **Waste Management** 29, pp. 2092–2104.

HUPE, K.; HEYER, K.-U. ; BECKER, J.F.; TRAORE, O.; NOETZEL, S. STEGMANN, R. ( 2003) Investigations of alternative landfill surface sealing systems in test fields. In Proceedings Sardinia 2003, **Ninth International Waste Management and Landfill Symposium**. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

IBGE (2007) **Manual Técnico de Pedologia**. Série Manual Técnico em Geociência n°. 4. 2ª. Edição. Rio de Janeiro. 316 p.

IBGE (2010) **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/default.shtm>> Acesso em: 10 set. 2010.

IM, J.; MOON, S.; NAM, K.; KIM, Y.-J.; KIM, J.Y. (2008) Estimation of mass transport parameters of gases for quantifying CH<sub>4</sub> oxidation in landfill soil covers. **Waste Management**. v. 29, pp 869-875.

IAA/PLANALSUCAR (1983). Instituto do Açúcar e do Alcool. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, 396p.

IPPC (2007) Climate Change 2007: **Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-ts.pdf>> Acesso em: 25 mai. 2008.

JANG, Y.-S.; KIM, Y. -W.; LEE, S. -I. (2002) Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea. **Waste Management**. v. 22, pp 261-267.

JONES, H. A.; NEDWELL, D.B. (1993) Methane emission and oxidation in a landfill cover soil. **FEMS Microbiological Societies** 102, 185-195

JUCÁ, J.F.T. (1990). **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tese de Doutoramento, Engenharia Civil, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

JUCÁ, J. F. T. Flow Properties of Unsaturated Soils under Controlled Suction (1993). **ASCE Special Geotechnical Publication**, Virginia, USA, v. 39, n. 1, p. 151-162, 1993. ISBN 978-0-87262-988-2.

JUCÁ, J. F. T. (2009) Permeabilidade do solo ao ar. **Notas de Aula** da disciplina de Mecânica dos solos não saturados. PPGEC. UFPE.

JUGNIA, L.-B.; CABRAL, A. R.; GREER, C. W. (2008) Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. **Ecological Engineering**. Vol. 33 pp.102–109

KHIRE, M. V; MEERDINK, J.S; BENSON, C.H.; BOSSCHER, P.J. (1995) **Unsaturated hydraulic conductivity and water balance predictions for earthen landfill final Covers**. In: Soil suction applications in geotechnical engineering practice. W. Wray, W.; Houston, S. (eds.). GEOTECH SPEC PUBL, ASCE, NEW YORK, NY, (USA), no. 48, pp. 38-57,

KHIRE, M. V; BENSON, C.H.; BOSSCHER, P.J. (1997) Water balance Modeling of Earthen Final Covers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. pp744 -754.

KIGHTLEY, D., NEDWELL, D.B., COOPER, M., (1995). **Capacity for methane oxidation in landfill cover soils measured in laboratory-scale soil microcosms**. Applied and Environmental Microbiology 61, 592±601.

KRULL, E. S.; SKJEMSTAD, J. O.; BALDOCK, A. J. (2004) **Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties**. GRDC report, Project CSO 00029. Disponível em < [www.grdc.com.au/uploads/documents/cso00029.pdf](http://www.grdc.com.au/uploads/documents/cso00029.pdf) >. Acesso em: 20 nov.2010.

LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; CASTILHOS JR., A. B.; RITTER, E.; MORAES, C. A. M.; SIMÕES, G. F.; PRIM, E. C. C.; FERREIRA, C. F. A.; SILVA, F. V. B.; COELHO, H. M. G.; BOFF, R. D. (2006) Processos Construtivos de Aterros Sanitários: ênfase no Estudo de Camadas de Cobertura como Mecanismos de Controle da Geração de Lixiviado. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.) **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na Proteção Ambiental de Corpos D'água: prevenção, geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES.475p.

LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. (2009) Geração e Características do Lixiviado. In: GOMES, L. P. (Coord) **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro, ABES. 358p.

LINS, E.A.M.. (2003) **Utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. UFPE.142.p

LOHILA, A.; LAUTILA, T.; TUOVINEM, J.-P.; AURELA, M.; HATAKKA, J. THUM, T.; PIHLATE, M.; RINNE, J.; VESALA, T. (2007) Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at municipal landfill. **Environm. Sci. Technol.** v. 41, 2717-2722.

