



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

MARISTELA DA SILVA OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA PARA ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO O MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO**

**Recife
2021**

MARISTELA DA SILVA OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA PARA ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO O MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO**

Projeto de Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4/2222

O48d Oliveira, Maristela da Silva.
Dimensionamento de camadas de cobertura para aterros sanitários utilizando o método do balanço hídrico / Maristela da Silva Oliveira. 197 f.; figs., tabs., abrev., siglas e simbols.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2021.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Aterros sanitários. 3. Camadas de cobertura. 4. Balanço hídrico. 5. Camadas oxidativas. 6. Camadas convencionais. I. Mariano, Maria Odete Holanda (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2022 - 322

MARISTELA DA SILVA OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA PARA ATERROS
SANITÁRIOS UTILIZANDO O MÉTODO DO BALANÇO HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 25/02/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria Odete Holanda Mariano (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Régia Lúcia Lopes (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Eduardo Antônio Maia Lins (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado e do presente trabalho;

Ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, pelo suporte durante a realização do curso;

Ao Grupo de Resíduos Sólidos – GRS, pelas trocas de conhecimentos e colaboração durante o desenvolvimento do trabalho;

Ao Professor Dr. José Fernando Thomé Jucá, pelos valiosos conhecimentos repassados e pela sugestão do tema de pesquisa;

A professora Maria Odete Mariano, pela valiosa orientação e apoio para realização do trabalho;

A Murray Fredlund pelas trocas enriquecedoras e aos colaboradores da Bentley pelo suporte em relação a licença acadêmica do software SVFlux da SoilVision;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

A toda minha família, pelo incentivo aos estudos e suporte;

Aos colegas da pós-graduação em Geotecnia, pelas trocas de conhecimentos tão enriquecedoras;

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para esse acontecimento, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O principal objetivo da camada de cobertura de aterros sanitários é controlar a infiltração de água na massa de lixo e reduzir a emissão de gases para atmosfera. O dimensionamento da camada de cobertura ainda não está bem documentado na literatura e no Brasil ainda não se tem uma norma específica para seu dimensionamento. Este trabalho teve como objetivo dimensionar a camada convencional e a camada oxidativa da Célula Experimental do Aterro da Muribeca, localizada na cidade de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco - Brasil. Para isso, foi utilizado o Método do Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather (1957) simplificado por Mendonça (1958) e Pereira (2005). O cálculo foi realizado com auxílio de uma planilha em Excel, onde os dados de entrada foram os dados da estação climatológica mais próxima e dados secundários dos solos, provenientes de pesquisas anteriores nas coberturas estudadas. A espessura de camada necessária para reduzir a percolação para o máximo de 10% da precipitação foi de 0,71 m e de 0,36 m para as camadas convencional e oxidativa, respectivamente. Observou-se que o método do balanço hídrico, quando calibrado, é uma ferramenta eficaz prever o comportamento da camada de cobertura em relação ao fluxo de água. O método permite determinar a espessura da camada de forma didática e simples e mostra-se uma alternativa viável para aterros de pequeno porte de forma a reduzir custos e minimizar os impactos ambientais.

Palavras-chave: aterros sanitários; camadas de cobertura; balanço hídrico; camadas oxidativas; camadas convencionais.

ABSTRACT

The main objective of the landfill cover layer is to control infiltration of water into the waste and to reduce the gases emission to the atmosphere. The design of the cover layer is not still well documented on the literature, and in Brazil it does not have a defined standard for its design yet. This work aimed to design the conventional and methane oxidation cover layer of the Experimental Cell of the Muribeca's Landfill. The experimental cell is located at the city of Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco - Brazil. For this, it was used the Thornthwaite and Mather Water Balance Method (1957) simplified by Mendonça (1958) and Pereira (2005). The calculation was performed by using an Excel spreadsheet where the input data was the data from the nearest climatological station and secondary soil data from previous research on the studied covers. The required cover thicknesses to reduce percolation to a maximum of 10% of the precipitation was 0.71 m and 0.36 m for the conventional and the methane oxidation cover, respectively. It was observed that the water balance method, when calibrated, is an effective tool to predict the behavior of the cover layer related to the water flow. The method allows to determine the thickness of the layer in a didactic and simple way and it is an practicable alternative for small landfills in order to reduce costs and minimize environmental impacts.

Keywords: landfill; cover layers; water balance; methane oxidation layers; conventional covers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de sistema de cobertura de aterro sanitário	31
Figura 2 - Perfil de camada de cobertura de acordo com a USEPA para (a) Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos e (b) resíduos perigosos e de baixa radioatividade.....	32
Figura 3 - Detalhe da camada de cobertura recomendada pelo BCME	33
Figura 4 - Detalhe da camada de cobertura com geomembrana recomendado pelo BCME	34
Figura 5 - Componentes do sistema de cobertura recomendados pela Diretiva para Aterros sanitários da União Europeia (LANDFILL DIRECTIVE 1999/31/EC)	35
Figura 6 - Ilustração da variação de umidade no perfil da camada de cobertura	38
Figura 7 - Barreira capilar.....	40
Figura 8 - (a) Curva característica (b) condutividade hidráulica não saturada para solo argiloso e solo granular.....	41
Figura 9 - Comparação da variação de umidade de uma biocobertura e um solo puro (solo de controle) ao longo do tempo	45
Figura 10 - Variação da umidade na profundidade de 60 cm de uma (a) camada de cobertura convencional e de (b) uma camada metanotrófica	49
Figura 11 - Balanço Hídrico Climatológico para diferentes regiões do Brasil	53
Figura 12 - Flutuação sazonal da umidade da camada de cobertura.....	55
Figura 13 - (a) Umidade volumétrica (b) evapotranspiração potencial - precipitação para uma barreira capilar em Wenatchee	55
Figura 14 - Percolação Cumulativa em uma barreira capilar em Wenatchee.....	56
Figura 15 - Efeito da compactação na curva de retenção de água de um solo franco-arenoso	60
Figura 16 - Variação da condutividade hidráulica com a macroporidade	60
Figura 17 - Efeito da umidade e energia de compactação na condutividade hidráulica de uma argila siltosa	61
Figura 18 - Combinação das forças capilares e de adsorção.....	62
Figura 19 - Influência do tipo de solo na forma da curva de retenção de água	63
Figura 20 - Formato geral da curva de retenção de água pelo solo	63

Figura 21 - Representação do efeito de histerese nos solos.....	65
Figura 22 - Situação do solo para diferentes teores de umidade	66
Figura 23 - Método de determinação da capacidade de campo dos solos (a) sem aplicação de pressão (b) Método Europeu	68
Figura 24 - Variação do grau de saturação do solo em função da sucção matricial .	70
Figura 25 - Curvas características de retenção de água ajustadas pelos parâmetros de Van Genuchten (1980) das quatro camadas da Célula Experimental do Aterro da Muribeca	71
Figura 26 - Curva de retenção do (a) solo puro e do (b) solo + material compostado na proporção 1:1 (em volume)	72
Figura 27 - Variação da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10 cm, 25 cm e 50 cm para a coluna de (a) solo puro e (b) solo + material compostado	73
Figura 28 - Comparação entre pontos medidos experimentalmente por Lopes (2011) e curva teórica ajustada através do programa RETC	74
Figura 29 - Relação entre curva de retenção e condutividade hidráulica	77
Figura 30 - Taxa de infiltração e capacidade de infiltração	80
Figura 31 - Geração de lixiviado ao longo do ciclo de vida de um aterro	82
Figura 32 - Curva característica do solo indeformado e solos compactados em laboratório	84
Figura 33 - Variação da condutividade hidráulica com o número de ciclos de secagem para amostras de solos de Houston Red, Sauk, Country, Denver e New Orleans	86
Figura 34 - Variação da condutividade hidráulica em função da umidade de compactação com aumento do número de ciclos de umedecimento e secagem para as amostras de (a) Houston Red (b) Sauk Country nos Estados Unidos	87
Figura 35 - Deformação de contração volumétrica em função da (a) porcentagem de argila e (b) índice de plasticidade	89
Figura 36 - Variação da contração volumétrica em função da umidade de compactação	89
Figura 37 - Modelo de fluxo de água em um aterro sanitário	92

Figura 38 - Componentes do balanço hídrico das (a) barreiras resistivas e (b) camadas de armazenamento de água	93
Figura 39 - Esquema para obtenção de capacidade de água disponível (CAD) do solo.....	94
Figura 40 - Representação de água retirada do solo após atingir a capacidade de campo.....	107
Figura 41 - Célula experimental do Aterro da Muribeca	109
Figura 42 - Altura de água na camada convencional (CONV).....	112
Figura 43 - Altura de água na camada oxidativa (MET01)	112
Figura 44 - Esquema das coberturas estudadas (a) camada convencional, (b) Camada oxidativa 1:1.....	114
Figura 45 - Geometria das camadas estudadas.....	114
Figura 46 - Componentes do balanço hídrico da (a) camada convencional (b) camada oxidativa	118
Figura 47 - Modelo de umidade no solo da camada de cobertura	120
Figura 48 - Balanço de evapotranspiração e Precipitação para média histórica de 1981-2010	137
Figura 49 - Balanço de evapotranspiração – Precipitação para o período de set/2008 a dez/2010 e da média histórica.....	137
Figura 50 - Variação dos valores excedentes hídricos ao longo do tempo.	138
Figura 51 - Balanço Hídrico acumulado na camada convencional para o período de setembro de 2008 a dezembro de 2010.....	142
Figura 52 - Comparação entre percolação estimada para o período monitorado com a infiltração medida em campo.....	143
Figura 53 - Variação do coeficiente de escoamento superficial.	144
Figura 54 - Comparação da percolação calculada (modelo calibrado) com a infiltração medida	145
Figura 55 - Armazenamento de água na camada estimado pelo modelo	145
Figura 56 - Comparação do armazenamento de água na camada convencional previsto pelo modelo e dados de monitoramento em campo	146
Figura 57 - Comparação do armazenamento de água na camada estimada modelo ajustado e os dados de monitoramento da água armazenada na camada em campo para o período monitorado.....	147

Figura 58 - Parâmetros de retenção de água adotados e ajustados	148
Figura 59 - Comparação das percolações do ano típico e período monitorado calculados pelo modelo calibrado e infiltração medida em campo	149
Figura 60 - Comparação entre a percolação estimada através do modelo antes e após calibração e infiltração medida na camada convencional ($C=0,60$ para mês de maio).....	150
Figura 61 - Armazenamento de água (ano típico)	150
Figura 62 - Níveis de percolação na camada convencional para (a) ano mais úmido e para (b) percentil de 95% da precipitação	151
Figura 63 - Armazenamento de água na camada convencional para (a) ano mais úmido (b) percentil de 95% da precipitação	151
Figura 64 - Variação do fluxo de água na camada de cobertura convencional para (a) média histórica (b) período monitorado	152
Figura 65 - Balanço Hídrico acumulado da camada oxidativa para o período de setembro de 2008 a dezembro de 2010	159
Figura 66 - Variação no armazenamento de água na camada oxidativa (período monitorado)	159
Figura 67 - Comparação entre a percolação medida e estimada na camada oxidativa para o período monitorado	160
Figura 68 - Comparação da percolação calculada (modelo calibrado) com a infiltração medida na camada oxidativa.....	161
Figura 69 - Sobreposição dos gráficos de altura de água na camada do modelo e medidos em campo através de sensores de umidade por Lopes (2011).....	162
Figura 70 - Sobreposição do armazenamento de água na camada oxidativa do modelo ajustado e medidos em campo	162
Figura 71 - Ilustração dos ajustes nos parâmetros de retenção de água dos solos da camada oxidativa	163
Figura 72 - Comparação entre a percolação estimada pelo modelo e medida em campo para camada oxidativa (ano típico).....	164
Figura 73 - Armazenamento de água na camada oxidativa (ano típico).	165

Figura 74 - Comparação entre a infiltração medida em campo e a percolação calculada pelo modelo para (a) o ano mais úmido e (b) o percentil de 95% da precipitação.....	165
Figura 75 - Armazenamento de água na camada oxidativa para (a) o ano mais úmido e para (b) o percentil de 95% da precipitação	166
Figura 76 - Variação do fluxo de água na camada de cobertura oxidativa para (a) média histórica (b) período monitorado(a).....	166
Figura 77 - Variação do fluxo de evapotranspiração potencial e real estimados pelo modelo para o período monitorado (a) camada convencional (b) camada oxidativa	169
Figura 78 - Variação da relação de ETR/ETP na camada convencional em função do tempo (a) e da água retida no solo (b)	170
Figura 79 - Variação da relação de ETR/ETP na camada oxidativa em função do tempo (a) e da água retida no solo (b)	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de valores dos parâmetros de materiais compostados para utilização em camadas de cobertura oxidativas	44
Tabela 2 - Valores da capacidade de campo (θ_{cc}) e tensão matricial (h_{cc}) para valores de $p=0,01$ e $p=0,015$	69
Tabela 3 - Umidade de Capacidade de campo dos solos das camadas de cobertura da Célula Experimental do Aterro da Muribeca	71
Tabela 4 - Proposições para modelagem da curva de condutividade hidráulica.....	78
Tabela 5 - Cálculo do balanço hídrico simplificado utilizando a equação de Pereira (2005).....	98
Tabela 6 - Capacidade de água disponível dos solos	99
Tabela 7 - Coeficiente de Escoamento Superficial	100
Tabela 8 - Valores de coeficiente de escoamento superficial em função da declividade e tipo de solo	102
Tabela 9 - Faixa de valores do coeficiente de escoamento superficial em função da declividade e tipo de solo.	102
Tabela 10 - Valores de C' e α em função da declividade e tipo de solo.....	103
Tabela 11 - Valores de C' e α em função da declividade e tipo de solo.....	103
Tabela 12 - Propriedade dos solos das camadas da Célula Experimental	110
Tabela 13 - Infiltração medida nos infiltrômetros das camadas convencional e oxidativa	111
Tabela 14 - Características geométricas das coberturas estudadas.....	115
Tabela 15 - Propriedades dos solos das camadas estudadas	115
Tabela 16 - Permeabilidade das camadas estudadas.....	116
Tabela 17 - Dados de entrada na planilha e forma de obtenção.....	121
Tabela 18 - Dados de entrada para o cálculo da espessura da camada.....	124
Tabela 19 - Roteiro para cálculo da espessura da camada	127
Tabela 20 - Parâmetros de retenção de água por diferentes metodologias disponíveis na literatura.....	133
Tabela 21 - Parâmetros de retenção de água determinados a partir da curva de retenção de água do solo teórica modelada por D'Ângelo (2016).....	133

Tabela 22 - parâmetros de entrada utilizados para cálculo do balanço hídrico na camada.....	134
Tabela 23 - Cálculo da retenção de água na camada	134
Tabela 24 - Coeficientes de escoamento superficial adotados	134
Tabela 25 - Evapotranspiração potencial média mensal e evaporação total para série climatológica de 1981 – 2010 (Evaporímetro de Piché)	135
Tabela 26 - Evapotranspiração potencial (set/2008 a dez/2010)	135
Tabela 27 - Temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar	136
Tabela 28 - Precipitação total mensal para série histórica de 1981-2010 (INMET). 136	
Tabela 29 - Precipitação total mensal (setembro de 2009 a dezembro de 2010) ...	136
Tabela 30 - Variação do excedente hídrico entre os anos 1961 e 2008	139
Tabela 31 - Valores de precipitação superiores ao percentil de 95%.....	139
Tabela 32 - Parâmetros de entrada da camada convencional	140
Tabela 33 - Cálculo do balanço hídrico da camada convencional para período monitorado	141
Tabela 34 - Cálculo da espessura de camada convencional (Ano típico) – Cenário 1.....	153
Tabela 35 - Cálculo da espessura da camada convencional (ano típico) – Cenário 2.....	154
Tabela 36 - Cálculo da espessura da camada para o ano mais úmido.....	155
Tabela 37 - Cálculo da espessura da camada para o percentil de 95% da precipitação.....	156
Tabela 38 - Parâmetros de entrada da camada oxidativa.....	156
Tabela 39 - Dados de entrada da mistura de solo.....	157
Tabela 40 - Cálculo do balanço hídrico para camada oxidativa (período monitorado)	158
Tabela 41 - Correlação entre infiltração medida e percolação calculada	160
Tabela 42 - Cálculo da espessura de camada oxidativa (ano típico)	167
Tabela 43 - Espessura de camada oxidativa (ano mais úmido).....	168
Tabela 44 - Espessura de camada oxidativa (Percentil 95% da precipitação)	168

LISTA DE ABREVIACÃO, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área do aterro ocupada pelas células de rejeito
A	Parâmetro de ajuste
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AS	Armazenamento de água na camada
As	Armazenamento de água no solo
AS _{disponível}	Capacidade de armazenamento de água disponível
AS _{máx}	Armazenamento máximo de água do solo
AS _{nec}	Quantidade de água necessária a ser armazenada
AS _{nec}	Armazenamento de água necessário
AS _{nec,solo}	Quantidade de água necessária a ser armazenada no solo puro
AS _{nec solo+comp}	Quantidade de água necessária a ser armazenada na mistura
At	Área seção transversal
B	Altura total de solo
B	Espessura da camada
BCME	Ministério do Meio Ambiente da Colúmbia Britânica
C	Coefficiente de escoamento superficial
C'	Parâmetro de escoamento superficial em função do tipo solo
CAD	Capacidade de água disponível
CC	Capacidade de campo
CCME	Conselho Canadense dos Ministros do Meio Ambiente
CH ₄	Metano
CO ₂	Gás carbônico
CR	Capacidade total de armazenamento ou capacidade de retenção
DTA _{solo}	Disponibilidade total de água do solo puro
DTA _{solo+comp}	Disponibilidade total de água do solo + composto orgânico
E	Índice de vazios
ES	Escoamento superficial
ET	Evapotranspiração
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
Fi	Frequência acumulada

F_i	Frequência simples
G	Densidade relativa dos grãos
G	Vapor de água
H	Espessura do solo
H	Carga ou pressão de sucção
H_c	Amplitude da classe
H_{camada}	Espessura da camada
H_{nec}	Espessura de camada necessária
H_{Rmax}	Profundidade efetiva do sistema radicular
H_{solo}	Espessura da camada de solo puro
$H_{Solo+comp}$	Espessura da camada de solo + material compostado
H_w	Altura de água
I	Infiltração de água
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
I_c	Índice de calor
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITRC	Conselho Regulatório e de Tecnologia dos Estados Americano
K	Coeficiente de infiltração
K	Condutividade hidráulica
K_{sat}	Permeabilidade saturada
K_x	Permeabilidade na direção x
K_y	Permeabilidade na direção y
K_z	Permeabilidade na direção z
L	Drenagem lateral
L	Limite inferior anterior
M	Parâmetro de ajuste
MMA	Ministérios do Meio Ambiente
MTUG	Máximo teor de umidade gravimétrica
MTUV	Máximo teor de umidade volumétrica
N	Máxima insolação diária
N	Porosidade do solo
NAC	Negativo acumulado
n_v	Parâmetro de ajuste

P	Precipitação
P	Relação entre a taxa de drenagem e condutividade hidráulica
PERC	Água percolada para massa de lixo
PERC	Quantidade de água percolada
pH	Potencial hidrogeniônico
PMP	Ponto de murcha permanente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Q_{PERC}	Vazão percolada
R	Escoamento superficial
RCRA	Lei de Conservação e Recuperação de Recursos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Grau de saturação
T	Tempo
T_m	Temperatura média diária
U_c	Água de composição da camada
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
V_t	Volume total de solo
V_v	Volume de vazios
X	Percentil
ZA	Zero Alternativa
A	Parâmetro de escoamento superficial em função da declividade
γ	Peso específico do solo
ΔAS	Varição mensal da água armazenada no solo
ΔSc	Água absorvida e retida na camada
θ	Umidade do solo
Θ_{cc}	Umidade de capacidade de campo
Θ_i	Umidade inicial ou umidade de compactação do solo
Θ_{pmp}	Umidade de ponto de murcha permanente
θ_r	Umidade residual do solo
θ_s	Umidade de saturação do solo
λ	Parâmetro empírico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	ASPECTOS SOBRE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	27
2.2	CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS.....	29
2.2.1	Função	30
2.2.2	Composição mínima das camadas de coberturas	31
2.2.3	Concepção das Camadas de Cobertura ao longo do tempo	36
2.3	ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE CAMADAS OXIDATIVAS E CONVENCIONAIS.....	45
2.4	ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE ANÁLISES NUMÉRICAS E DADOS DE CAMPO.....	47
2.5	PARÂMETROS IMPORTANTES NO DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA	50
2.6	INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS LOCAIS.....	52
2.7	VEGETAÇÃO	57
2.8	COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	59
2.9	CONCEITOS DE SOLOS NÃO SATURADOS APLICADOS ÀS CAMADAS DE COBERTURA	61
2.9.1	Relação sucção-umidade	62
2.9.2	Percolação de água em solos não saturados	75
2.9.3	Permeabilidade não saturada à água	76
2.9.4	Infiltração de água em solos não saturados	79
2.10	PRODUÇÃO DE LÍQUIDO PERCOLADO.....	81
2.11	MANUTENÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SERVIÇO DA CAMADA	82
2.11.1	Degradação hidráulica do solo	83
2.11.2	Ciclos de umedecimento e secagem	85

2.11.3	Contração do solo	87
2.12	DRENAGEM DAS ÁGUAS PLUVIAIS.....	90
2.13	BALANÇO HÍDRICO DE ATERROS SANITÁRIOS	91
2.13.1	Tipos de balanço hídrico	94
2.13.2	Método do Balanço Hídrico aplicado às coberturas de aterros sanitários	95
2.13.3	Cálculo do balanço hídrico pelo Aplicativo do INMET	99
2.13.4	Determinação da Evaporação Real pelo método de Penman-Wilson e utilização do Software SVFlux	100
2.13.5	Obtenção das componentes do balanço hídrico	101
2.13.6	Determinação da espessura da camada	104
2.14	LOCAL DE ESTUDO – CÉLULA EXPERIMENTAL DO ATERRO DA MURIBECA.....	108
3	MATERIAIS E MÉTODOS	113
3.1	GEOMETRIA DAS CAMADAS.....	113
3.2	PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS.....	115
3.3	DADOS CLIMATOLÓGICOS	117
3.4	MODELO DE FLUXO DE ÁGUA	118
3.5	MODELO DE RETENÇÃO DE ÁGUA NA CAMADA	119
3.6	ROTEIRO DE CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA	120
3.7	ROTEIRO DE CÁLCULO DA ESPESSURA DA CAMADA.....	124
3.8	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS FATORES CLIMÁTICOS	129
3.9	CALIBRAÇÃO DO MODELO	130
3.10	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	131
4	AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	132
4.1	INTRODUÇÃO.....	132
4.2	SISTEMATIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS SOLOS.....	132
4.3	SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS CLIMATOLÓGICOS.....	135
4.4	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS FATORES CLIMATICOS	136
4.5	CAMADA CONVENCIONAL	140
4.5.1	Cálculo do balanço hídrico para período monitorado	140
4.5.2	Calibração do modelo	142
4.5.3	Cálculo do balanço hídrico da camada (modelo calibrado)	148

4.5.4	Cálculo da espessura da camada	152
4.6	CAMADA OXIDATIVA	156
4.6.1	Cálculo do balanço hídrico para período monitorado	157
4.6.2	Calibração do modelo	161
4.6.3	Cálculo do balanço hídrico (modelo calibrado)	164
4.6.4	Cálculo da espessura da camada	167
4.7	ANÁLISE DA EVAPORAÇÃO REAL PREVISTA PELO MÉTODO	169
4.8	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	172
4.8.1	Camada convencional	172
4.8.2	Camada oxidativa	173
4.9	ERROS, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES DO MÉTODO	174
5	CONCLUSÕES	175
	REFERÊNCIAS	178
	APÊNDICE A - DADOS DE PRECIPITAÇÃO (SÉRIE INMET 1961-2008) EM ORDEM CRONOLÓGICA	187
	APÊNDICE B - DADOS DE PRECIPITAÇÃO (SÉRIE INMET 1961-2008) EM ORDEM CRESCENTE	188
	APÊNDICE C - FAIXAS DE PRECIPITAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS FREQUÊNCIAS SIMPLES (FI) E ACUMULADA	189
	APÊNDICE D - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA CONVENCIONAL PARA O ANO TÍPICO (MODELO NÃO CALIBRADO)	190
	APÊNDICE E - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA CONVENCIONAL (ANO TÍPICO)	191
	APÊNDICE F - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA CONVENCIONAL (ANO TÍPICO)	192
	APÊNDICE G - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA CONVENCIONAL PARA ANO MAIS ÚMIDO (MODELO CALIBRADO)	192
	APÊNDICE H - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA CONVENCIONAL PARA PERCENTIL DE 95% DA PRECIPITAÇÃO (MODELO CALIBRADO)	194

APÊNDICE I - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA OXIDATIVA (ANO TÍPICO)	195
APÊNDICE J - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA OXIDATIVA (ANO MAIS ÚMIDO)	196
APÊNDICE K - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA OXIDATIVA (PERCENTIL DE 95% DA PRECIPITAÇÃO)	197

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo na produção de resíduos provenientes da chamada indústria descartável (CARNEIRO *et al.*, 2011). A disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários ainda é o destino final mais utilizado no Brasil (PANORAMA, 2020) e no mundo.

Os aterros sanitários geram dois passivos ambientais, por um lado a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e do subsolo, e por outro, a poluição atmosférica, contribuindo para o efeito estufa. Atualmente, a poluição atmosférica, em decorrência de gases oriundos de aterros sanitários, representa uma parcela expressiva no contexto geral na contribuição para o aquecimento global.

O solo é o meio para onde os poluentes resultantes da decomposição do lixo são lançados. Quando os atingem o solo, de forma geral, são submetidos a uma complexa transformação física, química e biológica durante seu movimento através do solo. Para prever ou monitorar a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais ou até mesmo fazer a descontaminação do solo, necessita-se compreender as condições que controlam o fluxo de fluidos no solo e seus mecanismos de transporte. Segundo Yaron *et al.* (1996), os mecanismos de fluxo podem ser afetados pelos constituintes do solo e também pelos fatores ambientais.

Em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei nº 12.305/2010, onde ficou definido que a disposição de RSU deve ser realizada em aterros sanitários, quando não for possível a reutilização ou reciclagem desses resíduos. Essa lei determinou que os lixões fossem substituídos por aterros sanitários até 2014, no entanto essa meta não foi alcançada.

Dez anos depois, em 2020, o congresso aprovou a PL 4.162 de 2019, que institui o novo marco legal do saneamento básico, e agora aguarda a sanção presidencial. Essa nova lei altera alguns dispositivos legais, dentre eles a lei 12.305/2010, estabelecendo novas regras. Pelas novas regras, todos municípios que não elaboraram o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos terão até dezembro de 2020 para apresentar uma solução. A nova lei também determina novos prazos para encerramento dos lixões em todo país. Para os municípios que já elaboraram o plano, o prazo é agosto de 2021, para capitais e regiões metropolitanas, e agosto de 2022, para cidades com mais de 100 mil habitantes. Já para as cidades

com população entre 50 e 100 mil habitantes, o prazo é agosto de 2023, e para os municípios com menos de 50 mil habitantes, o prazo é agosto de 2024. Também de acordo com a nova lei, nos casos onde a disposição de resíduos em aterros sanitários for economicamente inviável, outras soluções técnicas podem ser adotadas de forma a evitar danos a saúde pública e segurança e minimizar impactos ambientais.

Os aterros sanitários geralmente possuem um sistema de cobertura intermediário e final. As coberturas diárias são executadas ao final de cada jornada de trabalho, e tem objetivo de evitar o espalhamento do lixo, proliferação de odores e vetores e evitar a emissão descontrolada de gases. As camadas intermediárias são colocadas quando a disposição necessita ser interrompida por algum período. A cobertura final é construída quando a disposição de resíduos é encerrada com objetivo de controlar a infiltração de águas pluviais e emissão de gases e promover a recuperação da área (CASTILHOS jr. *et al.*, 2003).

A camada de cobertura final tem uma grande importância na operação dos aterros sanitários, já as camadas intermediárias são personagens secundárias no projeto, e podem passar despercebidas. No entanto, ambas têm função essencial no gerenciamento do aterro, e com planejamento adequado, essas camadas podem ser otimizadas para melhorar a operação do aterro e diminuir os custos do processo.

No Brasil, a grande maioria dos aterros de RSU possui uma cobertura final formada por camada homogênea de argila compactada denominada de camada convencional. A camada convencional é formada por uma camada de solo de baixa permeabilidade geralmente compactado, podendo possuir ou não cobertura vegetal.

A instalação e operação de dessas camadas demanda uma quantidade de materiais expressiva, que muitas vezes não existe em quantidade disponível nas proximidades, tornando o processo de aquisição e transporte onerosos. Além disso, a crescente preocupação com as questões ambientais impulsiona o desenvolvimento de potenciais soluções na redução das emissões de gases para atmosfera. Esse cenário fez repensar a composição das coberturas tradicionais de forma a reduzir custos e beneficiar o meio ambiente. Assim, iniciou-se os estudos das camadas de cobertura alternativas.

As camadas alternativas são formadas por uma ou mais camadas de solo ou mistura de solo natural e materiais diversos com alto teor orgânico, e geralmente

possuem cobertura vegetal. As camadas alternativas mais conhecidas são as camadas evapotranspirativas e as camadas oxidativas.

As camadas evapotranspirativas são compostas por uma única e espessa camada de solo com alta capacidade de armazenamento de água, geralmente recoberta por vegetação (COSTA, 2015).

As camadas oxidativas são compostas por uma mistura de solo e composto orgânico em diversas proporções. Essas camadas são executadas utilizando conhecimentos técnicos para melhorar a oxidação dos gases e aumentar a retenção de líquidos no seu interior. Estudos recentes mostram que as camadas oxidativas apresentam desempenho equivalente às camadas convencionais, além de reduzir as emissões de metano. E por isso, são as camadas mais promissoras e mais estudadas atualmente.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

No Brasil ainda não se tem uma norma para dimensionamento de camadas de cobertura. A NBR 8419/1992 trata da apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e a NBR 13896/1997 aborda aspectos, critérios para projeto, implantação e operação de aterros. A NBR 13.896 (1997) diz que um dos objetivos do plano de encerramento do aterro deve ser minimizar a infiltração de água na célula e que cobertura final deve possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro e da base. A regulamentação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – USEPA também apresenta exigências para camadas de cobertura de aterros sanitários.

Por razões práticas de custo ou tempo, o dimensionamento tradicional é realizado apenas com informações básicas sobre material de cobertura, tais como: espessura, granulometria (composição) e permeabilidade do solo. Logo, é de grande relevância ter-se um método didático e simples para estimar a percolação de água e determinar a espessura e propriedades da camada. Além de ser um instrumento para reduzir custos e a minimizar os impactos ambientais.

No âmbito dessa pesquisa, foram abordadas questões relevantes, tais como:

- O método do balanço hídrico é adequado para estimar o fluxo de água através das camadas de cobertura de aterros sanitários constituídas por solo?

- Quais as condições climáticas e parâmetros dos solos exercem maior influência sob fluxo de água através das camadas de cobertura?
- Qual o efeito da compactação e da vegetação no comportamento da camada em relação à retenção de água ao longo do tempo?
- Qual a espessura de camada necessária para atender aos requisitos de percolação máxima?

1.2 OBJETIVOS

Para a organização deste trabalho foram traçadas metas sobre o tema pretendido. Seguem os objetivos desta pesquisa, a partir das hipóteses consideradas.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho analisou a aplicabilidade do método do balanço hídrico para determinação da espessura das camadas de cobertura de aterros sanitários em relação ao fluxo de água. O estudo foi desenvolvido para a camada convencional e a camada oxidativa da Célula Experimental do Aterro Sanitário da Muribeca, tendo como objetivo principal desenvolver um método prático e didático para determinação da espessura de camada de cobertura da forma mais econômica possível.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho teve por objetivos:

- Realizar revisão bibliográfica das camadas de cobertura de aterros sanitários e do fluxo de água nos solos compactados não saturados;
- Estudar e analisar o método do balanço hídrico;
- Sistematizar os dados do solo da camada convencional e oxidativa da Célula Experimental do Aterro da Muribeca (capacidade campo, ponto de murcha permanente e coeficiente de escoamento superficial);
- Sistematizar dos dados climatológicos (precipitação e evapotranspiração potencial) da estação climatológica mais próxima;

- Aplicar o método do balanço hídrico para o cálculo de uma camada de cobertura convencional e oxidativa;
- Calibrar e validar o modelo para período monitorado através da comparação com os dados medidos em campo por Lopes (2011);
- Realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada para o período monitorado;
- Determinar a espessura da camada.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi dividida em seis capítulos: O Capítulo I é composto pela introdução, relevância e justificativa de pesquisa e os objetivos gerais e específicos. O capítulo II apresenta a revisão da literatura onde são abordados inicialmente os aspectos relacionados aos aterros sanitários e as camadas de cobertura de aterros sanitários. Em seguida são apresentados alguns estudos comparativos entre os diferentes tipos de cobertura em relação a infiltração de água e os fatores que influenciam no comportamento da camada, tais como: vegetação, fatores climáticos e compactação do solo. Depois são abordados os conceitos de solos não saturados aplicados a fluxo de água em camadas de cobertura, tais como: permeabilidade, relação sucção-umidade, capacidade de retenção de água no solo, efeito da histerese e trajetória de tensões, percolação de água e infiltração de água. O capítulo também discute outros tópicos relacionados a operação dos aterros sanitários como produção de líquido lixiviado, drenagem das águas pluviais e manutenção das condições de serviço das camadas de cobertura. No final, é apresentada uma revisão sobre o método do balanço hídrico, como foi concebido, os parâmetros de entrada e o roteiro para sua aplicação. E por último, o capítulo descreve a área de estudo, suas principais características e os resultados dos estudos experimentais realizados nas camadas estudadas.

O capítulo III trata dos materiais e métodos, onde é descrita a metodologia utilizada para a determinação da espessura da camada. Esse capítulo explica os dados de entrada e sua forma de obtenção, e descreve a metodologia para calibração do modelo, análise da qualidade dos parâmetros de entrada e determinação da espessura da camada.

O capítulo IV apresenta os resultados, análise dos resultados e sugestões para estudos futuros. O capítulo V apresenta as conclusões. E por último, são apresentadas as referências utilizadas no desenvolvimento da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo, são abordados aspectos relacionados aos aterros sanitários e os conceitos das camadas de cobertura, estudos comparativos entre camadas convencionais e oxidativas e os fatores condicionantes no armazenamento de água no solo, tais como: clima, vegetação e compactação. Também são abordados conceitos de solos não saturados aplicados ao fluxo de água e uma revisão do método do balanço hídrico. E por fim, é feita uma descrição da área de estudo, onde são apresentados os resultados de estudos prévios nas camadas estudadas.

2.1 ASPECTOS SOBRE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos ainda é um dos grandes desafios em países em desenvolvimento. Os aterros sanitários ainda são o local de disposição final mais popular no Brasil.

Segundo a NBR 8419/1992, o aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo que reduz os danos à saúde pública e ao ambiente, diminuindo os impactos ambientais.

De acordo com Mancini (2018), o aterro sanitário constitui em uma técnica de engenharia de confinar os resíduos, minimizando o risco a coletividade, em uma menor área possível, cobrindo periodicamente com solo.

As principais vantagens dos aterros sanitários são a proteção da saúde pública e do ambiente. A implantação de aterros sanitários também apresenta vantagens em relação aos aspectos estéticos, controle na proliferação de insetos e aproveitamento energético dos gases. Os principais desafios para implantação de aterros sanitários são os custos de construção, operação, pós-encerramento, bem como a oposição pública para sua instalação.

De acordo com Mancini (2018), alguns questionamentos são importantes no projeto de aterros sanitários, tais como: população, vida útil do aterro, massa específica dos resíduos e altura de empilhamento de resíduos. Quanto a vida útil, a legislação exige mínimo de 10 anos, porém, atualmente, os projetos são dimensionados para uma vida útil maior de que 15 anos. A massa específica dos

resíduos geralmente varia entre 0,8 t/m³ e 1,2 t/m³ e a altura de empilhamento utilizada normalmente varia de 3 a 5m.

Os projetos de aterros sanitários devem seguir as recomendações das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A NBR 8.419/1992 e a NBR 13.896/1997 fornecem as diretrizes e exigências para projetos de aterros sanitários de RSU e as diversas partes que o compõem. No caso de aterros classe II, a norma que deve ser seguida é a NBR 8.419/NB 843 e a NBR 13.896/1997, que tratam dos elementos essenciais de projetos de aterros como impermeabilização da camada da base e da camada superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de lixiviados e gases, entre outros aspectos. Outras normas também são aplicadas para outros tipos de aterros, como NBR 8.418/NB 842 e NBR 10.157/NB 1025, que são aplicadas a aterros de resíduos perigosos.

A NBR 13.896 (1997) ressalta os critérios para adequabilidade do local para implantação do aterro que incluem a existência de um depósito extenso e homogêneo de material de permeabilidade inferior a 10⁻⁶ cm/s e uma zona não saturada de espessura superior a 3 m.

Os aterros sanitários de pequeno porte foram introduzidos pela Resolução CONAMA 404/2008 do Conselho Nacional que simplificou o licenciamento para esse tipo de instalação para disposições diárias de até 20 toneladas de lixo. Essa foi uma oportunidade para os municípios substituírem os lixões a céu aberto por essas alternativas de baixo custo que inclui a possibilidade de vários municípios fazerem a gestão dos resíduos de forma regionalizada, possibilitada pela Lei 11.445/2007 e Lei de Consórcios Públicos 11.107/2005. Posteriormente, os aterros de pequeno porte foram normalizados pela NBR 15.849/2010, que aborda as diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros de pequeno porte. As principais normas aplicadas a aterros sanitários são:

Aterros Perigosos:

- NBR 8418:1984 - Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos;
- NBR 10157:1987 - Critérios para projeto construção e operação.

Aterros Não Perigosos:

- NBR 8419:1992/96 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos;

- NBR 13896:1997 - Aterro de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – diretrizes para projeto implantação e operação;
- NBR 15849:2010 - Aterros sanitários de pequeno porte.

2.2 CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

O sistema de cobertura final é construído quando a última célula alcança sua cota máxima, finalizando a disposição de resíduos nessa área. De acordo com Lopes (2011), no Brasil não existe requisitos legais para o tipo de material da camada de cobertura. A norma NBR 13.896/1997 apenas cita a importância de se ter uma camada de cobertura final que funciona como uma impermeabilização superior.

A eficiência da camada de cobertura influencia diretamente no processo de decomposição bioquímica dos resíduos, características físico-químicas do lixiviado e na emissão de gases para atmosfera (FERREIRA & MAHLER, 2006).

O solo a ser utilizado nas camadas de cobertura deve garantir a estabilidade física, química e biológica (FERREIRA & MAHLER, 2006), ter uma durabilidade adequada, reduzindo os custos com manutenção, e possibilitar a utilização futura do local. A localização das jazidas, propriedades e classificação geotécnica são as principais características que vão determinar a qualidade do material a ser utilizado na camada de cobertura. Normalmente as argilas são usadas em camadas de cobertura devido a sua baixa permeabilidade.

Anotações do Guia de Sistemas de Camadas de Cobertura para Aterros Sanitários da USEPA ressaltam que a máxima taxa de percolação deve ser de 0,1 até 1,0 mm/ano. De acordo com Lopes (2011), o Brasil ainda não tem regulamentação quanto a limites de taxas de emissões de água e gás em camadas de cobertura.

Algumas informações podem ser levadas em consideração na análise de uma camada de cobertura para determinado local:

- Dados de ensaios de campo: a performance de estudos com lisímetros (no local ou na região) fornecem uma excelente indicação da performance esperada no local. A validação dos dados depende das similaridades entre os solos, plantas e condições climáticas;

- Dados de outras camadas nas proximidades: a performance de outras camadas próximas ao local pode ser considerada também para uma validação preliminar das alternativas de projeto. A extrapolação dos dados de locais próximos pode economizar tempo e dinheiro.

2.2.1 Função

A camada de cobertura deve ser compatível com a utilização final do local. De acordo com Teixeira (2008), o sistema de cobertura tem entre outras as seguintes funções:

- Controlar a infiltração de água;
- Reduzir a emissão de gases para atmosfera;
- Diminuir a emissão de odores;
- Evitar que o resíduo seja espalhado;
- Absorver possíveis recalques;
- Minimizar a entrada de oxigênio e prevenir possíveis riscos de incêndio;
- Evitar a proliferação de insetos;
- Limitar a erosão e arraste de sedimentos do solo;
- Permitir que a área possa ser utilizada em benefício social.

Segundo a NBR 13.896/1997, a camada de cobertura final de um aterro sanitário deve ser dimensionada de forma a exigir pouca manutenção, evitar erosão, e acomodar deformações sem fraturas. Além disso, o aterro deve conter um plano de encerramento para minimizar a infiltração de água na célula.

Quando um aterro para de receber resíduos, ele deve ser fechado para isolar os resíduos a uma baixa umidade diminuindo a geração de lixiviado a longo prazo. A camada de cobertura final deve ser instalada em no máximo 06 (seis) meses após o último recebimento de resíduos (EPA/530-SW-91-084, 1992).

2.2.2 Composição mínima das camadas de coberturas

Os componentes típicos de uma camada de cobertura, de uma forma geral, incluem: camada de superfície, camada de proteção, camada de drenagem, barreira de infiltração, geomembranas, camada de drenagem de gases e camada de fundação. Koerner & Daniel (1997) apresentam uma configuração para o sistema de cobertura final de aterro com utilização de geomembranas. Nessa configuração, a camada de superfície separa as camadas inferiores do ambiente, a camada de proteção protege as camadas inferiores e armazena a água superficial, a camada de drenagem remove a água que infiltra no sistema, a camada de barreira hidráulica controla o movimento de fluidos através de materiais impermeabilizantes, a camada de drenagem de gases coleta os gases, e a camada de fundação serve de base para as camadas superiores. A Figura 1 mostra o modelo proposto pelos autores.

Figura 1 - Modelo de sistema de cobertura de aterro sanitário



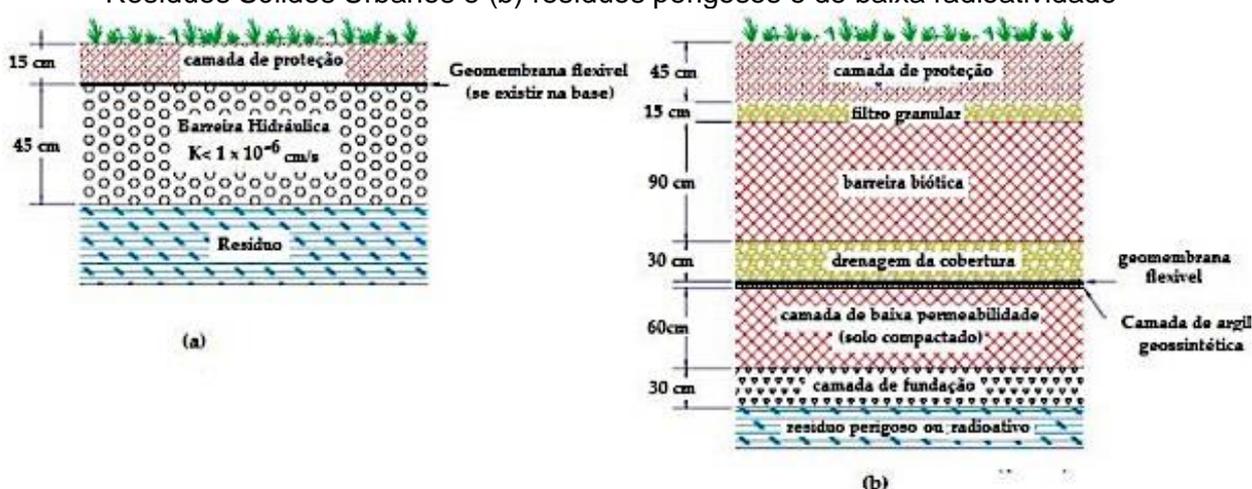
Fonte: (Oliveira & Braga, 2017, baseado em Koerner e Daniel, 1997)

Na escolha do sistema de cobertura pode haver a combinação dessas camadas ou a dispensa de alguma, dependendo das particularidades do local e do projeto, que deve ser avaliado caso a caso (COSTA, 2015). A NBR 13.896/1997 não menciona ou recomenda uma espessura mínima para camada de cobertura final ou especifica o

seu material de composição, apenas recomenda que a camada deve ter um coeficiente de permeabilidade inferior ao do solo natural da área do aterro e da camada da base do aterro para evitar o chamado “efeito banheira”. Esse efeito ocorre quando a camada de base possui permeabilidade inferior à da camada de cobertura, fazendo com que a água fique acumulada dentro do aterro.