LOISEAU, C.; CUI, Y.J.; DELAGE, P. (2002), Air conductivity of a heavily compacted swelling clay-sand mixture, **Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils**, eds. Jucá, Marinho e Campos, Recife, Brasil, Vol.1, pp.383-388.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F. C.; NASCIMENTO, J. C. F.; DOURADO, K. A. (2005). **Estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos sob a influência da biodegradabilidade**. In: 23º. Congresso Brasileiro da ABES, Anais... Campo Grande, MT.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. (2000), Laboratory and field test for studying gas flow through MSW landfill cover soil, **ASCE Geotechnical Special Publication** (Denver- USA), nº99, pp. 569-585.

MACIEL, F. J. (2003) **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 173 p.

MACIEL, F. J. (2009) **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 354 p.

MAHIEU K.; DE VISSCHER, A.; VANROLLEGHEM P. A.; van CLEEMPUT, O. (2007) Modelling of stable isotope fractionation by methane oxidation and diffusion in landfill cover soils. **Waste Management**. doi:10.1016/j.wasman.2007.06.003.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; MEDEIROS, J. F. (2005) Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível para as plantas em função de doses de vermicomposto. **CAATINGA**, Mossoró, v.18, n.3, p.195-199, jul./set. 2005.

MARIANO, M. O. H.; (2008) **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil. Recife-PE. 243p.

MARINHO, F. A. M. (1994), **Shrinkage behaviour of some plastic soils**, PhD Thesis, Imperial College, London, UK. 216p.

MARINHO, F. A. M.; SOUZA, L. (2010) Projeto de Pesquisa sobre sistema de cobertura de Aterro de RSU para oxidação biológica do metano. **Revista Limpeza Pública**, nº. 73, p. 6-13.

MAURICE, C.; LAGERKVIST, A. (2003) LFG emission measurements in cold climatic conditions: seasonal variations and methane emissions mitigation. **Cold Regions Science and Technology**, 36, 37–46

MATEUS, M.S.C.S.; MACHADO, S.L. (2007) Discussão sobre a utilização do modelo empírico de van Genuchten (1980) para ajuste de curva característica. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador, BA. Pp 451-456.

McBAIN, M. C.; WARLAND, J. S.; MCBRIDE, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C. (2005) Micrometeorological measurements of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a municipal solid waste landfill. **Waste Management Research**, Vol. 23. pp. 409–419

McCARTNEY, J.S., AND ZORNBERG, J.G. (2002). **Design and Performance Criteria for Evapotranspirative Cover Systems**. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Environmental Geotechnics, A.A. Balkema, Vol. 1, pp. 195-200.

MELCHIOR, S. (1997). In situ studies of the performance of landfill caps (compacted soil liners, geomembranes, geosynthetic clay liners, capillary barriers) **Land Contamination & Reclamation**. Vol. 5, no. 3, pp. 209-216.

MELCHIOR, S; SOKOLLEK, V.; BERGER, K.; VIELHABER, B. STEINERT, B. (2010). Results from 18 years of In situ performance Testing of Landfill cover systems in Germany. **Journal of Environmental Engineering** . Vol. 136, no. 8, pp. 815-823.

MILLER, C.J.; YESILLER, N.; YALDO, K. & MERAYYAN, S. (2002). Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol.128, nº 9. p.733-742.

MONTEIRO, V. E. D. (2003). **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE.

MORRIS, C. E.; STORTMONT, J.C. (1999) Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering/December 1999**.

MOSHER, B. W.; CZEPIEL, P.C.; SHORTER, J.; AIWINE, E.; HARRISS, R.C.; KOLB, C.; LAMB B. (1996) Mitigation of methane emissions at landfill sites in New England, USA. **Energy Convers. Mgmt** Vol. 37, Nos 6-8, pp. 1093-1098.

MUALEM, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated porous media. **Water Resource, Res** 12 (3), 513-522

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (2007) **Assessment of the Performance of Engineered Waste Containment Barriers**. Disponível em <<http://www.nap.edu/catalog/11930.html>>. Acesso em: 20 jan. 2010.

NIKIEMA, J.; BRZEZISNKI, R.; HEITZ, M. (2007) Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. **Rev. Environmental Science Biotechnology**. 6:261-284.

NOZHEVNIKOVA, A.; GLAGOLEV, M.; NEKRASOVA, V.; EINOLA, J., SORMUNEN, K.; RINTALA, J., (2003). The analysis of methods for measurement of methane oxidation in landfills. **Water Science and Technology** 48 (4), 45–52.

PARK, J.W; SHIN, H.C. (2001), Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. **Atmospheric Environment**, nº35, pp.3445-3451.

PARK S.; LEE, C. RYU, SUNG, K. (2009) Biofiltration for Reducing Methane Emissions from Modern Sanitary Landfills at the low methane generation stage. **Water Air Soil Pollute**. 196:19–27

PAWŁOWSKA M.; STEPNIEWSKI, W. (2006) An influence of methane concentration on the methanotrophic activity of a model landfill cover. **Ecological Engineering**, 26 p392–395

PELCZAR, Jr., M. J.; CHAN, E.C.S.; KRIEG, N.R. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. 2ª edição; São Paulo-SP: Makron Books, 1997. v.2.

PINTO, J. S. (2005) **Estudo da Condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria-RS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. RS. 154 p.

POWELSON, D. K.; CHANTON, J.; ABICHOU, T.; MORALES, J. (2006) Methane oxidation in water-spreading and compost biofilters. **Waste Management and Research**, Vol. 24, N<sup>o</sup>. 6, pp 528-536.

PURIFICAÇÃO, R. C. (2009) **Utilização de biocamada metanotrófica como alternativa para redução de emissões de metano por Aterros sanitários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 168 p.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D. D. (2004) **Escoamento Superficial**. 2Ed. – Viçosa: UFV. 87p.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. (2002) **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction**. Prentice Hall. New Jersey. 717p.

RANNAUD, D.; CABRAL, A.R.; ALLAIRE, S. (2009) Modeling methane migration and oxidation in Landfill cover materials' with TOUGH2-LGM. **Water Air Soil Pollut.** V. 198 p. 253-267.

REICHENAUER, T. G.; WATZINGER, A.; RIESING, J. GERZABEK, M. (2011) Impact of different plants on the gas profile of landfill cover. **Waste Management** 31 p 843-853.

RODRIGUES, T.S.N., (2009) **Estudo de viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado em célula experimental no aterro controlado da Muribeca – PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 151p.

RONCATO, C. (2009) **Étude des taux d'oxydation du méthane dans des colonnes expérimentales simulant un biorecouvrement de site d'enfouissement**. Mémoire de Maîtrise. Faculté de Génie. Université de Ssherbrooke Canada. 133p.

ROSE, J.L.; GOUVEIA, P.P.F.; MAHLER, C. F. (2007) Study of methane oxidation on a covering layer. In: **Proceedings Sardinia 2007**, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

ROSE, J.L. (2009) **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camada oxidativas experimentais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 166p

ROWE, R. K. (1998). From the past to the future of landfill engineering through case histories. In: **Proceedings of Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**. St Louis. Missouri. USA.

SANTOS, C. (2007), Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem, Lisboa, Edições Sílabo.

SCANLON, B.R.; REEDY, R. C.; KEESE, K. E. DWYER, S.F. (2005) Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the southwestern USA. **Vadose Zone J.** 4: 55-71. Disponível em: < [www.vadosezone.org](http://www.vadosezone.org) >. Acesso em 15 de abril de 2010.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. (2003a): Capacity for Biodegradation of CFCs and HCFCs in a Methane Oxidative Counter-Gradient Laboratory System Simulating Landfill Soil Covers. **Environ. Sci. Technol.** Vol. 37, pp.. 5143-5149.

SCHEUTZ, C.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P; BLAKE, D.; MORCET, M.; KJELDSEN, P. (2003b): Comparative oxidation and net emissions of CH<sub>4</sub> and selected non-methane organic compounds in landfill cover soils. **Environ. Sci. Technol.**, 37, pp. 5150-5158.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. (2004): Environmental Factors Influencing Attenuation of Methane and Hydrochlorofluorocarbons in Landfill Cover Soils. **J. Environ. Qual.** 33:72–79.

SCHEUTZ, C.; MOSBÆK, H.; KJELDSEN, P. (2004): Attenuation of Methane and Volatile Organic Compounds in Landfill Soil Covers. **J. Environ. Qual.** 33:61–71.

SCHEUTZ, C.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P.; BLAKE, D.; MORCET, M.; ARAN, C.; KJELDSEN, P. (2007). Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. **Waste Management**. Article in press.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P.; BOGNER, J.; De VISSCHER, A.; GEBERT, J. HILGER, H. A.; HUBER-HUMER, M.; SPOKAS, K. (2009): Microbial methane oxidation process and

technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management Research**; Vol. 27, p409-433. Disponível em < <http://wmr.sagepub.com/cgi/content/abstract/27/409>> Acesso em: 20 jan.2010.

SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P.; MORCET, M.; ARAN, C.; GRAFF, C.; MOREAU-LE GOLVAN, Y.; HEBE, I. (2006) Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? **Waste Management** 26 (2006) 516–525

STEIN, V.B., HETTIARATCHI, J.P.A., ACHARI, G.A. (2001). Numerical model for biological oxidation and migration of methane in soils. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management* Vol. 5, pp. 225–234.