Nos estados Unidos, a USEPA regula todos os resíduos de acordo com a Lei de Conservação e Recuperação de Recursos de 1976 (RCRA). A USEPA classifica os resíduos em perigosos (C) e não perigosos (D), e estabelece critérios para camada de cobertura final de aterros sanitários. A USEPA recomenda que as camadas de cobertura devem ter um coeficiente de permeabilidade mínimo de 1×10^{-5} m/s e uma composição mínima composta por uma camada de infiltração de 18” (45,72 cm) e uma camada de erosão de 6” (15,24 cm), que proteja a camada de infiltração e seja capaz de manter a vegetação nativa. Essa norma também diz que uma cobertura alternativa também pode ser utilizada desde que forneça uma proteção equivalente contra infiltração de água e erosão. A Figura 2 mostra a configuração recomendada pela USEPA para resíduos sólidos urbanos e para resíduos perigosos ou de baixo nível de radioatividade.

Figura 2 - Perfil de camada de cobertura de acordo com a USEPA para (a) Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos e (b) resíduos perigosos e de baixa radioatividade

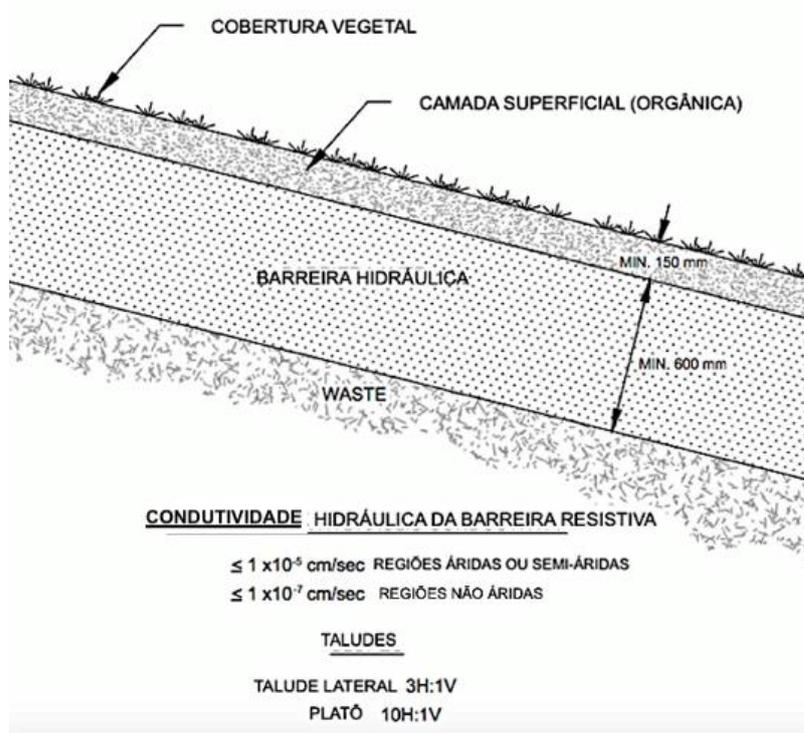


Fonte: (Adaptado de National Acadêm of Science, 2007, citado por Lopes, 2011)

O Conselho Canadense dos Ministros do Meio Ambiente (Canadian Council of Ministers of the Environment) - CCME (2006) diz que a cobertura final deve ser composta de uma argila de baixa permeabilidade e/ou geotêxtil acima do aterro.

O Ministério de Meio Ambiente da província canadense da Columbia Britânica (British Columbia Ministry of Environment) - BCME (2016) recomenda a utilização de uma camada superior com espessura de acordo com o tipo de vegetação que será utilizada ou espessura mínima de 15 cm, acima de uma camada de baixa permeabilidade com espessura mínima de 60 cm de solo. A camada superior é denominada camada “orgânica” pois proporciona a retenção de umidade e fornece os nutrientes necessários para manter a cobertura vegetal. A Figura 3 mostra os detalhes da camada de cobertura recomendado pelo BCME:

Figura 3 - Detalhe da camada de cobertura recomendada pelo BCME



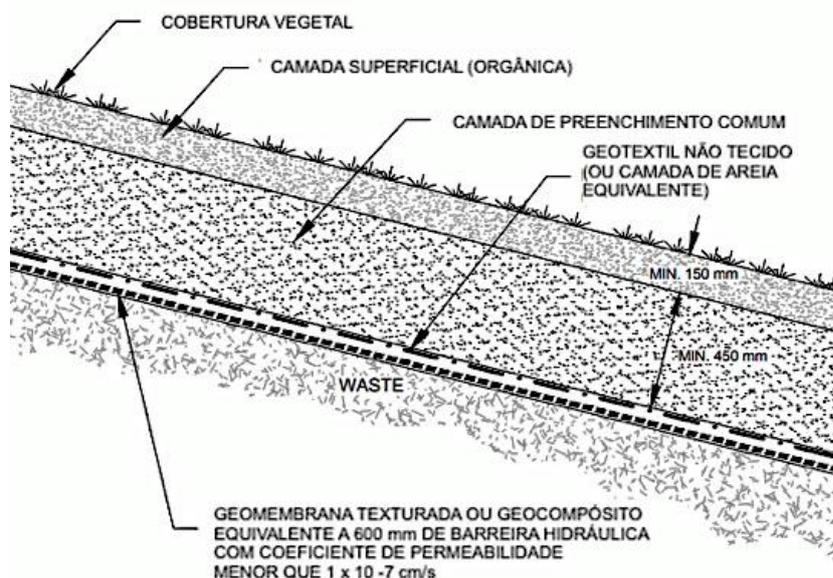
Fonte: (BCME, 2016)

De acordo com o BCME (2016), a camada de cobertura deve consistir de uma camada com permeabilidade menor ou igual a 1×10^{-5} cm/s para regiões áridas e semiáridas e permeabilidade menor ou igual a 1×10^{-7} cm/s para regiões não áridas. A máxima declividade dos taludes depende do tipo de solo e do clima, os taludes mais suaves reduzem a erosão e escoamento superficial, enquanto que os taludes mais íngremes, reduzem a infiltração, embora que aumentem a instabilidade do aterro. De acordo com o BCME (2016), deve ser utilizada uma inclinação de 3H:1V (33%) para os taludes laterais e de 10H:1V (10%) para o platô da célula. A inclinação do platô

pode ser reduzida para 25H:1V (4%) em sistemas de cobertura que utilizam geomembrana ou barreira de compósito e camada de drenagem.

A Figura 4 mostra o detalhe da camada de cobertura equivalente utilizando geossintéticos, composta por geomembrana, camada de proteção mínima de 15 cm e camada de solo de baixa permeabilidade de 45 cm:

Figura 4 - Detalhe da camada de cobertura com geomembrana recomendado pelo BCME



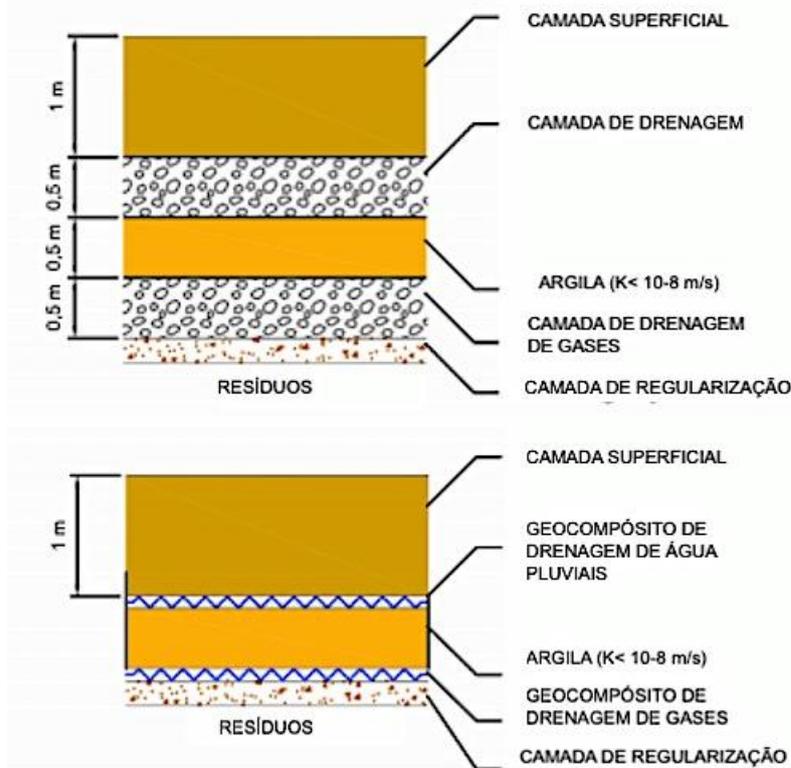
Fonte: (Adaptado do BCME, 2016)

De acordo com a Landfill Directive 1999/31/EC, os principais requisitos para os componentes do sistema de cobertura em aterros não perigosos são:

- Uma Camada superficial (15 – 30 cm) com talude mínimo de 1:20 e máximo de 1:3;
- Uma camada subsuperficial que somada à camada superficial tenham no mínimo 1 m de espessura;
- Uma camada de drenagem com espessura mínima de 0,5 m e permeabilidade mínima de $1,0 \times 10^{-4}$ m/s;
- Uma camada de barreira hidráulica com espessura mínima de 0,60 m e permeabilidade mínima de $1,0 \times 10^{-9}$ m/s.

Esses componentes são amplamente substituídos por geossintéticos, quando as legislações nacionais permitem (CAZZUFFI *et al.*, 2017). A Figura 5 mostra as componentes do sistema de cobertura de acordo com a legislação italiana derivadas da Landfill Directive 1999/31/EC e a seção correspondente utilizando geossintético:

Figura 5 - Componentes do sistema de cobertura recomendados pela Diretiva para Aterros sanitários da União Europeia (LANDFILL DIRECTIVE 1999/31/EC)



Fonte: (Cazzuffi *et al.*, 2017)

Os requisitos para construção e operação de aterros na União Europeia estão definidos no Landfill Directive 1999/31/EC (Diretivas para aterros Sanitários). As Diretivas são atos legislativos da União Europeia que são usados para assegurar a conformidade das diferentes legislações nacionais. Essa directiva classifica os aterros em inertes, não perigosos e perigosos. O Landfill Directive 1999/31/EC foi emendado em 2018 pelo Directive (EU) 2018/850, no qual as restrições aplicadas a aterros são reforçadas, proibindo a disposição de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários.

A Landfill Directive 1999/31/EC estabelece os requisitos de permeabilidade e espessura da camada da base do aterro, podendo esta ser dispensada nos casos em que não há risco para subsolo e águas subterrâneas. No entanto, a directiva é menos consistente em relação aos requisitos para camada de cobertura. A utilização de camadas de cobertura em aterros, na abordagem pela Directiva, é formulada como sendo opcional, mesmo quando os riscos para ambiente são identificados.

A directiva para aterros diz que cobertura deve ser instalada nos casos em que as autoridades competentes identificarem que a decomposição dos resíduos ocorre de forma lenta, para prevenir da formação de lixiviado. Nesses casos em que for

indicada, a camada de cobertura deve ser composta por camadas espessas de materiais naturais com pedregulhos e argila compactada, respectivamente. Outros sistemas de coberturas também são propostos para permitir a drenagem de gases (CAZZUFFI *et al.*, 2017).

2.2.3 Concepção das Camadas de Cobertura ao longo do tempo

A concepção de camadas de coberturas é um desafio pois envolvem várias variáveis como tipo e extensão da massa de lixo, condições hidrológicas, tipo de camada de base, vizinhança, vida útil da camada e uso futuro do local. O conceito inicial das camadas de cobertura referia-se a uma barreira resistiva para impedir a entrada de água da chuva e saída dos gases do aterro. A evolução conceitual e funcional das camadas de cobertura foi impulsionada pela busca por alternativas potenciais que causem o menor impacto ambiental e reduzam o custo de instalação e manutenção da camada.

As camadas de coberturas denominadas convencionais são formadas por uma camada homogênea de solo de baixa permeabilidade compactado. Essas camadas funcionam como uma barreira resistiva que impede a entrada de água. As principais desvantagens desse sistema de cobertura são o alto custo para atender às exigências de permeabilidade e as dúvidas em relação ao seu desempenho a longo prazo.

Tradicionalmente eram utilizadas geomembranas com a função de impedir a passagem de água ou gás. Embora as camadas compostas com geomembranas, tenham contribuído positivamente em vários aterros, sendo uma alternativa segura e sustentável, essas camadas apresentam algumas desvantagens, tais como: custo elevado, limitações quanto a sua durabilidade, problemas com perfurações da camada durante a instalação (KOERNER, 2002), possibilidade de formação de bolsões de gás, além de impedir as trocas entre o meio e a massa de lixo interferindo no processo de decomposição dos resíduos (JUCÁ, 2003 *apud* MACIEL, 2003; MARIANO, 2020).

Por conta desses questionamentos em relação à impermeabilização total das camadas, as camadas de baixo custo (sem geossintéticos), denominadas de camadas alternativas, ganharam notoriedade (ALBRIGHT *et al.*, 2004). Assim surgiram as camadas anisotrópicas (barreiras capilares) e as camadas evapotranspirativas (barreiras evapotranspirativas).

As camadas evapotranspirativas são camadas de armazenamento de água mais espessas que utilizam o solo disponível localmente. As principais desvantagens dessas camadas são a formação de fluxos preferenciais, devido ao ressecamento do solo, penetração de raízes e buracos feitos por animais (KOERNER, 2002).

As camadas anisotrópicas ou barreiras capilares são formadas por uma camada de solo fino, acima de uma camada de pedregulho. A principal desvantagem dessa camada é o carreamento de finos para camada inferior, fazendo com que perca a funcionalidade. Além disso, elas não funcionam adequadamente em climas úmidos (KOERNER, 2002).

As novas conceituações de cobertura que vêm ganhando destaque atualmente envolvem o uso de materiais alternativos que melhoram o aspecto geotécnico e biológico da camada (MARIANO, 2020). Outras razões para se procurar por materiais alternativos são uso de solos locais, custo e aproveitamento de materiais que seriam descartados no ambiente (COSTA *et al*, 2018; MACIEL & JUCÁ, 2000).

Atualmente, as camadas mais promissoras são as camadas oxidativas. Essas camadas utilizam material orgânico que condiciona o desenvolvimento de microrganismos consumidores de CH₄. Embora haja grandes avanços em usos de composto orgânico, ainda continua sendo um desafio manter as condições de serviço dessa camada ao longo do seu ciclo de vida, sendo primordial que se tenha um programa de inspeção periódicas para verificar a performance dessas camadas a curto e longo prazo.

A seguir são apresentados os principais aspectos das camadas mais estudadas que são a camada convencional, camada oxidativa e barreiras capilares. Neste estudo iremos focar nas camadas convencionais e oxidativas.

2.2.3.1 Camadas Convencionais ou Barreiras Resistivas

O conceito das camadas de cobertura convencionais propõe que as camadas funcionem como uma barreira hidráulica para impedir a entrada de água no solo através da utilização de um baixo coeficiente de permeabilidade hidráulica (desejável $<10^{-7}$). A baixa permeabilidade da camada é primariamente utilizada como critério na aprovação de uma camada de cobertura, pois limita ou impede a penetração de água na camada, convertendo a precipitação em escoamento superficial.

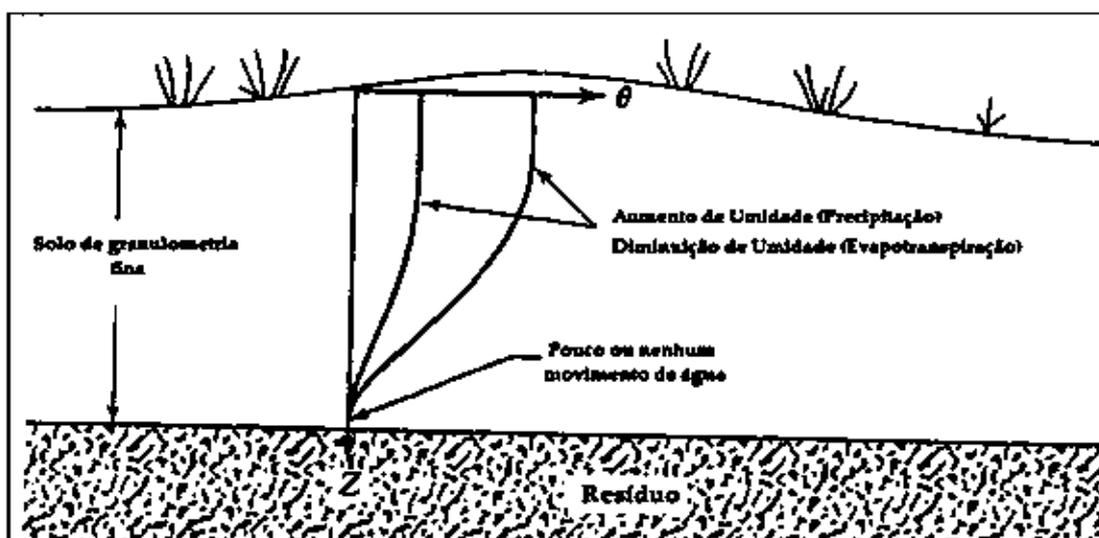
As camadas convencionais geralmente são formadas por solos de granulometria fina, argilas e siltes ou composição desses, no qual se aplica uma compactação afim de reduzir a permeabilidade da camada. No entanto, solos com granulometria fina apresentam maior susceptibilidade de apresentar componentes expansivos em sua composição, além de apresentar um alto índice de plasticidade. Essas características não são desejáveis em camadas de cobertura, visto que favorecem a ocorrências de degradação hidráulica do solo e potencializam o efeito de histerese dos solos.

Solos com densidades elevadas podem limitar o crescimento das raízes, dificultando o estabelecimento da vegetação na camada. O crescimento das raízes pode ser bastante reduzido para densidades acima de $1,5 \text{ Mg/m}^3$, densidades acima de $1,7 \text{ Mg/m}^3$ podem prevenir o crescimento de raízes em alguns solos. Por outro lado, podem ocorrer fissuras no solo pela formação de canais pelas raízes (CAMARGO & ALLEONI, 2006).

As camadas de cobertura convencionais são mais vantajosas em locais de elevada precipitação. Em climas áridos ou semiáridos podem ocorrer fissuras por ressecamento, tornando a camada ineficiente (FOURIE & MOONSAMMY, 2002).

Para evitar a perda de funcionalidade da cobertura, a camada deve ser projetada de forma que ocorra pouca ou nenhuma variação de umidade na base da camada, como mostrado na Figura 6:

Figura 6 - Ilustração da variação de umidade no perfil da camada de cobertura



Fonte: (Benson e Khire, 1995, citado por Lopes, 2011)

O dimensionamento de camadas de cobertura convencionais pode ser resumido em três passos de acordo com Guia Regulatório e Técnico Americano do Conselho Regulatório e de Tecnologia dos Estados (US INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL – ITRC, 2003):

1. Especificação do material;
2. Desenvolvimento de um conjunto especificações de projeto para instalação do material;
3. Desenvolvimento de um plano de controle de qualidade da construção.

As principais vantagens das camadas convencionais são:

- Efeito estético;
- Redução ou eliminação de elementos como geossintéticos;
- Redução de odores e proliferação de vetores;
- Redução da infiltração de água através de um baixo coeficiente de permeabilidade.

E as principais desvantagens são:

- Limitações no desenvolvimento da vegetação devido à elevada compactação;
- Dúvidas em relação à performance a longo prazo;
- Degradação hidráulica do solo após os primeiros ciclos de umedecimento e secagem;
- Formação de fissuras ou tricas, quando utilizadas em climas áridos e semiáridos;
- Maior custo de construção.

2.2.3.2 Barreiras capilares

As camadas evapotranspirativas anisotrópicas ou barreiras capilares consistem um sistema de duas camadas de diferentes granulometrias. A diferença entre as propriedades hidráulicas não saturadas das duas camadas formam uma quebra de capilaridade entre elas (BOLEN et al., 2001 *apud* ZHAN, 2016). Isso permite que a camada de solo fino retenha mais água, aumentando a sua capacidade de armazenamento de água (KHIRE *et al.*, 2000; STOMONT & MORRIS, 1998 *apud*

BENSON & BAREITHER, 2012). A Figura 7 mostra um modelo de configuração de uma barreira capilar:

Figura 7 – Barreira capilar



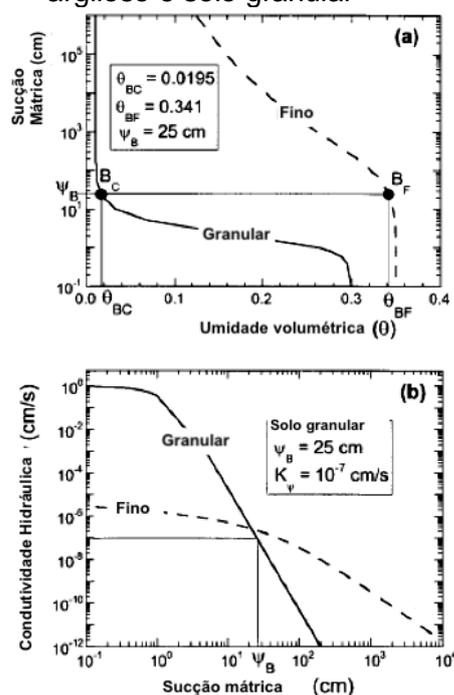
Fonte: (Benson & Bareither, 2012)

As barreiras capilares utilizam o balanço hídrico e o princípio de armazenamento de água para controlar a percolação (BOHNHOFF *et al.*, 2009). Essa camada funciona como um reservatório, ao invés de uma barreira hidráulica, armazenando água durante períodos de precipitação, até que a água seja eliminada através das plantas ou evapore através da superfície do solo (SQUILLACE *et al.*, 2012; KHIRE *et al.*, 2000). A percolação é reduzida quando a capacidade de armazenamento de água e propriedades evapotranspirativas aumentam (SQUILLACE *et al.*, 2012).

A utilização de camadas evapotranspirativas é vantajosa particularmente em regiões de clima árido e semiárido, onde a precipitação é balanceada com a energia disponível para evapotranspiração (KHIRE *et al.*, 2000, ZORNBERG *et al.*, 2003, ALBRIGHT *et al.*, 2004).

Dados obtidos por Stomont & Anderson (1999) *apud* Khire *et al.* (2000) mostraram que uma quantidade de água significativa só entrará no solo granular quando a sucção mátrica na superfície de solo granular aumentar para o valor próximo da umidade residual do solo granular da curva característica (B_c), como ilustrado na Figura 8:

Figura 8 - (a) Curva característica (b) condutividade hidráulica não saturada para solo argiloso e solo granular



Fonte: (Khire *et al.*, 2000)

Nesse ponto, as condutividades hidráulicas não saturadas dos dois tipos de solos vão ser aproximadamente iguais, favorecendo a percolação através da superfície de contato entre os dois solos.

A continuidade nos valores de propressão requer que a sucção mátrica nas duas camadas seja igual na interface entre as camadas. Assim, a sucção mátrica no solo fino deve ser igual a Ψ_B , antes da água penetrar no solo granular. Mesmo quando o ponto B_F é atingido, uma pequena quantidade de água vai entrar no solo granular, pois a permeabilidade hidráulica da camada granular ainda é baixa em B_c . (BENSON & KHIRE, 1995; BEWS *et al.*, 1997; WARD & GEE, 1997 *apud* KHIRE *et al.*, 2000).

As principais vantagens das barreiras capilares são:

- Utilização de solo local, diminuindo custos com transporte;
- Redução da energia requerida (mistura, molhagem, compactação) para se obter uma baixa permeabilidade;
- Redução ou eliminação de elementos como geossintéticos;
- Menor vulnerabilidade ao ressecamento e fissuramento do solo durante e após instalação;

- Menor custo de manutenção devido a redução da erosão com estabelecimento da vegetação;
- Instalação de linhas de coleta de gás na camada de solo granular.

As principais desvantagens são:

- Perda da funcionalidade com carreamento do material fino para camada inferior;
- Dificuldade de compactação;
- Não funcionam adequadamente em clima úmido;
- Necessitam grandes volumes de solo.

2.2.3.3 Camadas oxidativas

Um dos grandes desafios envolvendo as camadas de cobertura é reduzir a emissão de gases, ao mesmo tempo que permita a entrada de oxigênio, necessária para decomposição dos resíduos. As camadas oxidativas apresentam alguns avanços nesse contexto, pois são camadas mais porosas facilitando as trocas entre os meios, a massa de lixo e o ar atmosférico (MACIEL, 2003). A matéria orgânica misturada com solo aumenta a capacidade de retenção de água pelo solo, fazendo com que a emissão de gases para atmosfera seja reduzida, já que a camada se mantém com umidade elevada por mais tempo.

As camadas de cobertura oxidativas, também conhecidas como camadas metanotróficas, são baseadas nos conceitos das camadas biorreativas ou biocoberturas, funcionando como uma barreira biológica. A oxidação do CH_4 é um fenômeno natural que ocorre com a exposição prolongada do metano ao solo em ambientes aeróbicos, então é necessário que estejam presentes simultaneamente CH_4 e O_2 .

As camadas oxidativas são formadas por uma camada de solo puro ou mistura de solo com matéria orgânica estabilizada (MOE) de forma a otimizar as propriedades geotécnicas do solo e favorecer a oxidação do metano. O solo geralmente é compactado para encontrar um coeficiente de permeabilidade suficientemente baixo (entre $< 10^{-5}$ e $< 10^{-7}$ cm/s) (ALBRIGHT *et al.*, 2004).

De acordo com Rose (2009), as camadas oxidativas não reduzem a quantidade de biogás enviada para atmosfera, mas atua reduzindo o efeito desastroso das emissões de metano, uma vez que esse gás tem um potencial poluidor maior que o gás carbônico.

A incorporação de matéria orgânica estabilizada (MOE) aos solos é uma forma de mitigar a emissão de CH₄ para atmosfera, além de melhorar algumas propriedades do solo como retenção de umidade, textura do solo, permeabilidade ao gás, resistência à erosão (HUBER-HUMER *et al.*, 2009) e contração do solo (COSTA, 2015).

O solo com alto teor de matéria orgânica propicia um ambiente favorável para desenvolvimento dos microrganismos através de uma alta superfície específica, alta capacidade de retenção de água, porosidade e textura adequadas para que ocorram as trocas gasosas e baixa condutividade térmica (LOPES, 2011).

É importante se certificar que os compostos utilizados nas camadas de cobertura oxidativas sejam estáveis, caso contrário a respiração do material compostado pode consumir o oxigênio disponível concorrendo com a atividade bacteriana (HUBER-HUMER & LECHNER, 1999; HUBER-HUMER, 2004; WILSHUSEN *et al.*, 2004a *apud* LOPES, 2011).

Um dos processos utilizados na estabilização de materiais orgânicos é a compostagem, que consiste na transformação biológica dos materiais orgânicos em um composto estabilizado quimicamente pela ação de microrganismos do próprio material ou de um pré-inóculo.

Huber-Humer *et al.* (2009) apresentam a faixa de valores dos parâmetros para avaliar a adequabilidade dos materiais compostados para utilização como camadas de coberturas, como pode ser observado na Tabela 1:

Tabela 1 - Faixa de valores dos parâmetros de materiais compostados para utilização em camadas de cobertura oxidativas

Parâmetro	Unidade	Valor proposto	Comentários
Propriedades Físicas			
Densidade	kg/l	0,8 - 1,1	Densidade < 0,8 não ocorreu nos experimentos É recomendado um teor de umidade inicial de cerca de 50% da capacidade retenção de água
Teor de Umidade	% w/w	30 - 50	Em climas áridos é recomendada uma alta da capacidade retenção de água Mínimo de 25%.
Capacidade retenção de Água	%DM	50 - 130	Mais adequado > 30% do teor médio de umidade
Grau de aeração	%v/v	>25	
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
Propriedades Químicas			
Condutividade	mS/cm	<4	Metanotróficas são bastante toleráveis condutividade elevadas
pH	-	6,5 - 8,5	Metanotróficas são tolerantes com variações de pH
SO ₄ ²⁻	ppmDM	>500	As maiores concentrações de sulfato podem ser favoráveis para a oxidação do CH ₄ sob condições anaeróbias
NH ₄ ⁺ - N	ppmDM	<400	Altas concentrações de amônia podem inibir a oxidação do metano
NO ₂ ⁻ - N	ppmDM	<0,1	Nitrito é um forte inibidor da oxidação do metano
NO ₃ ⁻ - N	ppmDM	Não há valor limite	A maioria das metanotróficas pode usar nitrato como fonte de nitrogênio
P _{total}	%DM	>0,3	P é um nutriente essencial para metanotróficas
N _{total} (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, citado por Lopes, 2011)

As principais vantagens das camadas oxidativas são:

- Aproveitamento de resíduos orgânicos de compostagem, palhas, aparas de madeira, dentre outros;
- Redução ou eliminação de elementos como geossintéticos;
- Maior capacidade de retenção de líquidos;
- Camada mais porosa, permitindo as trocas entre o meio e massa de lixo;
- Redução das emissões gasosas, através da retenção de gás e oxidação do metano;
- Diminuição da formação de fissuras e trincas;
- Condições mais propícias para o estabelecimento da vegetação;

- Utilização em aterros de pequeno porte, onde não é viável exploração de biogás.

As principais desvantagens da camada oxidativa são:

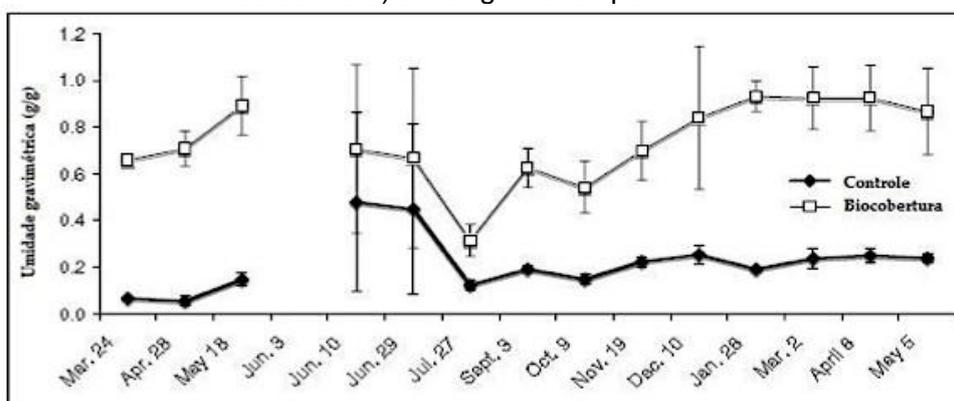
- Durabilidade do material compostado;
- Maior permeabilidade à água, por ser mais porosa;
- Dúvidas em relação à performance a longo prazo.

2.3 ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE CAMADAS OXIDATIVAS E CONVENCIONAIS

Lins & Jucá (2005) realizaram o cálculo estimativo da vazão de percolado pelo método do balanço hídrico para uma camada convencional do Aterro da Muribeca no ano de 2003 e encontraram valores de vazão cerca de 33,75% acima da medida real. Os autores justificaram os resultados superestimados pela alta taxa de infiltração (cerca de 82%), não levando em consideração o grau de compactação do solo e dos resíduos.

Stern *et al.* (2007) desenvolveram um estudo para avaliar o efeito das condições climáticas nas condições de umidade do solo para uma camada oxidativa e uma convencional. Os autores observaram que a cobertura oxidativa (biocobertura) é capaz de reter melhor a umidade do que a camada convencional (camada de controle) como mostrado na Figura 9:

Figura 9 – Comparação da variação de umidade de uma biocobertura e um solo puro (solo de controle) ao longo do tempo



Fonte: (Stern *et al.*, 2007)

Rose (2009) realizou uma análise comparativa em quatro composições de solos (solo, solo + composto na proporção 1:1, solo mais composto na proporção 3:1 e composto orgânico) em laboratório, tendo como objetivo avaliar a eficiência do composto para utilização em camadas alternativas. Os autores observaram um aumento da capacidade de campo do solo quando misturado com composto orgânico. Em relação a compactação, a autora verificou que quando maior a proporção de composto, maior a umidade ótima e menor o peso específico seco. Em relação a porosidade, tanto o solo como as misturas apresentaram valores bem próximos. A autora realizou ensaios de permeabilidade à água em amostras na condição de 60% do peso específico seco máximo e 85% da umidade ótima, e verificaram que a permeabilidade diminui à medida que se aumenta a proporção de composto orgânico.

Lopes (2011) realizou um estudo experimental de campo para avaliar a infiltração de água e as emissões de metano (CH_4) em uma camada convencional, duas camadas oxidativas em diferentes proporções e uma barreira capilar da célula experimental do Aterro da Muribeca, Jaboatão – PE. A autora concluiu que o comportamento em relação ao fluxo de líquido e gases na camada está relacionado às características construtivas e condições climáticas locais. As camadas oxidativas e barreiras capilares apresentaram, em períodos de grande precipitação, maior infiltração em relação às camadas convencionais, devido a menor compactação da camada. Por outro lado, as camadas oxidativas e barreiras capilares apresentam emissões de CH_4 seis vezes menores que as camadas convencionais. A autora verificou que a vegetação se mostrou um fator decisivo na performance da camada aumentando a eficiência da oxidação e retendo umidade tanto para umidades baixas como para umidades elevadas. Os dados da instrumentação do período monitorado forneceram indicações sobre o padrão de comportamento da camada a longo prazo, tendo em vista que a estrutura do solo passou por cerca de três ciclos de secagem e molhagem. No entanto, os efeitos das condições climáticas críticas e a alteração das propriedades do solo, como por exemplo a permeabilidade, devem ser levados em consideração.

Galdino Oliveira (2013), que continuou a pesquisa, avaliou a eficiência destas camadas ao longo do tempo e observou que camada que perde mais eficiência ao longo do tempo é a camada convencional. A camada oxidativa mostrou-se mais

eficiente em relação a oxidação de CH_4 em cerca de três vezes em relação a camada convencional e duas vezes em relação a camada barreira capilar.

Costa *et al.* (2018) realizaram ensaios de coluna em laboratório em uma coluna composta por solo puro de 60 cm (compactação de 80% e porosidade de 52%) e outra composta por uma camada oxidativa de 30 cm (compactação de 75% e porosidade de 59%), acima de uma camada de solo puro de 30cm. Os resultados de ensaios, simulando uma chuva de 30 mm seguida de uma chuva de 10 mm, mostraram que a camada oxidativa apresentou uma maior a capacidade de retenção de água, principalmente para umidades mais elevadas, e um tempo de infiltração mais lento. As camadas de solos com material compostado se mostraram mais eficientes tanto na redução de emissão de gases como na redução da infiltração de água pelo solo. O estudo mostrou que os solos se comportaram de maneira distinta após o primeiro ciclo de umedecimento e secagem. A camada oxidativa não apresentou microfissuração, enquanto a camada convencional apresentou fissuração devido a retração do solo. Por ser um ensaio em laboratório, não foi contabilizada a influência da vegetação e do escoamento superficial.

2.4 ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE ANÁLISES NUMÉRICAS E DADOS DE CAMPO

A modelagem numérica de solos saturados é realizada de forma relativamente simples, pois os parâmetros podem ser considerados constantes. Enquanto nos solos não saturados envolvem a representação de parâmetros como uma função matemática. Conseqüentemente, as soluções das modelagens numéricas se tornam não lineares, necessitando de procedimentos iterativos para encontrar a solução. A solução de problemas em solos não saturados envolve a solução de Equações Diferenciais Parciais não lineares de fluxo. A convergência para uma solução necessita que a malha de elementos finitos ser desenhada de forma que a convergência seja garantida (FREDLUND, 2016).

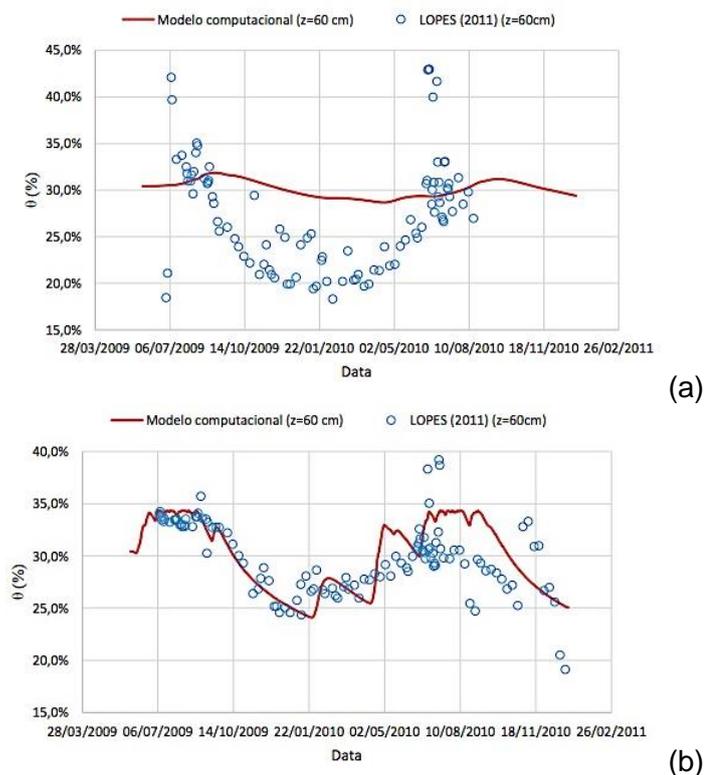
A não linearidade dos parâmetros dos solos não saturados são resultantes das mudanças no grau de saturação do solo quando um processo físico é simulado. E essa variação no grau de saturação está primariamente relacionada à sucção do

solo. O coeficiente de permeabilidade e o armazenamento de água no solo pode ser computada em função da sucção de 0 a 1500kPa (FREDLUND, 2016).

Khire *et al.* (2000) utilizou o software UNSAT-H para avaliar o fluxo em camadas de coberturas. O estudo mostrou que os dados previstos na simulação com programa apresentaram uma boa correlação com os dados de balanço hídrico obtidos em campo. Quando o software simula a camada de cobertura, as condições de contorno são aplicadas na superfície da camada, o fluxo corresponde à precipitação ou evaporação. Durante a precipitação, a infiltração é separada em infiltração e escoamento superficial. O software não considera a parcela de água retida na cobertura vegetal e o atraso na infiltração da água que fica retida no talude. Apesar dessas limitações, a previsão do escoamento superficial e infiltração pelo programa é bastante precisa.

D'Ângelo (2016) realizou a análise numérica através do programa HYDRUS 1-D de uma camada oxidativa e uma camada convencional da Célula Experimental do Aterro da Muribeca para avaliar a infiltração de água e a variação da umidade ao longo da camada. A Figura 10 mostra a comparação entre as umidades medidas em campo e calculadas pelo modelo computacional na profundidade de 60 cm, ou seja, na profundidade que sofre menor influência das variações climáticas:

Figura 10 – Variação da umidade na profundidade de 60 cm de uma (a) camada de cobertura convencional e de (b) uma camada metanotrófica



Fonte: (D'Ângelo, 2016)

Para simplificar o modelo, a vegetação não foi considerada na simulação. O modelo computacional não fez a previsão dos picos de percolação que eventualmente ocorrem nos períodos de excedente hídrico prolongado, mostrando algumas limitações nesse aspecto.

O autor também simulou a umidade ao longo do perfil e comparou com os valores obtidos do monitoramento em campo realizado por Lopes (2011). Houve uma maior discrepância de valores de umidade da camada convencional na profundidade de 60 cm. O autor explica que esses erros e divergências são considerados aceitáveis, tendo em vista as limitações em termos de modelagem e as simplificações adotadas pelo modelo. Já na camada metanotrófica, todas as profundidades apresentaram comportamento similares aos valores medidos pelos sensores em campo.

2.5 PARÂMETROS IMPORTANTES NO DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA

Os principais parâmetros hidrológicos e geotécnicos que devem ser considerados no dimensionamento de camadas de cobertura de acordo com Conselho Regulatório e de Tecnologia dos Estados dos EUA – ITRC (2003) são: limites de Attemberg, densidade do solo, compactação, distribuição do tamanho das partículas, porcentagem de argila, condutividade hidráulica saturada, porosidade total, tipo de argila mineral, parâmetros de fluxo não saturado e capacidade de armazenamento de água.

De acordo com ITRC (2003), as principais condições agronômicas que afetam o crescimento das plantas são: aeração do solo, conexão entre os poros e presença de oxigênio no ar do solo, presença de amônia, presença de ânions/salinidade e conteúdo de sódio, disponibilidade de nutrientes, presença de bactérias e fungos, gás carbônico (CO₂) da matéria orgânica em decomposição, fertilidade do solo, conteúdo de húmus, pH, resistência do solo, temperatura, substâncias tóxicas, e umidade.

O ITRC (2003) faz algumas considerações sobre as propriedades dos solos para utilização em camadas de cobertura de aterros:

- Conteúdo de húmus: o húmus é um componente orgânico da matéria orgânica em decomposição que proporciona ao solo uma capacidade de troca catiônica (CTC) considerável, além daquela proveniente dos minerais de argila, melhorando a estrutura do solo. A adição de matéria orgânica no solo pode melhorar a sua fertilidade temporariamente, embora não seja vantajosa, pois o material adicionado vai oxidar e desaparecer em alguns meses ou anos e o solo reverterá para condições iniciais;
- Substâncias perigosas: as camadas de cobertura não devem conter substâncias químicas de atividades humanas. Substâncias como óleos, sais naturais. O sódio pode causar a defloculação das partículas de argila (dispersão);
- Limites de Attemberg: a utilização de solos com alta plasticidade pode ocasionar grandes variações de volume resultantes das flutuações de umidade. Chadwick *et al.* (1999) *apud* ITRC (2003) sugere o uso das propriedades de plasticidade para decidir se um solo é ou não viável para

utilização em camadas de cobertura. Zornberg (2003) afirma que um solo com índice de plasticidade entre 7% e 30% e limite de liquidez menor que 40% pode limitar essas variações de volume e fissuras decorrentes do ressecamento do solo;

- Distribuição granulométrica: um solo bem graduado tem um impacto significativo na condutividade hidráulica, propriedades de retenção de água e condutividade hidráulica não saturada das camadas de cobertura. Zornberg (2003) observou que o uso de solos com percentual passante na peneira nº 200 menor ou igual a 35% previnem a erosão e aumentam a capacidade de armazenamento de água, além de ter um maior potencial para controlar a infiltração de água;
- Coeficiente de permeabilidade hidráulica saturada: em camadas de cobertura é requerido que o coeficiente de permeabilidade não saturada seja menor ou igual a 10^{-5} m/s;
- Coeficiente de permeabilidade hidráulica não saturada: essa é uma característica bastante importante para modelagem numérica do fluxo não saturado em camadas de cobertura;
- Resistência ao cisalhamento do solo: a resistência do solo depende de fatores como densidade, distribuição granulométrica das partículas e umidade. Essa propriedade é importante quando a estabilidade é um aspecto importante de projeto. A resistência do solo também é um importante aspecto em relação ao estabelecimento da vegetação, pois um solo muito resistente reduz ou limita o crescimento das plantas;
- Capacidade de retenção de água pelo solo: o solo com maior capacidade de retenção de água irá necessitar de uma espessura menor da camada;
- Densidade do solo: a densidade está relacionada às propriedades como resistência ao cisalhamento e propriedades estruturais. A densidade deve ser baixa o suficiente para manter uma cobertura vegetativa ativa, mas também ser alta suficiente para prevenir recalques diferenciais.

Outras variáveis importantes também devem ser observadas na análise do solo para utilização em camadas de cobertura como: porcentagem de cobertura vegetal, porcentagem de fragmento de rochas, distribuição e profundidade das raízes,

coloração do solo, consistência e resistência à deformação, reação do solo ao ácido clorídrico, presença de carbonatos (salinidade), estrutura e textura do solo.

2.6 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS LOCAIS

De acordo com ITRC (2003), os principais fatores climáticos que influenciam no fluxo de água nas camadas de cobertura são:

- Precipitação diária;
- Temperatura máxima e mínima;
- Umidade relativa;
- Radiação solar total;
- Velocidade diária dos ventos.

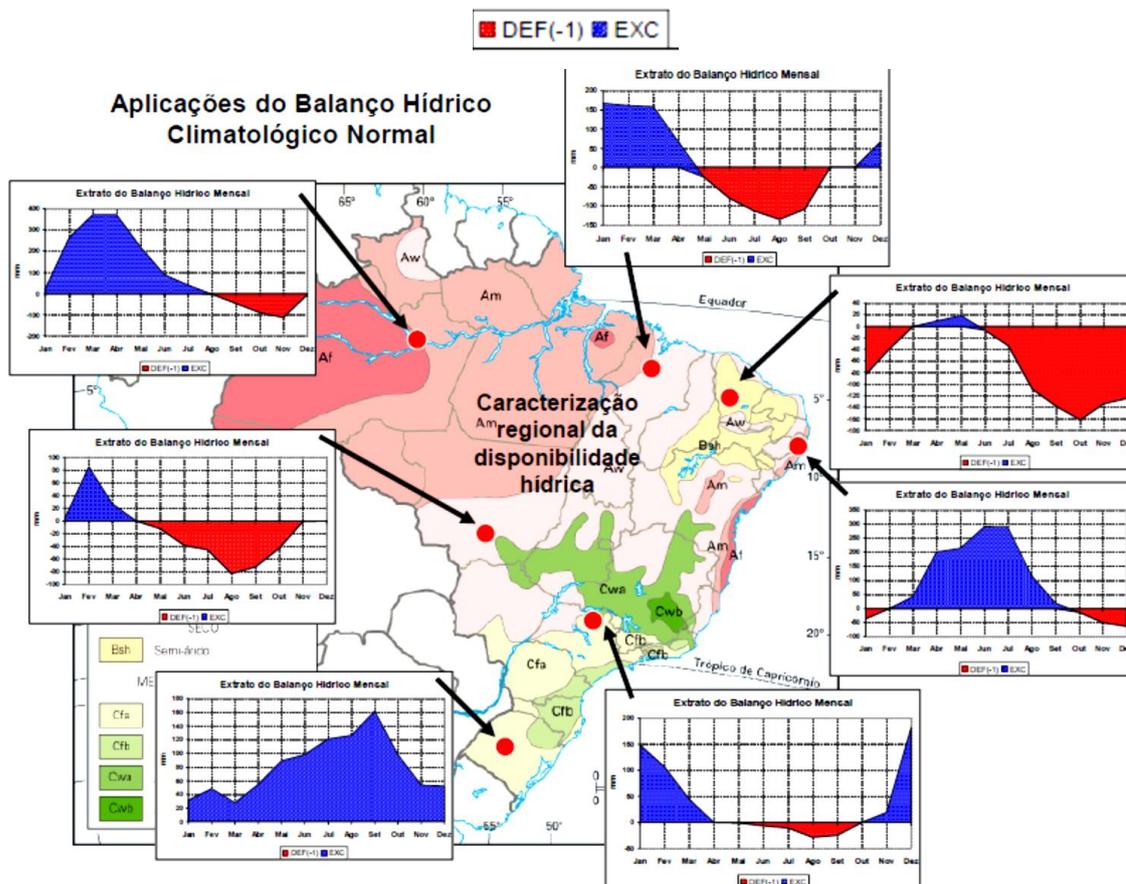
O fluxo de água através da interface solo-atmosfera é governado por dois principais processos: a água entra no solo através da infiltração e é eliminada da superfície de solo em forma de vapor através do processo de evaporação (WILSON *et al.*, 1994).

O termo evaporação potencial que foi introduzido por Thornthwaite (1948) pode ser definida como a máxima taxa de evaporação através de uma superfície de água pura sob determinadas condições climáticas (WILSON *et al.*, 1994).

Os métodos tradicionais como de Thornthwaite (1948) baseado na temperatura e o método Priestley e Taylor (1972) baseado na energia estimam a evaporação máxima ou potencial baseada nas condições climáticas. Métodos como esses são apropriados para solos saturados ou espelhos d'água. No caso dos solos não saturados essa evaporação é significativamente reduzida relativa a taxa de evaporação. Além disso, esses métodos consideram uma superfície de solo descoberta, ou seja, sem vegetação (WILSON *et al.*, 1994).

A evapotranspiração corresponde a parcela de evaporação mais a transpiração das plantas. O gráfico de balanço de precipitação e evapotranspiração pode assumir formas variadas para as diferentes regiões do Brasil, algumas regiões podem ter maior déficit hídrico, enquanto outras podem ter maior excedente hídrico, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Balanço Hídrico Climatológico para diferentes regiões do Brasil



Fonte: (Sentelhas & Angelocci, 2012)

A cor vermelha representa os períodos de déficit hídrico e a cor azul os períodos de excedente hídrico. Na região norte, a precipitação acumulada anual pode ultrapassar 3000mm, no Nordeste o volume precipitado é inferior a 1250 mm, enquanto no sul do Brasil esse valor é de no máximo 2050 mm (INMET, 2016).

Logo, a avaliação do clima da região é de grande importância para fornecer estimativas de evapotranspiração, deficiência hídrica, excedente hídrico, armazenamento de água no solo e a disponibilidade hídrica total (SANTOS; CHANG; KIANG, 2012 *apud* OLIVEIRA & BRAGA, 2017).

Quando se projeta uma camada de cobertura em relação ao fluxo de água, é importante avaliar o balanço hídrico do local e as situações críticas para percolação de água. O cenário crítico para percolação de água ocorre para chuvas de longa duração e baixa intensidade, onde a precipitação não excede a taxa de infiltração. Esses eventos podem não causar efeitos erosivos, mas podem sobrecarregar a camada, gerando uma maior quantidade de água infiltrada (ITRC, 2003).

Os dados climatológicos utilizados para representar as condições do local devem ter a máxima extensão possível. Alguns autores acham que uma série histórica de 20 anos deveria ser o mínimo, mas os projetistas fazem o melhor com os dados disponíveis.

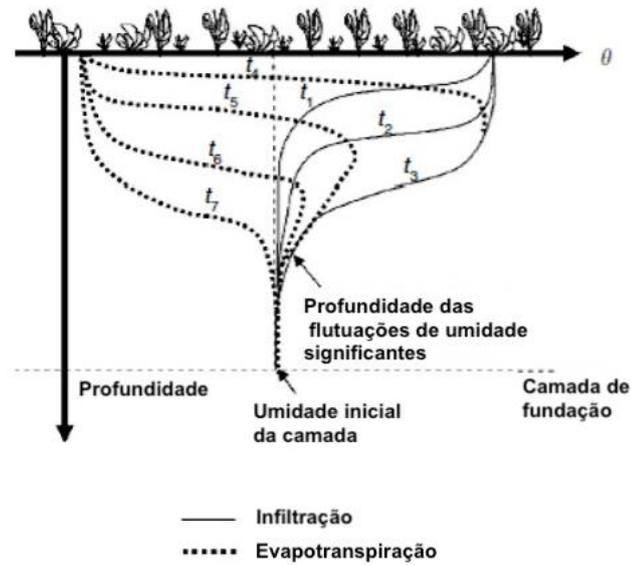
Em climas frios, a transpiração é quase inexistente durante inverno, então a camada de cobertura deve ser capaz de armazenar toda ou quase toda a água pluvial durante esse período. A decisão entre se utilizar a precipitação média ou eventos extremos deve ser discutida entre projetistas e órgãos regulatórios (ITRC, 2003).

Uma análise das condições climáticas locais deve ser realizada para avaliar a viabilidade e as dificuldades para implantação de uma camada de cobertura alternativa no local. É importante verificar se o clima local é compatível com o clima da região, pois o clima local pode variar substancialmente se estiver localizado próximo a montanhas, vales ou próximo da costa. Em regiões áridas, os sistemas de cobertura em solo natural, como a argila por exemplo, podem sofrer alta evaporação contribuindo para o ressecamento do solo e formação de trincas (FERREIRA & MAHLER, 2006).

As camadas de cobertura convencionais que utilizam argila de baixa condutividade geralmente apresentam um desempenho satisfatório em climas úmidos, no entanto em climas áridos o sistema pode não funcionar adequadamente, devido a formação de macro e microfissuras na argila (EPA, 2003).

A camada mais superficial apresenta comportamento sazonal e sofre grande influência do clima. A Figura 12 ilustra a variação da umidade no perfil de solo ao longo do tempo.

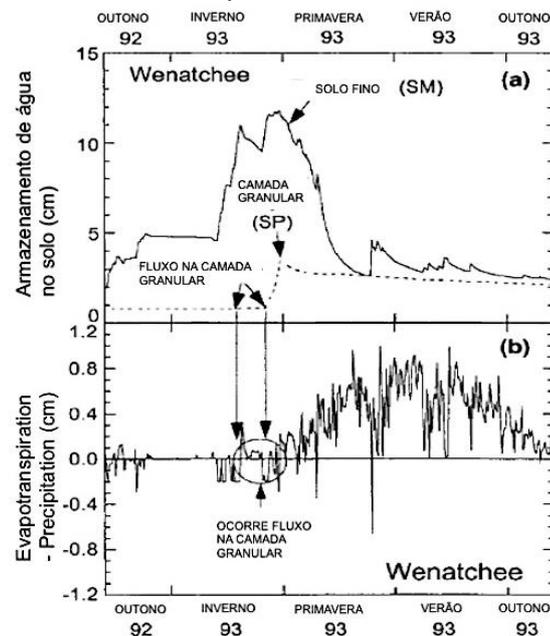
Figura 12 - Flutuação sazonal da umidade da camada de cobertura



Fonte: (Zornberg & McCartney, 2007), citado por D'Ângelo, 2016)

Khire *et al.* (2000) estudaram o efeito das condições meteorológicas em uma barreira capilar localizada em Wenatchee nos Estados Unidos. A Figura 13 mostra a variação no armazenamento de água no solo ao longo das estações do ano:

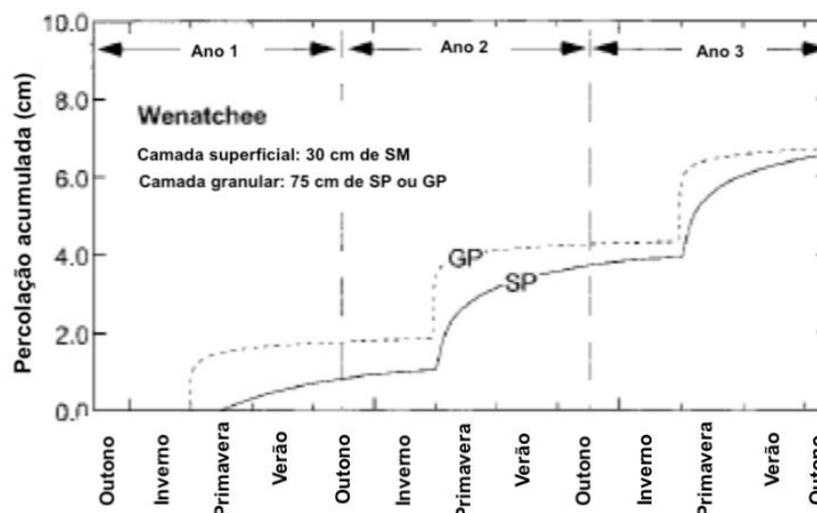
Figura 13 - (a) Umidade volumétrica (b) evapotranspiração potencial - precipitação para uma barreira capilar em Wenatchee



Fonte: (Adaptado de Khire *et al.*, 2000)

A longo prazo as percolações tendem a manter um padrão como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Percolação Cumulativa em uma barreira capilar em Wenatchee



Fonte: (Adaptado de KHIRE *et al.*, 2000)

As condições climáticas locais e a série climatológica devem ser avaliadas para analisar se a camada vai ter o desempenho esperado. Uma maior capacidade retenção de água é necessária quando as estações chuvosas são mais frequentes e menos intensas e não coincidem com o período de maior evapotranspiração.

Albright *et al.* (2004) realizou um estudo em camadas de cobertura para diferentes condições climáticas, tais como: clima quente e úmido, frio e úmido e quente e árido. O estudo foi realizado durante um período de 2 a 4 anos em lisímetros de 10 m por 20 m em onze locais nos Estados Unidos. Os lisímetros foram instrumentados para medir o escoamento superficial, armazenamento de água, drenagem lateral (apenas na camada convencional) e percolação. A evapotranspiração foi estimada a partir da diferença da precipitação total e a soma dos outros componentes do balanço hídrico. Os sistemas de cobertura apresentavam configurações distintas com espessuras totais variando de 0,70 m a 2,90 m. Todas as coberturas foram construídas com solo local e as espessuras das camadas dependeram das condições específicas de cada local.

O estudo mostrou que a presença de vegetação e a aspereza da superfície das camadas alternativas promovem uma maior resistência para o escoamento superficial, resultando em um menor escoamento superficial para camadas alternativas (5% da

precipitação) e para camada convencional (10% da precipitação). Esse escoamento superficial é levemente maior nos climas úmidos e nos climas áridos ele tende a diminuir com tempo. Os autores concluíram que as camadas convencionais não são efetivas em climas úmidos, fissuras e outros defeitos são responsáveis pelo aumento da percolação. Não se teve uma conclusão dessas camadas em climas áridos, pois o número de dados para se fazer inferências foi insuficiente. As camadas alternativas em climas úmidos também se apresentaram ineficientes para se obter baixas percolações. Por outro lado, as camadas alternativas em climas áridos, semiáridos e subúmidos se mostraram bastante efetivas com performance semelhante as camadas com geossintéticos.

Albright *et al.* (2004) apresentaram o resultado do balanço hídrico para uma camada convencional com taxa de infiltração de 195mm/ano, valor correspondente a 17% da precipitação. As taxas de infiltração aumentaram significativamente para cerca de 326 mm/ano após um período de seca, onde ocorreu ressecamento do solo e formação de trincas que não reverteram à condição inicial após o período úmido.

Yang *et al.* (2006) estudaram o efeito da intensidade e duração da precipitação para mostrar evidências experimentais da redistribuição da água no solo e da histerese em barreiras capilares. Os autores observaram que a intensidade de precipitação tem maior impacto nas camadas de solo fino do que na camada de solo granular, devido a grande diferença de permeabilidade saturada das duas camadas. A camada de solo granular, abaixo do solo fino, restringe o aumento da poropressão na camada de solo fino. As chuvas de curta duração resultam em um atraso na resposta da poropressão, enquanto que nas chuvas de longa duração ocorre uma melhor redistribuição da água no solo durante infiltração.

2.7 VEGETAÇÃO

O estabelecimento da vegetação na camada de cobertura é fundamental para proteção do solo, produzindo efeitos como redução da erosão do solo, diminuição da amplitude térmica e manutenção da umidade do solo. A vegetação também promove alteração no teor de matéria orgânica nas camadas superficiais, devido a decomposição das raízes mortas e folhagens (SALTON & TOMAZI, 2014).

As raízes alteram a estrutura do solo. Com o crescimento da vegetação, as raízes tendem a preencher os macroporos na camada superficial de solo compactado o que faz reduzir a permeabilidade ao ar em cerca de uma ordem de grandeza. Por outro lado, a presença de torrões aumenta a permeabilidade ao gás dos solos compactados em até duas ordens de grandeza, devido ao aumento do tamanho dos poros e diminuição da tortuosidade (ZHAN *et al.*, 2016).

Nas plantas as raízes são responsáveis pela absorção de água e minerais. As raízes podem ser de dois tipos: sistema pivotante (leguminosas) e sistema fasciculado (gramíneas). As raízes fasciculadas são formadas por várias raízes semelhantes que se desenvolvem em profundidade de 20-30 cm, porém podem chegar até 2 m de profundidade.

Na concepção das camadas de cobertura, é importante selecionar espécies que tenham o sistema fasciculado e de rápido estabelecimento, e certificar-se que essas espécies são plenamente adaptadas às condições edafoclimáticas locais. É de grande importância também que o estabelecimento da vegetação ocorra mais breve possível após construção para evitar o efeito de degradação hidráulica do solo, assim como deve-se dar uma atenção especial a sobrevivência das plantas a longo prazo.

Nas camadas de cobertura convencionais, a construção de uma camada superficial com vegetação tem o objetivo de prevenir a erosão e contração do solo (MACIEL, 2003), além de minimizar o impacto visual, restabelecendo a interação da área com meio ambiente. No caso das camadas oxidativas, devido a presença de composto orgânico, a vegetação da área se desenvolva melhor, diminuindo a fissuração.

O tipo de planta pode ser escolhido de acordo com clima, uso futuro do solo, limitações de projeto, etc. Pode-se optar pela utilização da vegetação nativa ou uma combinação diferente plantas. A mistura de tipos de vegetação diferentes pode maximizar o número de dias e quantidade total de transpiração das plantas.

Alguns aspectos são importantes na seleção do tipo de planta de acordo com ITRC (2003):

- As plantas devem ser capazes de fixar raízes ao longo de toda a profundidade da camada;
- As plantas devem ser capazes de transpirarem na estação seca;

- Espécies nativas são mais adequadas por se adaptarem melhor as condições locais;
- Fatores agronômicos devem ser considerados para se conseguir as taxas ótimas de transpiração das plantas.

2.8 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Para decidir quanto densa a camada de cobertura deve ser, é necessário considerar quanto densa e permeável é a camada da base do aterro. Se a camada da base for mais densa que a camada de cobertura, o nível da água vai subir gradualmente gerando instabilidade no aterro.

O comportamento do solo compactado é influenciado principalmente pela sua estrutura. Solos compactados no ramo seco apresentam maiores contrações em sua estrutura em decorrência de umedecimento quando comparados aos solos compactados no ramo úmido. Os solos compactados no ramo seco e no ramo úmido também diferem em relação ao estado de tensão e variáveis tensionais antes do umedecimento (VALENÇA, 2002). Os solos com estrutura dispersa (compactados no ramo úmido) apresentam menor permeabilidade e menores médias dos diâmetros dos poros do que os solos compactados no ramo seco (MACIEL, 2003).

A compactação altera a estrutura dos solos de forma a aumentar a resistência à penetração das raízes, reduzir a aeração, alterar o fluxo de água e calor e diminuir a disponibilidade de água total do solo. A compactação também faz reduzir a condutividade hidráulica do solo, com isso taxa de infiltração é reduzida, causando efeitos como redução da aeração do solo e aumento do escoamento superficial (CAMARGO & ALLEONI, 2006).

O tamanho dos poros do solo determina a sucção que será necessária para esvaziá-lo. Quanto maior o tamanho dos poros, menor será a sucção necessária para retirar a água, portanto solos com distribuição dos poros distintas pode apresentar quantidades variáveis de água retida para uma mesma sucção (CAMARGO & ALLEONI, 2006).

De acordo com Melchior *et al.* (2010), as camadas compactadas apresentaram bom desempenho no período inicial em relação a infiltração de água, e essa eficiência diminuiu ao longo do tempo.

Jang *et al.* (2002) utilizou um modelo computacional para avaliar a influência do grau de compactação da camada e dos resíduos e da espessura da camada na geração de lixiviado, e observou que a compactação das camadas intermediárias e do resíduo tem mais influência na geração de lixiviado do que a espessura da camada.

Em condições de saturação, a capacidade de armazenamento de água de um solo diminui com a compactação. A água é retirada do solo com mais facilidade no solo compactado do que nos solos naturais, isso é evidenciado na curva que retenção de água que se apresenta mais íngreme para o solo natural. Nos solos compactados, o solo apresenta variações de umidade menos bruscas para pequenas variações na sucção. Assim, para sucções baixas, o solo compactado retém menos água, e para tensões de sucção altas, o solo compactado retém mais água (CAMARGO & ALLEONI, 2006). A Figura 15 mostra a curva de retenção de água para um solo compactado e um solo natural.

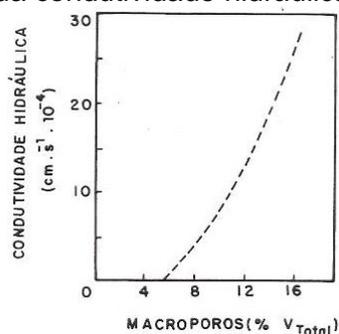
Figura 15 - Efeito da compactação na curva de retenção de água de um solo franco-arenoso



Fonte: (Croney & Coleman, 1964 *apud* Camargo & Alleoni, 2006)

A Figura 16 mostra a variação da condutividade hidráulica com a macroporosidade.

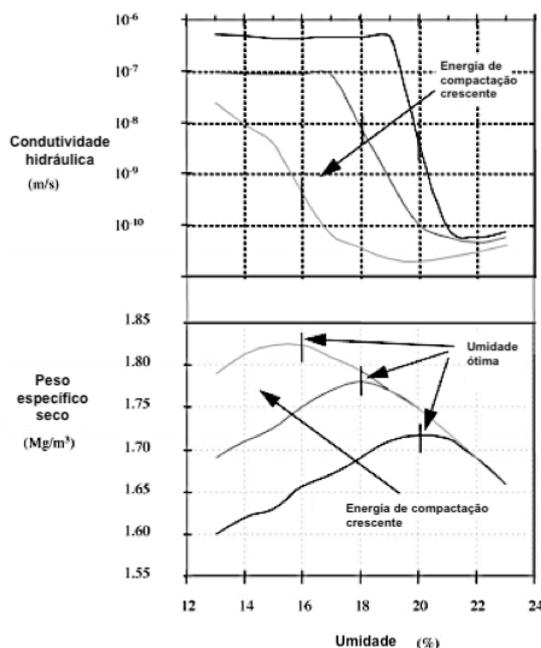
Figura 16 - Variação da condutividade hidráulica com a macroporidade



Fonte: (Camargo & Alleoni, 2006)

A Figura 17 mostra a influência da energia de compactação na condutividade hidráulica e no peso específico seco do solo.

Figura 17 - Efeito da umidade e energia de compactação na condutividade hidráulica de uma argila siltosa



Fonte: (Adaptado de Mitchell *et al.*, 1965)

Com aumento da energia de compactação, o solo tende a aumentar o seu peso específico seco e diminuir a umidade ótima, e conseqüentemente a condutividade hidráulica é reduzida.

As camadas de cobertura de uma forma geral apresentam limitações no processo de compactação por estarem apoiadas diretamente em uma camada compressível (lixo). De acordo com Camargo & Alleoni (2006), a profundidade máxima de compactação possibilitada por máquinas é de 0,50 m, independentemente do tipo de solo e do peso do maquinário utilizado.

Além disso, os solos reagem diferente para uma mesma tensão aplicada. Portanto, é importante saber quando o solo está compactado em uma densidade menor do que a especificada, pois este pode sofrer recalque diferencial. As medições das densidades aceitáveis em campo devem ser um ponto inicial para controle de compactação.

2.9 CONCEITOS DE SOLOS NÃO SATURADOS

Este capítulo apresenta os principais conceitos de solos não saturados aplicados a camadas de cobertura de aterros sanitários.

2.9.1 Relação sucção-umidade

A relação entre a sucção e o teor de umidade ou curva característica de retenção de água permite avaliar o tipo solo para utilização em camadas de cobertura, funcionando como uma ferramenta prática para analisar o comportamento do solo em condições não saturadas. Essa relação também fornece parâmetros importantes para descrever o comportamento do solo não saturado, tais como: permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (FREDLUND *et al.*, 1997).

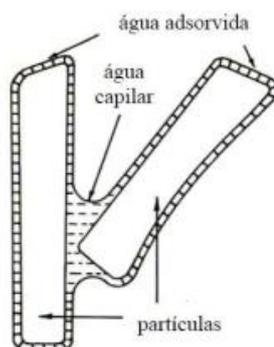
A capacidade de retenção de água no solo em potenciais mátricos específicos e a condutividade hidráulica são dois aspectos muito importantes nas camadas de cobertura, já que a partir delas o fluxo de água nas camadas de cobertura é mais facilmente mensurável (ANGELOTTI NETTO, 2007).

A sucção total do solo é composta basicamente por duas componentes: a sucção mátrica e a sucção osmótica. Fredlund *et al.* (1979) sugere que o comportamento dos solos não saturados depende basicamente da sucção matricial.

Existe uma variedade de equipamentos disponíveis comercialmente para medir a sucção dos solos. O psicrômetro, por exemplo, é capaz de medir a sucção total em amostras de solo com rapidez razoável. A técnica do papel filtro vem se tornando a mais utilizada para medir a sucção matricial por ser uma técnica simples e de baixo custo, e o seu procedimento tem sido padronizado.

Quando o solo está submetido a baixas sucções, a água retida no solo depende da sua capacidade de campo. Por outro lado, a retenção de água no solo quando submetido a altos valores de sucção depende de duas forças: as forças capilares e as forças de adsorção, como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Combinação das forças capilares e de adsorção

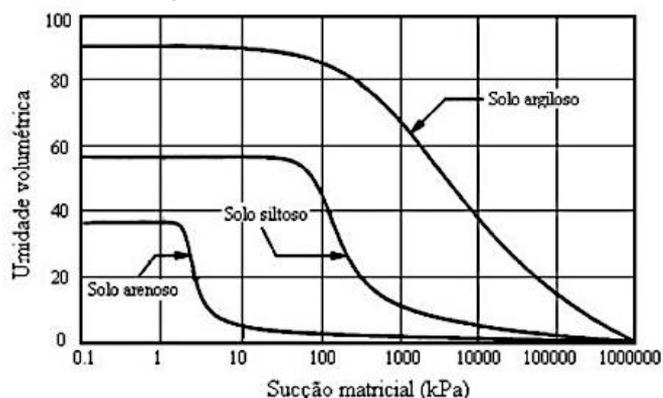


Fonte: (Hillel, 1971, citado por Gonçalves, 2012)

Essas forças correspondem ao potencial mátrico do solo (CASTRO, 1987) *apud* (SANTOS *et al.*, 2015). O potencial osmótico está relacionado a presença de íons na água intersticial (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

De acordo Fredlund (1998), quanto maior a plasticidade do solo, maior o valor da entrada de ar e da sucção residual. A textura do solo pode influenciar na retenção de água, como pode ser observado nas curvas expressas na Figura 19.

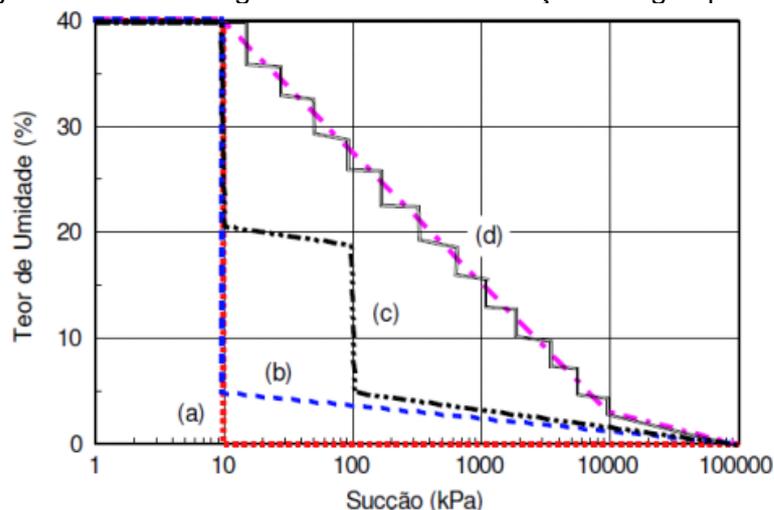
Figura 19 - Influência do tipo de solo na forma da curva de retenção de água



Fonte: (Vanapalli, 1994, citado por Gonçalves, 2012)

Marinho (2005) propôs um modelo para forma geral das curvas características de retenção de água pelo solo, onde a forma da curva característica está relacionada ao tamanho dos poros, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Formato geral da curva de retenção de água pelo solo



Fonte: (Marinho, 2005)

Para os materiais rígidos, com distribuição uniforme dos poros, a curva apresenta o aspecto da curva (a). Um material com um único tamanho de poro apresenta uma curva com formato da curva (b), onde após a entrada de ar certa quantidade de água permanece no solo, sendo necessária uma energia maior para retirá-la. A curva (c) representa um material com dois tamanhos de poros, já os materiais bem graduados apresentam uma redução gradual da umidade representado pela curva (d).

O tipo de solo influencia no valor da entrada de ar e na inclinação da curva de retenção. Os solos granulares geralmente apresentam baixos valores de entrada de ar e uma menor capacidade de retenção de água e uma areia mal graduada retém menos água que uma areia bem graduada.

De acordo com Yuan & Ding (2011), não há muitas pesquisas sobre a curva de retenção com mistura de solos grossos e solos finos, sendo a curva da mistura condicionada aos valores de sucção do solo fino, já que esse preenche os espaços vazios dos poros.

A forma da curva de retenção depende da granulometria do solo, da forma, arranjo e composição mineralógica das partículas do solo e das condições iniciais do solo, tais como umidade e índice de vazios e energia de compactação (Vanapalli *et al.*, 1999; Kawai *et al.*, 2000; Zhou e Yu, 2005; Marinho e Stuermer, 2000; Miller *et al.*, 2002 *apud* Gonçalves, 2012).

Yang *et al.* (2006) mostraram que a curva característica dos solos granulares se assemelha a curva granulométrica. Baseado nas similaridades da curva granulométrica com a curva característica de retenção de água, foram propostos métodos de previsão da curva característica do solo a partir da curva granulométrica.

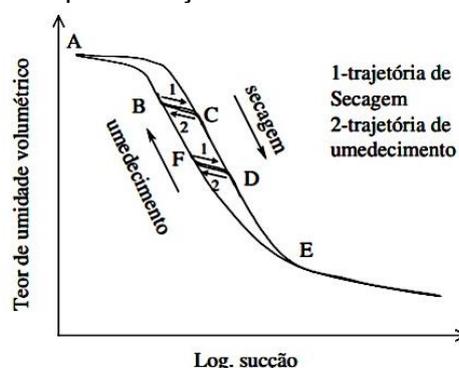
2.9.1.1 O efeito da histerese e a trajetória de tensões

A modelagem da curva sucção-umidade é de difícil obtenção, tanto em relação ao tempo, como em relação à variabilidade dos valores devido ao efeito de histerese (GONÇALVES, 2012). As curvas de umedecimento e secagem nem sempre são idênticas, isso se deve à histerese dos solos. A histerese está relacionada a estrutura e variação do sentido do fluxo, normalmente ascendente e descendente. A relação sucção-umidade pode ser obtida por dois caminhos:

- a) Dessorção: curva de secagem;
- b) Sorção: curva de umedecimento.

A Figura 21 ilustra esse fenômeno, onde um solo compactado na umidade B, ao ser submetido a secagem, segue a trajetória BC (trajeto 1). Caso a secagem se intensifique, seguirá a trajetória BCD, e nesse mesmo ponto se o solo sofrer umedecimento, seguirá a trajetória DF (trajetória 2), voltando a B se o umedecimento se intensificar (D'ANGELO, 2016). Os solos mais uniformes tendem a ter uma curva mais íngreme e apresentar menos histerese (GONÇALVES, 2012).

Figura 21 - Representação do efeito de histerese nos solos



Fonte: (Viera, 2005, citado por D'Ângelo, 2016)

As variações no estado de tensão ocasionadas pelas variações na sucção provocam deformações devido às redistribuições das fases líquidas, sólida e de ar no solo. Durante a infiltração de água no solo, ocorre predominantemente o fenômeno de umedecimento, a água tem maior dificuldade para penetrar no solo e seu umedecimento (variação de umidade) ocorre de forma mais lenta. Na secagem do solo (evaporação), o aumento da sucção aumenta a tensão de pré-adensamento do solo, ocasionando uma redistribuição das fases água, ar e solo.

2.9.1.2 Capacidade de campo dos solos

Nas camadas de cobertura, a determinação da capacidade de campo é muito importante para verificar o ponto a partir do qual começa a ocorrer percolação de água para camada inferior.

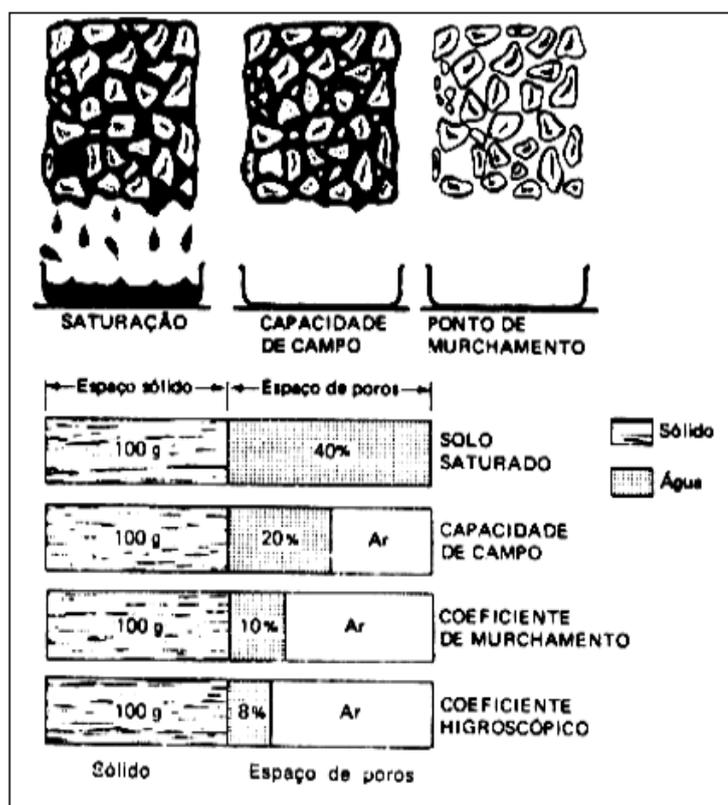
Para Meyer & Gee (1999), a capacidade de campo (CC) do solo é definida como a quantidade de água retida no solo, após todo o excesso de água ser drenado.

Segundo Reichardt (1988), a capacidade de campo não é uma característica da matriz de solo e sim um processo dinâmico. O autor observou que a capacidade de campo também está relacionada à condutividade hidráulica.

De acordo com Lins (2003), a retenção de água é atribuída principalmente ao conjunto de forças da tensão superficial e da pressão capilar, a percolação ocorre quando a força gravitacional supera esse conjunto de forças.

A retenção de água pelo solo para diferentes valores de sucção está ilustrada na Figura 22:

Figura 22 - Situação do solo para diferentes teores de umidade



Fonte: (Adaptado de Brady, 1989, citado por Lins, 2003)

Um das formas de reduzir a quantidade de água infiltrada no aterro é através da potencialização da capacidade de campo da camada de cobertura. Solos com capacidade de armazenamento de água limitada, como por exemplo as areias, atingem a saturação muito mais rápido do que os solos com alto teor de finos, como as argilas.

A capacidade de retenção de água depende primariamente da estrutura do solo e do conteúdo de matéria orgânica, assim, quanto maior a porcentagem de silte e argila, maior a capacidade de retenção de água pelos solos. As partículas menores têm uma superfície específica maior aumentando sua capacidade de reter e armazenar a água.

Para Ottoni Filho *et al.* (2014), a capacidade de campo corresponde à distribuição vertical do conteúdo volumétrico de água na parte superior do perfil de solo (água de qualquer fonte com a profundidade de até 10 cm) que no decorrer da infiltração se torna completamente úmido, e no final da infiltração permanece exposto aos processos subsequentes de drenagem sem que ocorra evapotranspiração ou precipitação por um período de 48h.

De acordo com Caetano (2020), a definição de Ottoni Filho *et al.* (2014) é a mais adequada, pois não perde o sentido original da definição da capacidade de campo, ao mesmo tempo que elimina as divergências em relação ao ponto de equilíbrio, fixando o tempo de drenagem.

Ottoni Filho *et al.* (2014) realizou ensaios em 22 tipos de solos brasileiros para determinar a capacidade de campo, e observou que os valores obtidos eram influenciados principalmente pelas propriedades básicas do solo e por outros fatores como umidade antecedente, morfologia do solo e nível d'água. Durante o processo de infiltração, mais ou menos água pode ser drenada para camadas inferiores, dependendo da hidrodinâmica e da curva característica do solo.

Nos últimos 100 anos, muitos métodos foram desenvolvidos ao longo do mundo para determinar a capacidade de campo. Esses métodos determinam quanto de água pode ser retida para diferentes condições.

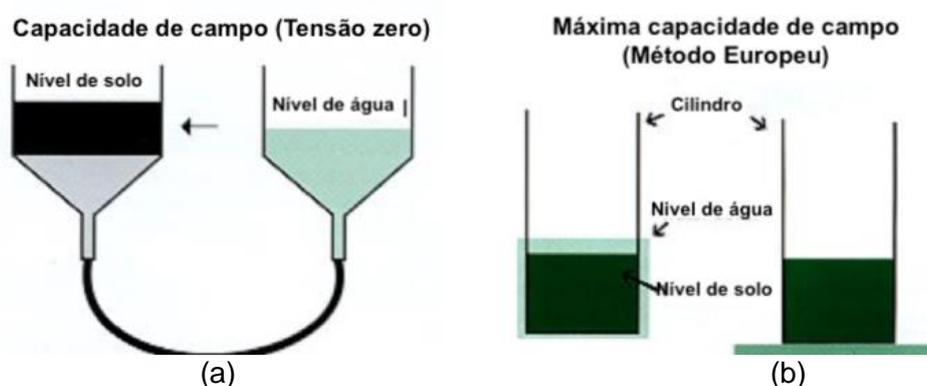
Em campo, a determinação da capacidade de campo (CC) segue a metodologia da EMBRAPA (1979), onde o solo é umedecido e depois coberto com um revestimento impermeável para evitar perdas por evaporação. Quando a drenagem de água cessa, é retirada uma amostra para determinar o teor de água do solo.

Em laboratório, o método vai depender do tipo de solo e pode ser realizado com ou sem aplicação de tensão no solo. Para solos de granulometria grossa, o método mais popular é o de caixas de areia, onde as amostras são colocadas em caixas e sujeitas a uma pressão entre os -60 e -100 cm (-0.6 e -10 kPa) até atingir o equilíbrio;

já para os solos de granulometria média e fina, uma metodologia muito empregada é o método das placas de pressão, onde as amostras são saturadas, colocadas na placa de pressão e submetidas a uma pressão equivalente de -100 e -330 cm (-10 e -33 kPa), até atingir o equilíbrio entre o teor de água na amostra e a pressão exercida (RAMOS *et al.*, 2016).

Em alguns ensaios de laboratório, a capacidade de campo é determinada sem aplicação de pressão no solo. No método da tensão zero, ilustrado na Figura 23 (a), a amostra de solo é saturada através de um recipiente adjacente até a metade de sua altura, quando o sistema entrar em equilíbrio, as amostras úmidas e secas são pesadas, e então é determinada a sua capacidade de campo. O método europeu da capacidade de campo máxima também não aplica pressões externas no solo. Nesse método, a amostra de solo é saturada em um cilindro que é colocado em uma superfície absorvente até que o excesso de água saia por gravidade. Quando equilíbrio é atingido a capacidade de campo é calculada baseada na quantidade de água retida, como ilustrado na Figura 23 (b):

Figura 23 - Método de determinação da capacidade de campo dos solos (a) sem aplicação de pressão (b) Método Europeu



Fonte: (Adaptado de Agvise, 2020)

Outros métodos de laboratório também foram desenvolvidos aplicando tensões ao solo. A amostra de solo é colocada em uma placa porosa, depois é colocada numa câmara fechada, então é aplica-se uma pressão conhecida no solo. A umidade de capacidade de campo é determinada pela relação entre a quantidade de água retida na amostra úmida e da amostra seca de solo. A água retida pelo solo diminui com aumento da pressão aplicada.

A determinação da capacidade de campo também pode ser feita através da curva de retenção de água do solo. No entanto, não existe um consenso na literatura em relação ao valor da sucção matricial correspondente a capacidade de campo (RIOS, 2016). Alguns autores sugerem que o valor de 33 kPa se correlacione com a capacidade de campo para solos argilosos e de regiões temperadas, no entanto, para solos de regiões tropicais e arenosos há uma melhor correlação com sucções variando de 6 a 10 kPa (BRITO *et al.*, 2011; REICHARDT, 1988; FERREIRA & MARCOS, 1983, ANDRADE *et al.*, 1991, MELLO *et al.*, 2002 *apud* ANDRADE E STONE, 2011).

Andrade e Stone (2011) analisaram 2042 amostras de solos separadas por classe textural e encontraram os valores da capacidade de campo em razão da relação entre a taxa de drenagem e condutividade hidráulica (p), como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores da capacidade de campo (θ_{cc}) e tensão matricial (h_{cc}) para valores de $p=0,01$ e $p=0,015$

Classe textural	$p = 0,0100$		$p = 0,0150$	
	θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)	h_{cc} (kPa)	θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)	h_{cc} (kPa)
Muito argilosa	0,409	7,5	0,417	6,5
Argilosa	0,401	7,4	0,409	6,4
Média	0,354	6,8	0,362	6,0
Arenosa	0,239	6,5	0,249	5,7

Fonte: (Andrade e Stone, 2011)

Os autores verificaram que para p equivalente a 1% do valor de K , a tensão de água no solo correspondente à umidade de capacidade de campo se situou entre 6,5 e 7,5 kPa, mostrando que essa é uma alternativa viável para determinação de θ_{cc} a partir da curva característica do solo.

Ferreira & Marcos (1983) *apud* Andrade e Stone (2011) utilizaram o ponto de inflexão da curva característica de retenção de água no solo correspondente a capacidade de campo e obtiveram resultados satisfatórios quando essa umidade se correlacionava com a umidade de 6 kPa.

Andrade & Stone (2011) propôs uma simplificação da equação de Van Genuchten (1980) para a determinação da capacidade de campo como mostrada na Equação 1:

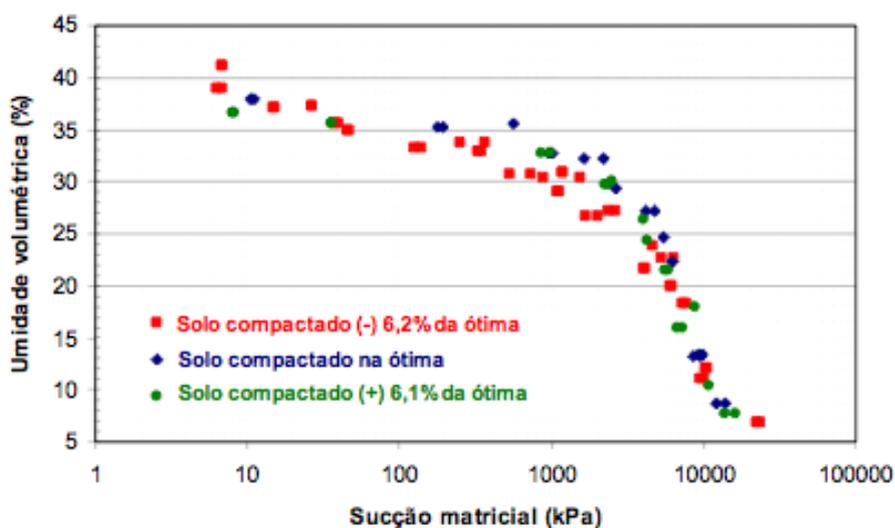
$$h_{cc} = \frac{\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_{cc} - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}}}{a}^{\sqrt{nv}} \quad (1)$$

Onde θ_s é a umidade de saturação, θ_r é a umidade residual, θ_{cc} é a umidade de capacidade de campo, m , nv e a são parâmetros de ajuste.

O conteúdo de matéria orgânica influencia na capacidade de armazenamento de água devido a afinidade entre a água e a matéria orgânica.

Maciel (2003) mediu a sucção de três amostras de solo da célula nº 8 do Aterro da Muribeca para diferentes graus de saturação próximos à umidade ótima (na umidade ótima, umidade ótima + 6,1% e umidade ótima - 6,1%), utilizando o método do papel filtro, que foi padronizado pela ASTM D5298-92 e descrito por Marinho (1995). Os resultados dos ensaios estão expressos na Figura 24.

Figura 24 - Variação do grau de saturação do solo em função da sucção matricial



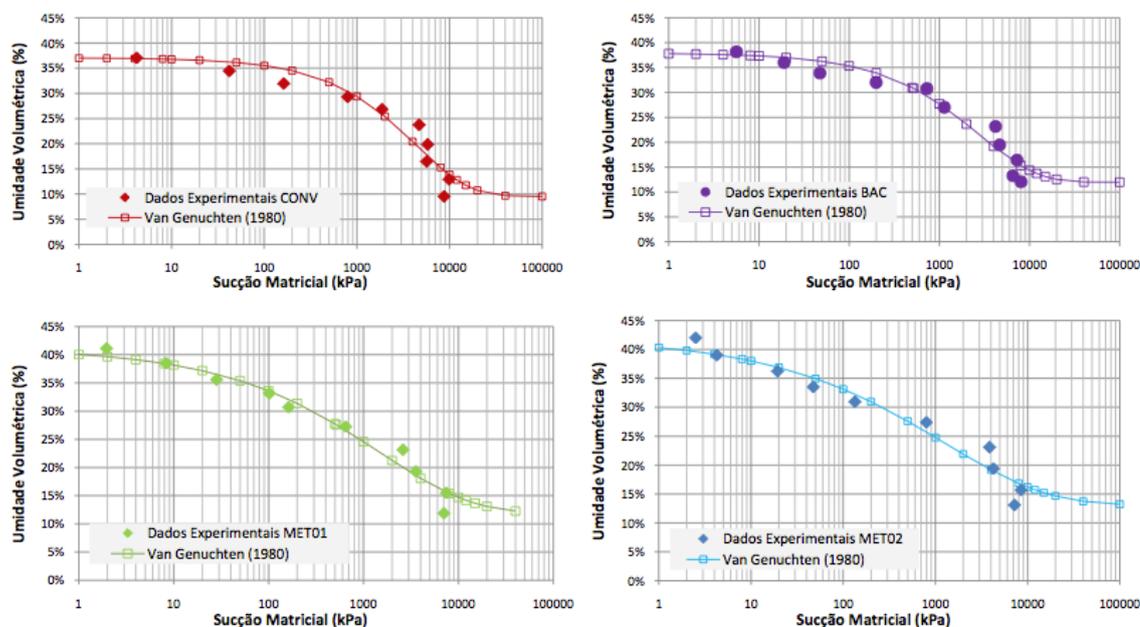
Fonte: (Maciel, 2003)

É importante salientar que o método do papel filtro simula a perda de água do solo quando submetido a determinados níveis de sucção. O estudo mostrou que os solos compactados na umidade ótima e acima da umidade ótima apresentam melhores propriedades de retenção de água.

Em outro estudo realizado por Lopes (2011), a curva de retenção também foi obtida utilizando a técnica do papel filtro em amostras coletadas em campo. A Figura 25 mostra as curvas de retenção teóricas ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980) para as quatro camadas monitoradas da célula experimental do Aterro da

Muribeca: convencional (CONV), oxidativa na proporção 1:1 (MET01), oxidativa na proporção 3:1 (MET02) e barreira capilar (BAC).

Figura 25 - Curvas características de retenção de água ajustadas pelos parâmetros de Van Genuchten (1980) das quatro camadas da Célula Experimental do Aterro da Muribeca



Fonte: (Lopes, 2011)

A autora também determinou as capacidades de campo das camadas a partir da metodologia utilizada por Lins (2003), e para a sucção de 10 kPa, conforme citado por Maia *et al.* (2005). Os resultados estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Umidade de Capacidade de campo dos solos das camadas de cobertura da Célula Experimental do Aterro da Muribeca

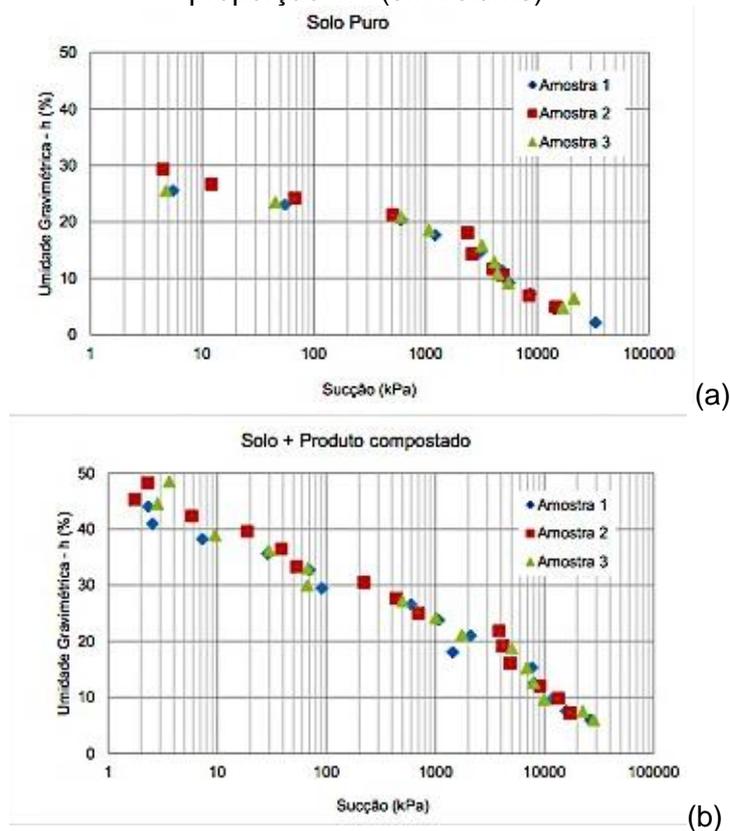
Material	Maia <i>et al.</i> (2005)	Lins (2003)
CONV	21%	22,2%
BAC	25%	20,4%
MET01	28%	28,7%
MET02	24%	24,0%

Fonte: Lins (2002) *apud* Maia et al. (2005)

Costa (2015) realizou estudos experimentais de laboratório em um solo puro e um solo misturado com composto orgânico. As curvas características dos solos podem ser observadas na Figura 26. Observa-se pelas curvas características de retenção de água (umidade gravimétrica) que o solo adicionado de matéria orgânica apresenta uma maior umidade gravimétrica de capacidade de campo. Essa diferença é mais pronunciada para sucções mais baixas. Nesse estudo foram encontrados

valores de capacidade de campo de 24% para o solo puro e de 35% e para o solo + material compostado (1:1) através de ensaios laboratoriais, utilizando a técnica do papel filtro.

Figura 26 - Curva de retenção do (a) solo puro e do (b) solo + material compostado na proporção 1:1 (em volume)

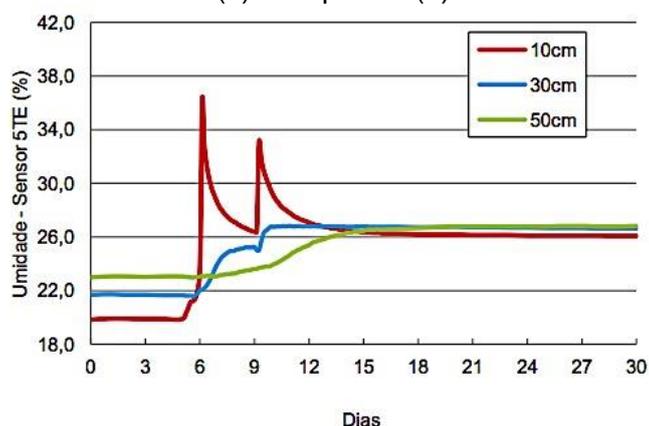


Fonte: (Costa, 2015)

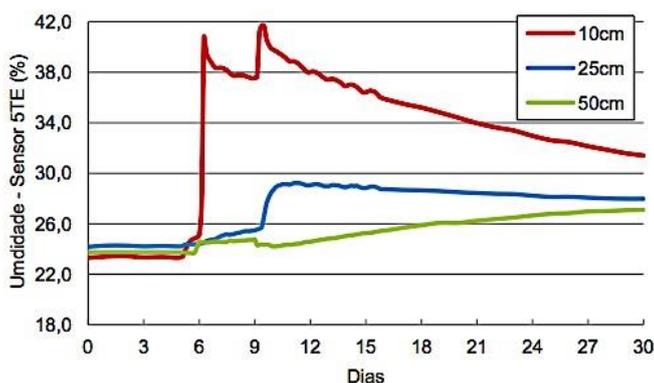
A autora também simulou uma precipitação de 30 mm, distribuída em três tempos de 10mm, em colunas de solo puro e uma mistura de solo e composto orgânico. Os resultados da simulação de chuva nas colunas de solo estão expressos na Figura 27. Na coluna composta por solo puro, a umidade na superfície aumentou, ultrapassou a capacidade de campo, e depois sofreu uma redução estabilizando na umidade próxima à capacidade de campo. A umidade nas três profundidades da coluna se estabilizou em cerca de 15 dias. Na coluna de solo + composto, a umidade na camada superficial também aumentou ultrapassando a capacidade de campo, e estabilizou em uma umidade ligeiramente maior que a coluna composta apenas por solo. A mistura de solo e composto demorou mais para estabilizar apresentou uma faixa de variação de umidade foi bem maior que o do solo puro.

É importante salientar que no ensaio não foi considerado a parcela do escoamento superficial. Além disso, ao longo dos dias, uma parte da água pode ter sido removida do solo através do processo de evaporação.

Figura 27 - Variação da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10 cm, 25 cm e 50 cm para a coluna de (a) solo puro e (b) solo + material compostado



(a)

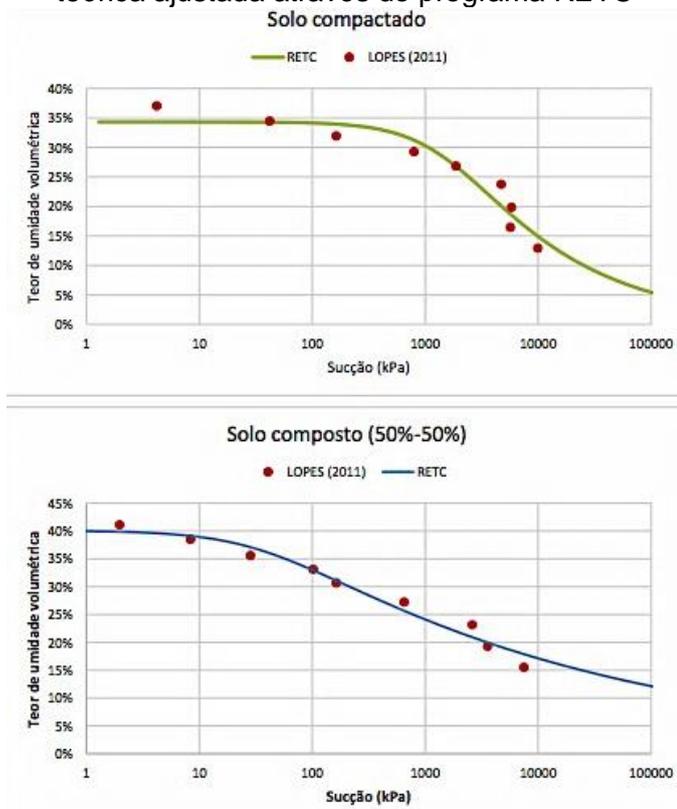


(b)

Fonte: (Costa, 2015)

D'Ângelo (2016), realizou uma simulação numérica utilizando os dados do estudo na célula experimental do Aterro da Muribeca realizado por Lopes (2011). As curvas dos pontos experimentais e do modelo ajustada com parâmetros obtidos do programa estão expressas na Figura 28. O autor encontrou a umidade de capacidade de campo (θ_{cc}) de 40% e o ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) de 0% para solo mais material compostado (proporção em volume de 1:1), e os valores de θ_{cc} de 34,3% e θ_{pmp} de 0% para solo puro utilizando os parâmetros de ajuste de Van Genuchten no programa RETC.

Figura 28 - Comparação entre pontos medidos experimentalmente por Lopes (2011) e curva teórica ajustada através do programa RETC



Fonte: (D'Ângelo, 2016)

2.9.1.3 Ponto de murcha permanente

O teor de água correspondente ao ponto de murcha permanente pode ser determinado em laboratório ou através da curva característica. Em laboratório, as amostras são colocadas dentro de painéis de pressão e sujeitas a uma pressão equivalente de -15000 cm (-1500 kPa), até atingir o equilíbrio entre o teor de água na amostra e a pressão exercida (RAMOS *et al.*, 2016). Já através da curva característica, a umidade é obtida considerando o ponto de inflexão da curva ou para sucção matricial (ψ) correspondente ao ponto de murcha permanente (PMP).

O ponto de murcha permanente é um atributo do solo e refere-se a determinada quantidade de água nele armazenada ou retida. No entanto, é importante ressaltar que esse ponto depende do tipo de planta, cada planta tem determinada quantidade de água que consegue absorver.

2.9.2 Percolação de água em solos não saturados

Os fatores que exercem influenciam sobre o fluxo de água nos solos não saturados estão relacionados a condutividade hidráulica e ao gradiente de pressão (BRAD, 1989 *apud* ANGELOTTI NETTO, 2007).

O fenômeno de fluxo de água nos solos é baseado nos conceitos de conservação de energia (Princípio de Bernoulli), permeabilidade dos solos (Lei de Darcy) e conservação de massa. Para que haja fluxo, é necessário que a energia total em dois pontos seja diferente. A existência de um gradiente hidráulico fará com que ocorra percolação, o fluido sairá do ponto de maior energia para o ponto de menor energia. Os principais requisitos para que ocorra o fluxo de fluidos são a presença de um impulsionador de fluxo “*driving force*”, ou seja, a existência de um gradiente que pode ser de pressão, concentração, osmótico etc., e a continuidade dos poros vazios no solo.

O fluxo de água em solos não saturados é dito transiente pois o volume de percolado varia ao longo do tempo. O fluxo em uma coluna de solo não saturado é complexo, e seu entendimento é importante para compreender os princípios que governam as camadas de cobertura de aterros sanitários.

Henri Darcy em 1856 desenvolveu uma equação para fluxo em solos saturados. As equações modernas para solos saturados e não saturados são baseadas em seu trabalho (ITRC, 2003). Darcy (1856) estudou o fluxo de água através dos meios porosos e encontrou que a taxa de fluxo em um meio poroso é proporcional ao gradiente de energia potencial daquele fluido em uma constante de permeabilidade denominada de coeficiente de permeabilidade hidráulica. A lei de Darcy é equivalente empiricamente a equação de Navier-Stokes (THUSYANTHAN & MADABHUSHI, 2003). A Lei de fluxo generalizada está expressa na Equação 2:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{e+1} \left(e \frac{\partial S}{\partial t} + S \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (2)$$

Onde, k_x é o coeficiente de permeabilidade na direção x, k_y é o coeficiente de permeabilidade na direção y, k_z é o coeficiente de permeabilidade na direção z, “e” é o índice de vazios, “S” é a saturação e “H” é a espessura do solo.

O fluxo estacionário ou permanente ocorre quando a saturação (S) e o índice de vazios (e) são constantes, ou seja, não varia com o tempo. Quando “e” é variável e “S” é constante, caracteriza-se o fluxo transiente em adensamento e expansão. Nesse fluxo a quantidade de água percolada varia com o tempo. Por outro lado, quando “e” é constante e “S” é variável, se “S” é crescente caracteriza o processo de umedecimento e se “S” é decrescente, caracteriza-se o processo de secagem. Caso “e” seja variável e “S” também, caracteriza-se então os problemas de compressão e expansão, além do umedecimento e secagem.

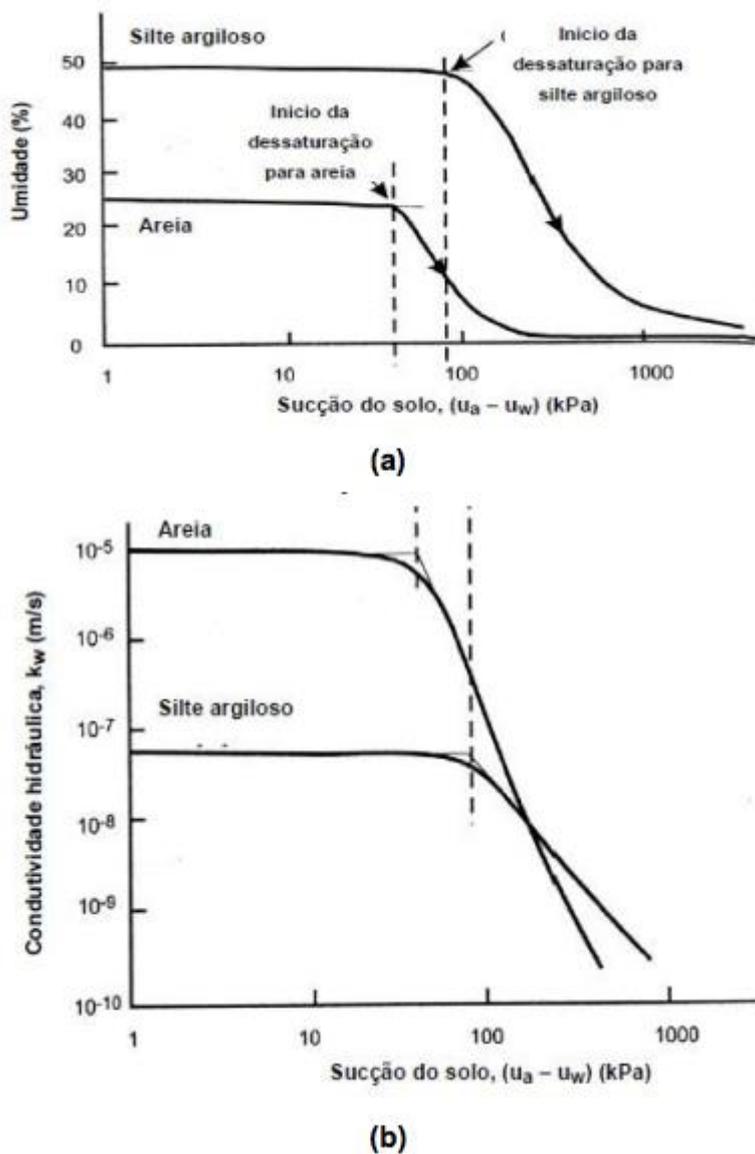
2.9.3 Permeabilidade não saturada à água

As camadas de cobertura geralmente são compactadas para alcançar um baixo coeficiente de permeabilidade saturada ($< 10^{-5}$ ou $< 10^{-7}$). Um baixo coeficiente de permeabilidade pode ser obtido otimizando a umidade de compactação e energia de compactação do solo.

Nos solos não saturados, a permeabilidade à água tem seu valor máximo quando o solo está saturado e vai diminuindo acordo com o potencial matricial do solo. Nas camadas de cobertura, a água disponível no solo é controlada pelo balanço definido entre precipitação e taxa de remoção de água do solo pela evapotranspiração.

Para entender o comportamento não saturado do solo, é necessário definir a função de permeabilidade, que relaciona a permeabilidade com a umidade do solo. A função de permeabilidade pode ser determinada de forma experimental ou através de métodos indiretos. Fredlund *et al.* (1994) notaram que a curva de retenção guarda uma relação com a curva de condutividade hidráulica. A Figura 29 mostra a semelhança entre a curva característica e de condutividade hidráulica do solo:

Figura 29 - Relação entre curva de retenção e condutividade hidráulica



Fonte: (Fredlund, 2000)

Alguns métodos indiretos que utilizam relações empíricas e a permeabilidade saturada são comumente utilizados para prever a função de permeabilidade. Existem várias proposições para modelagem da curva de condutividade hidráulica em função da sucção do solo. A Tabela 4 mostra as equações propostas por alguns autores:

Tabela 4 - Proposições para modelagem da curva de condutividade hidráulica

Modelo	Equação	Definição de Variáveis
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + a \left(\frac{\psi}{\rho_w g} \right)^n}$	ψ = sucção; a e n = parâmetros de ajuste; ρ_w = densidade da água; g = aceleração gravitacional;
Brooks e Corey (1968)	$\begin{cases} k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^n \rightarrow \psi > \psi_b \\ k(\psi) = k_{sat} \rightarrow \psi \leq \psi_b \end{cases}$	ψ = sucção; ψ_b = sucção de entrada de ar; n = parâmetros de ajuste;
Arbhabhirama e Kridakom (1968)	$k = \frac{k_{sat}}{\left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{n'} + 1}$	ψ = sucção; ψ_b = sucção de entrada de ar; n' = parâmetros de ajuste;
Davidson et al. (1969)	$k = k_{sat} e^{[\beta(\theta - \theta_s)]}$	θ_s = teor de umidade saturado; β = parâmetro de ajuste;
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2\beta-5}$	θ_s = teor de umidade saturado; β = parâmetro de ajuste;
Mualem (1976)	$\frac{k}{k_{sat}} = \frac{[1 - (\alpha\psi)^{m+n} (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{2m}}$ $\rightarrow \psi > 0$	ψ = sucção; m , n e a = parâmetros de ajuste;
Mualem e Dagan (1978)	$\frac{k}{k_{sat}} = S \left(\frac{\int_{\psi}^{\theta} \frac{d\theta}{\psi^{1+b}}}{\int_{\psi}^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi^{1+b}}} \right)^2$	ψ = sucção; θ = teor de umidade volumétrico; b = fator de tortuosidade;
Van Genuchten (1980)	$k(\theta) = k_{sat} S^l \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^n \right]^2$ $S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	S = grau de saturação; $l = 0,5$; m = parâmetro de ajuste;
Leong e Rahardjo (1998)	$\frac{k}{k_{sat}} = \Theta^p \rightarrow \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	Θ = teor de umidade normalizado; p = parâmetro de ajuste;
Vanapalli e Lobbezoo (2002)	$\frac{k}{k_{sat}} \approx 10^{(\gamma \log S^2)}$ $\gamma = 14,0S(IP)^2 + 9,4(IP) + 0,75$	IP = índice de plasticidade

Fonte: (Gerscovich & Guedes, 2002, citado por Gonçalves, 2012)

O modelo mais utilizado para modelagem da curva de condutividade hidráulica não saturada é o modelo de Van Genuchten (1980). A Equação de Van Genuchten (1980) está expressa na Equação 3:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r)(1 + (ah)^{n_v})^{-m} + \theta_r \quad (3)$$

Esse modelo de utiliza alguns parâmetros para fazer o ajuste da curva, como definidos a seguir:

- O valor do coeficiente de permeabilidade para o solo saturado corresponde ao valor de sucção zero na curva característica;
- O parâmetro α (cm^{-1}) refere-se ao inverso do valor de h (carga de pressão ou sucção) a meio caminho de θ_s e θ_r , ou seja, o valor de saturação efetiva de 50%;
- O parâmetro n_v é adimensional e determina a inclinação da curva de retenção, quanto maior o seu valor mais íngreme é a curva;
- θ_r corresponde ao ponto onde a inclinação da curva de retenção é zero, esse valor pode ser medido experimentalmente pela umidade do solo muito seco;
- θ_s é o parâmetro correspondente a porosidade do solo.

A função de condutividade hidráulica não-saturada do solo, $K(S_e)$, pode ser estimada usando a equação de Van Genuchten (1980) combinada com as equações propostas por Burdine (1953) e Mualem (1976), como mostrado nas Equações 4 e 5:

$$k(\theta) = k_{\text{sat}} - S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = [1 + (\alpha h)^{n_v}]^{-m} \quad (5)$$

Onde, K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada, " λ " é um parâmetro empírico, " S " é o grau de saturação, e é o índice de vazios e " α ", " n_v " e " m " são parâmetros de ajuste da equação de Van Genutchen (1980).

2.9.4 Infiltração de água em solos não saturados

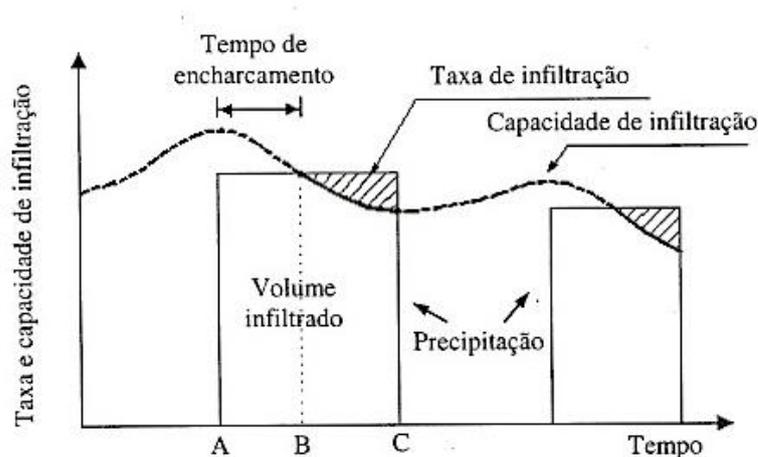
Nos solos não saturados, durante uma precipitação a água penetra no solo pela ação da gravidade, ou seja, por infiltração. A infiltração de água no solo é um dos fenômenos físicos mais importantes em camadas de cobertura. A partir desta é

possível estimar a capacidade de escoamento superficial que influencia diretamente na erosão do solo.

A capacidade de infiltração do solo pode ser influenciada por diversos fatores, como: umidade antecedente, condutividade hidráulica, porosidade, densidade e granulometria do solo, teor orgânico, inclinação e deformação da superfície, velocidade de descida d'água, duração e intensidade de precipitação, carreamento de materiais finos, vegetação e temperatura (HILLEL, 1980 *apud* MORAIS *et al.*, 2018; GEE, 1981 *apud* FERREIRA & MAHLER, 2006).

A capacidade de infiltração do solo varia ao longo do tempo como pode ser observado Figura 30. No tempo A, após iniciar a precipitação, a capacidade de infiltração é maior do que a intensidade da chuva, portanto toda a água é infiltrada. No tempo B, a precipitação é igual a taxa de infiltração, então parte da água passa a escoar superficialmente. Apenas ao final da precipitação que o solo começa a secar novamente uma vez que a capacidade de infiltração volta a subir.

Figura 30 - Taxa de infiltração e capacidade de infiltração



Fonte: (Brandão *et al*, 2006, citado por Lopes, 2011)

Durante a precipitação, os espaços vazios do solo são preenchidos por água à medida que o ar vai sendo expulso. Em uma precipitação intensa, não há tempo para dissipação do ar nos vazios, favorecendo a ocorrência de escoamento superficial.

A velocidade de infiltração de água no solo é maior para solos mais secos, e à medida que o solo vai umedecendo, a capacidade de infiltração diminui, até alcançar a velocidade de equilíbrio, em que a capacidade de absorção de água pelo solo é praticamente nula (LEPSCH, 1993 *apud* MOLINARI & VIEIRA, 2004). A taxa de

infiltração também pode variar com a intensidade de precipitação e área de contribuição para escoamento superficial. Se a intensidade de precipitação for menor que a capacidade de infiltração, toda chuva será infiltrada. A água escoar superficialmente quando a taxa de infiltração no solo é menor ou igual a taxa de precipitação. (SILVEIRA *et al.*, 1993 apud MOLINARI & VIEIRA, 2004).

Outro fenômeno inverso pode ocorrer, dependendo da intensidade da chuva. A água que cai rapidamente na superfície tende a infiltrar com certa velocidade que não favorece a troca gradual entre a água que tenta infiltrar e o ar que vai sendo substituído. Nesse caso, a água não consegue infiltrar devido a pressão exercida pelo ar (poropressão de ar), formando um fluxo superficial chamado Hortoniano (VIEIRA, 1998).

A medida da taxa de infiltração pode ser feita através do Infiltrômetro de duplo anel (Sealed Double-Ring Infiltrometer – SDRI). O SDRI fornece diretamente a medida da taxa de infiltração de solos finos ($k < 10^{-5}$). O coeficiente de permeabilidade pode ser calculado conhecendo a taxa de infiltração no estado permanente, carga hidráulica do anel externo e a profundidade da frente de molhagem.

2.10 PRODUÇÃO DE LÍQUIDO PERCOLADO

Abreu *et al.* (2019) ressalta que é importante prever a quantidade de lixiviado tanto na fase de operação quanto na fase de encerramento do aterro pois o tratamento destes líquidos percolados implica em custos para o proprietário.

Os líquidos lixiviados coletados no sistema de drenagem de um aterro são provenientes de três fontes principais: águas pluviais, umidade do lixo e a água liberada do processo de decomposição dos resíduos (PADILLA, 2007).

A produção de líquido percolado varia ao longo do ciclo de vida de um aterro sanitário. O período inicial, antes da construção da camada de cobertura, possui uma produção de lixiviado consideravelmente maior do que o restante das etapas (Figura 31). Nessa etapa o aterro recebe toda a água proveniente da precipitação. Após a instalação da camada de cobertura, a percolação de água fica condicionada a performance da camada.

Figura 31 - Geração de lixiviado ao longo do ciclo de vida de um aterro



Fonte: (Adaptado de Bonaparte, 1995, citado por Gross & Gross, 2016)

2.11 MANUTENÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SERVIÇO DA CAMADA

Uma variedade de estudos sugere que a baixa permeabilidade de camadas de cobertura em solos compactados pode ficar comprometida pelos ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e degelo, recalques diferenciais e intrusão de biotas (JESSBERGER & STONE, 1991; BENSON & OTHMAN, 1993; SUTER *et al.*, 1993; SMITH *ET AL.*, 1997; ZIMMIE & LAPLANTE, 1992; MELCHIOR, 1997; ALBRECHT & BENSON, 2000 *apud* ALBRIGHT *et al.*, 2006).

Os principais fatores que contribuem para perda de desempenho da camada de cobertura são os recalques diferenciais e a degradação hidráulica do solo. A camada deve ser dimensionada para acomodar os efeitos de recalques dos aterros, ser resistente à erosão e limitar a formação de fissuras ao longo do tempo.

A camada de cobertura também deve ser projetada para que seja requerido a mínima manutenção. A manutenção da camada de cobertura é uma medida programada que deve ser feita em períodos de tempo regulares e tem por objetivo minimizar os custos e a necessidade de reparos.

O Departamento de Proteção Ambiental do estado de Maine nos Estados Unidos (2001) baseou-se nos estudos das condições de serviço de quatro aterros sanitários localizados no estado de Maine para fazer algumas recomendações para coberturas compostas apenas por solo:

- Uma Camada de cobertura composta apenas por solo não deve ser utilizada onde há exigências ou especificações para coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 1×10^{-6} m/s;

- Devem ser feitas considerações caso seja utilizado um sistema de cobertura com umidade abaixo da umidade ótima para limitar a degradação que já ocorre como resultado da secagem do solo e o fluxo de gases que também aparenta contribuir para o ressecamento da camada;
- Uma camada protetora mais espessa deve ser utilizada quando utilizado apenas solo como material de cobertura;
- Deve ser dada uma atenção especial para determinar a camada de vegetativa ótima, mudas e misturas de fertilizantes que acelerem o estabelecimento da vegetação para que tenham uma boa cobertura e o mínimo de profundidade das raízes;
- Todos os aterros devem ser avaliados quanto a possibilidade recalques para prover o reforço necessário nas camadas de cobertura.

2.11.1 Degradação hidráulica do solo

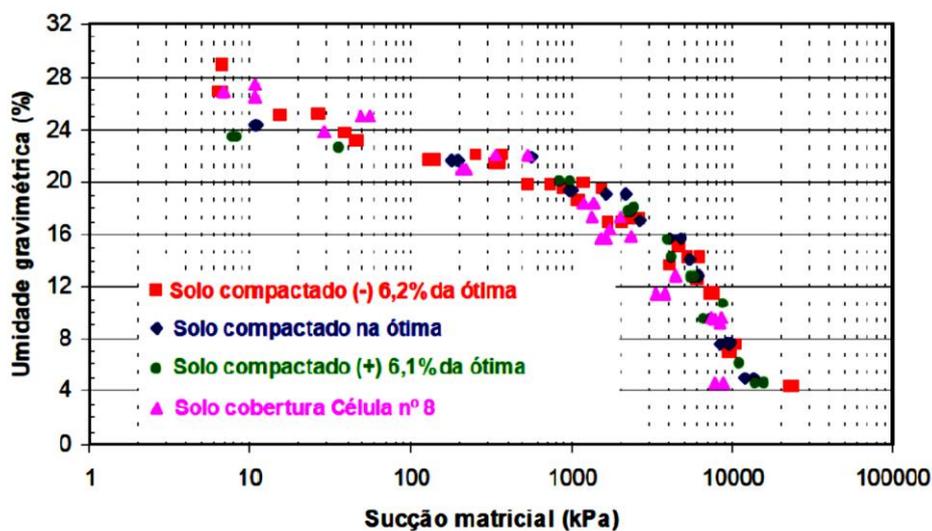
Dentre os principais fatores que contribuem para degradação hidráulica da camada de cobertura está a tendência de ressecamento do solo devido à perda de umidade quando submetidos a ciclos de secagem, índice de plasticidade, penetração de raízes e fluxo de gases.

A variação no índice de vazios é resultante da contração e expansão do solo. Quando solos plásticos secam, as forças de atração interna da argila provocam a formação de torrões, o solo perde a água dos poros ocasionando a contração da massa do solo e formação de fissuras (micro e macrofissuras). A secagem do solo causa uma contração volumétrica que cria caminhos preferenciais. Logo, esse efeito deve ser levado em consideração no dimensionamento e na estimativa dos custos de médio e longo prazo e da manutenção do sistema. Durante o seu umedecimento ocorre expansão, no entanto os caminhos preferenciais continuam existindo e não implicam na diminuição da condutividade hidráulica da camada de cobertura.

A camada de cobertura com menor índice de plasticidade (IP) tem um menor grau de dessecação do solo ao longo do tempo. Por outro lado, solos com menor IP apresentam menor umidade natural, ou seja, uma performance hidráulica menos eficiente.

Alguns autores mostraram que mesmo utilizando solos compactados no ramo úmido eles tendem a reverter em estrutura floculada após submetidos a ciclos de secagem, causando aumento do coeficiente de permeabilidade (ALBRECHT & BENSON, 2000). Maciel (2003) constatou esse aspecto ao comparar as curvas sucção umidade de solos compactados em laboratórios com o solo indeformado da camada de cobertura. O autor observou que a curva característica de sucção da camada de cobertura se assemelhava melhor a curva característica do solo compactado no ramo seco como pode ser observado na Figura 32:

Figura 32 - Curva característica do solo indeformado e solos compactados em laboratório



Fonte: (Maciel, 2003)

Albright *et al.* (2006) realizaram um estudo em Georgia nos Estados Unidos para avaliar a performance de camadas de cobertura em solos compactados localizada em um clima úmido ao longo de 4 anos da vida útil. O monitoramento contínuo da drenagem profunda foi realizado através de lisímetros instalados na camada. Os autores observaram o padrão de fluxo e concluíram que fluxos preferenciais se desenvolveram logo após a construção, aparentemente devido à formação de fissuras de ressecamento do solo. Após quatro anos, a barreira hidráulica foi escavada para avaliar mudanças na sua estrutura e permeabilidade hidráulica e conduzir testes de infiltração com anel duplo. Os resultados dos ensaios indicaram que a permeabilidade aumentou em cerca de três ordens de magnitude durante os quatro primeiros anos de vida útil. Foi observado também que fissuras e raízes se desenvolveram por toda a extensão da camada e que os resultados de ensaios em

pequenas amostras indeformadas podem subestimar os resultados. A pesquisa também mostrou que a camada deve ser protegida em relação ao ressecamento e penetração de raízes para poder funcionar como esperado, mesmo em locais quentes e úmidos.

2.11.2 Ciclos de umedecimento e secagem

Croney & Coleman (1954) *apud* Albrecht & Benson (2000) verificaram que ocorreram mudanças significativas na curva característica de retenção de água do solo após a secagem inicial (primeiro ciclo), sugerindo que a estrutura do solo se define após o primeiro ciclo.

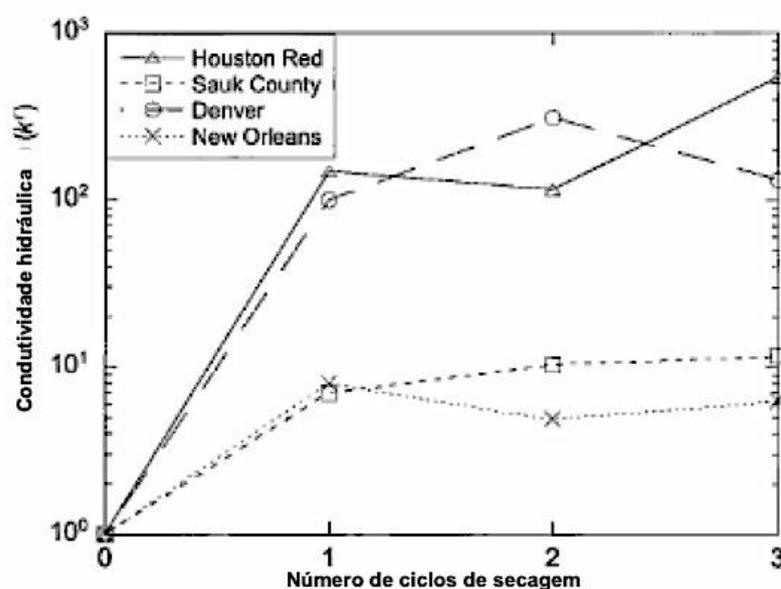
Benson & Daniel (1990) *apud* Albrecht & Benson (2000) explica que ocorre um aumento expressivo na condutividade hidráulica para solos compactados acima da umidade ótima pelo fato da condutividade inicial ser controlada pelos microporos, os macroporos passam a controlar a permeabilidade hidráulica após a secagem do solo. Nos solos compactados no ramo seco, ocorre uma pequena alteração na permeabilidade após a secagem, e em alguns casos há uma pequena redução gradual. Nesses solos, os macroporos controlam a permeabilidade inicial do solo, e com umedecimento os poros tendem a reduzir devido a contração volumétrica, no entanto as fissuras formadas durante a secagem tende a criar novos caminhos preferenciais. Portanto, o solo compactado no ramo seco tem uma pequena redução na permeabilidade hidráulica ou nenhuma, embora apresente maior grau de fissuração.

Benson *et al.* (1993) *apud* Albrecht & Benson (2000) realizaram ensaios de permeabilidade em amostras de argilas compactadas na umidade ótima, ótima +3% e ótima -3%, submetidas a quatro ciclos de umedecimento e secagem, e verificaram que as amostras na umidade ótima e abaixo da umidade ótima não sofreram alteração na condutividade hidráulica, enquanto nas amostras compactadas 3% acima da ótima aumentaram a permeabilidade em um fator de três. Todas as amostras aumentaram a permeabilidade em uma ordem de grandeza nos primeiros dois ciclos de umedecimento e secagem e depois estabilizaram.

Albrecht & Benson (2000) realizaram um estudo em amostras de solo de cinco camadas de coberturas de aterros localizados nos Estados Unidos para avaliar a

influência de fatores como números de ciclos de secagem, condições de compactação, composição do solo e mineralogia na contração e formação de fissura em solos compactados. Os autores verificaram que a contração volumétrica não teve aumento significativo com aumento do número de ciclos de secagem. Os resultados de ensaios mostraram que ocorreu um aumento significativo na condutividade hidráulica a partir do primeiro ciclo de secagem como pode ser observado na Figura 33.

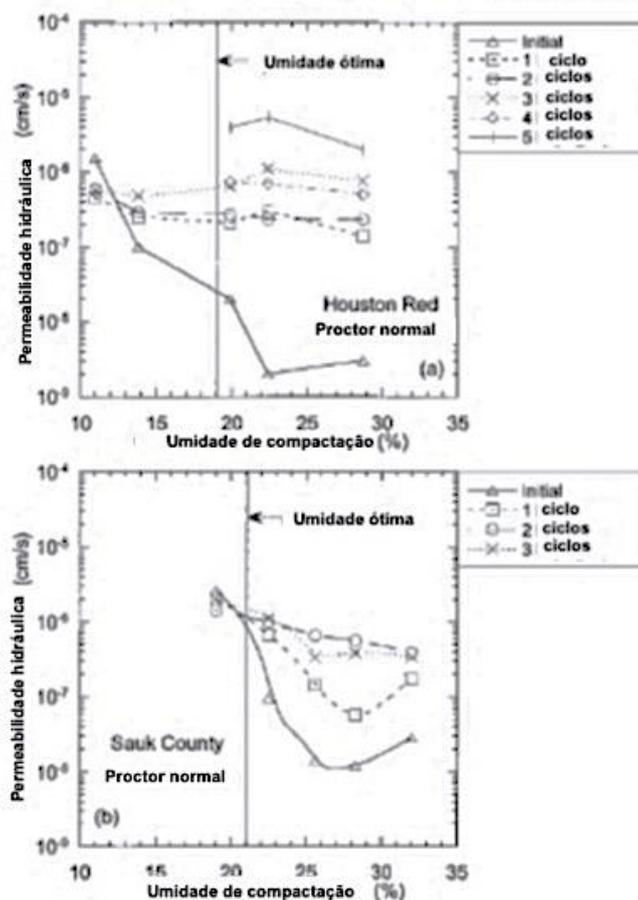
Figura 33 - Variação da condutividade hidráulica com o número de ciclos de secagem para amostras de solos de Houston Red, Sauk, County, Denver e New Orleans



Fonte: (Adaptado de Albrecht & Benson, 2000)

O estudo também sugeriu que a tensão decorrente da contração volumétrica da secagem do solo é bastante superior a tensão que o solo foi submetido durante a compactação. As amostras que fissuraram foram submetidas a ensaios de permeabilidade em cada ciclo de secagem para avaliar seu efeito na condutividade hidráulica. A Figura 34 mostra como a condutividade hidráulica varia em função da umidade de compactação e o número de ciclos de secagem para os solos de Houston Red e Sauk Country nos Estados Unidos:

Figura 34 – Variação da condutividade hidráulica em função da umidade de compactação com aumento do número de ciclos de umedecimento e secagem para as amostras de (a) Houston Red (b) Sauk Country nos Estados Unidos



Fonte: (Adaptada de Albrecht & Benson, 2000)

Os resultados dos ensaios mostraram que a condutividade hidráulica das amostras teve um acréscimo substancial após os dois primeiros ciclos de secagem. As amostras compactadas na umidade ótima para amostra de Houston Red tiveram um aumento na permeabilidade de duas ordens de magnitude, enquanto que para o solo de Sauk Country a condutividade hidráulica aumentou duas ordens de grandeza nos primeiros dois ciclos de secagem e depois estabilizou.

2.11.3 Contração do solo

A contração do solo é uma característica muito importante em camadas de cobertura, pois pode alterar as propriedades hidráulicas do solo. É desejável que o solo não apresente níveis altos contração por contribuir para formação de fissuras e formação de caminhos preferenciais de fluxo.

A adição de matéria orgânica estabilizada pode melhorar o desempenho do solo em relação a contração. De acordo com Costa (2015) a utilização de matéria orgânica estabilizada reduz o nível de fissuração do solo após os primeiros ciclos de secagem.

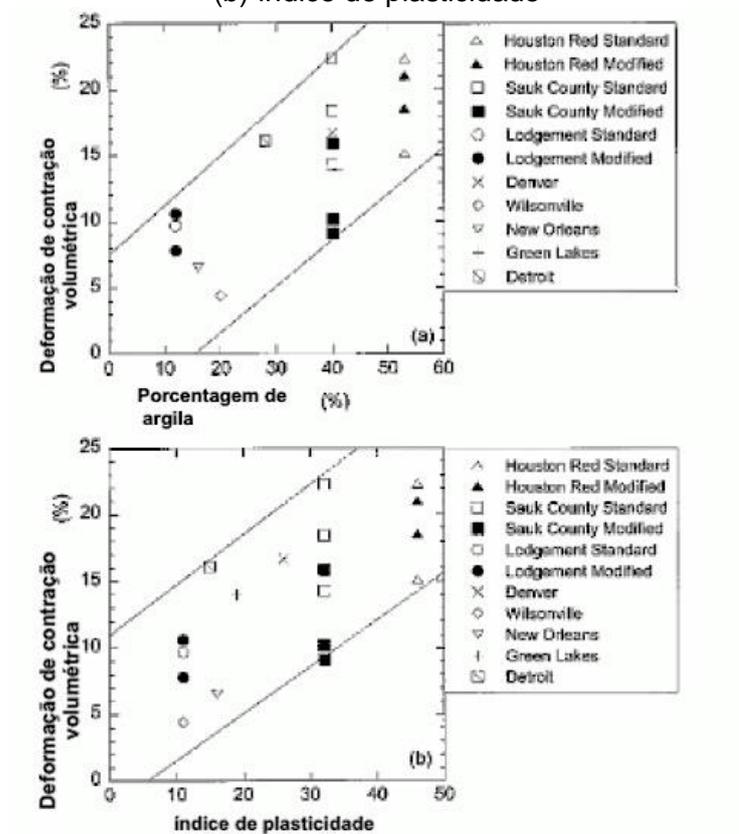
O efeito da contração do solo pode ser evitado limitando a porcentagem de finos EPA (2000). Nos solos que contêm argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, como as montmorilonitas e vermiculitas, ocorrem fenômenos cíclicos por conta das variações sazonais. Os solos plásticos e com grande percentual de argila são mais sensíveis a variação de sucção, pois aumentam e diminuem de volume quando ganham e perdem água, respectivamente.

A deformação causada pela contração aumenta à medida que se aumenta o percentual de argila no solo e a umidade de compactação, sendo insensível a energia de compactação (JONG & WARKENTIN, 1965; KLEPPE & OLSON, 1985 *apud* ALBRECHT & BENSON, 2000).

Os dados de contração volumétrica de solos de vários locais nos estados unidos foram sistematizados para mostrar a relação com as propriedades do solo. A Figura 35 mostra a relação entre a contração volumétrica e o percentual de argila e índice de plasticidade para amostras compactadas em umidades maiores que a ótima +2%.

Os marcadores no gráfico fechados correspondem a energia Proctor Modificada e os abertos correspondem ao Proctor Normal. Os resultados do estudo mostraram que a contração volumétrica mantém uma relação diretamente proporcional ao conteúdo de argila no solo.

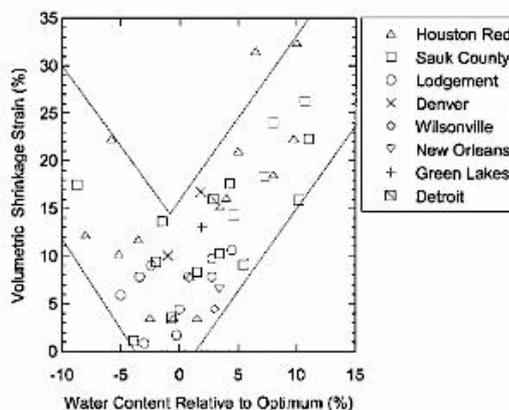
Figura 35 – Deformação de contração volumétrica em função da (a) porcentagem de argila e (b) índice de plasticidade



Fonte: (Adaptado de Albrecht & Benson, 2000)

Em relação à compactação, as mostras compactadas na umidade ótima, e levemente acima ou abaixo apresentam menores valores de contração. A Figura 36 mostra a variação da deformação de contração volumétrica em função da umidade de compactação relativa a umidade ótima para argilas de diferentes aterros nos Estados Unidos.

Figura 36 - Variação da contração volumétrica em função da umidade de compactação



Fonte: (Albrecht & Benson, 2000)

2.12 DRENAGEM DAS ÁGUAS PLUVIAIS

A drenagem das águas superficiais permite que a água que não infiltra no solo seja encaminhada para sistema de coleta, evitando que essa água fique acumulada e penetre na camada de cobertura posteriormente.

De acordo com a NBR 15.849/2010, o coeficiente de escoamento superficial deve ser adotado de acordo com as características de permeabilidade da camada de solo da cobertura. Se o valor do escoamento superficial for muito alto, pode-se assumir que o escoamento superficial é equivalente à 5-10% da precipitação (KHIRE *et al.*, 1997, 1999 *apud* KHIRE, 2000).

Na construção da camada de cobertura, o solo é espalhado sobre os resíduos com auxílio de tratores esteira e motoniveladoras e compactado com declividade longitudinal de 2% a 7% para assegurar a drenagem das águas para fora da área de implantação do aterro.

O impacto das gotas de chuva no solo e a ação dos ventos são os principais agentes erosivos do solo. A erosão pela água é responsável pela maior parte da perda do solo (SILVA, 2006 *apud* DAMÉ *et al.*, 2010). O controle de sedimentação e erosão é feito em paralelo junto com controle de escoamento superficial, adotando estruturas para acumular os sedimentos e promover o direcionamento da água para o local adequado.

A drenagem da água superficial da cobertura final inclui bermas de interceptação de água superficial e os canais que concentram a água em caminhos de fluxo e estruturas de descarga, coletam a água e a retém por um certo período de tempo.

O sistema de drenagem de águas superficiais deve ser composto por:

- Drenagem secundária – canaletas escavadas no solo para auxiliar no escoamento da água para o sistema principal;
- Drenagem principal - canaletas em concreto simples moldado “*In loco*” com caixas de passagem para coletar a água que esco externamente na superfície do aterro, direcionando para as bacias de retenção ou galerias de águas pluviais públicas;

- Bacias de detenção – dispositivos com objetivo de regular as vazões quando não houver um sistema de galerias públicas de forma a evitar os processos de erosão.

2.13 BALANÇO HÍDRICO DE ATERROS SANITÁRIOS

O conceito de balanço hídrico em hidrologia, é o resultado da porção de água que entra e que sai em uma certa porção de solo, em um determinado período de tempo. Numa escala local, o balanço hídrico tem por objetivo estabelecer a variação no armazenamento de água e conseqüente disponibilidade de água no solo.

O balanço hídrico de aterros sanitários inclui o balanço da camada de cobertura e o balanço dos RSU. O balanço da camada de cobertura é decorrente das interações com a atmosfera, tendo como principais componentes desse processo a infiltração, o armazenamento e a retirada de água da camada de cobertura. Já o balanço dos RSU considera a umidade do lixo, a decomposição dos resíduos e os efeitos da sua compressibilidade e o lixiviado produzido. A resultante desses dois balanços corresponde à estimativa do volume de água no aterro, permitindo a otimização do projeto e da operação do aterro (SÃO MATEUS, 2012).

De acordo com Blight *et al.* (1996) *apud* Lins (2003) o balanço hídrico de aterros sanitários pode ser descrito de acordo com a Equação 6:

$$\text{ÁGUA QUE ENTRA} = \text{ÁGUA QUE SAI} + \text{ÁGUA RETIDA} \quad (6)$$

A água que entra no aterro é proveniente das águas pluviais ou da umidade natural da massa de lixo. De uma maneira prática, a chuva representa a principal entrada de água no sistema. Os fluxos horizontais de água, em camadas homogêneas, se compensam, e anulam-se.

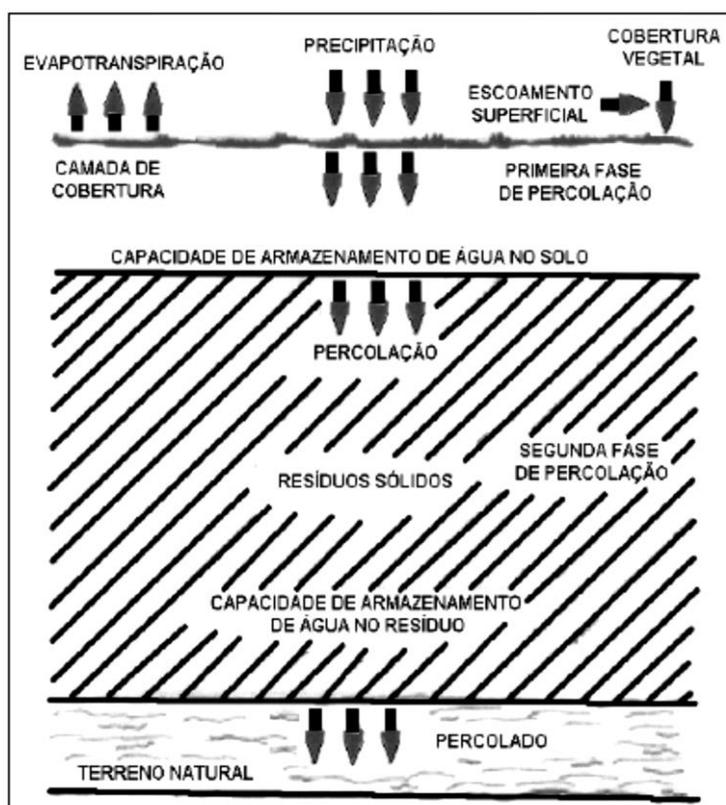
Após eventos chuvosos, a água pode seguir várias direções, uma parte cai diretamente no solo, outra parte é interceptada pela vegetação existente, chegando ao solo por gotejamento ou escorrendo pelo caule das plantas. Quando atinge o solo, a água pode infiltrar no solo, ou escoar superficialmente. Quando a água infiltra no solo começa a movimentar-se (percolar), seguindo várias direções na zona não saturada do solo em direção ao lençol freático. E nesse trajeto, parte da água infiltrada

pode ficar retida na camada de solo ou na massa de lixo ou retornar para atmosfera através do processo de evapotranspiração.

Nas camadas de cobertura, a evapotranspiração é a principal saída, principalmente nos períodos secos, e a drenagem profunda ou percolação é a principal saída nos períodos chuvosos. O aterro também pode perder água através dos processos de evaporação da água, transpiração da cobertura vegetal e processos biológicos (BENGTSSON, 1994 *apud* LINS, 2003). O restante é acumulado ou eliminado pela drenagem. A parcela de água que percola pelas paredes laterais e pela base são desprezíveis (BLIGHT *et al.*, 1996 *apud* LINS, 2003).

A Figura 37 mostra um modelo idealizado por Rocca (1981), que mostra as principais componentes do balanço hídrico na camada de cobertura, tais como: precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, armazenamento de água no solo e percolação na base.

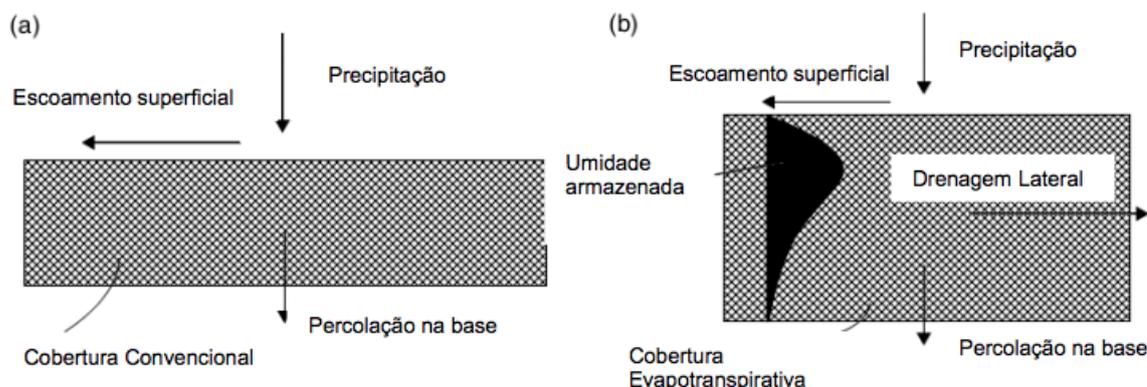
Figura 37 - Modelo de fluxo de água em um aterro sanitário



Fonte: (Adaptado de ROCCA, 1981, citado por Lins, 2003)

A Figura 38 mostra as diferenças entre as componentes do balanço hídrico das barreiras resistivas (camada convencional) e das camadas de armazenamento de água, como por exemplo as camadas evapotranspirativas e oxidativas:

Figura 38 - Componentes do balanço hídrico das (a) barreiras resistivas e (b) camadas de armazenamento de água



Fonte: (Adaptado da USEPA, 2007, citado por Costa *et al.*, 2018)

As componentes do balanço hídrico em uma camada de cobertura monolítica podem ser expressas através da relação expressa na Equação 7:

$$P + U_c = (ET + ES + G) + \Delta S_c + PERC + L \quad (7)$$

Onde:

P = Precipitação

U_c = Água de composição da camada

ET = Evapotranspiração

G = Vapor de água

ES = Escoamento superficial

ΔS_c = Água absorvida e retida na camada

PERC = Água percolada através da camada para massa de lixo

L = Drenagem lateral

Desprezando o vapor de água (G) a água que fica retida na vegetação (interceptação vegetal), por possuir um valor muito pequeno comparado aos outros valores, o armazenamento de água na camada de cobertura pode ser descrito como mostrado na Equação 8:

$$\Delta U_c = P - ET - ES + U_c - PERC - L \quad (8)$$

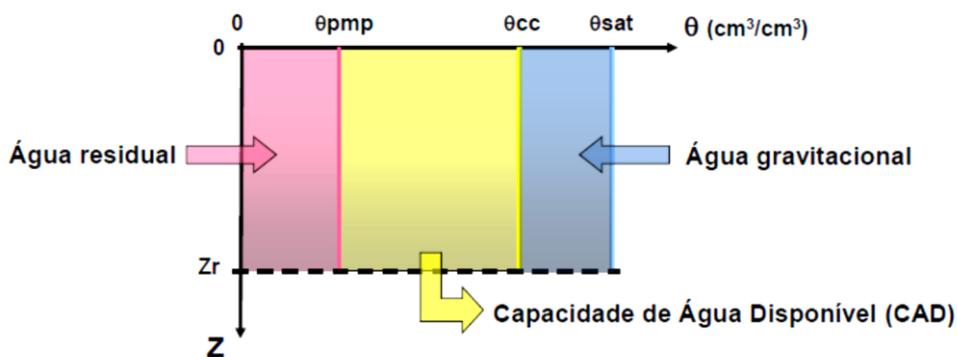
Por meio dessa equação, pode-se determinar a variação na disponibilidade de água no solo. Caso se conheça a capacidade de água disponível no solo, pode-se determinar a quantidade de água adicional que pode ser armazenada por ele até atingir a capacidade de campo da camada.

2.13.1 Tipos de balanço hídrico

Há dois tipos de balanços hídricos climatológicos: Normal e sequencial. O balanço hídrico normal é elaborado com os dados médios de P e ETP de uma região, esse é um indicador climatológico da disponibilidade hídrica na região, ou seja, dos períodos com déficit e excedentes hídricos. Enquanto que o sequencial é elaborado com os dados de P e ETP de um período ou uma sequência de períodos (meses, semanas, dias) de um ano específico para uma certa região. Para se elaborar o BHC é necessário determinar a capacidade de água disponível no solo (CAD).

A CAD representa a quantidade de água que está disponível para transpiração das plantas. Essa propriedade depende das características físico-hídricas do solo e do tipo de planta, e pode ser determinada a partir da umidade de capacidade de campo (θ_{cc}) cm^3/cm^3 , ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) cm^3/cm^3 e da profundidade efetiva do sistema radicular (H_{Rmax}) cm. A Figura 39 mostra um esquema de como obter a CAD.

Figura 39 - Esquema para obtenção de capacidade de água disponível (CAD) do solo



Fonte: (Sentelhas & Angelocci, 2012)

Utilizando as unidades gravimétricas, a expressão para obter a CAD está expressa na Equação 9:

$$CAD = [(\theta_{cc} - \theta_{pmp})/100] * \gamma * H_{Rmax} \quad (9)$$

Utilizando as umidades volumétricas, a expressão para obter CAD está expressa na Equação 10:

$$CAD = [(\theta_{cc} - \theta_{pmp})/100] * H_{Rmax} \quad (10)$$

2.13.2 Método do Balanço Hídrico aplicado às coberturas de aterros sanitários

O método do balanço hídrico é um dos modelos mais utilizados para previsão do volume de lixiviado em um aterro sanitário. A precisão e a sensibilidade do método são muito pouco estudadas e depende das condições de campo de cada análise. Esse método se aplica nos casos onde há disponibilidade de dados climatológicos. De acordo com a aplicabilidade, o balanço pode ser calculado diário, pentada, mensal, anual e por década.

O balanço hídrico climatológico (BHC) foi desenvolvido em 1948 por Thornthwaite e melhorado por Mather em 1955, sendo denominado de Método de Thornthwaite & Mather (1955). Para aplicação desse método, é necessário conhecer capacidade de água disponível (CAD), a precipitação (P), a evapotranspiração potencial (ETP) e o coeficiente de escoamento superficial. Com essas informações é possível conhecer a variação da retenção de água no solo ao longo do tempo. Como naquela época a capacidade computacional era limitada, o cálculo era realizado utilizando tabelas de água retida em função do negativo acumulado para diferentes valores de CAD, variando de 25 mm a 400 mm (PEREIRA, 2005).

O BHC baseia-se na conservação de solo e água no solo. A relação (P – ETP) representa a disponibilidade de água no solo, os valores negativos significam perda potencial de água e os valores positivos significam recarga de água. Caso essa recarga ultrapasse a capacidade de campo, pode resultar em percolação de água para massa de lixo.

O solo funciona como um reservatório nos períodos de excedente hídrico, e nos períodos de déficit hídrico ele dificulta a perda d'água, à medida que vai secando. Nesse sentido, a água retida se torna uma função potencial dessa demanda (P-ETP) e da CAD adotada. Se o período de déficit hídrico se prolongar, a água retida será

uma função potencial dos valores Negativos Acumulados de (P – ETP), ou seja, da perda potencial acumulada. Esse somatório é denominado de negativo acumulado (NAC).

Posteriormente, outras formulações foram desenvolvidas para cálculo do balanço hídrico baseadas na teoria do balanço hídrico de Thornthwaite.

Em 1958, Mendonça, utilizou cálculo diferencial e integral e impondo condições de contorno, realizou uma simplificação do Método de Thornthwaite & Mather (1955), eliminando a necessidade de consultar tabelas, sem prejuízos nos resultados finais. Nessa abordagem, as tabelas de armazenamento de água (AS) poderiam ser substituídas por uma equação adimensional (AS/CAD) (PILAU, 2014; PINTO & PREUSS, 1975 *apud* PEREIRA, 2005). O Balanço Hídrico Simplificado (BHS), pode ser calculado de forma mais prática sem a necessidade de consulta de tabelas.

A expressão adimensional (ARM/CAD) para cálculo do BHS proposto por Mendonça (1958) está expressa na equação 11:

$$AS/CAD = \exp [NAC/CAD] \quad (11)$$

Onde, as parcelas de armazenamento (AS) e negativo acumulado (NAC) podem ser calculadas pelas equações 12 e 13, respectivamente:

$$AS = ARM \exp [NAC/CAD] \quad (12)$$

$$NAC = CAD \cdot \ln [AS/CAD] \quad (13)$$

No cálculo do BHS proposto por Mendonça (1958), sempre que houver um período de (P-ETP) > 0, esse valor deve ser somado ao AS do mês anterior, e em função desse novo valor de AS, calcula-se o novo NAC. Se esse valor de (P-ETP) for insuficiente para levar AS ao valor de CAD, utiliza-se o Negativo Acumulado daquele mês invertendo-se a equação de Mendonça (Pereira *et al.*, 1997 *apud* Pereira, 2005). Sempre que houver valor de (P-ETP) < 0, esse valor deve ser acumulado ao NAC, e em função dele se calcula o AS.

Outro modelo de balanço hídrico adaptado do estudo publicado por Thornthwaite foi apresentado por Fenn, em 1975, e depois melhorados por Kmet em

1982. Nesse método proposto por Fenn (1975) o cálculo de AS é feito consultando tabelas em função da demanda de (P – ETP) (BENDZ *et al.*, 1997 *apud* FIRTA & CASTILHOS jr, 2014).

Fenn *et al.* (1975 *apud* Rios, 2016) também apresentou tabelas de armazenamento de água para outras condições de contorno. O autor diz que a camada de cobertura de aterros é como uma conta bancária onde a precipitação é depositada e a evapotranspiração são os saques e que os três fatores críticos no balanço hídrico são evapotranspiração, armazenamento de água no solo e escoamento superficial. Esse método possui as seguintes condições de aplicação:

- Espessura da camada de 60 cm;
- Declividade da cobertura de 2% a 4%;
- Existência de vegetação na cobertura;
- Infiltração no aterro resultante apenas da precipitação;
- Características da camada de cobertura e do lixo uniformes;
- Parâmetros meteorológicos correspondem as médias aritméticas mensais das séries históricas;
- Fluxo de água unidirecional, na direção vertical.

Em seguida, Koerner e Daniel, em 1997, apresentaram uma planilha em Excel para aplicação do método do balanço hídrico adaptado de Thornthwaite e Mather (1955), onde são utilizados os dados do solo e dados meteorológicos como dados de entrada. Os autores apresentaram uma equação para cálculo do armazenamento de água no solo (AS) para os meses de déficit hídrico (I-ETP) < 0, como pode ser observada na Equação 14:

$$AS = (AS_{m\acute{a}x}) \cdot 10^{-b \cdot (I-ETP)} \quad (14)$$

Onde, $b = 0,455 / (AS_{m\acute{a}x})$ e $AS_{m\acute{a}x}$ corresponde ao armazenamento máximo de água pela camada.

Em 2005, Pereira realizou a demonstração da teoria de Thornthwaite e apresentou uma forma condensada da equação de Mendonça (1958) que pode ser aplicada para uma sequência de meses de estiagem, ou seja, (P-ETP < 0). Nessa

equação condensada, eliminou-se a coluna do Negativo Acumulado, tornando o modelo ainda mais simples. Nesse novo método, o cálculo do balanço hídrico inicia-se no primeiro mês com déficit hídrico após o período de excedente hídrico prolongado. A Equação 15 mostra a expressão condensada proposta por Pereira (2005) para uma sequência de n meses com déficit hídrico ($P-ETP < 0$):

$$AS_n = AS_{n-1} \cdot \exp [(P - ETP)_n / CAD] \quad (\text{PEREIRA, 2005}) \quad (15)$$

Sempre que houver dois ou mais meses com excedente hídrico ($P-ETP > 0$), AS é calculada pela Equação 16:

$$AS_n = AS_{n-1} + (P - ETP)_n \quad (\text{PEREIRA, 2005}) \quad (16)$$

Em seguida, se houver outro mês com déficit hídrico ($P-ETP < 0$), retoma-se a Equação 15, sem que seja necessário calcular o negativo acumulado do mês anterior. O roteiro para cálculo do balanço hídrico utilizando a equação condensada de Pereira (2005), está expresso na Tabela 5:

Tabela 5 - Cálculo do balanço hídrico simplificado utilizando a equação de Pereira (2005)

Parâmetro	Sigla	Unidade	Fórmula	
Escoamento superficial	R	mm	$R = P \times C$	
Infiltração	I	mm	$I = P - R$	
Determinar o armazenamento de água "AS"	AS	mm	1º mês de cálculo	$(I-ETP)_i < 0, AS = AS_{i-1} \cdot \exp ((I-ETP)_i / CAD) < AS_{max}$
			Meses subsequentes	$(I-ETP)_i < 0, AS = AS_{i-1} \cdot \exp ((I-ETP)_i / CAD) < AS_{max}$
				$(I-ETP)_i \geq 0, AS = ((I-ETP)_i + AS_{i-1}) < AS_{max}$
Variação do armazenamento de água	ΔAS	mm	$\Delta AS = AS_i - AS_{i-1}$	
Evapotranspiração atual ou real mensal	ETR	mm	ETR	$(I-ETP)_i < 0, ETR_i = I - \Delta AS$
				$(I-ETP)_i \geq 0, ETR = ETP$
Percolação	PERC	mm		$(I-ETP)_i \leq 0, PERC = 0$
				$(I-ETP)_i > 0, PERC = I - ETR - \Delta AS$
Verificação dos cálculos	CK	mm	Mensal	$CK = PERC + ETR + \Delta AS + R = P$
			Anual	$\Sigma CK = \Sigma P$
Taxa de percolação mensal	Fluxo	mm/s	$\text{Fluxo} = PERC / t$	onde $t = 2.592.000s$
Vazão	Q_m	m^3/s	$Q_m = (\text{Fluxo} \cdot A) / 1000$	Onde A = área total da camada superficial

Fonte: (Autor, baseada em Koerner & Daniel, 1997)

2.13.3 Cálculo do balanço hídrico pelo Aplicativo do INMET

A aplicação adequada da NBR 15.849/2010 necessita de dados climatológicos que deem segurança aos projetistas. O site do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (<https://portal.inmet.gov.br/>) fornece os dados meteorológicos das estações pluviométricas no Brasil que podem servir de apoio para projetos de aterros sanitários de pequeno porte.

A NBR 15849/2010 diz que para o cálculo do balanço hídrico devem ser utilizadas as séries anuais de precipitações médias e temperatura, que são utilizadas para estimar a evapotranspiração através da equação de Thornthwaite, e o coeficiente de escoamento superficial para o tipo de camada.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) juntamente com o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET desenvolveram um aplicativo que permite estimar o excedente hídrico em vários locais ao longo do território nacional.

O aplicativo calcula o balanço hídrico pelo método de Thornthwaite, utilizando as séries de valores mensais de chuva e temperatura que são gradeados pela Universidade de Delaware, fornecendo os dados de excedentes hídricos e outros parâmetros associados ao ponto de grade mais próximo do local.

O excedente é calculado utilizando as bases climatológicas referentes a série de 47 anos (1961-2008). O cálculo é feito para todos anos e depois é feita uma distribuição estatística dos dados. O valor fornecido corresponde ao percentil de 75%, ou seja, o valor que tem 75% de chance de não ser ultrapassado para o local. Os parâmetros adotados para cálculo do balanço hídrico pelo aplicativo são:

- Declividade de 7%, como recomendado pela NBR 15.849/2010;
- Cobertura vegetal composta por gramíneas.

A capacidade de água disponível para os diferentes tipos de solos utilizada pelo aplicativo está expressa na Tabela 6:

Tabela 6 - Capacidade de água disponível dos solos
CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL

TIPO DE SOLO	CAD
Argiloso	250
Siltoso	200
Arenoso	150

Fonte: (INMET, 2019)

Os coeficientes de escoamento superficial dos solos para as estações secas e úmidas adotados pelo aplicativo podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficiente de Escoamento Superficial

COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL		
TIPO DE SOLO	SECA	UMIDA
Argiloso	0,18	0,22
Siltoso	0,14	0,19
Arenoso	0,10	0,15

Fonte: (INMET, 2019)

O balanço hídrico da camada de cobertura é feito considerando uma camada de espessura de 1 (um) metro, como determinado na NBR 15849/2010.

O aplicativo também fornece os valores mensais e anuais de precipitação, precipitação efetiva e o excedente hídrico.

2.13.4 Determinação da Evaporação Real pelo método de Penman-Wilson e utilização do Software SVFlux

Dois processos principais governam o fluxo de água entre o solo e a atmosfera: infiltração e evaporação. O processo de infiltração é governado basicamente pelas propriedades dos solos como permeabilidade hidráulica e é razoavelmente compreendido. Enquanto o processo de evaporação é mais difícil de entender pois é governado tanto pelas propriedades do solo quanto que pelas condições climáticas. O conceito de evaporação potencial foi introduzido por Thornthwaite em 1948. Dalton propôs uma equação para determinar a evaporação potencial baseada na temperatura da superfície e pressão de vapor de água e ar. Priestley e Taylor (1970) também propuseram um método baseado na energia para determinar a evaporação potencial. Penman resolveu essa dificuldade em relação a temperatura da superfície, desenvolvendo um método relativamente simples. O método de Penman considera que a superfície de solo está saturada todo o tempo (Wilson *et al.*, 1994).

Wilson (1990) desenvolveu uma tese sobre evaporação real e distribuição da temperatura ao longo do perfil de solo. Wilson modificou o método de Penman para calcular a evaporação real e comparou com dados físicos. Gitirana (2004) comparou os dados de Wilson com os resultados de simulações utilizando o software SVFlux e encontrou bastante proximidade entre os resultados (SOILVISION, 2018).

2.13.5 Obtenção das componentes do balanço hídrico

Para aplicação do método, é necessário conhecer algumas variáveis como coeficiente de escoamento superficial, capacidade de água disponível, precipitação, e evapotranspiração potencial.

A precipitação e evapotranspiração potencial podem ser obtidas da estação climatológicas mais próxima. Os parâmetros utilizados são as médias aritméticas mensais (FIRTA & CASTILHOS Jr., 2014).

A evapotranspiração corresponde à perda de água para atmosfera de uma superfície úmida. É a combinação da evaporação de água da superfície e transpiração pelas plantas onde a vegetação está presente.

O escoamento superficial ou *runoff* (R) corresponde à quantidade de água precipitada que não infiltra e nem evapora. Na maioria dos casos é controlado pela interface solo-atmosfera, mais especificamente pela condutividade hidráulica da superfície e da densidade da vegetação (ALBRIGHT et al., 2004).

A razão entre o volume escoado e o volume precipitado é denominada coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de “*runoff*” (C). Esse coeficiente C pode ser relativo a uma chuva isolada ou a um período de tempo onde várias chuvas ocorrem. A relação para calcular C está expressa na Equação 17:

$$C = \frac{R \text{ (volume escoado)}}{P \text{ (volume precipitado)}} \quad (17)$$

O valor de C também pode ser calculado através da Equação 18:

$$C = \alpha \times C' \quad (18)$$

Onde, os coeficientes α e C' são parâmetros tabelados.

Quando o coeficiente de escoamento superficial não for medido, esses valores podem ser obtidos de tabelas de referência encontradas na literatura. Vários autores apresentaram tabelas com coeficiente de escoamento superficial considerando tipo de solo, declividade e estação do ano.

Rio-Águas (2010) e Pruski (2002) apresentaram valores de C em função da declividade e tipo de solo, como pode ser observado nas Tabelas 8 e 9, respectivamente:

Tabela 8 - Valores de coeficiente de escoamento superficial em função da declividade e tipo de solo

Tipologia da área de drenagem	Coeficiente de escoamento superficial
Solo arenoso, declividade baixa < 2 %	0,05 – 0,10
Solo arenoso, declividade média entre 2% e 7%	0,10 – 0,15
Solo arenoso, declividade alta > 7 %	0,15 – 0,20
Solo argiloso, declividade baixa < 2 %	0,15 – 0,20
Solo argiloso, declividade média entre 2% e 7%	0,20 – 0,25
Solo argiloso, declividade alta > 7 %	0,25 – 0,30

Fonte: (Modificado de Rio-Águas, 2010, citado por Oliveira e Braga, 2017)

Tabela 9 – Faixa de valores do coeficiente de escoamento superficial em função da declividade e tipo de solo

	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

Fonte: (Pruski et al., 2004, citado por Lopes 2011)

Outros autores apresentaram tabelas onde os parâmetros α e C' dependem do tipo de solo, declividade e estação do ano. A Tabela 10 mostra os parâmetros α e C' propostos pelo manual para implantação de aterros sanitários em valas de pequenas dimensões, trincheiras e em células do Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e a Tabela 11 mostra os parâmetros C' e α propostos Rocca et al. (1993):

Tabela 10 - Valores de C' e α em função da declividade e tipo de solo

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente α	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso C = 0,30	0 a 2	0,17	0,34
	2 a 7	0,34	0,50
Siltoso C = 0,35	0 a 2	0,25	0,39
	2 a 7	0,40	0,53
Argiloso C = 0,40	0 a 2	0,33	0,43
	2 a 7	0,45	0,55

Fonte: (IAP, 2019)

Tabela 11 - Valores de C' e α em função da declividade e tipo de solo

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente (α)	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso C = 0.30	0 a 2	0.17	0.34
	2 a 7	0.34	0.50
Argiloso C = 40	0 a 2	0.33	0.43
	2 a 7	0.45	0.55

Fonte: (Rocca *et al.*, 1993)

Logo, a parcela de escoamento superficial (R) pode ser calculada através da Equação 19:

$$R = C \cdot P \quad (19)$$

Então, a Infiltração (I) de água no solo pode estimada através da Equação 20:

$$I = P - R \quad (20)$$

O Armazenamento de água no solo (AS) é determinado a partir da CAD e da demanda de (P – ETP) e a variação do armazenamento de água (ΔAS) corresponde à diferença entre AS do mês atual e do mês anterior.

A evapotranspiração real (ETR) corresponde à quantidade de água que, em condições ambientes, é evaporada e transpirada através das plantas. Para os meses em que a infiltração (I) é maior que a ETP, a ETR é igual a ETP, quando a I é menor que a ETP, a ETR é condicionada ao grau de umidade do solo.

COMO É CALCULADO O BALANÇO HÍDRICO:

Pelo método do Balanço hídrico, a quantidade de água percolada na camada é calculada pela Equação 21:

$$PERC = P - R - ETR - \Delta AS \quad (21)$$

Onde,

PERC = quantidade de água percolada (mm);

P = precipitação média mensal (mm);

ETR = evaporação real média mensal (mm)

R = escoamento superficial (mm)

ΔAS = variação mensal da água armazenada no solo (mm).

A vazão percolada é calculada de acordo com a Equação 22:

$$Q_{PERC} = \frac{PERC \times A \times K}{\Delta t} \quad (22)$$

Onde:

Q_{PERC} = vazão percolada (m³/s);

A = área do aterro ocupada pelas células de rejeito (m²) (estimada);

K = coeficiente de infiltração em função das características do solo de cobertura para solos argilosos (K = 0,10);

Δt = mensal = 30 x 86.400 = 2.592.000 s

O fluxo de percolação na camada inferior Q_{PERC} (m³/s) corresponde à quantidade de líquido que vai penetrar na massa de lixo.

2.13.6 Determinação da espessura da camada

Os projetos de camadas de cobertura visam ajustar a capacidade de armazenamento de água e coeficiente de escoamento superficial da cobertura para reduzir a infiltração de água na massa de lixo para um nível aceitável. De uma forma geral, a quantidade de água infiltrada pode ser reduzida otimizando o coeficiente de permeabilidade, grau de compactação, capacidade de campo do solo e espessura da camada.

Albright *et al.* (2004) ressalta que tanto as camadas convencionais como as camadas alternativas dependem do princípio de armazenamento de água pelo solo.

E de acordo com Joaquim Jr. (2015), essa capacidade de armazenamento varia com a espessura da camada. Portanto, conhecendo a capacidade de armazenamento de água do solo disponível e a quantidade de água que será necessária ser armazenada, é possível estimar a espessura da camada. O dimensionamento deve ser refinado com simulações numéricas, utilizando os dados de caracterização, para avaliar as variações na performance da camada ao mudar os parâmetros de projeto (como a compactação) e os fatores ambientais (duração da precipitação e intensidade, condição de umidade inicial, temperatura, umidade relativa, etc.).

De acordo com as notas de aula de Marinho (2019), o máximo teor de umidade gravimétrica (MTUG) do solo é a relação entre o índice de vazios (e) e a densidade relativa dos grãos (G), como mostrado na Equação 23:

$$MTUG = \frac{e}{G} \quad (23)$$

Portanto, o máximo teor de umidade volumétrica (MTUV) é igual a porosidade do solo (n):

$$MTUV = n \quad (24)$$

Marinho (2019) também apresentou a expressão para cálculo da capacidade de retenção de água do solo (CR), utilizando conceitos de mecânica dos solos. Sabendo que a umidade do solo pode ser descrita pela Equação 25:

$$\theta = \frac{Vv}{Vt} = \frac{A hw}{At b} = \frac{hw}{b} \quad (25)$$

Onde, θ é a umidade do solo, Vv é o volume de vazios, Vt é o volume total de solo, At é a área seção transversal (área da célula), hw é a altura de água e b é a altura total da camada. E fazendo a umidade do solo (volumétrica) igual a umidade de capacidade de campo, encontra-se a expressão para calcular CR, como mostrada na Equação 26:

$$hw = \theta_{cc} b = CR \text{ (capacidade de retenção)} \quad (26)$$

CR corresponde ao valor máximo de água que o solo pode reter em condições de livre drenagem, acima da qual a água excedente escoará por gravidade.

Marinho (2019) também apresentou equações diferenciais simplificadas para obtenção da capacidade total de armazenamento de água ou capacidade de retenção de água (CR) e da capacidade de água disponível para plantas (CAD), como pode ser observado nas Equações 27 e 28:

$$CR = \int_0^b \theta_{cc} dz = (\theta_{cc})b \quad (27)$$

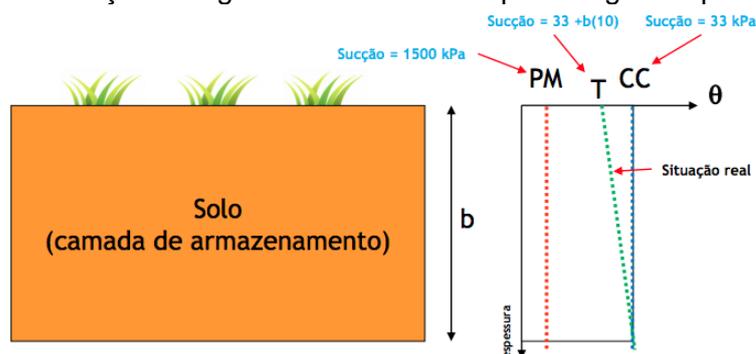
$$CAD = \int_0^b (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) dz = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) b \quad (28)$$

O perfil de umidade da camada varia ao longo do tempo durante os ciclos de umedecimento e secagem. O solo tem umidade inicial (θ_i) correspondente a umidade de compactação. Quando a camada for submetida ao processo de secagem, a umidade inicial vai diminuir gradualmente a partir das camadas superiores. Por outro lado, durante o umedecimento do solo, decorrentes da infiltração de água pluviais, o perfil de solo tende a apresentar umidades maiores nas camadas superficiais, e à medida que as camadas superiores vão atingindo a capacidade de campo, a frente de molhagem vai avançando.

A Figura 40 ilustra a variação da umidade do solo ao longo do perfil durante a secagem após atingir a capacidade de campo. Marinho (2019) considerou o valor de sucção de 33kPa para capacidade de campo do solo. Para esse cenário, o armazenamento de água na camada pode ser obtido de forma interativa através da Equação 29:

$$AS = \left[\left(\frac{\theta_{pmp} + \theta}{2} \right) - \theta_{pmp} \right] b \quad (29)$$

Figura 40 - Representação de água retirada do solo após atingir a capacidade de campo



Fonte: (Marinho, 2019)

Para projeto das coberturas, define-se a quantidade total de água que necessita ser armazenada supondo que a vegetação remove parte da água através dos processos de evapotranspiração. Considera-se a hipótese de que a CAD deve ser suficiente para armazenar toda a água infiltrada gerando o mínimo de percolação. Portanto, a CAD corresponde à diferença entre as entradas e saídas do sistema para determinado período, como mostrado na Equação 30:

$$CAD = P - ETR - L - R - PERC \quad (\text{MARINHO, 2019}) \quad (30)$$

Onde, L = drenagem lateral.

Portanto, para estimar a espessura da camada, deve-se satisfazer a condição da Equação 31:

$$b \geq CAD / (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \quad (\text{MARINHO, 2019}) \quad (31)$$

A disponibilidade total de água (DTA) é definida pela Equação 32:

$$DTA = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \quad (32)$$

Portanto, a Equação 31, pode ser escrita da seguinte forma:

$$b \geq CAD / DTA \quad (33)$$

Dados experimentais de Benson (2004 *apud* MARINHO, 2019) sugerem que a percolação ocorre quando o teor de umidade é 70% da capacidade de campo, portanto, portanto:

$$b \geq \frac{P}{0,7 CR} \quad (\text{MARINHO, 2019}) \quad (34)$$

Essa estimativa da espessura da camada serve para avaliar a viabilidade da camada para determinado local e é um ponto de partida para estudos mais detalhados. O passo a passo desse processo também foi proposto pelo ITRC (2003) e será descrito brevemente a seguir:

- a) Determinar a disponibilidade total de água (DTA): a DTA é a diferença entre θ_{cc} e θ_{pmp} , onde θ_{cc} representa a umidade onde ocorre drenagem para qualquer água adicional e θ_{pmp} representa o limite onde a evapotranspiração cessa.
- b) Determinar a quantidade de água necessária ser armazenada (AS_{nec}) nos períodos onde a precipitação excede a evapotranspiração;
- c) Determinar a espessura de camada necessária (H_{nec}) para armazenar toda água infiltrada. A espessura é obtida dividindo o armazenamento necessário (AS_{nec}) correspondente ao período pela DTA. Portanto, $H_{nec} = AS_{nec} / DTA$.

2.14 LOCAL DE ESTUDO – CÉLULA EXPERIMENTAL DO ATERRO DA MURIBECA

A célula Experimental do Aterro da Muribeca fica localizada na região metropolitana do Recife, no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

O clima da região é do tipo tropical costeiro com predomínio de chuvas de monções. De acordo com a classificação Koppen, o clima é do tipo AS', clima quente e húmido, com forte incidência de ventos alísios de nordeste.

A região possui evapotranspiração média mensal variando de 120,0 mm a 171,7 mm, a evapotranspiração anual total é de 1785,2 mm. A precipitação média

mensal varia de 55,2 mm a 395,1 mm, e a precipitação anual total é de 2.263,4 mm, com excedente hídrico acumulado anual de cerca de 478,20 mm.

O local possui temperatura média anual de 25,9 °C, média das temperaturas mínimas de 22,3 °C e média das temperaturas máximas de 29,5 °C. A umidade relativa do ar média é de 78,3% e a intensidade dos ventos varia de 2,6 m/s a 3,3 m/s, com velocidades máximas médias nos meses de setembro.

Essa célula experimental foi dimensionada por Jucá & Maciel (2006), possui dimensões de 65m de largura, 85m de comprimento e 9 m de altura e um volume total de resíduos de 38.000 m³. A construção da célula experimental iniciou-se em 2006, mas somente em fevereiro de 2008 a camada de cobertura foi implantada. A camada de cobertura e suas bermas foram compactadas com trator de esteira 150 HP, sem controle de compactação ou de umidade. Foram executadas quatro configurações de camadas distintas, sendo duas configurações de camadas oxidativas, uma camada convencional e uma barreira capilar (D'ÂNGELO, 2016).

A Figura 41 mostra a foto aérea da Célula Experimental do Aterro da Muribeca

Figura 41 - Célula experimental do Aterro da Muribeca



Fonte: (Lopes, 2011)

A Tabela 12 mostra os dados de caracterização do material das quatro camadas estudadas: camada convencional (CONV), camada metanotrófica (proporção 1:1 em volume) (MET01), camada metanotrófica (proporção 3:1 em volume) (MET02) e

barreira capilar (BAC). Esse trabalho foi desenvolvido sobre a camada convencional (CONV) com área de 534,8 m² e a camada oxidativa (MET01) com área de 298,1 m².

Tabela 12 - Propriedade dos solos das camadas da Célula Experimental

Análise		CONV	MET 01	MET 02	BAR	PRODUTO COMPOSTADO	
Ensaio de laboratório	Granulometria	% argila	29	23	27	25	0
		% silte	23	29	25	24	1
		% areia fina	8	10	15	15	12
		% areia média	20	15	12	19	32
		% areia grossa	19	16	16	15	31
		% pedregulho	1	7	5	2	24
		% < 0,0075 mm	53	54	55	55	1
	Limites de consistência	LL (%)	42	52	50	43	-
		LP (%)	29	39	33	31	-
		IP (%)	13	12	17	13	-
	γ _d max (kN/m ³)		16,1	23	14,6	16,6	-
	θ (%)		19,9	22,9	18,4	19	-
	Peso específico dos grãos (kN/m ³)		26,2	24,5	25,3	26,3	-
	K _{sat} (m/s)		1,5 x 10 ⁻⁹	2,8 x 10 ⁻⁶	9,2 x 10 ⁻⁵	4,4 x 10 ⁻⁸	-
	K _{ar} (m/s)		4,0 x 10 ⁻⁸	2,3 x 10 ⁻⁵	3,2 x 10 ⁻⁷	2,2 x 10 ⁻⁷	-
θ _{cc} (%)		22,2	28,7	24	20,4	-	
Classificação no sistema Unificado		ML	MH	MH	ML	-	
Ensaio de campo	γ _d méd (kN/m ³)		15,1	12,3	13,5	14,9	5,9
	Porosidade média (n)		0,43	0,52	0,49	0,43	-
	Grau de compactação <i>in situ</i>		93,6	95,4	93,4	90,6	-

θ_{cc} = Umidade de capacidade de campo; CH = argila de alta plasticidade; ML = silte de baixa plasticidade; MH = silte de alta plasticidade; CL = argila de baixa plasticidade.

Fonte: (Lopes, 2011)

A vegetação utilizada nas camadas de cobertura é composta por gramíneas e vegetação nativa. A camada oxidativa desenvolveu vegetação, no entanto a camada convencional tinha cobertura vegetal apenas em uma porção da área próxima à camada oxidativa.

A declividade transversal da célula foi de 0,5% e a longitudinal foi de 1,5% para facilitar o escoamento das águas superficiais. Foram construídas também canaletas de concreto de 30 cm de diâmetro na parte central do platô superior.

Foi utilizado o mesmo solo nas quatro camadas. A camada convencional é composta por uma camada de solo compactado de 70cm de espessura, as camadas oxidativas são compostas por uma camada superior composta por uma mistura de

solo e matéria orgânica estabilizada na proporção de 1:1 e 3:1 com 30 cm de espessura acima de uma camada de solo compactado de 30 cm de espessura, e a barreira capilar é composta por uma camada superior de solo de 50 cm de espessura e uma camada de brita na parte inferior com 20 cm de espessura.

Lopes (2011) instalou infiltrômetros com mesmo material da cobertura. O infiltrômetro foi construído em ferro galvanizado com 2 mm de espessura e capacidade para 18 l. Para as camadas metanotróficas e convencionais o infiltrômetro tinha uma área de 0,3364 m² com alturas distintas de 5 cm e 45 cm. As medições eram feitas diariamente exceto nos sábados e domingos com auxílio de provetas. A altura de água infiltrada foi determinada dividindo-se o volume de água pela área do infiltrômetro. Os dados de infiltração medidos em campo para as duas camadas estudadas estão expressos na Tabela 13:

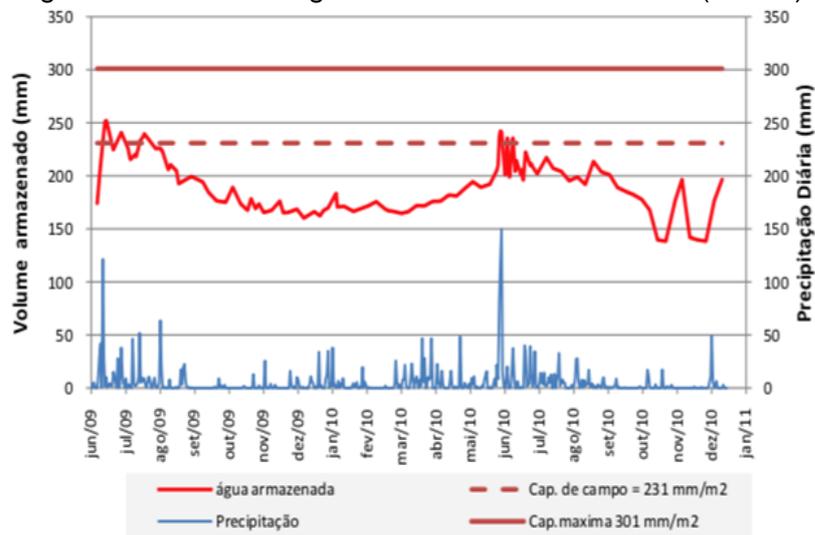
Tabela 13 - Infiltração medida nos infiltrômetros das camadas convencional e oxidativa

Infiltração no infiltrômetro (mm)		
	Camada Convencional	Camada oxidativa
Junho/2009	43,98	114,19
Julho/2009	0,25	50,71
Agosto/2009	0,00	48,84
setembro/2009	0,00	0,02
outubro/2009	0,00	0,29
novembro/2009	0,00	0,34
dezembro/2009	0,00	0,47
janeiro/2010	0,00	0,22
fevereiro/2010	0,00	0,21
março/2010	0,00	0,73
abril/2010	0,00	2,38
maio/2010	0,00	2,38
junho/2010	0,35	23,03
julho/2010	0,00	0,00
agosto/2010	0,00	0,00
setembro/2010	0,00	0,00
outubro/2010	0,00	0,31
novembro/2010	0,00	0,11
dezembro/2010	0,00	0,00

Fonte: (Lopes, 2011)

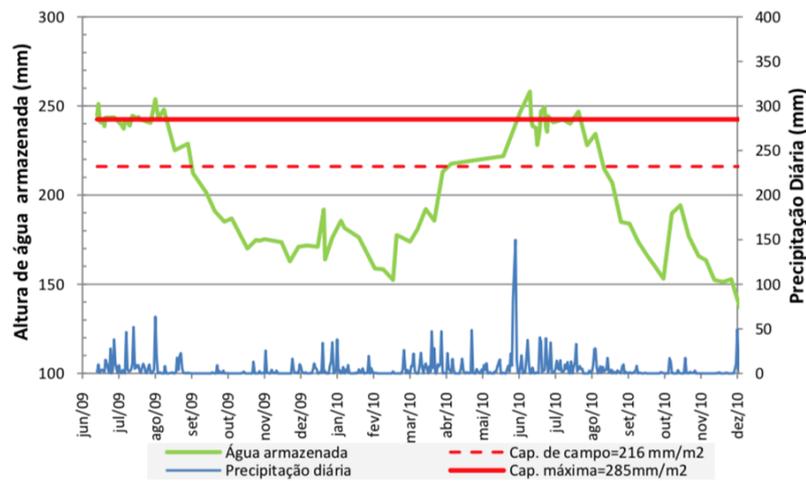
A autora também instalou sensores de umidade ao longo do perfil das camadas nas profundidades de 0,20m, 0,40m e 0,60m. A determinação da umidade do solo foi feita a partir das umidades medidas pelos sensores durante o período monitorado. As Figuras 42 e 43 mostram a variação de altura de água nas camadas convencional e oxidativa, respectivamente:

Figura 42 - Altura de água na camada convencional (CONV)



Fonte: (Lopes, 2011)

Figura 43 – Altura de água na camada oxidativa (MET01)



Fonte: (Lopes, 2011)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

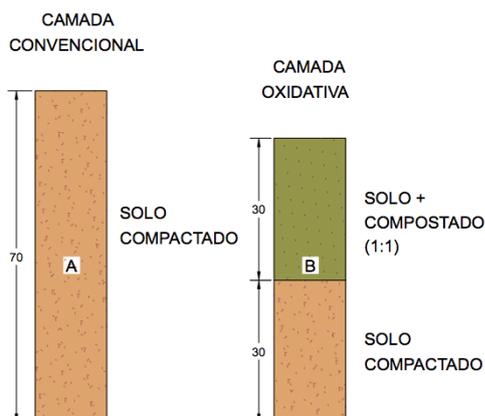
Este capítulo descreve o roteiro cálculo da estimativa da espessura de dois tipos de camadas de cobertura e os procedimentos adotados.

O estudo foi realizado para uma camada convencional e uma camada oxidativa da Célula Experimental do Aterro da Muribeca que fica localizado no município de Jaboatão dos Guararapes-PE. Foi utilizada uma planilha em Excel baseada na planilha proposta por Koerner & Daniel (1997) onde foi aplicado o Método do Balanço Hídrico adaptado de Thornthwaite & Mather (1955) que foi simplificado por Mendonça (1958) e melhorado por Pereira (2005). Os parâmetros de entrada da planilha são dados secundários, provenientes da estação meteorológica mais próxima e de estudos prévios nas camadas estudadas. Foi realizado um ajuste do modelo através de uma análise comparativa entre os resultados calculados através do método e os dados experimentais de infiltração e umidade medidos em campo por Lopes (2011). Foi feita uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada, e por fim, foi proposto um método simples e didático para estimar a espessura da camada baseada nos princípios de armazenamento de água pelo solo.

3.1 GEOMETRIA DAS CAMADAS

O cálculo do balanço hídrico foi feito para uma camada de cobertura já existente, portanto os dados geométricos das camadas correspondem às medidas das camadas executadas em campo. As camadas estudadas foram a camada convencional (CONV) e a camada oxidativa na proporção de 1:1 em volume (MET01) da célula experimental monitorada em campo por Lopes (2011). A Figura 44 mostra o desenho esquemático das duas camadas:

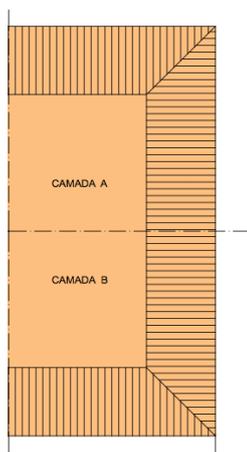
Figura 44 - Esquema das coberturas estudadas (a) camada convencional, (b) Camada oxidativa 1:1



Fonte: (Figura do Autor, adaptada de Lopes, 2011)

- Perfil A (Camada Convencional): camada composta por 70 cm de solo compactado;
- Perfil B (Camada Oxidativa ou Metanotrófica): camada composta por 30 cm de solo + material compostado na proporção 1:1 (em volume) sobreposta a uma camada de 30 cm de solo compactado.

A Figura 45 mostra a vista superior esquemática das duas camadas estudadas:
Figura 45 - Geometria das camadas estudadas



Fonte: (Figura do Autor, baseada em Lopes, 2011)

A área de contribuição para os processos de infiltração e evapotranspiração para a camada convencional) é de 534,8 m² e camada oxidativa é de 298,1 m².

Nesse estudo, as áreas de contribuição para infiltração correspondem ao platô da célula, não foram incluídas as áreas dos taludes laterais. A inclinação da camada refere-se ao sentido longitudinal da área do platô das camadas em campo e a

profundidade das raízes é considerada como a espessura da camada que corresponde à média das espessuras das camadas em campo. A Tabela 14 mostra os principais parâmetros adotados para cálculo das vazões de lixiviado das camadas de cobertura estudadas.

Tabela 14 - Características geométricas das coberturas estudadas

Parâmetros	Camada	
	Convencional	Oxidativa
Inclinação - i (mm/mm)	0,015	0,015
Área da célula - A (m ²)	534,8	298,1
Espessura total da camada - Hcamada (m)	0,7	0,6

Fonte: (Lopes, 2011)

3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS

As propriedades físico-hídricas foram encontradas na literatura. Foram utilizados os dados de caracterização dos solos disponíveis em Lopes (2011). Os valores de densidade específica média, porosidade média e grau de compactação *in situ* estão expressos na Tabela 15

Tabela 15 - Propriedades dos solos das camadas estudadas

Análise		Barreira resistiva (camada convencional)	Barreira oxidativa (camada oxidativa) 1:1 em volume	Produto compostado
Ensaio de laboratório	θ (%)	19,9	22,9	-
Classificação no sistema Unificado		ML	MH	-
Ensaio de campo	γ_d méd (kN/m ³)	15,1	12,3	5,9
	Porosidade média (n)	0,43	0,52	-
	Grau de compactação <i>in situ</i> (%)	93,6	95,4	-

θ = Umidade do solo; CH = argila de alta plasticidade; ML = silte de baixa plasticidade; MH = silte de alta plasticidade.

Fonte: (Lopes, 2011)

Os coeficientes de permeabilidade à água e ao ar das camadas estão expressos na Tabela 16:

Tabela 16 - Permeabilidade das camadas estudadas

Parâmetros	Camada	
	Convencional	Oxidativa
Coeficiente de Permeabilidade à água - K_a (m/s)	$1,5 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-6}$
Coeficiente de Permeabilidade ao ar - K_{ar} (m/s)	$4,0 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-5}$

Fonte: (Lopes, 2011)

Para aplicação do método foi indispensável calcular inicialmente os parâmetros de retenção de água do solo, tais como: umidade de capacidade de campo e ponto de murcha permanente. A umidade volumétrica de capacidade de campo foi obtida da curva característica de retenção de água teórica ajustada através dos parâmetros Van Genuchten modelada por D'Ângelo (2016) através do software RETC utilizando os pontos experimentais da curva característica dos solos das camadas obtida por Lopes (2011).

Os valores da umidade volumétrica de capacidade de campo também foram determinados diretamente pelo programa RETC. Já, os valores de umidade volumétrica de ponto de murcha permanente encontrados pelo programa foram zero para ambas as camadas, pois tinham poucos resultados experimentais próximos a esse ponto, não sendo possível fazer ajuste. Então, para esse estudo, esse ponto foi obtido geometricamente através da curva teórica de retenção de água para a sucção correspondente de 10.000 kPa.

Os armazenamentos de água no solo para outros valores de sucção, tais como saturação, capacidade de retenção (CR) e ponto de murcha permanente (PMP) foram obtidos multiplicando-se as respectivas umidades pela espessura da camada. A altura de água máxima na camada é igual ao produto do máximo teor de umidade volumétrica (MTUV) ou n pela espessura da camada.

A parcela de escoamento superficial não foi quantificada em campo, então, para um cálculo preliminar foram utilizados coeficientes de escoamento superficial de tabelas de referência, também extraídos da literatura. Os coeficientes de escoamento superficial utilizados para cálculo inicial foram obtidos da tabela de Rocca *et al.* (1993) (Ver Tabela 11).

3.3 DADOS CLIMATOLÓGICOS

Os dados climatológicos do local de estudo foram obtidos da estação meteorológica mais próxima ao local do aterro. A precipitação e evapotranspiração potencial foram obtidas da Estação Meteorológica Convencional do INMET – Curado (Recife), disponível no site do INMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

A estação Curado (Recife) fica localizada na latitude -8.05928° , longitude -34.959239° e altitude de 11,3 metros e à distância de 10 km da célula experimental, sendo esta referência para toda região metropolitana.

Para esse estudo foram utilizados os dados médios mensais da série histórica do ano 1981 a 2010 (normais climatológicas), os dados do ano mais úmido (ano 2000), do percentil de 95% e os dados do período onde a infiltração foi monitorada em campo (setembro/2009 a dezembro/2010).

As normais climatológicas do INMET são equivalentes à média histórica do período de 01 de janeiro de 1981 à 31 de dezembro de 2010, seguindo a conceituação e procedimentos da Organização Meteorológica Mundial (OMM), estabelecidos no documento WCDP N° 10 (INMET, 2020).

No contexto das superfícies de solo cobertas por vegetação, a evapotranspiração potencial (ETP) corresponde à máxima capacidade da água a ser perdida como vapor em uma dada condição climática por um meio contínuo de vegetação que cobre toda a superfície do solo, que se encontra na capacidade de campo ou acima desta. A evapotranspiração é determinada pelo INMET de forma indireta através do modelo empírico de Thornthwaite (1948), utilizando a Equação 35:

$$ETP = b_1 \cdot (T_m)^{a_1} \quad (35)$$

Onde,

T_m = temperatura média diária.

$a_1 = (67,5 \times 10^{-8} \times I_3) - (7,71 \times 10^{-6} \times I_2) + (0,01791 \times I) + 0,492$

$I = \sum (T_{mi}/5)$ (somatório dos doze meses do ano)

N = máxima insolação diária, função da latitude e do mês

$b_1 = (N/12)$, fator de ajuste do comprimento do dia

ETP = evapotranspiração potencial (mm/mês)

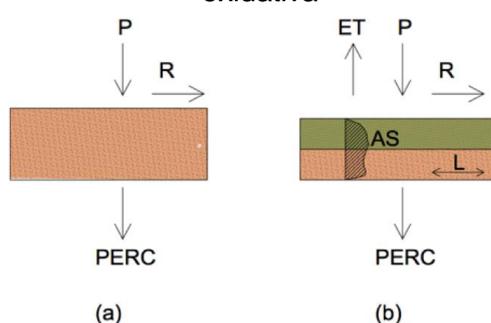
I_c = Índice de calor

Na coleta dos dados de outras variáveis como pressão atmosférica, temperatura média compensada, umidade relativa do ar compensada e direção e intensidade dos ventos, o INMET calcula o valor diário a partir da média de três horários de observação, na falta de alguma dessas parcelas, implica a ausência do valor diário. Enquanto para as variáveis como precipitação, evaporação e insolação, os valores diários computados pelo INMET correspondem ao valor acumulado diário medidos às 12 UTC (9 horas de Brasília).

3.4 MODELO DE FLUXO DE ÁGUA

O modelo de fluxo de água é unidirecional (direção vertical) e leva em consideração a precipitação (P), escoamento superficial (R), o armazenamento de água do solo (AS), evapotranspiração real (ETR) e a percolação (PERC). O modelo não considera a parcela de vapor de água (G) e a água que fica retida na vegetação (interceptação vegetal) por possuir um valor desprezível em relação às outras componentes. A Figura 46 mostra o as componentes do balanço hídrico para cada tipo de camada:

Figura 46 – Componentes do balanço hídrico da (a) camada convencional (b) camada oxidativa



Fonte: Figura do Autor

O fluxo lateral (L) também é desprezado, pois os fluxos laterais ocorrem nas duas direções, portanto, se anulam.

3.5 MODELO DE RETENÇÃO DE ÁGUA NA CAMADA

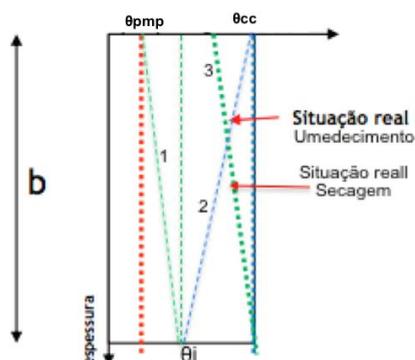
A quantificação da água retida na camada de cobertura para os potenciais mátricos que a camada está submetida ao longo do tempo (períodos secos e chuvosos) é influenciada tanto pelas condições climáticas como pelas propriedades do solo. Nesse estudo, a demanda (P-ETP) representa a disponibilidade de água no solo e a água retida na camada é calculada através da Equação 15 e 16 que dependem da umidade antecedente, do balanço de $P - ETP$ e da CAD do solo. O cálculo do armazenamento de água no solo da camada (AS) é iniciado no primeiro mês após o período chuvoso, considerando que no mês anterior o solo estava na capacidade de campo.

Esse modelo de armazenamento de água na camada considera que a camada está em condições de livre drenagem e encontra-se sempre em condições não saturadas, logo a quantidade de água máxima retida no solo para baixos valores de sucção (durante a infiltração) está condicionada à capacidade de campo (CR).

A camada pode apresentar ou não vegetação, então nas camadas com vegetação a quantidade mínima de água retida no solo está condicionada ao ponto onde cessa a evapotranspiração, ou seja, o ponto de murcha permanente da vegetação (AS_{mp}). Nos casos onde não tiver presença de vegetação, a quantidade de água mínima fica condicionada à umidade correspondente a sucção máxima para o local.

A Figura 47 mostra o modelo de variação da umidade ao longo do perfil de solo. A linha 1 representa a secagem do solo após a instalação da camada, a linha 2 representa o umedecimento da camada após sua instalação, e a linha 3 mostra a secagem do solo após atingir a sua capacidade de campo:

Figura 47 - Modelo de umidade no solo da camada de cobertura



Fonte: (Figura do Autor, baseado em Marinho, 2019)

Nesse modelo, a altura de água na camada corresponde à soma da quantidade de água armazenada no período (ΔAS) com a umidade do ponto de murcha permanente (AS_{pmp}), portanto o armazenamento máximo é equivalente à soma de CAD e PMP, ou seja, CR.

3.6 ROTEIRO DE CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA

A altura de água percolada foi calculada a partir da Equação 21. Os dados de entrada para planilha foram evapotranspiração potencial (ETP), precipitação (P), coeficiente de escoamento superficial (C), os parâmetros do solo como umidade de ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e umidade de capacidade de campo (θ_{cc}) e a porosidade (n). Também foram inseridas na planilha as características geométricas da camada como a profundidade de alcance das raízes (HR_{max}) e área de contribuição de infiltração (A) de cada camada.

A Tabela 17 mostra os dados de entrada na planilha, suas respectivas representações, unidades de medida e a sua forma de obtenção:

Tabela 17 - Dados de entrada na planilha e forma de obtenção

Dados de entrada	Sigla	Unidade	Modo de Obtenção
Precipitação pluviométrica mensal	P	mm	Estação Climatológica
Evapotranspiração potencial mensal	ETP	mm	Estação Climatológica
Coefficiente de escoamento superficial	C	adim.	Tabelado
Profundidade da zona de raízes	H _{Rmax}	m	Adotado
Área da célula	A	m ²	Adotado
Porosidade	n		Ensaio de laboratório
Umidade volumétrica de capacidade de campo	θ_{cc}	%	Curva de retenção de água/ensaio de laboratório
Umidade volumétrica de ponto de murcha permanente	θ_{pmp}	%	Curva de retenção de água

Fonte: Tabela do Autor

O cálculo do balanço hídrico foi dividido em quatro etapas: determinação da evapotranspiração potencial (ETP) e precipitação (P), cálculo do balanço de infiltração e evapotranspiração potencial (I-ETP), cálculo da evapotranspiração real (ETR) e cálculo do fluxo de percolação (Q_{PERC}).

O procedimento de cálculo das componentes obedeceu ao seguinte roteiro:

- a) Obtenção da precipitação (P);
- b) Obtenção da evapotranspiração (ETP);
- c) Obtenção do coeficiente de escoamento superficial (C);
- d) Cálculo da parcela de escoamento superficial (R): $R = P * C$;
- e) Cálculo da infiltração (I): $I = P - R$;
- f) Cálculo do balanço de infiltração e evapotranspiração potencial (I-ETP);
- g) Obtenção da umidade de capacidade de campo (θ_{cc});
- h) Obtenção da umidade de ponto de murcha permanente (θ_{pmp});
- i) Cálculo da disponibilidade total de água (DTA): $DTA \text{ (mm/m)} = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * 1000$;
- j) Determinação da profundidade da zona de alcance das raízes (H_{Rmax});
- k) Cálculo da capacidade de água disponível (CAD): $CAD \text{ (mm)} = DTA \text{ (mm/m)} * H_{Rmax} \text{ (m)}$;
- l) Cálculo da capacidade de armazenamento de água máxima do solo ($AS_{saturação}$): $AS_{saturação} = 0,01 * n \text{ (%) } * H_{Rmax}$;
- m) Cálculo da capacidade de retenção de água (CR): $CR = 0,01 * \theta_{cc} \text{ (%) } * H_{Rmax}$;

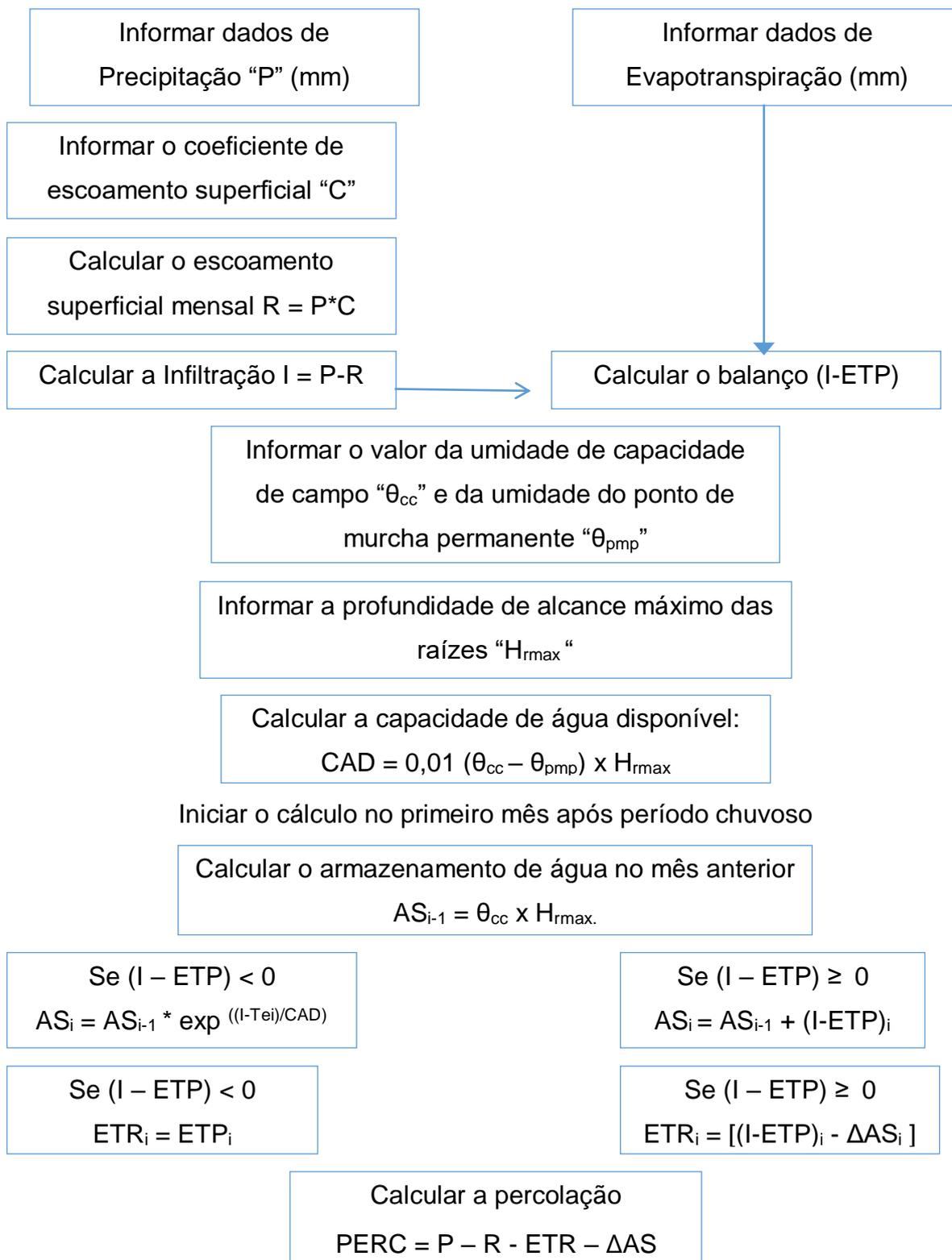
- n) Cálculo do ponto onde cessa evapotranspiração (AS_{pmp}): $AS_{pmp} = 0,01 * \theta_{pmp} (\%) * H_{Rmax}$;
- o) Determinação da água armazenada no solo (AS): calculada de acordo com o balanço (I-ETP), inicia-se no primeiro mês com (I-ETP) < 0 após o período úmido: se (I - ETP) < 0, $AS_i = AS_{i-1} * \exp^{((I-ETP_i)/CAD)}$, e se (I-ETP) ≥ 0, $AS_i = AS_{i-1} + (I-ETP)_i$;
- p) Determinação das trocas mensais de armazenamento de água no solo (ΔAS): $\Delta AS = AS_i - AS_{i-1}$, representa os ganhos (valores positivos) e perdas de água (valores negativos) do solo em função da alteração do armazenamento de água. As trocas mensais “ ΔAS ” são obtidas pela diferença entre a quantidade de água armazenada do mês atual e do mês anterior. Se $\Delta AS_i < 0$, significa a retirada de água do solo, e se $\Delta AS_i > 0$, significa a reposição de água no solo;
- q) Determinação da evapotranspiração real (ETR): se (I-ETP) ≥ 0, então $ETR_i = ETP_i$, e se (I - ETP) < 0, então $ETR_i = [(I-ETP)_i - \Delta AS_i]$;
- r) Determinação do déficit hídrico (DEF): $DEF = ETP - ETR$, quando DEF = 0 significa que o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar;
- s) Determinação do excedente hídrico (EXC): Se (I-ETP) < 0, então EXC = 0, se (I-ETP) > 0, então $EXC = P - ETR - \Delta AS$;
- t) Cálculo da percolação (PERC): se (I - ETP) < 0, PERC = 0, ou seja, toda água é armazenada no solo ou eliminada através da evapotranspiração, se (I - ETP) ≥ 0 e o solo ultrapassar sua capacidade de campo, $PERC = (I - ETR) - \Delta AS$. Na planilha em Excel foi inserida uma linha de checagem (CK), onde $CK = PERC + ETR + R + \Delta AS = P$.

De posse da altura de água percolada (PERC), determina-se a vazão de percolação através da Equação 36:

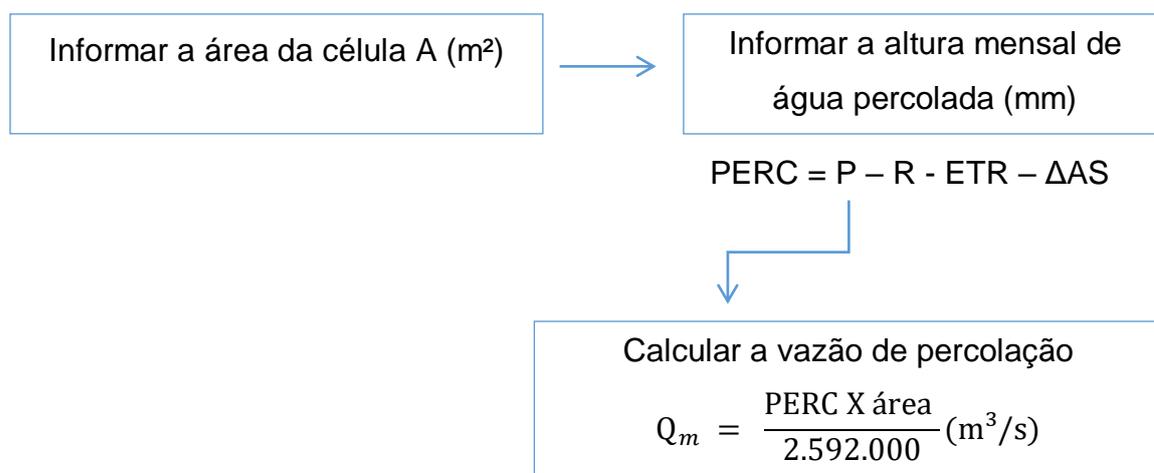
$$Q_{PERC} = \frac{PERC \times \text{área}}{2.592.000} (m^3/s) \quad (36)$$

Na cobertura oxidativa, a água retida no solo foi calculada para cada camada separadamente utilizando suas respectivas capacidades de água disponíveis (CAD), e posteriormente foram somadas.

Fluxograma do Método do Balanço Hídrico Simplificado



Fluxograma para cálculo da vazão mensal de percolação na base da camada



3.7 ROTEIRO DE CÁLCULO DA ESPESSURA DA CAMADA

O cálculo da espessura da camada de cobertura foi baseado no princípio de armazenamento de água pelo solo. A Tabela 18 mostra os dados de entrada da planilha para o cálculo da espessura da camada:

Tabela 18 - Dados de entrada para o cálculo da espessura da camada

Dados de entrada	Sigla	Unidade
Precipitação	P	mm
Infiltração	I	mm
Escoamento superficial ou "runoff"	R	mm
Evapotranspiração real	ETR	mm
Máximo teor de umidade volumétrica ou porosidade	MTUV ou n	(%)
Umidade de capacidade de Campo	θCC	(%)
Umidade de ponto de murcha permanente	θpmp	(%)

Fonte: Tabela do Autor

A espessura de solo necessária (H_{camada}) foi determinada a partir da capacidade de armazenamento de água disponível ($AS_{disponível}$) e da quantidade de água necessária a ser armazenada (AS_{nec}), como demonstrado a seguir na Equação 37:

$$H_{camada} = \frac{AS_{nec}}{AS_{disponível}} \quad (37)$$

Na camada convencional, a capacidade de armazenamento de água disponível corresponde à disponibilidade total de água do solo ($AS_{\text{disponível}} = DTA_{\text{solo}}$), então a espessura da camada foi calculada de acordo com a Equação 38:

$$H_{\text{camada}} = \frac{AS_{\text{nec}}}{DTA_{\text{solo}}} \quad (38)$$

Para fazer o cálculo da espessura de camada convencional necessária para limitar a percolação a no máximo 10% do valor da precipitação ($H_{\text{nec}10\%}$), igualou-se o AS_{nec} ao resultado de 90% da precipitação menos as parcelas de escoamento superficial e evapotranspiração real do período, como mostrado na Equação 39:

$$H_{\text{camada}} = \frac{AS_{\text{nec}}}{DTA_{\text{solo}}} = \frac{(0,9 P - R - ETR)}{DTA_{\text{solo}}} \quad (39)$$

No caso da cobertura oxidativa, como a água fica armazenada em duas camadas com propriedades distintas, foi considerada a hipótese de que a camada superior retém uma parte da água infiltrada ($AS_{\text{nec,solo}}$) e quando essa camada atinge a sua capacidade de campo, a água excedente fica retida na camada inferior ($AS_{\text{nec,solo+compostado}}$). A água só percola para massa de lixo quando as duas camadas atingem sua capacidade de campo. A espessura da camada foi calculada dividindo o armazenamento necessário (AS_{nec}) pela soma das disponibilidades de água das duas camadas ($DTA_{\text{solo}} + DTA_{\text{compostado}}$), encontrou-se uma espessura igual para duas camadas ($H_{\text{solo}} = H_{\text{solo+compostado}}$). Assim, a espessura total da camada (H_{camada}) é igual a soma dessas duas camadas de igual espessura (H), como está demonstrado a seguir nas Equações 40 a 42:

$$H_{\text{camada}} = H_{\text{solo}} + H_{\text{solo+compostado}} \quad (40)$$

$$H_{\text{solo}} = \frac{AS_{\text{nec,solo}}}{DTA_{\text{solo}}} \quad (41)$$

$$H_{\text{solo+compostado}} = \frac{AS_{\text{nec,solo+compostado}}}{DTA_{\text{solo+compostado}}} \quad (42)$$

Sabendo que $AS_{nec} = AS_{nec,solo} + AS_{nec,solo+compostado}$, então:

$$\begin{aligned} AS_{nec,solo} &= DTA_{solo} * H_{solo} \\ AS_{nec,solo+compostado} &= DTA_{solo+compostado} * H_{solo+compostado} \\ AS_{nec} &= DTA_{solo+compostado} * H_{solo+compostado} + DTA_{solo} * H_{solo} \end{aligned}$$

Fazendo $H_{solo} = H_{solo+composto} = H$

$$\begin{aligned} AS_{nec} &= DTA_{solo+compostado} * H + DTA_{solo} * H \\ AS_{nec} &= H * (DTA_{solo} + DTA_{solo+composto}) \end{aligned}$$

Então a espessura das camadas da cobertura oxidativa foi calculada de acordo com a Equação 43:

$$H = \frac{AS_{nec}}{(DTA_{solo} + DTA_{solo+composto})} \quad (43)$$

Onde, $H_{camada} = 2 * H$ (Espessura total da camada).

Para fazer o cálculo da espessura necessária das camadas da cobertura oxidativa para limitar a percolação à no máximo 10% do valor da precipitação ($H_{nec10\%}$), igualou-se o AS_{nec} ao resultado de $0,9 P - R - ETR$, como mostrado na Equação 44:

$$H_{nec10\%} = \frac{AS_{nec}}{(DTA_{solo} + DTA_{solo+composto})} = \frac{(0,9 P - R - ETR)}{(DTA_{solo} + DTA_{solo+composto})} \quad (44)$$

Então, $H_{camada} = 2 * H$ (Espessura total da camada para limitar a infiltração a no máximo 10% da precipitação).

As espessuras das camadas foram determinadas para três hipóteses:

- Hipótese 1 – a camada é dimensionada para armazenar toda a água infiltrada, ou seja, $AS_{nec} = I$;

- Hipótese 2 – a camada é dimensionada para armazenar toda a água infiltrada subtraindo a parcela de evapotranspiração real, ou seja, $AS_{nec} = (I - ETR)$;
- Hipótese 3 - a camada é dimensionada para armazenar toda a água infiltrada subtraindo a parcela de evapotranspiração real e escoamento superficial, e limitando a percolação a no máximo 10% da precipitação ($0,9 P - R - ETR$).

O balanço de infiltração e evapotranspiração refere-se à quantidade de água que realmente será armazenada no solo considerando as perdas devido à evapotranspiração real (ETR) e escoamento superficial (R).

A Tabela 19 mostra o roteiro para cálculo da espessura da camada.

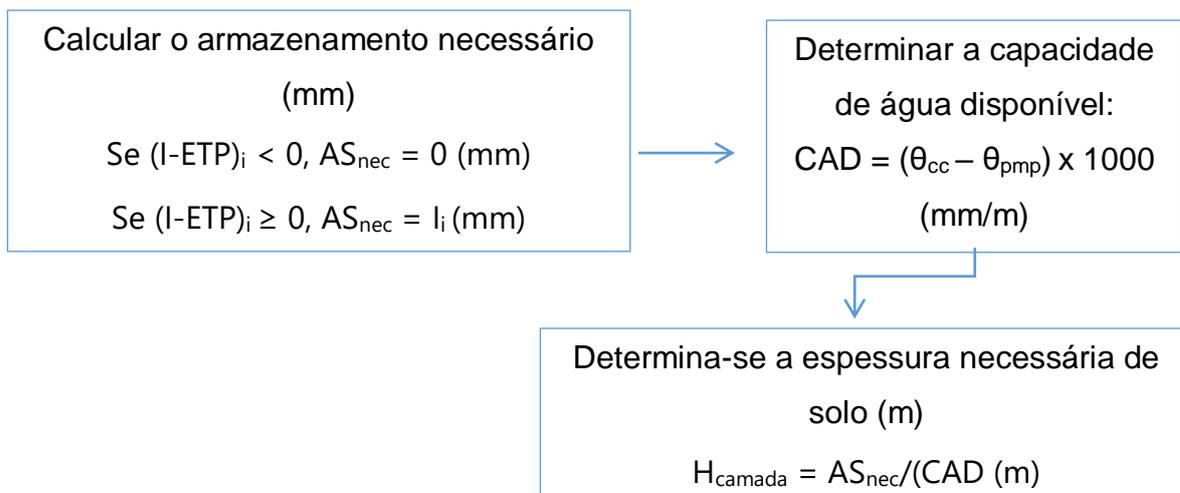
Tabela 19 - Roteiro para cálculo da espessura da camada

Parâmetro	Sigla	Unidade	Fórmula
Capacidade de água disponível	CAD	mm	$CAD = 0,01 * (\theta_{cc} - x \theta_{cc}) * Hr_{max}$
Capacidade de retenção de água	CR	mm	$CR = 0,01 * \theta_{cc} * Hr_{max}$
Altura máxima água na camada	AS sat	mm	$AS_{sat} = 0,01 * MTUV * Hr_{max}$
Altura mínima de água na camada	AS pmp	mm	$AS_{pmp} = 0,01 * \theta_{pmp} * Hr_{max}$
Armazenamento de água necessário	ASnec	mm	Hipótese 1
			Se $(I-ETP)_i < 0$, $AS_{nec} = 0$
			Se $(I-ETP)_i \geq 0$, $AS_{nec} = I$
			Hipótese 2
			Se $(I-ETP)_i < 0$, $AS_{nec} = 0$
			Se $(I-ETP)_i \geq 0$, $AS_{nec} = I - ETR$
Hipótese 3			
Se $(I-ETP)_i < 0$, $AS_{nec} = 0$			
Se $(I-ETP)_i \geq 0$, $AS_{nec} = 0,9 P - R - ETR$			
Espessura da camada	Hnec	m	$H_{nec} = AS_{nec}/DTA$

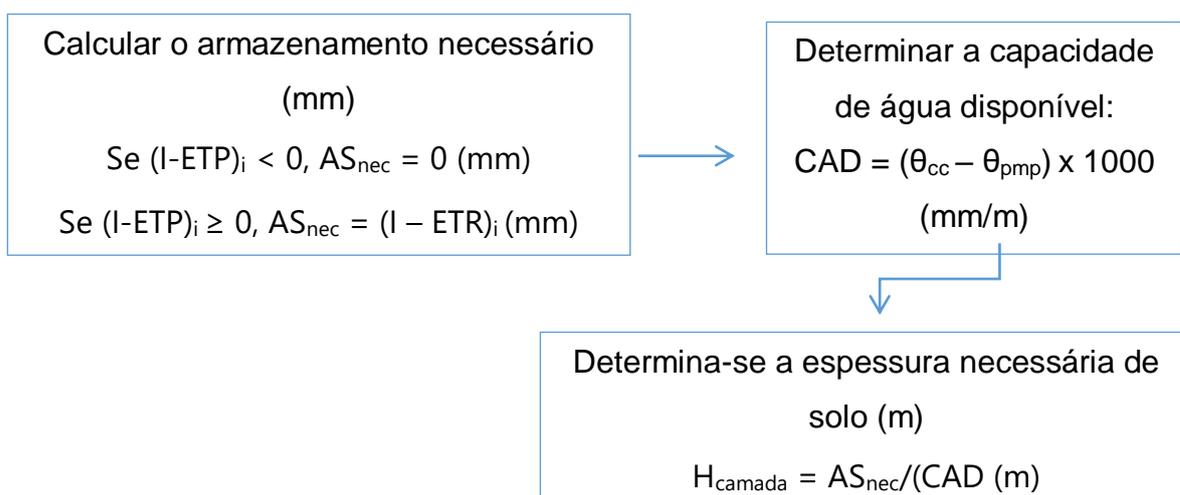
Fonte: Tabela do autor

A seguir são apresentados os fluxogramas para cálculo da espessura da camada para as três hipóteses de cálculo das camadas:

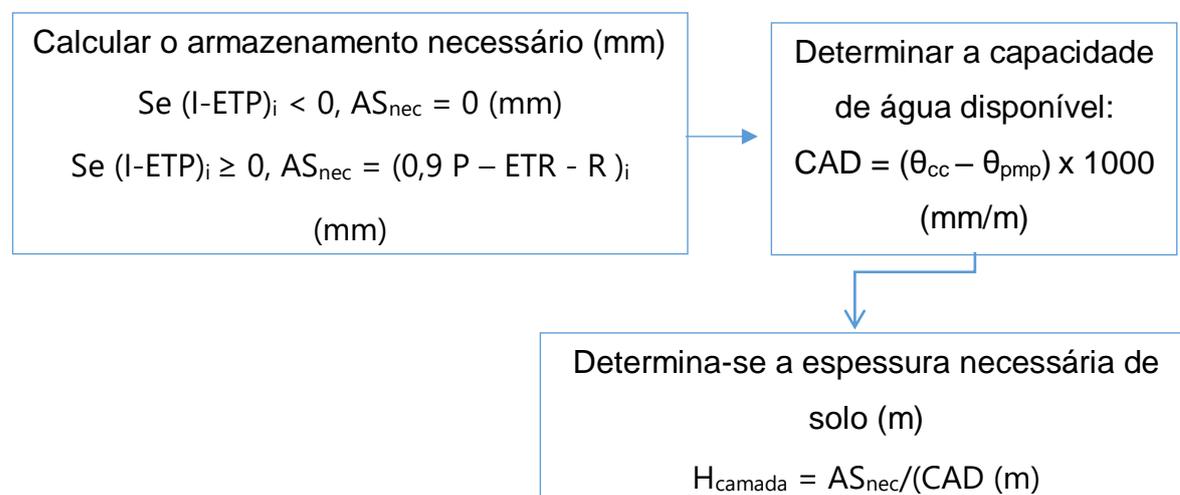
Fluxograma para cálculo espessura da camada - Hipótese 1



Fluxograma para cálculo espessura da camada - Hipótese 2



Fluxograma para cálculo espessura da camada - Hipótese 3



3.8 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS FATORES CLIMÁTICOS

O cálculo do balanço hídrico foi realizado para um ano típico, utilizando os dados de precipitação e evapotranspiração da média da série histórica de 30 anos (1981 – 2010). Para avaliar os períodos críticos para percolação de água, também foi realizado o cálculo para o ano mais úmido e para o percentil de 95% da precipitação. O percentil de 95% corresponde ao valor de precipitação que tem 95% de chance de não ser excedido. O cálculo do percentil de 95% da precipitação foi realizado utilizando a série histórica de 47 anos (1961 – 2008) do INMET. O percentil de 95% foi calculado através da Equação 45:

$$P_x = l + \left[\frac{k \frac{\sum f_i}{100} - F_{i-1}}{f} \right] hc \quad (45)$$

Onde,

l = limite inferior anterior;

f_i = frequência simples;

F_i = frequência acumulada;

hc = amplitude da classe;

x = percentil.

Para avaliar a variabilidade dos fatores climáticos a curto e a longo prazo, foram utilizados dados dos excedentes hídricos do local de estudo obtidos a partir do aplicativo disponível no site do INMET. Os excedentes hídricos anuais referem-se à série histórica de 47 anos (1961 – 2008) da estação de coordenadas de longitude - 34,982 e latitude -8,085, correspondente a Estação Curado (Recife). Para o cálculo dos excedentes hídricos anuais através do aplicativo do INMET foi considerada uma camada com 1,0 m de espessura em solo argiloso localizada na cidade de Jaboatão dos Guararapes.

3.9 CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo foi realizada utilizando dados secundários de medições de campo nas duas camadas estudadas. Os dados são provenientes do monitoramento da infiltração e umidade do solo em campo realizado por Lopes (2011).

A calibração é uma adaptação do modelo para as condições reais. Neste estudo, o procedimento de calibração ocorreu para o período de setembro de 2009 a dezembro de 2010, onde seguiu-se a metodologia citada por Beck-Broichsitter *et al.* (2018), denominada de Alternativa Zero - “Zero Alternative” (ZA). A “Alternativa Zero” não é em si uma calibração, mas uma simulação com dados observados em campo para avaliar a qualidade dos parâmetros de entrada em determinar os dados de saídas.

Os dados medidos em campo do período de junho de 2009 a dezembro de 2010 foram utilizados para calibrar o modelo e avaliar a qualidade dos parâmetros de entrada através da comparação entre os resultados do modelo e de campo. A correlação entre os dados foi calculada para verificar a validade das predições teóricas pelo método.

Para analisar a quantidade de água percolada calculada pelo modelo, foi utilizada uma ferramenta em "Data" do Excel, "What-if Analysis", impondo a condição de que a percolação de campo seja igual a percolação estimada com auxílio da função "goal seek". Foi imposta a condição de que a percolação estimada pelo modelo seja igual a infiltração medida em campo, mudando o valor do coeficiente de escoamento superficial do período. Os ajustes foram realizados apenas para os parâmetros dos últimos meses do período chuvoso, ou seja, os meses onde ocorreram infiltração expressiva de água na massa de lixo. Nos demais meses não foi possível realizar o ajuste pois os valores da percolação em ambas situações eram zero ou muito próximo de zero.

Os coeficientes de escoamento superficial foram ajustados pois foram únicos dados de entrada que não foram medidos, seja através de ensaios de laboratório ou de campo. Os valores de tabelas encontradas na literatura não levam em consideração a compactação do solo e formação de fluxos preferenciais como reforçado por Lins (2003).

Para analisar a quantidade de água retida na camada, foram comparados os dados de altura de água na camada calculado pelo modelo com a altura de água obtida através dos sensores de umidade em campo. A curva de altura de água na camada do modelo foi ajustada com a curva de campo ajustando os valores da capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo.

3.10 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Uma análise sensitiva foi realizada para analisar o efeito das mudanças da quantidade dos dados de entrada nos dados de saída. Foram analisadas as mudanças nos resultados variando parâmetros como capacidade de campo, ponto de murcha permanente, espessura da camada, precipitação e coeficiente de escoamento superficial.

4 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados encontrados no desenvolvimento desse estudo sobre a aplicação do método do balanço hídrico para dimensionar camadas de cobertura de aterros sanitários. O método do balanço hídrico foi utilizado para estimar a espessura da camada convencional e da camada oxidativa da célula Experimental do Aterro da Muribeca.

4.1 INTRODUÇÃO

Os resultados são apresentados como a seguir. Inicialmente é apresentada a sistematização dos dados do solo e dos dados climatológicos e a análise da variabilidade dos fatores climáticos na área de estudo. Em seguida, são apresentados os resultados da calibração do modelo, a análise da sensibilidade dos parâmetros de entrada, cálculo do balanço hídrico e da espessura das camadas. Por fim, é apresentada uma análise da evaporação real determinada pelo modelo e comentários sobre erros e limitações do método.

4.2 SISTEMATIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS SOLOS

As umidades de capacidade de campo das duas camadas adotadas nesse estudo foram extraídas de D'Ângelo (2016). Já, as umidades do ponto de murcha permanente foram determinadas através da curva teórica de retenção de água do solo também modeladas por D'Ângelo (2016) para sucção correspondente de 10.000 kPa.

A Tabela 20 mostra os resultados da umidade de capacidade de campo e ponto de murcha permanente das duas camadas estudadas utilizando diferentes metodologias referenciadas na literatura, tais como: ensaios de laboratório, simulação numérica através do software RETC, sucções de 10 kPa e 6 kPa para na curva característica. O PMP foi determinado para sucção de 10.000 kPa.

Tabela 20 - Parâmetros de retenção de água por diferentes metodologias disponíveis na literatura

Camada	Tipo de material	θ_{cc} (%)	θ_{cc} (%)	θ_{pmp} (%)
Referência		Lopes (2011)	Lopes (2011)	D'Ângelo (2016)
Critério/ Metodologia		Curva característica (sucção 10kPa)/ metodologia citada por Maia et al. (2005)	Ensaio de laboratório /Metodologia utilizada em Lins (2003)	Software RETC
Convencional	solo argiloso compactado	21,0%	22,2%	0,0%
Oxidativa	solo + material compostado (1:1)	28,0%	28,7%	0,0%
	solo argiloso compactado	21,0%	22,2%	0,0%

Fonte: Tabela do Autor

A Tabela 21 mostra os parâmetros de retenção da camada convencional (A) e oxidativa (B) determinados a partir da curva teórica dos solos por diferentes critérios:

Tabela 21 - Parâmetros de retenção de água determinados a partir da curva de retenção de água do solo teórica modelada por D'Ângelo (2016)

Camada	Tipo de material	θ_{cc} (%)	θ_{cc} (%)	θ_{cc} (%)	θ_{pmp} (%)
Referência		D'Ângelo (2016)	D'Ângelo (2016)	D'Ângelo (2016)	D'Ângelo (2016)
Critério/ Metodologia		Curva característica (sucção 6kPa)/ metodologia sugerida por Ferreira & Marcos (1983)	Curva característica (sucção 10kPa)/ metodologia citada por Maia et al. (2005)	Curva característica (sucção de 33 kPa)/ Metodologia citada por Ancântara (2007)	Curva característica (sucção 10.000kPa)
Convencional	solo argiloso compactado	35,0%	35,0%	35,0%	15,0%
Oxidativa	solo + material compostado (1:1)	40,0%	39,0%	37,5%	17,5%
	solo argiloso compactado	35,0%	35,0%	35,0%	15,0%

Fonte: Tabela do Autor

Nesse estudo foi utilizado a umidade de capacidade de campo obtida através do software RETC e a umidade de ponto de murcha permanente determinada através da curva característica para a sucção de 10.000 kPa. A Tabela 22 mostra os parâmetros de entrada utilizados nesse estudo:

Tabela 22 - parâmetros de entrada utilizados para cálculo do balanço hídrico na camada

Camada	Tipo de material	Espessura (mm)	θ_{cc} (%)	MTUV ou $\theta_{max = n}$ (%)	θ_{pmp} (%)
Convencional	solo argiloso compactado	700	34,0%	0,43	15,0%
Oxidativa	solo + material compostado (1:1)	300	40,0%	0,52	17,5%
	solo argiloso compactado	300	34,0%	0,43	15,0%

Fonte: Tabela do Autor

Os resultados encontrados mostram-se coerentes com valores encontrados para solos argilosos por Andrade e Stone (2011) e outros estudos envolvendo as camadas de cobertura da célula experimental do Aterro da Muribeca (COSTA, 2015; LOPES, 2011). A Tabela 23 mostra o cálculo da disponibilidade total de água (DTA) e da capacidade de água disponível (CAD) das camadas e a altura de água retida no solo para valores de sucção específicas, tais como: máximo teor de umidade volumétrica (MTUV), correspondente à umidade de ponto de murcha permanente e à capacidade de retenção de água pelo solo em condições de livre drenagem (CR):

Tabela 23 - Cálculo da retenção de água na camada

Camada	Tipo de material	DTA (mm/m)	CAD (mm)	AS sat (mm)	CR (mm)	AS pmp (mm)
Convencional	solo argiloso compactado	190	133	301	238	105
Oxidativa	solo + material compostado (1:1)	225	67,5	156	120	52,5
	solo argiloso compactado	190	57	129	102	45

Fonte: Tabela do Autor

Consultando a Tabela de Rocca et al. (1993) e considerando um solo argiloso e declividade de até 2%, encontrou-se o valor C' e de α para estação seca e chuvosa das duas camadas. Encontrou-se o valor de C multiplicando o valor de C' por " α ". A Tabela 24 mostra os coeficientes de escoamento superficial adotados para as duas camadas:

Tabela 24 - Coeficientes de escoamento superficial adotados

Estação do ano	Coeficiente de escoamento superficial		
	C'	α	$C = C' \times \alpha$
Período seco	0,4	0,43	0,172
Período úmido	0,4	0,53	0,212

Fonte: Tabela do Autor

4.3 SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS CLIMATOLÓGICOS

Os dados da evapotranspiração potencial mensal e evaporação total para série climatológica de 1981 – 2010 estão expressos na Tabela 25:

Tabela 25 - Evapotranspiração potencial média mensal e evaporação total para série climatológica de 1981 – 2010 (Evaporímetro de Piché)

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Ano
Evapotranspiração Potencial - Mensal (mm)	174,5	160,6	173,5	158,2	143,3	124,1	117,2	120,0	130,4	152,4	159,3	171,7	1785,2
Evaporação Total (Evaporímetro Piche)(mm)	160,2	133,9	127,9	96,5	87,6	82,5	88,6	107,1	133,3	160,5	169,1	174,2	1521,4

Fonte: INMET

A Tabela 26 mostra os dados evapotranspiração do período de setembro de 2008 a dezembro de 2010.

Tabela 26 - Evapotranspiração potencial (set/2008 a dez/2010)

Evapotranspiração Potencial (set/09-dez/10) (mm)					
Set/08	120,8	Ago/09	115,6	Jul/10	112,7
Out/08	147,9	Set/09	120,8	Ago/10	108,6
Nov/08	142,4	Out/09	141,5	Set/10	101,4
Dez/08	142,7	Nov/09	143,9	Out/10	140,2
Jan/09	148,5	Dez/09	141,5	Nov/10	138,6
Fev/09	104,0	Jan/10	128,0	Dez/10	146,5
Mar/09	150,2	Fev/10	132,1		
Abr/09	155,2	Mar/10	161,9		
Mai/09	147,5	Abr/10	149,6		
Jun/09	114,6	Mai/10	150,3		
Jul/09	110,9	Jun/10	133,4		

Fonte: INMET

A Tabela 27 mostra outras variáveis climáticas como temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e velocidade do vento para série histórica de 1981 – 2010.

Tabela 27 - Temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Ano
Temperatura Média Compensada - Bulbo Seco (°C)	26,90	27,10	27,10	26,50	25,70	24,70	24,10	24,20	25,10	25,90	26,60	26,90	25,90
Temperatura Máxima (°C)	30,60	30,70	30,70	30,10	29,40	28,30	27,70	27,80	28,40	29,40	30,10	30,50	29,50
Temperatura Mínima (°C)	23,00	23,20	23,10	22,90	22,30	21,70	21,10	20,90	21,50	22,20	22,70	22,90	22,30
Pressão Atmosférica ao Nível do Barômetro (hPa)	1011,3	1011,4	1011,1	1011,3	1012,4	1014,3	1015,3	1015,7	1014,8	1013,4	1012,1	1011,7	1012,9
Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa)	1012,5	1012,6	1012,3	1012,5	1013,7	1015,5	1016,6	1017,0	1016,1	1014,7	1013,3	1012,9	1014,1
Umidade Relativa do Ar (%)	74,4	75,1	77,2	81,3	83,7	84,8	84,2	81,3	77,5	74,1	72,7	73,3	78,3
Intensidade do Vento (m.s ⁻¹)	3,0	2,9	2,7	2,6	2,6	2,7	2,9	3,1	3,3	3,2	3,2	3,1	2,9

Fonte: INMET

Os dados de precipitação para média histórica de 1981- 2010 e para o período monitorado em campo (set/2008 a dez/2010) estão expressos na Tabela 28 e na Tabela 29, respectivamente:

Tabela 28 - Precipitação total mensal para série histórica de 1981-2010 (INMET)

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Ano
Precipitação (mm)	106,1	132,4	210,6	290,5	311,8	391,1	353,7	217,8	100,2	55,2	38,7	55,3	2263,4

Fonte: INMET

Tabela 29 - Precipitação total mensal (setembro de 2009 a dezembro de 2010)

Precipitação total mensal (set/09-dez/10) - P (mm)					
Set/08	47,60	Ago/09	288,40	Jul/10	267,60
Out/08	53,60	Set/09	83,30	Ago/10	191,60
Nov/08	16,00	Out/09	16,30	Set/10	72,70
Dez/08	18,30	Nov/09	49,90	Out/10	37,40
Jan/09	85,20	Dez/09	47,80	Nov/10	23,90
Fev/09	376,10	Jan/10	193,40	Dez/10	84,90
Mar/09	143,00	Fev/10	45,20		
Abr/09	343,60	Mar/10	92,70		
Mai/09	409,40	Abr/10	273,30		
Jun/09	333,00	Mai/10	114,20		
Jul/09	387,80	Jun/10	543,90		

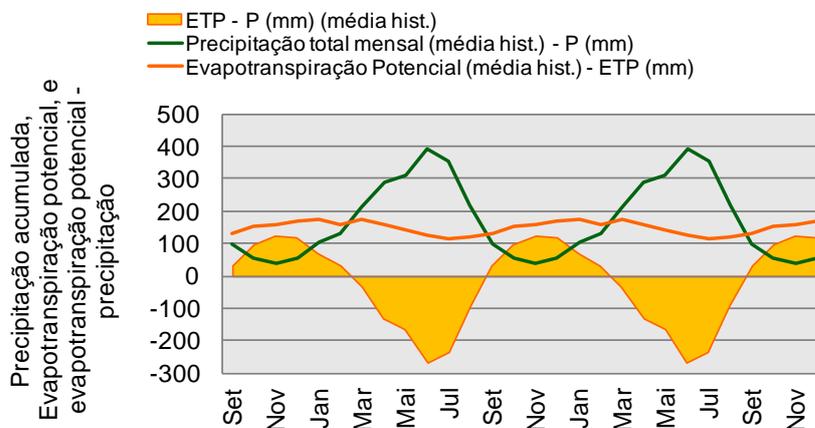
Fonte: INMET

4.4 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS FATORES CLIMATICOS

A Figura 48 mostra o gráfico do balanço de precipitação e evapotranspiração potencial para a estação Recife (Curado). Baseado nos valores médios da série histórica de 1981 a 2010, a região apresenta um excedente hídrico entre os meses de

março e agosto, e déficit hídrico entre os meses setembro a fevereiro do ano subsequente.

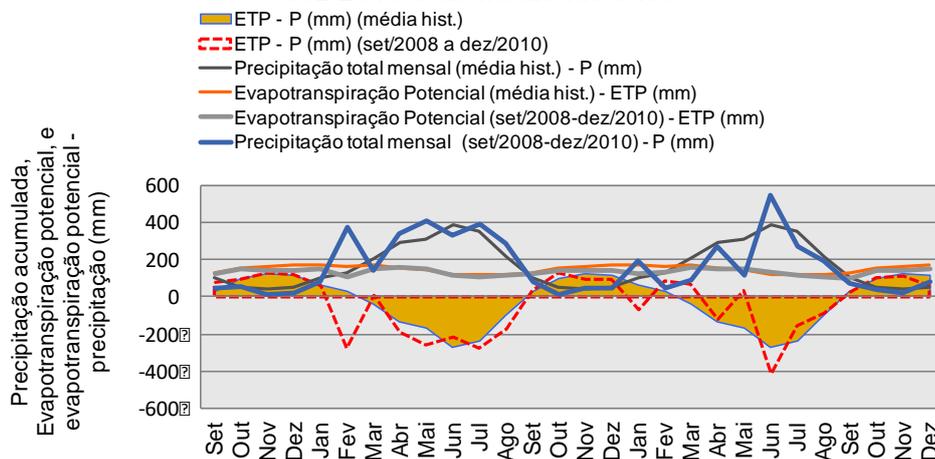
Figura 48 – Balanço de evapotranspiração e Precipitação para média histórica de 1981-2010



Fonte: Figura do Autor

A Figura 49 mostra o balanço de precipitação e evapotranspiração para o período monitorado (junho de 2009 a dezembro de 2010) comparado com o balanço da média histórica.

Figura 49 – Balanço de evapotranspiração – Precipitação para o período de set/2008 a dez/2010 e da média histórica



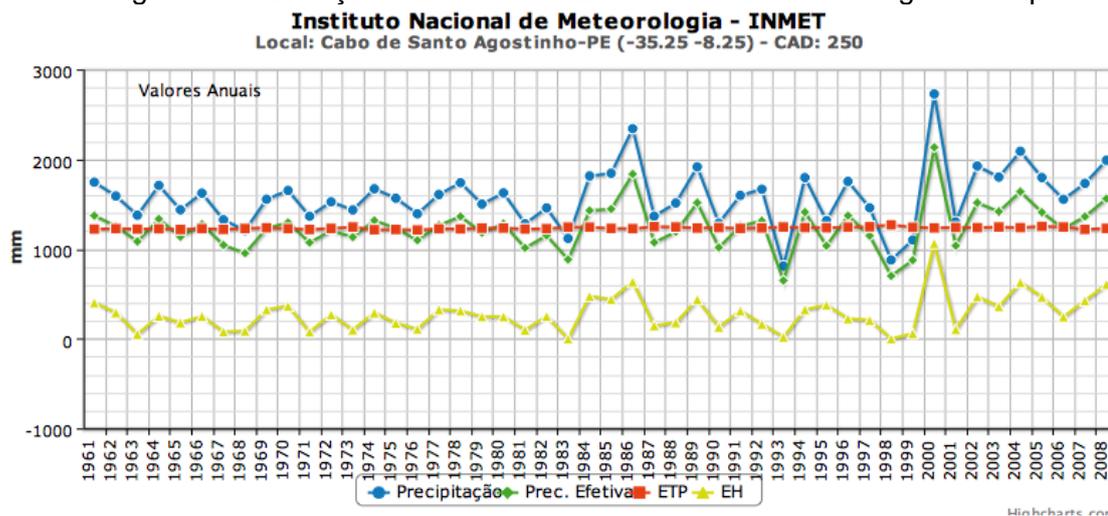
Fonte: Figura do Autor

Percebe-se que o ano de 2009 apresentou tendência e valores muito próximos da média histórica, já o ano de 2010 houve uma menor porção de excedente hídrico, apesar de apresentar um pico de precipitação maior, cerca 543 mm no mês junho.

A Figura 50 mostra a variação de excedentes hídricos de 1961 a 2008, obtidas do aplicativo do site do INMET. Observa-se que os valores máximos de excedente

hídrico ocorreram no ano 2000, com precipitação total anual de 2727,40 mm e evapotranspiração potencial de 1.236,33 mm e um excedente hídrico total de 1062,27 mm, e os valores mínimos ocorreram no ano de 1998, com precipitação total de 877,8 mm, evapotranspiração potencial de 1.236,33 mm, e um déficit hídrico total de 568 mm. A média de excedente hídrico do período foi de 228,21 mm.

Figura 50 – Variação dos valores excedentes hídricos ao longo do tempo.



A Tabela 30 mostra os valores de excedente hídrico para a série histórica do INMET - 1961 – 2008 da Estação Curado (Recife).

Tabela 30 - Variação do excedente hídrico entre os anos 1961 e 2008

ANO	P	P _{efetiva}	ETP	EH	ANO	P	P _{efetiva}	ETP	EH
2008	1989,3	1.561,61	1.230,20	607,97	1984	1813,7	1.428,87	1.243,01	474,97
2007	1731,2	1.362,02	1.219,02	424,7	1983	1118,3	882,83	1.243,42	0
2006	1552,9	1.227,28	1.244,59	243,85	1982	1458,3	1.150,48	1.226,64	250,24
2005	1.795,80	1.409,67	1.252,06	464,01	1981	1281,5	1.012,25	1.221,67	98,26
2004	2.089,20	1.639,10	1.239,42	627,05	1980	1624,7	1.280,91	1.234,22	245,92
2003	1.801,20	1.416,24	1.245,33	357,49	1979	1500,3	1.182,45	1.232,51	246,42
2002	1.925,10	1.515,17	1.239,35	469,8	1978	1739,7	1.361,96	1.223,31	310,57
2001	1300,5	1.036,82	1.240,86	104,84	1977	1607,6	1.264,96	1.224,67	324,45
2000	2727,4	2.132,72	1.236,33	1.062,27	1976	1392,9	1.097,72	1.211,07	107,85
1999	1100,6	874,81	1.241,66	58,04	1975	1566,2	1.230,51	1.217,75	173,96
1998	877,8	770,92	1.268,91	0	1974	1670,8	1.318,33	1.214,62	290,25
1997	1459	1.147,58	1.247,84	207,85	1973	1435,1	1.132,83	1.245,14	99,3
1996	1752,7	1.372,71	1.243,42	224,89	1972	1526,7	1.205,95	1.230,17	268,88
1995	1316,2	1.036,15	1.237,62	374,28	1971	1364,7	1.071,41	1.217,68	76,6
1994	1795,2	1.411,39	1.239,22	324,48	1970	1652,2	1.297,27	1.226,20	365,37
1993	809,3	648,85	1.244,85	19,76	1969	1554,4	1.229,90	1.237,51	324,18
1992	1665,4	1.314,77	1.235,41	164,14	1968	1207,2	952,48	1.227,41	86,27
1991	1597,2	1.254,87	1.229,80	310,93	1967	1325,1	1.044,22	1.219,33	77,85
1990	1289,6	1.017,20	1.238,72	129,47	1966	1621,9	1.275,15	1.227,19	250,51
1989	1916,3	1.515,71	1.234,95	437,95	1965	1436,5	1.136,65	1.217,42	179,31
1988	1512,9	1.191,90	1.244,23	179,69	1964	1708,2	1.334,54	1.224,78	253,5
1987	1366,9	1.073,40	1.249,80	146,28	1963	1377,7	1.084,40	1.221,73	50,59
1986	2342,2	1.834,78	1.226,05	635,46	1962	1590,8	1.256,05	1.226,88	291,4
1985	1843,9	1.445,61	1.229,64	438,73	1961	1744,5	1.371,84	1.221,99	401,69
MÉDIA					228,21				

Fonte: Dados do INMET

As tabelas dos dados de precipitação em ordem cronológica para cálculo do percentil de 95% (P_{95}) estão expressas no Apêndice A. O Apêndice B contém os valores de precipitação em ordem crescente. As faixas de precipitações com suas respectivas frequências simples e acumuladas estão expressas no Apêndice C.

Para o cálculo do percentil de 95%, calculou-se primeiramente termo da equação $k \frac{\sum fi}{100} = 45,6$, e substituiu-se os valores da seqüência para os valores correspondentes ao termo, obtendo-se: $P_{95} = 2.061,0 \text{ mm}$. O valor do percentil de 95%, portanto, corresponde ao valor da precipitação imediatamente superior, ou seja, $P_{95} = 2.089,20 \text{ mm}$, valor equivalente ao ano de 2004. Os valores de precipitação que excedem o percentil de 95% estão expressos na Tabela 31:

Tabela 31 - Valores de precipitação superiores ao percentil de 95%

ANO	P	P _{efetiva}	ETP	EH
2004	2.089,20	1.639,10	1239,42	627,05
1986	2342,2	1834,78	1226,05	635,46
2000	2727,4	2132,72	1236,33	1.062,27

Fonte: Tabela do Autor, dados do INMET

4.5 CAMADA CONVENCIONAL

Para iniciar o cálculo do balanço hídrico da camada convencional foi necessário inserir alguns dados de entrada. A Tabela 32 mostra os parâmetros de entrada para cálculo do balanço hídrico da camada convencional.

Tabela 32 - Parâmetros de entrada da camada convencional

Parâmetros de entrada		Valor
Escoamento superficial	C'	0,40
	α (período seco)	0,43
	α (período úmido)	0,53
Retenção de água	θ_{pmp} (%)	15,00%
	θ_{cc} (%)	34,00%
Geometria da célula	HRmax (mm)	700,00
	Área da célula A (m ²)	534,80

Fonte: Tabela do Autor

4.5.1 Cálculo do balanço hídrico para período monitorado

Inicialmente foi calculado o balanço hídrico para o período monitorado. O cálculo foi iniciado no mês de setembro de 2009, primeiro mês após a estação chuvosa, onde foi considerado que o solo atingiu a sua capacidade de campo. Portanto, o solo encontra-se com sua capacidade de água disponível esgotada, ou seja, o armazenamento de água no solo é igual a CAD, que no caso da camada convencional é de 133 mm. A Tabela 33 mostra o cálculo do balanço hídrico para o período de setembro de 2008 a dezembro de 2010 da camada de cobertura convencional utilizando a equação de Pereira-Mendonça (2005) baseada no Método de Thornthwaite e Mather (1957).

Tabela 33 - Cálculo do balanço hídrico da camada convencional para período monitorado

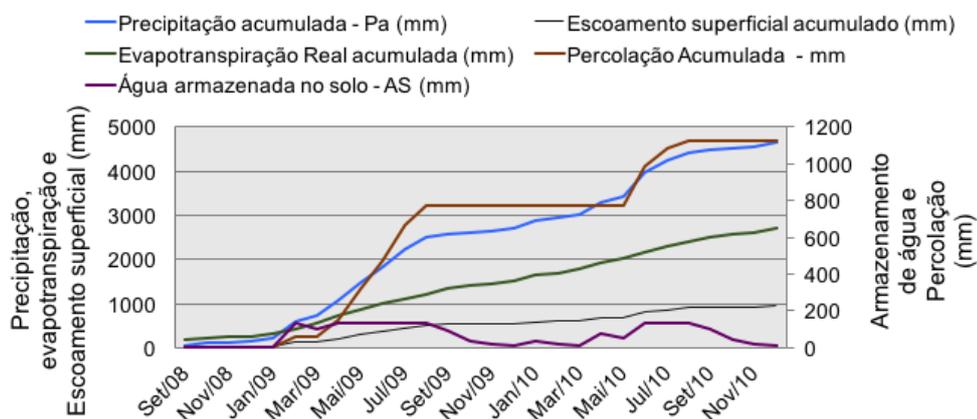
BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO															
Mês	Set/08	Out/08	Nov/08	Dez/09	Jan/09	Fev/09	Mar/09	Abr/09	Mai/09	Jun/09	Jul/09	Ago/09	Set/09	Out/09	
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL															
1 Evapotranspiração Potencial (set/2008-1 dez/2010) - ETP (mm)	120,80	147,90	142,40	142,70	148,50	104,00	150,20	155,20	147,50	114,60	110,90	115,60	120,80	141,50	
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	120,80	268,70	411,10	553,80	702,30	806,30	956,50	1111,70	1259,20	1373,80	1484,70	1600,30	1721,10	1862,60	
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO															
3 Precipitação total mensal (set/2008-3 dez/2010) - P (mm)	47,60	53,60	16,00	18,30	85,20	376,10	143,00	343,60	409,40	333,00	387,80	288,40	83,30	16,30	
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	47,60	101,20	117,20	135,50	220,70	596,80	739,80	1083,40	1492,80	1825,80	2213,60	2502,00	2585,30	2601,60	
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
6 α	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,53	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	
7 C	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,17	
8 ETP - P (mm) (set/2008 a dez/2010)	73,20	94,30	126,40	124,40	63,30	-272,10	7,2	-188,40	-261,90	-218,40	-276,90	-172,80	37,50	125,20	
9 Escoamento superficial - R (mm)	8,19	9,22	2,75	3,15	14,65	79,73	24,6	72,84	86,79	70,60	82,21	61,14	14,33	2,80	
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	8,19	17,41	20,16	23,31	37,96	117,69	142,3	215,13	301,93	372,52	454,74	515,88	530,20	533,01	
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	39,41	44,38	13,25	15,15	70,55	296,37	118,4	270,76	322,61	282,40	305,59	227,26	68,97	13,50	
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-81,39	-103,52	-129,15	-127,55	-77,95	192,37	-31,8	115,56	175,11	147,80	194,69	111,66	-51,83	-128,00	
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)															
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	5,37	2,47	0,93	0,36	0,20	133,00	104,72	133,00	133,00	133,00	133,00	133,00	133,00	90,08	34,41
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	5,37	7,84	8,77	9,13	9,33	142,33	247,05	380,05	513,05	646,05	779,05	912,05	1002,12	1036,53	
16 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-133,93	-2,90	-1,53	-0,58	-0,16	132,80	-28,28	28,28	0,00	0,00	0,00	0,00	-42,92	-55,67	
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	173,34	47,29	14,78	15,73	70,70	104,00	146,68	155,20	147,50	114,60	110,90	115,60	111,90	69,17	
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	173,34	220,63	235,41	251,14	321,84	425,84	572,53	727,73	875,23	989,83	1100,73	1216,33	1328,22	1397,39	
19 DEF (mm)	-52,54	100,61	127,62	126,97	77,80	0,00	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,90	72,33	
20 EXC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	139,30	0,00	160,12	261,90	218,40	276,90	172,80	0,00	0,00	
21 Reposição (mm)	173,34	47,29	14,78	15,73	70,70	236,80	146,68	183,48	147,50	114,60	110,90	115,60	111,90	69,17	
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR															
22 PERC _{est} - Set/2008 - Dez/2010 - CONV - (BHS) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,6	0,0	87,3	175,1	147,8	194,7	111,7	0,0	0,0	
23 Percolação Acumulada - mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,57	59,57	146,84	321,95	469,75	664,44	776,10	776,10	776,10	
24 Linha de checagem - CK (mm)	47,60	53,60	16,00	18,30	85,20	376,10	143,00	343,60	409,40	333,00	387,80	288,40	83,30	16,30	
25	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
26 Fluxo de percolação - Qperc (m³/s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	1,E-05	0,E+00	2,E-05	4,E-05	3,E-05	4,E-05	2,E-05	0,E+00	0,E+00	
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	15,84%	0,00%	25,40%	42,77%	44,39%	50,20%	38,72%	0,00%	0,00%	
Infiltração medida em campo - CONV (mm)										43,98	0,25	0,00	0,00	0,00	
Erro (%)										236,1%	77774,6%				
Erro absoluto (mm)										103,8	194,4	111,7	0,0	0,0	
						Período úmido			Dados de entrada				Checagem dos cálculos		
						Período seco			Dados de saída						

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO															
Mês	Nov/09	Dez/09	Jan/10	Fev/10	Mar/10	Abr/10	Mai/10	Jun/10	Jul/10	Ago/10	Set/10	Out/10	Nov/10	Dez/10	Ano
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL															
1 Evapotranspiração Potencial (set/2008-1 dez/2010) - ETP (mm)	143,90	141,50	128,00	132,10	161,90	149,60	150,30	133,40	112,70	108,60	101,40	140,20	138,60	146,50	3751,30
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	2006,50	2148,00	2276,00	2408,10	2570,00	2719,60	2869,90	3003,30	3116,00	3224,60	3326,00	3466,20	3604,80	3751,30	
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO															
3 Precipitação total mensal (set/2008-3 dez/2010) - P (mm)	49,90	47,80	193,40	45,20	92,70	273,30	114,20	543,90	267,60	191,60	72,70	37,40	23,90	84,90	4640,10
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	2651,50	2699,30	2892,70	2937,90	3030,60	3303,90	3418,10	3962,00	4229,60	4421,20	4493,90	4531,30	4555,20	4640,10	
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
6 α	0,43	0,43	0,53	0,43	0,43	0,53	0,43	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43	
7 C	0,17	0,17	0,21	0,17	0,17	0,21	0,17	0,21	0,21	0,21	0,17	0,17	0,17	0,17	
8 ETP - P (mm) (set/2008 a dez/2010)	94,00	93,70	-65,40	86,90	69,20	-123,70	36,10	-410,50	-154,90	-83,00	28,70	102,80	114,70	61,60	
9 Escoamento superficial - R (mm)	8,58	8,22	41,00	7,77	15,94	57,94	19,64	115,31	56,73	40,62	12,50	6,43	4,11	14,60	
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	541,59	549,81	590,81	598,59	614,53	672,47	692,11	807,42	864,15	904,77	917,27	923,71	927,82	942,42	
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	41,32	39,58	152,40	37,43	76,76	215,36	94,56	428,59	210,87	150,98	60,20	30,97	19,79	70,30	
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-102,58	-101,92	24,40	-94,67	-85,14	65,76	-55,74	295,19	98,17	42,38	-41,20	-109,23	-118,81	-76,20	
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)															
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	15,91	7,39	31,79	15,60	8,23	73,99	48,66	133,00	133,00	97,57	42,92	17,57	9,90	64,47	
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	1052,44	1059,83	1091,63	1107,23	1115,45	1189,44	1238,10	1371,10	1504,10	1637,10	1734,66	1777,58	1795,14	1805,05	
16 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-18,50	-8,52	24,40	-16,19	-7,38	65,76	-25,33	84,34	0,00	0,00	-35,43	-54,65	-25,35	-7,66	
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	59,81	48,09	128,00	53,62	84,13	149,60	119,89	133,40	112,70	108,60	95,63	85,62	45,14	77,96	
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	1457,20	1505,30	1633,30	1688,91	1771,04	1920,64	2040,53	2173,93	2286,63	2395,23	2490,86	2576,48	2621,62	2699,58	
19 DEF (mm)	84,09	93,41	0,00	78,48	77,77	0,00	30,41	0,00	0,00	0,00	5,77	54,58	93,46	1051,72	
20 EXC (mm)	0,00	0,00	41,00	0,00	0,00	57,94	0,00	326,16	154,90	83,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
21 Reposição (mm)	59,81	48,09	152,40	53,62	84,13	215,36	119,89	217,74	112,70	108,60	95,63	85,62	45,14	77,96	
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR															
22 PERC _{est} - Set/2008 - Dez/2010 - CONV - (BHS) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	210,8	98,2	42,4	0,0	0,0	0,0	0,0	
23 Percolação Acumulada - mm	776,10	776,10	776,10	776,10	776,10	776,10	776,10	986,9	1085,1	1127,5	1127,50	1127,50	1127,50	1127,50	
24 Linha de checagem - CK (mm)	49,90	47,80	193,40	45,20	92,70	273,30	114,20	543,90	267,60	191,60	72,70	37,40	23,90	84,90	
25	OK														
26 Fluxo de percolação - Qperc (m³/s)	0,E+00	4,E-05	2,E-05	9,E-06	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00							
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	38,77%	36,68%	22,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
Infiltração medida em campo - CONV (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Erro (%)								60142%							
Erro absoluto (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	210,5	98,2	42,4	0,0	0,0	0,0	0,0	

Fonte: Tabela do Autor

Em seguida foi calculado o balanço hídrico acumulado da camada. A Figura 51 mostra o balanço hídrico acumulado na camada convencional para período de setembro de 2008 a dezembro de 2010:

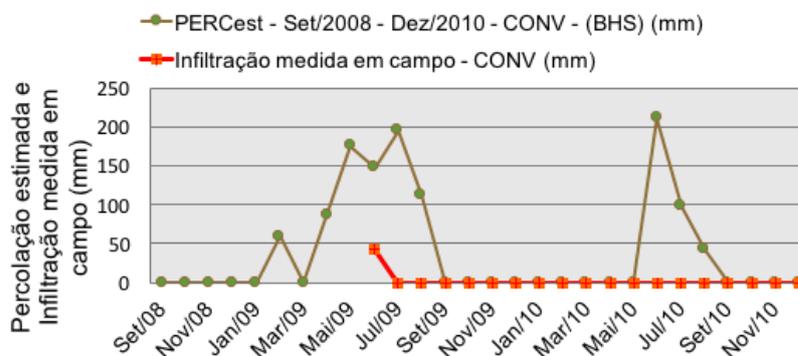
Figura 51 – Balanço Hídrico acumulado na camada convencional para o período de setembro de 2008 a dezembro de 2010



4.5.2 Calibração do modelo

Para se obter resultados mais confiáveis e verificar a qualidade dos parâmetros de entrada, o modelo foi calibrado com dados da umidade e percolação através da camada da situação real em campo. Esse processo consistiu em comparar os resultados do modelo com dados secundários provenientes de instrumentação de campo, identificando as divergências e fazendo os ajustes necessários. Inicialmente, foi feita uma comparação entre os dados de percolação através da camada estimados pelo modelo com a infiltração de água nos infiltrômetros em campo (ver os dados da infiltração medida em campo na camada convencional na Tabela 14). A Figura 52 mostra o gráfico comparativo entre os resultados estimados pelo modelo e de campo.

Figura 52 – Comparação entre percolação estimada para o período monitorado com a infiltração medida em campo



Fonte: Figura do Autor

Verifica-se que a percolação estimada através do método foi superestimada em relação aos valores de campo nos períodos chuvosos. Os erros absolutos da percolação estimada em relação a infiltração medida nos meses de junho, julho e agosto de 2009 foram de 103,8 mm, 194,4 mm e 111,7 mm, respectivamente. E nos meses de junho, julho e agosto de 2010, esses erros foram de 210,5 mm, 98,2 mm e 42,4 mm, respectivamente.

Também foi calculado o coeficiente de correlação entre as duas variáveis para o período de junho de 2009 a dezembro de 2010 e foi encontrado um valor de coeficiente de correlação $R^2 = 0,361$. O coeficiente encontrado mostra que as variáveis têm uma correlação positiva, embora não apresentem uma boa relação, pois este valor não está tão próximo ao valor 1 (um).

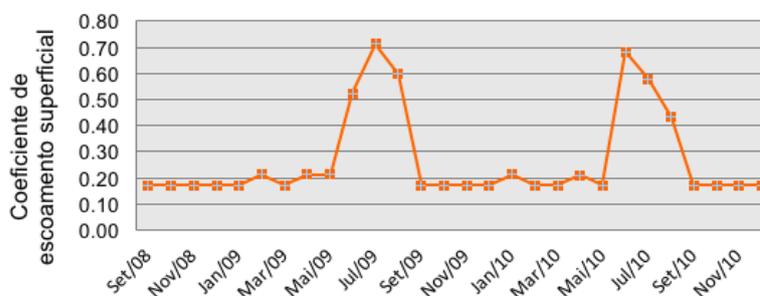
No período seco, a percolação foi praticamente zero em ambos os casos, no entanto, no período chuvoso os valores de percolação estimados pelo modelo foram bem maiores. Isso se explica pelo fato de que no período chuvoso ocorrem precipitações de maior intensidade e duração e os coeficientes de escoamento superficial utilizados não refletiram o comportamento do solo na relação entre as parcelas infiltração-escoamento superficial na situação real. De acordo com Carvalho & Silva (2006), chuvas de maior intensidade fazem com que o solo atinja rapidamente sua capacidade de infiltração gerando um excesso de chuva que escoará superficialmente. A quantidade de escoamento é proporcional a duração da precipitação, então quanto maior a duração da chuva maior a possibilidade de escoamento superficial. Outro aspecto importante é a umidade antecedente, no período chuvoso o solo já se encontra úmido devido a chuva anterior, diminuindo sua

capacidade de absorver água. Nos períodos secos, embora o solo esteja mais seco, dificultando a infiltração de água, as chuvas são de pequena intensidade e menos frequentes, fazendo com que a maior parte da água seja infiltrada no solo.

Para calcular as componentes do balanço hídrico do período monitorado foi utilizado um coeficiente de escoamento superficial (C) de uma tabela de referência encontrada na literatura que considera a estação do ano e inclinação do solo, mas não considera a intensidade e duração da precipitação, o efeito de maior ou menor compactação do solo e eventuais caminhos preferenciais. Portanto, os coeficientes de escoamento superficial adotados não refletem as condições reais da cobertura. Tendo em vista essa premissa, foi feito um ajuste desses parâmetros, fazendo com que os valores de percolação na base da camada sejam convergidos para os dados de infiltração medidos em campo. Então, foram encontrados os valores de coeficiente de escoamento superficial para estação úmida de 0,52, 0,71 e 0,60 para os meses de junho, julho e agosto de 2009, respectivamente, e de 0,68, 0,58 e 0,43 para os meses de junho, junho e agosto de 2010, respectivamente. Os meses de fevereiro, abril e maio de 2009 apresentaram percolação significativa, mas não foram ajustados, pois não tinham dados de campo para esse período. Nos demais meses não foi possível realizar ajustes, pois os valores da percolação estimada e infiltração medidos foram 0 (zero) ou muito próximos de zero.

A Figura 53 mostra a variação do coeficiente de escoamento superficial ao longo do tempo após os ajustes. Percebe-se que os valores de C sofrem um aumento no período úmido e são menores no período seco.

Figura 53 – Variação do coeficiente de escoamento superficial.

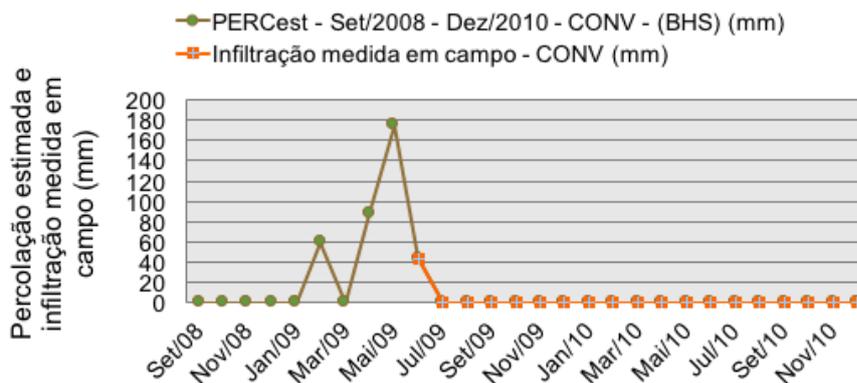


Fonte: Figura do Autor

Fazendo os ajustes nos coeficientes de escoamento superficial para os últimos meses da estação úmida (junho, julho e agosto), obteve-se um novo coeficiente de

correlação $R^2 = 1,000$. A infiltração estimada ficou totalmente ajustada aos dados medidos em campo como pode ser observado na Figura 54. Entre setembro de 2008 e julho de 2009 não foi possível calibrar o modelo pois a infiltração não foi medida para esse período.

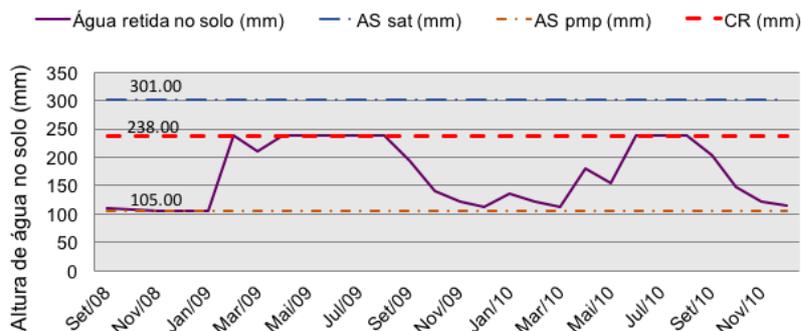
Figura 54 – Comparação da percolação calculada (modelo calibrado) com a infiltração medida



Fonte: Figura do Autor

Para verificar a qualidade dos parâmetros de retenção de água no solo (θ_{cc} e θ_{pmp}), também foi feita uma análise comparativa da variação da água armazenada na camada convencional estimada através da equação condensada de Pereira (2005) (ver Equações 15 e 16) com a água retida na camada em campo monitorada através de sensores de umidade (ver dados da altura de água na camada medidas em campo na figura 43). A Figura 55 mostra a água armazenada na camada convencional durante o período monitorado estimada através das Equações 15 e 16 baseadas no Método de Thornthwaite-Mather (1955):

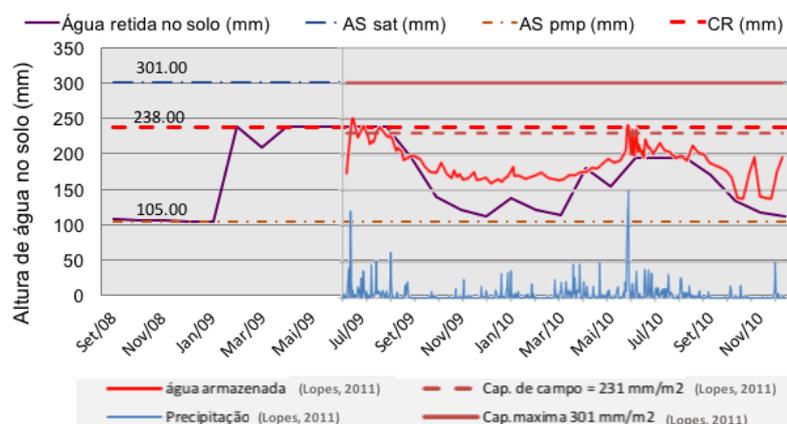
Figura 55 – Armazenamento de água na camada estimado pelo modelo



Fonte: Figura do Autor

O gráfico com a umidade medida em campo foi sobreposto ao gráfico obtido do modelo, preservando a mesma escala para que possibilite a comparação entre os resultados, como pode ser observado na Figura 56:

Figura 56 – Comparação do armazenamento de água na camada convencional previsto pelo modelo e dados de monitoramento em campo



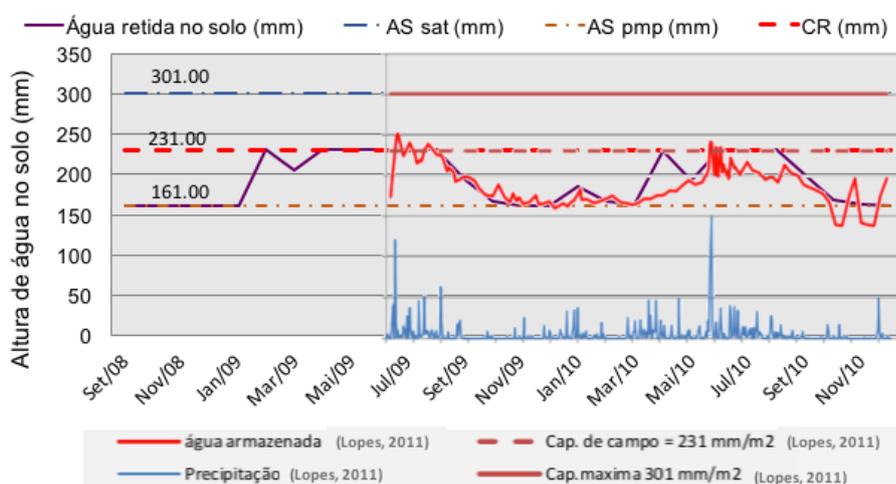
Comparando os dois resultados, verifica-se que há uma pequena diferença entre a capacidade de retenção de água do modelo ($CR = 238 \text{ mm}$) e dos dados medidos ($CR = 231$), essa diferença é justificada pelo fato do valor de θ_{cc} adotado nesse estudo ($\theta_{cc} = 34\%$) ser diferente do valor utilizado para o cálculo da altura de água retida na camada por Lopes (2011) que foi de $\theta_{cc} = 33\%$. Outra discrepância entre os dados estimados e os dados medidos é quantidade de água armazenada na camada durante a estação seca (entre setembro de 2009 e maio de 2010).

Nos resultados estimados pela equação condensada de Pereira (2005) é considerada a retirada da água do solo através da transpiração das plantas, o que não ocorreu em campo na camada convencional, pois a vegetação não se desenvolveu de forma efetiva, como foi observado por Lopes (2011) durante o monitoramento em campo. De acordo com a autora, a vegetação só se estabeleceu na camada convencional no final de 2009, e em uma área próxima a camada oxidativa (cerca de 30% da área da camada convencional).

Fazendo alguns testes na planilha, alterando os valores dos parâmetros de retenção de água (θ_{cc} e θ_{cc}), verificou-se que curva de água retida no solo movia-se para cima e para baixo de acordo com os parâmetros de retenção adotados, ou seja, alterando os limites de umidade do solo máximos (θ_{cc}) e mínimos (θ_{pmp}). Logo, a

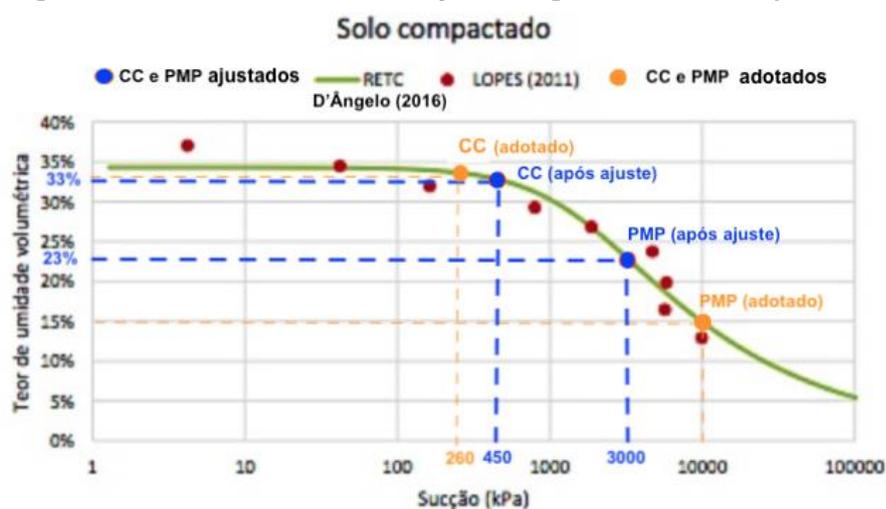
divergência entre os valores estimados e medidos pode ser ajustada reduzindo a quantidade de água disponível para os processos de evapotranspiração através do aumento θ_{pmp} e fazendo uma pequena diminuição no valor de θ_{cc} . Ao realizar o ajuste da umidade de capacidade de campo (θ_{cc}) de 34% para 33% e aumentar o valor do ponto de murcha permanente θ_{pmp} de 15% para 23%, as curvas de altura de água na camada ficaram bastante ajustadas, como pode ser observado na Figura 57:

Figura 57 – Comparação do armazenamento de água na camada estimado modelo ajustado e os dados de monitoramento da água armazenada na camada em campo para o período monitorado



A Figura 58 mostra a ilustração dos ajustes dos parâmetros de retenção de água na curva característica teórica do solo da camada convencional e seus respectivos valores de sucção:

Figura 58 – Parâmetros de retenção de água adotados e ajustados



Fonte: (Figura do Autor, adaptado de D'Ângelo, 2016)

Analisando os resultados, percebe-se que os dois principais fatores influenciaram na diferença dos resultados foram o efeito da compactação e a presença de vegetação. A compactação faz com que o solo apresente maior dificuldade em ganhar e perder água, deixando a umidade do solo mais uniforme ao longo do tempo. Por outro lado, o solo compactado dificulta o estabelecimento da vegetação. A vegetação, por sua vez, atua retirando a água do solo nos períodos de estiagem.

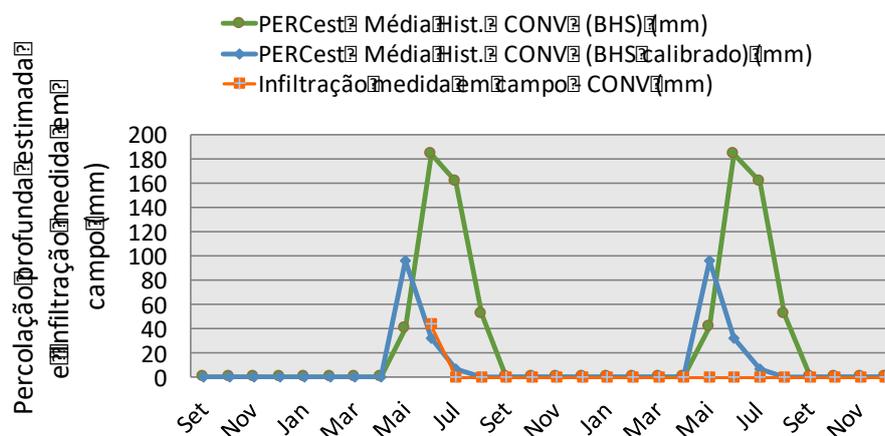
4.5.3 Cálculo do balanço hídrico da camada (modelo calibrado)

Após realizar os ajustes nos parâmetros de entrada da planilha, foi calculado o balanço hídrico da camada para o ano típico como mostrado no Apêndice D. e em seguida foi recalculado fazendo o ajuste dos valores de coeficiente de escoamento superficial dos últimos três meses do período úmido (meses com percolação significativa) e dos parâmetros de retenção de água.

Para realizar o ajuste da planilha foram utilizados os valores médios de "C" equivalentes a 0,60, 0,65 e 0,52 nos meses de junho, julho e agosto, respectivamente, e os valores de θ_{cc} de 33% e de θ_{pmp} de 23%. O cálculo do balanço hídrico para camada convencional utilizando modelo ajustado está expresso no Apêndice E.

A Figura 59 mostra a comparação entre as percolações do modelo ajustado do período monitorado, da média histórica e de campo:

Figura 59 – Comparação das percolações do ano típico e período monitorado calculados pelo modelo calibrado e infiltração medida em campo

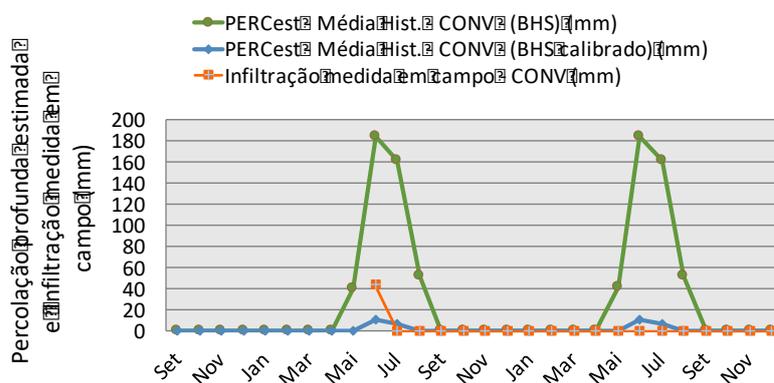


Fonte: Figura do Autor

A correlação encontrada utilizando os dados da média histórica e os dados medidos em campo foi de 0,226. Apesar de apresentar uma correlação mais baixa, os valores de percolação estimados utilizando as médias históricas foram muito próximos dos valores medidos em campo em termos de erro absoluto. Os erros absolutos foram de 11 mm e 6 mm nos meses de junho e julho de 2009 e de 102 mm, 32 mm e 6 mm para os meses de maio, junho e julho de 2010. Nos demais meses o erro absoluto foi próximo de zero. O erro maior no mês de maio se dá pelo fato das medições de campo iniciarem apenas no mês de junho de 2009 impossibilitando fazer o ajuste do valor de C para maio, e no ano seguinte, a sequência de meses com excedente hídrico foi menor, o que possibilitou fazer ajuste apenas para esses três meses.

Uma opção seria colocar o valor de C igual a 0,60 para o mês de maio de 2009 que resultaria na diminuição substancial desse erro. A planilha foi recalculada fazendo esse ajuste, como pode ser observada no Apêndice F, e o coeficiente de correlação fazendo essa modificação passa a ser de 0,638. Os erros absolutos da percolação após o ajuste são de 28 mm e 6,3 para os meses de junho e julho de 2009, e de 15,7 mm e 6,6 mm para os meses de junho e julho de 2010, respectivamente, os demais meses apresentam percolação nula em ambos os casos. A Figura 60 mostra a comparação dos valores da percolação estimada e a infiltração medida em campo para o ano típico fazendo esse ajuste no valor de C no mês de maio:

Figura 60 – Comparação entre a percolação estimada através do modelo antes e após calibração e infiltração medida na camada convencional ($C=0,60$ para mês de maio)

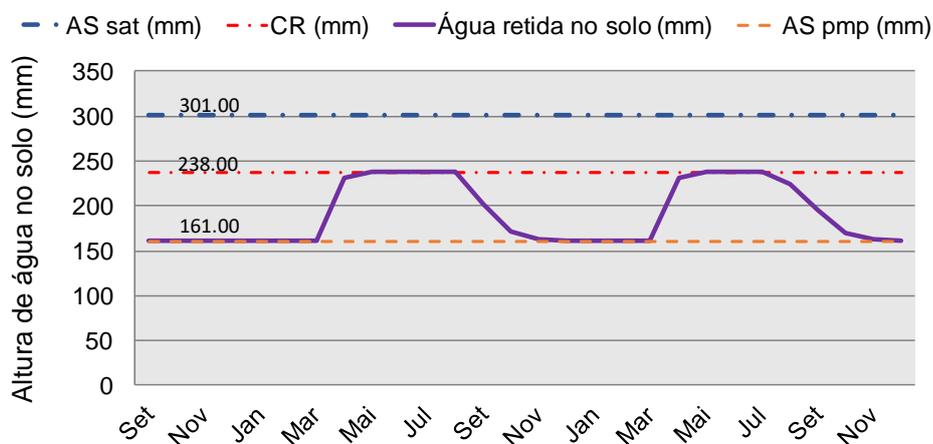


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 61 mostra o armazenamento de água na camada convencional para o ano típico utilizando modelo ajustado.

Figura 61 – Armazenamento de água (ano típico)

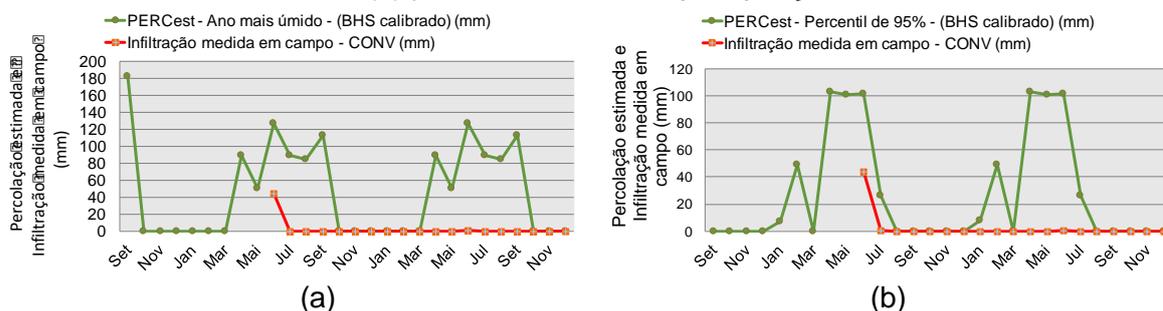


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

O cálculo do balanço hídrico da camada convencional para o ano mais úmido e o percentil de 95% da precipitação estão mostrados nos Apêndices G e H, respectivamente. A Figura 62 mostra a comparação entre os níveis de percolação medidos em campo do ano mais úmido e do percentil de 95% utilizando o modelo com parâmetros ajustados.

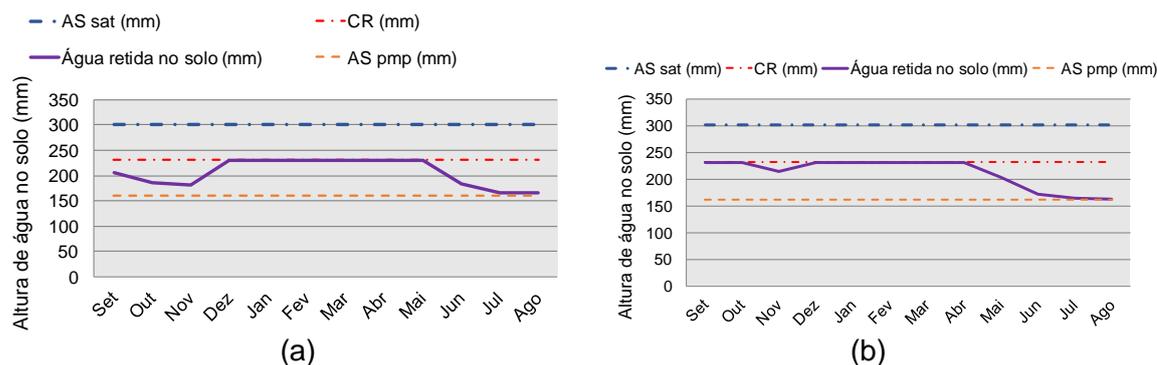
Figura 62 – Níveis de percolação na camada convencional para (a) ano mais úmido e para (b) percentil de 95% da precipitação



Fonte: O Autor (2021)
 Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 63 mostra o armazenamento de água no ano mais úmido e no percentil de 95% da precipitação da camada convencional.

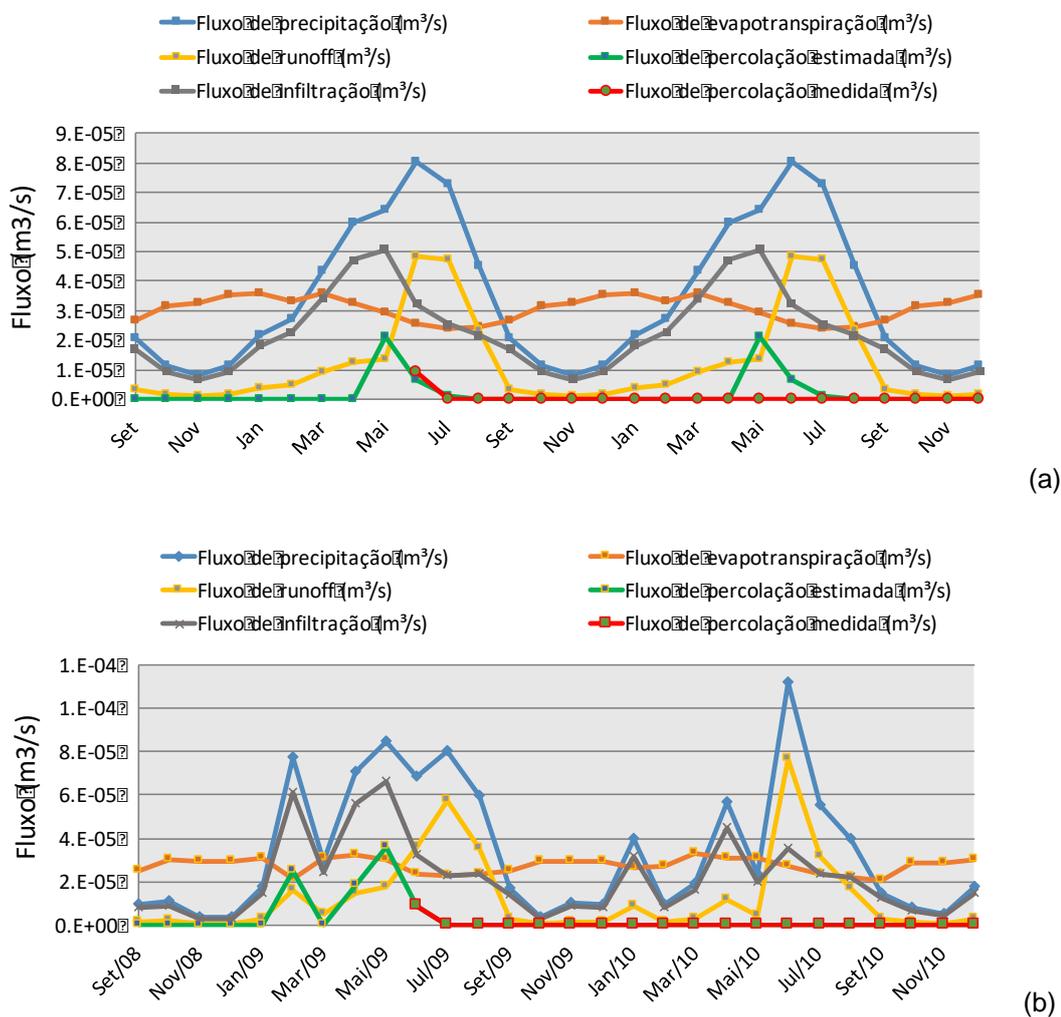
Figura 63 – Armazenamento de água na camada convencional para (a) ano mais úmido (b) percentil de 95% da precipitação



Fonte: O Autor (2021)
 Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 64 mostra o fluxo de água através da cobertura convencional dos componentes do balanço hídrico obtida através do modelo calibrado para o período monitorado e para a média histórica. Observa-se que a percolação tem uma boa correlação com a precipitação e que no início da estação chuvosa a maior parte da água infiltra na camada e no final da estação chuvosa uma maior quantidade de água esco superficialmente. Entende-se como fluxo de infiltração na camada a parcela de água que infiltra na camada de cobertura. O fluxo de percolação corresponde a parcela de água que percola através da camada para massa de lixo (medida e estimada) e o fluxo de evapotranspiração corresponde a evapotranspiração real estimada pelo modelo. O fluxo de precipitação e runoff também correspondem as parcelas do balanço hídrico estimadas pelo modelo em termos de valores mensais.

Figura 64 – Variação do fluxo de água na camada de cobertura convencional para (a) média histórica (b) período monitorado



Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

4.5.4 Cálculo da espessura da camada

A espessura da camada foi calculada para o ano típico, percentil de 95% da precipitação e para o ano mais úmido utilizando o modelo ajustado. É importante salientar que o cálculo foi realizado de forma simplificada considerando a capacidade de armazenamento de água do solo. A espessura foi calculada para a demanda de água acumulada mensal que necessita ser armazenada, sem considerar a umidade antecedente do solo. Dessa forma, a espessura de solo calculada pode estar subestimada para os últimos meses de estações úmidas mais prolongadas.

A demanda de água acumulada mensal foi calculada considerando três hipóteses: (1) a camada deve ser suficiente para armazenar toda água infiltrada (AS_{nec}

= I), (2) a camada deve ser suficiente para armazenar toda água infiltrada menos a evapotranspiração ($AS_{nec} = I - ETR$) e (3) a camada deve ser suficiente para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação ($AS_{nec} = P/10 - ETR - R$).

4.5.4.1 Cálculo da espessura da camada para ano típico

A Tabela 34 mostra o cálculo da espessura da camada para hipótese 1 ($AS_{nec} = I$), Hipótese 2 ($AS_{nec} = I - ETR$) e Hipótese 3 ($AS_{nec} = P/10 - ETR - R$), ajustando o coeficiente de escoamento superficial para $C=0,60$ em maio, $C=0,60$ em junho, $C=0,65$ em julho e $C=0,52$ em agosto – cenário 1 (Ver cálculo do balanço hídrico no Apêndice D) e ajustando o valor de θ_{cc} para 33% e de θ_{pmp} para 23%:

Tabela 34 - Cálculo da espessura de camada convencional (Ano típico) – Cenário 1

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA NECESSÁRIA													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	87,85	109,63	165,95	228,91	124,72	156,44	123,80	104,54	82,97	45,71	32,04	45,79
	Espessura da camada necessária para armazenar toda água infiltrada H_t (m)	0,88	1,10	1,66	2,29	1,25	1,56	1,24	1,05	0,83	0,46	0,32	0,46
	$Asnec/Asdisp$	0,38	0,47	0,72	0,99	0,54	0,68	0,54	0,45	0,36	0,20	0,14	0,20
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM
Hipótese 2	Armazenamento necessário $Asnec (I - ETR)$ mm	0,00	0,00	0,00	70,71	0,00	32,34	6,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura de camada necessária para armazenar a água infiltrada menos a parcela de evapotranspiração real H_{nec} (m)	0,00	0,00	0,00	0,71	0,00	0,32	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$Asnec/Asdisp$	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,14	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada subtraindo a parcela de evapotranspiração real?	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	$Asnec (0,9P - ETR - R)$	0,00	0,00	0,00	41,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação ($H_{nec10\%}$)	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$Asnec/Asdisp$	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fonte: O Autor (2021). Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Observou-se que a espessura de camada convencional adotada ($H_{camada} = 0,70m$) seria insuficiente para armazenar toda água infiltrada na maior parte dos meses do ano, entre janeiro e setembro, onde as precipitações excedem o valor de 100mm.

Considerando a hipótese 1, a espessura de camada para níveis de precipitações até 100mm seria de 1m e para precipitações até 200mm seria de 2,00

m. Para o mês de abril, onde a precipitação foi de 228,91 mm a espessura de camada necessária seria de 2,29 m.

Em relação à hipótese 2, a espessura da camada adotada mostra-se suficiente em todos os meses do ano. Apenas no mês de abril a espessura necessária calculada foi de 0,71 m, onde o valor da precipitação excedeu o valor de 200 mm. E para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação, a espessura máxima necessária foi de 42 cm. Logo, a espessura da camada convencional adotada seria suficiente para impedir a percolação para os níveis de no máximo 10% da precipitação. A Tabela 35 mostra o cálculo da espessura da camada para hipótese 1 ($AS_{nec} = I$), hipótese 2 ($AS_{nec} = I - ETR$) e Hipótese 3 ($AS_{nec} = P/10 - ETR - R$), considerando o cenário 2, onde os coeficientes de escoamento superficial: $C=0,60$ em junho, $C=0,65$ em julho e $C=0,52$ em agosto (Cálculo do balanço hídrico no Apêndice E).

Tabela 35 - Cálculo da espessura da camada convencional (ano típico) – Cenário 2

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA NECESSÁRIA													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	87,85	109,63	165,95	228,91	245,70	156,44	123,80	104,54	82,97	45,71	32,04	45,79
	Espessura da camada necessária para armazenar toda água infiltrada H_t (m)	0,88	1,10	1,66	2,29	2,46	1,56	1,24	1,05	0,83	0,46	0,32	0,46
	AS_{nec}/AS_{disp}	0,38	0,47	0,72	0,99	1,06	0,68	0,54	0,45	0,36	0,20	0,14	0,20
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM
Hipótese 2	Armazenamento necessário $AS_{nec} (I - ETR)$ mm	0,00	0,00	0,00	70,71	102,40	32,34	6,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura de camada necessária para armazenar a água infiltrada menos a parcela de evapotranspiração real H_{nec} (m)	0,00	0,00	0,00	0,71	1,02	0,32	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AS_{nec}/AS_{disp}	0,00	0,00	0,00	0,31	0,44	0,14	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltração subtraindo a parcela de evapotranspiração real?	SIM	SIM	SIM	Não	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	$AS_{nec} (0,9P - ETR - R)$	0,00	0,00	0,00	41,66	71,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação ($H_{nec}10\%$)	0,00	0,00	0,00	0,42	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AS_{nec}/AS_{disp}	0,00	0,00	0,00	0,18	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação?	SIM	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fonte: O Autor (2021). Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Observou-se que na hipótese 1 a camada deveria ter uma espessura de 2,46 m para armazenar toda água infiltrada. A camada convencional não seria suficiente para armazenar toda a água infiltrada na maior parte dos meses do ano (janeiro a setembro). Já para a hipótese 2, a camada de 0,70m seria suficiente na maior parte dos meses do ano, apenas no mês de maio a espessura mínima necessária deveria ser de 1,00m. E por fim, para limitar a percolação a no máximo 10% da infiltração, a

camada adotada de 0,70m seria suficiente atender esse critério na maior parte dos meses, apenas no mês de maio a espessura necessária seria de 0,71m.

4.5.4.2 Cálculo da espessura da camada para ano mais úmido e percentil de 95%

A Tabela 36 mostra o cálculo da espessura da camada para o ano mais úmido. A espessura máxima necessária para armazenar toda a água infiltrada foi de 2,37m, e para armazenar a água infiltrada menos a evapotranspiração, a espessura necessária foi de 1,39m. Para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação, a espessura necessária máxima foi de 1,09m.

Tabela 36 - Cálculo da espessura da camada para o ano mais úmido

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA NECESSÁRIA - ANO MAIS ÚMIDO													
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	162,01	69,88	98,97	237,27	140,82	206,00	172,10	176,45	212,84	36,93	3,81	109,06
	Espessura da camada necessária para armazenar toda água infiltrada Ht (m)	1,62	0,70	0,99	2,37	1,41	2,06	1,72	1,76	2,13	0,37	0,04	1,09
	Asnec/Asdisp	0,70	0,30	0,43	1,03	0,61	0,89	0,75	0,76	0,92	0,16	0,02	0,47
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	Não	SIM	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	Não
Hipótese 2	Armazenamento necessário Asnec (I - ETR) mm	41,09	0,00	0,00	139,45	50,75	126,32	89,50	84,31	112,77	0,00	0,00	0,00
	Espessura de camada necessária para armazenar a água infiltrada menos a parcela de evapotranspiração real Hnec (m)	0,41	0,00	0,00	1,39	0,51	1,26	0,89	0,84	1,13	0,00	0,00	0,00
	Asnec/Asdisp	0,18	0,00	0,00	0,60	0,22	0,55	0,39	0,36	0,49	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada subtraindo a parcela de evapotranspiração real?	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	Asnec (0,9P - ETR - R)	20,53	0,00	0,00	109,34	32,88	0,00	0,00	47,55	85,76	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação (Hnec10%)	0,21	0,00	0,00	1,09	0,33	0,00	0,00	0,48	0,86	0,00	0,00	0,00
	Asnec/Asdisp	0,09	0,00	0,00	0,47	0,14	0,00	0,00	0,21	0,37	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação?	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	SIM	SIM

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Tabela 37 mostra o cálculo da espessura da camada para o percentil de 95% da precipitação. A espessura de solo necessária para armazenar toda água infiltrada é de 2,19m, para armazenar toda água infiltrada menos a evapotranspiração é de 1,20 m e para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação é de 0,92 m no mês de abril.

Tabela 37 - Cálculo da espessura da camada para o percentil de 95% da precipitação

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA NECESSÁRIA - PERCENTIL DE 95%													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	198,65	160,67	94,32	218,91	189,83	180,12	107,24	43,06	65,16	23,93	16,64	17,14
	Espessura da camada necessária para armazenar toda água infiltrada Ht (m)	1,99	1,61	0,94	2,19	1,90	1,80	1,07	0,43	0,65	0,24	0,17	0,17
	Asnec/Asdisp	0,86	0,70	0,41	0,95	0,82	0,78	0,46	0,19	0,28	0,10	0,07	0,07
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 2	Armazenamento necessário Asnec (I - ETR) mm	77,36	49,48	0,00	119,60	100,64	101,08	26,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura de camada necessária para armazenar a água infiltrada menos a parcela de evapotranspiração real Hnec (m)	0,77	0,49	0,00	1,20	1,01	1,01	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Asnec/Asdisp	0,33	0,21	0,00	0,52	0,44	0,44	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para armazenar toda água infiltrada subtraindo a parcela de evapotranspiração real?	Não	SIM	SIM	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	Asnec (0,9P - ETR - R)	52,15	29,09	0,00	91,82	76,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação (Hnec10%)	0,52	0,29	0,00	0,92	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Asnec/Asdisp	0,23	0,13	0,00	0,40	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação?	SIM	SIM	SIM	Não	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

4.6 CAMADA OXIDATIVA

O cálculo do balanço hídrico da camada oxidativa foi realizado de forma similar ao da camada convencional, com exceção do armazenamento de água que foi calculado para cada camada (solo puro e solo+compostado) separadamente e posteriormente somados. O cálculo foi iniciado no mês de setembro de 2009, primeiro mês após período chuvoso, e a umidade do solo de cada camada do mês anterior foi considerada a umidade de capacidade de campo da respectiva camada.

A Tabela 38 e 39 mostram os dados de entrada na planilha das duas camadas que compõem a cobertura oxidativa. Os parâmetros do solo são dados secundários, provenientes dos estudos de Lopes (2011) e D'Ângelo (2016).

Tabela 38 - Parâmetros de entrada da camada oxidativa

Parâmetros de entrada - Solo puro compactado		Valor
Umidade volumétrica	θ_i (%)	19,90
	θ_{sat} (%)	43,0%
	θ_{pmp} (%)	15,0%
	θ_{CC} (%)	34,0%
Geometria da célula	HRmax (mm)	300,00
	Área da célula A (m ²)	298,10

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Por falta de parâmetros de escoamento superficial para as misturas de solo+matéria orgânica estabilizada foram utilizados os mesmos parâmetros da camada convencional, considerando a inclinação máxima de 2%.

Tabela 39 - Dados de entrada da mistura de solo

Parâmetros de entrada - Solo + Compostado		Valor
Escoamento superficial	C'	0,40
	α (período seco)	0,43
	α (período úmido)	0,53
Umidade volumétrica	θ_i (%)	22,9%
	θ_{sat} (%)	52,0%
	θ_{pmp} (%)	17,5%
	θ_{CC} (%)	40,0%
Geometria da célula	HRmax (mm)	300,00
	Área da célula A (m ²)	298,10

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

4.6.1 Cálculo do balanço hídrico para período monitorado

A Tabela 40 mostra o cálculo do balanço hídrico para camada de cobertura oxidativa para o período de setembro de 2008 a dezembro de 2010).

Tabela 40 - Cálculo do balanço hídrico para camada oxidativa (período monitorado)

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO														
Mês	Set/08	Out/08	Nov/08	Dez/09	Jan/09	Fev/09	Mar/09	Abr/09	Mai/09	Jun/09	Jul/09	Ago/09	Set/09	Out/09
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL														
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	120,80	147,90	142,40	142,70	148,50	104,00	150,20	155,20	147,50	114,60	110,90	115,60	120,80	141,50
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	120,80	268,70	411,10	553,80	702,30	806,30	956,50	1111,70	1259,20	1373,80	1484,70	1600,30	1721,1	1862,6
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO														
3 Precipitação total mensal- P (mm)	47,60	53,60	16,00	18,30	85,20	376,10	143,00	343,60	409,40	333,00	387,80	288,40	83,30	16,30
4 Precipitação acumulada (mm)	47,60	101,20	117,20	135,50	220,70	596,80	739,80	1083,40	1492,80	1825,80	2213,60	2502,00	2585,30	2601,60
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,53	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43
7 C	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,17
8 ETP - P (mm)	73,20	94,30	126,40	124,40	63,30	-272,10	7,20	-188,40	-261,90	-218,40	-276,90	-172,80	37,50	125,20
9 Escoamento superficial - R (mm)	8,19	9,22	2,75	3,15	14,65	79,73	24,60	72,84	86,79	70,60	82,21	61,14	14,33	2,80
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	8,19	17,41	20,16	23,31	37,96	117,69	142,29	215,13	301,93	372,52	454,74	515,88	530,20	533,01
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	39,41	44,38	13,25	15,15	70,55	296,37	118,40	270,76	322,61	262,40	305,59	227,26	68,97	13,50
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-81,39	-103,52	-129,15	-127,55	-77,95	192,37	-31,80	115,56	175,11	147,80	194,69	111,66	-51,83	-128,00
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)														
13 Água armazenada no solo +compostado - AS1 (mm)	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00	67,50	42,14	67,50	67,50	67,50	67,50	67,50	31,32	4,70
14 Água armazenada no solo puro compactado - AS2 (mm)	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	57,00	32,63	57,00	57,00	57,00	57,00	57,00	22,96	2,43
15 Armazenamento de água total - AS (mm)	0,16	0,03	0,00	0,00	0,00	124,50	74,77	124,50	124,50	124,50	124,50	124,50	54,28	7,13
16 Armazenamento de água acumulado (mm)	0,16	0,19	0,20	0,20	0,20	124,70	199,47	323,97	448,47	572,97	697,47	821,97	876,25	883,39
17 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-178,94	-0,13	-0,03	0,00	0,00	124,50	-49,73	49,73	0,00	0,00	0,00	0,00	-70,22	-47,15
18 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	218,35	44,51	13,28	15,16	70,55	104,00	168,13	155,20	147,50	114,60	110,90	115,60	139,19	60,65
19 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	218,35	262,86	276,14	291,29	361,84	465,84	633,97	789,17	936,67	1051,27	1162,17	1277,77	1416,96	1477,61
20 DEF (mm)	-97,55	103,39	129,12	127,54	77,95	0,00	-17,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-18,39	80,85
21 EXC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	147,60	0,00	138,67	261,90	218,40	276,90	172,80	0,00	0,00
22 Reposição (mm)	218,35	44,51	13,28	15,16	70,55	228,50	168,13	204,93	147,50	114,60	110,90	115,60	139,19	60,65
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR														
23 PERCest OXID BHS (set/08-dez/10) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,9	0,0	65,8	175,1	147,8	194,7	111,7	0,0	0,0
24 Percolação Acumulada - mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67,87	67,87	133,70	308,80	456,61	651,29	762,95	763,0	763,0
25 Linha de checagem - CK (mm)	47,60	53,60	16,00	18,30	85,20	376,10	143,00	343,60	409,40	333,00	387,80	288,40	83,3	16,3
27 Fluxo de percolação - Qperc (m³/s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	8,E-06	0,E+00	8,E-06	2,E-05	2,E-05	2,E-05	1,E-05	0,E+00	0,E+00
28 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	18,04%	0,00%	19,16%	42,77%	44,39%	50,20%	38,72%	0,00%	0,00%
				Período úmido			Dados de entrada					Checagem dos cálculos		
				Período seco			Dados de saída							

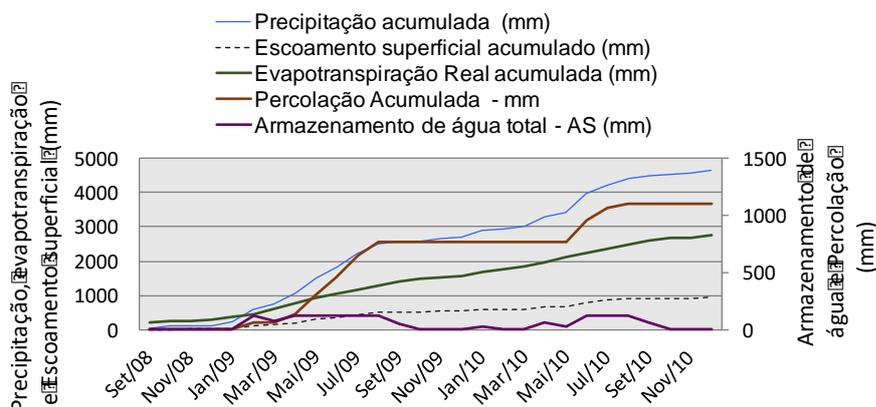
BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO															
Mês	Nov/09	Dez/09	Jan/10	Fev/10	Mar/10	Abr/10	Mai/10	Jun/10	Jul/10	Ago/10	Set/10	Out/10	Nov/10	Dez/10	Ano
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL															
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	143,90	141,50	128,00	132,10	161,90	149,60	150,30	133,40	112,70	108,60	101,40	140,20	138,60	146,50	3751,30
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	2006,5	2148,0	2276,00	2408,1	2570,00	2719,60	2869,90	3003,30	3116,00	3224,60	3326,00	3466,20	3604,80	3751,30	
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO															
3 Precipitação total mensal- P (mm)	49,90	47,80	193,40	45,20	92,70	273,30	114,20	543,90	267,60	191,60	72,70	37,40	23,90	84,90	4640,10
4 Precipitação acumulada (mm)	2651,50	2699,30	2892,70	2937,90	3030,60	3303,90	3418,10	3962,00	4229,60	4421,20	4493,90	4531,30	4555,20	4640,10	
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
6 α	0,43	0,43	0,53	0,43	0,43	0,53	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	
7 C	0,17	0,17	0,21	0,17	0,17	0,21	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,17	
8 ETP - P (mm)	94,00	93,70	-65,40	86,90	69,20	-123,70	36,10	-410,50	-154,90	-83,00	28,70	102,80	114,70	61,60	
9 Escoamento superficial - R (mm)	8,58	8,22	41,00	7,77	15,94	57,94	19,64	115,31	56,73	40,62	12,50	6,43	4,11	14,60	942,42
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	541,59	549,81	590,81	598,59	614,53	672,47	692,11	807,42	864,15	904,77	917,27	923,71	927,82	942,42	
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	41,32	39,58	152,40	37,43	76,76	215,36	94,56	428,59	210,87	150,98	60,20	30,97	19,79	70,30	3697,68
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-102,58	-101,92	24,40	-94,67	-85,14	65,76	-55,74	295,19	98,17	42,38	-41,20	-109,23	-118,81	-76,20	-53,62
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)															
13 Água armazenada no solo +compostado - AS1 (mm)	1,03	0,23	24,63	6,06	1,72	67,48	29,55	67,50	67,50	67,50	36,66	7,27	1,25	0,40	862,08
14 Água armazenada no solo puro compactado - AS2 (mm)	0,40	0,07	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	57,00	57,00	57,00	27,66	4,07	0,51	0,13	604,00
15 Armazenamento de água total - AS (mm)	1,43	0,29	24,69	6,07	1,72	67,48	29,55	124,50	124,50	124,50	64,33	11,34	1,76	0,54	1466,08
16 Armazenamento de água acumulado (mm)	884,82	885,11	909,81	915,88	917,59	985,07	1014,62	1139,12	1263,62	1388,12	1452,45	1463,78	1465,54	1466,08	
17 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-5,70	-1,14	24,40	-18,62	-4,35	65,76	-37,93	94,95	0,00	0,00	-60,17	-52,99	-9,58	-1,22	-178,56
18 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	47,02	40,71	128,00	56,05	81,11	149,60	132,49	133,40	112,70	108,60	120,37	83,95	29,37	71,52	2772,50
19 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	1524,63	1565,34	1693,34	1749,39	1830,50	1980,10	2112,59	2245,99	2358,69	2467,29	2587,66	2671,61	2700,98	2772,50	
20 DEF (mm)	96,88	100,79	0,00	76,05	80,79	0,00	17,81	0,00	0,00	-18,97	56,25	109,23	74,98	978,80	
21 EXC (mm)	0,00	0,00	41,00	0,00	0,00	57,94	0,00	315,55	154,90	83,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1868,66
22 Reposição (mm)	47,02	40,71	152,40	56,05	81,11	215,36	132,49	228,35	112,70	108,60	120,37	83,95	29,37	71,52	3131,84
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR															
23 PERCest OXID BHS (set/08-dez/10) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	200,2	98,2	42,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1103,74
24 Percolação Acumulada - mm	763,0	763,0	762,95	763,0	762,95	763,0	763,0	963,2	1061,4	1103,7	1103,74	1103,74	1103,74	1103,74	
25 Linha de checagem - CK (mm)	49,9	47,8	193,40	45,2	92,70	273,3	114,2	543,9	267,6	191,6	72,70	37,40	23,90	84,90	4640,10
27 Fluxo de percolação - Qperc (m³/s)	0,E+00	2,E-05	1,E-05	5,E-06	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00							
28 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,82%	36,68%	22,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 65 mostra o balanço hídrico acumulado da camada oxidativa para período monitorado:

Figura 65 – Balanço Hídrico acumulado da camada oxidativa para o período de setembro de 2008 a dezembro de 2010

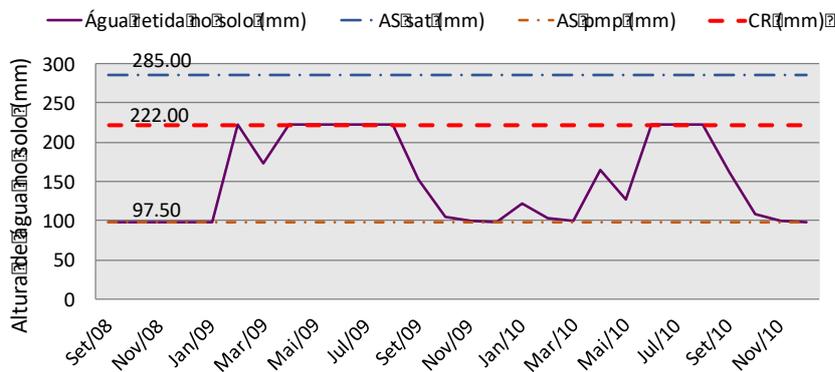


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 66 mostra o armazenamento de água no solo da camada oxidativa no período monitorado:

Figura 66 – Variação no armazenamento de água na camada oxidativa (período monitorado)

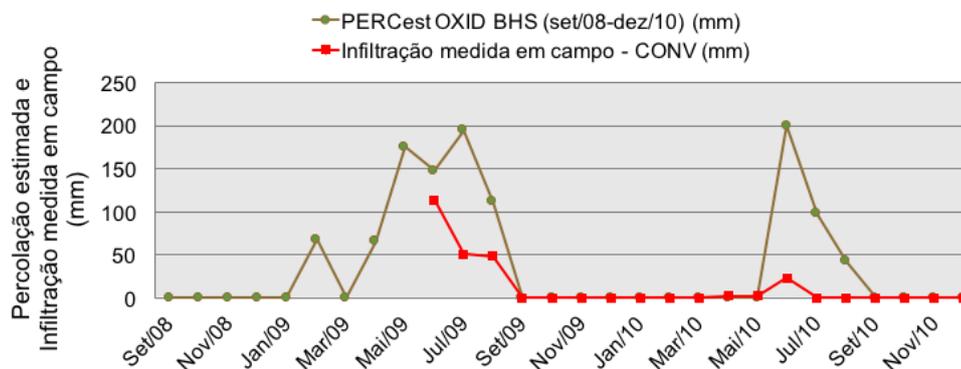


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 67 mostra a comparação entre a percolação medida e a percolação estimada pelo método do balanço hídrico não calibrado.

Figura 67 – Comparação entre a percolação medida e estimada na camada oxidativa para o período monitorado



Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Tabela 41 mostra os coeficientes de correlação entre a infiltração medida em campo e a percolação estimada na camada oxidativa para o período de junho de 2009 a dezembro de 2010. Como a infiltração através das camadas só começou a ser medida a partir de junho de 2009, o cálculo da correlação entre as variáveis de percolação medida e estimada foi calculado a partir dessa data.

Tabela 41 - Correlação entre infiltração medida e percolação calculada

Correlação entre dados medidos em campo e calculados	
Dados de Entrada	Coefficiente de correlação
Período de junho/2009 a dezembro/2010 Método BHS	0,712

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

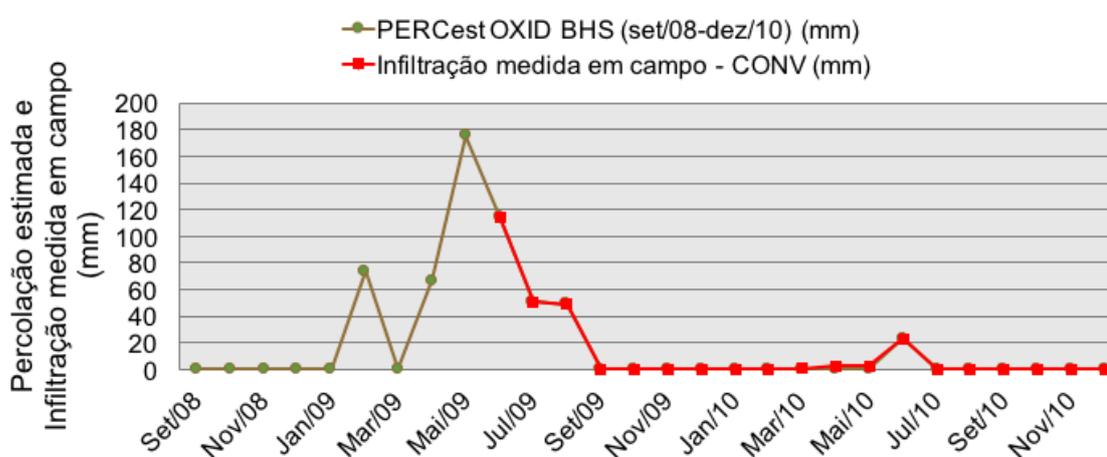
O coeficiente de correlação encontrado mostra que os valores estimados e medidos têm uma correlação positiva de 0,712. Assim como na camada convencional, no período seco, a percolação foi praticamente zero em ambos os casos, e no período chuvoso os valores de percolação foram superestimados. Os erros absolutos da percolação estimada em relação a infiltração medida foram de 33,6 mm, 144 mm e 62,8 mm nos meses de junho, julho e agosto de 2009, respectivamente. E nos meses de junho, julho e agosto de 2010 foram de 177,2 mm, 98,2 mm e 42,4 mm, respectivamente.

4.6.2 Calibração do modelo

Assim como na camada de cobertura convencional, foi realizado o ajuste dos coeficientes de escoamento superficial, fazendo os valores de percolação na base da camada convergir para os dados de infiltração medidos em campo. Os coeficientes foram muito similares aos encontrados para camada convencional