STERN, J.C.; CHANTON, J.; ABICHO, T.; POWELSON, D.; YUAN, L.; ESCORIZA, S.; BOGNER, J., (2007). Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. **Waste Management** 27 (9), 1248–1258.

STREESE, J.; STEGMANN, R. (2003) Microbial oxidation of methane from old landfills in biofilters. **Waste Management** 23 (2003) 573–580.

SUZUKI, M.; IMAI, J; SAITA, Y; NISHIGAKI, M. (2005) Substantiations and analysis for the capping with the capillary barriers. In: **Proceedings Sardinia 2005**. The Tenth International Landfill Symposium, Sardinia, Itália.

TANAKA, N.; MATSUTO, T.; LEE, H. S. On-site survey of methane and carbon dioxide flux from MSW landfills in Japan. In: **Proceedings Sardinia 1997**. The Sixth International Landfill Symposium, Sardinia, Itália, vol.4, pp.71-80. 1997.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. (1993). **Integrated Solid Waste Management – Engineering principles and management issues**. McGraw-Hill International Editions, 978 p.

TEIXEIRA, P.F.; (2008) **Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo. USP.168p.

TEIXEIRA, C. E.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F. A. M.; TEIXEIRA, P.F. (2009); Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, no. 1 jan-mar 2009 pp 99-108.

TSUTYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M.O. (2001) **Biossólidos na Agricultura**. 1ª. Ed. São Paulo.:SABESP. 486p.

URMANN, K.; NORINA, E. S.; SCHROTH, M. H. ZEYER, J. (2007) Methanotrophic activity in a diffusive methane/oxygen counter-gradient in an unsaturated porous medium. **Journal of Contaminant Hydrology** n. 94, p126-138.

USEPA (2007) **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2005**. USEPA #430-R-07-002 Disponível em <<http://epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>> Acesso em: 10 out. 2009.

van ELK, A. G. H. P. (2007) **Redução de emissões na disposição final**. In: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a Resíduos Sólidos Urbanos. Karin Segala (Coord.) Rio de Janeiro: IBAM,

van GENUCHTEN, M. Th (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Proc. Soil Sci. Soc. Am.** Vol. 44, n<sup>o</sup>. 5 pp 892-898.

VIEIRA. A. M (2005) **Estudo de barreiras capilares como Cobertura final de aterro de resíduos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo. 287p.

VISVANATHAN, C.; POKHREL, D.; CHEIMCHAI SRI, W.; HETTIARATCHI, J.P. A.; WU, J.S. (1999) Methanotrophic Activities in Tropical Landfill cover: Effects of Temperature, moisture and methane concentration. **Waste Management Research.** V.17, n.4, p.313-323.

ZHANG, H.; HE, P. SHAO, L. (2008) Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. **Atmospheric Environment** Vol. 42 pp. 5579– 5588

ZORNBERG, J. G., LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL J. A. (2003) Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 6, pp. 427 – 438.

ZORNBERG, J. G.; McCARTNEY, J.S. (2007) Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment. In: Delleur, J.W. **The Handbook of Groundwater Engineering.** 2 ed.

WATZINGER, A.; REICHENAUER, T.G.;BLUM, W.E.H.; GERZABEK, M.H.;ZECHMEISTER–BOLTENSTERN, S. (2005). The effect of landfill leachate irrigation on soil gas position: methane oxidation and nitrous oxide formation. **Water, Air, and Soil Pollution** 164, 295–313.

WEDLAND, E.; CUNHA, A.T. (2004) Barreira Capilar em lisímetro volumétrico. In: **5º.Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados.** pp. 307-312.

WHALEN, S. C.; REEBURGH, W. S.; SANDBECK, K. A. (1990). Rapid methane oxidation in a landfill cover soil. **Applied and Environmental Microbiology**, 56, 3405–3411.

WILSHUSEN, J.H.; HETTIARATCHI, J.P.A.; STEIN, V.B. (2004a). Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns. **Waste Management** Vol. 24 pp. 643–653.

WILSHUSEN, J.H.; HETTIARATCHI, J.P.A.; DE VISSCHER, A.; SAINT-FORT, R., (2004b). Methane oxidation and EPS formation in compost: effect of oxygen concentration. **Environmental Pollution** 23, 305–314.

YOON, J.I.; NAM, K.; KIM, J.Y. An innovative cover design using oxygen releasing compounds to reduce methane emissions from solid waste landfills, In: **Proceedings Sardinia 2005**, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy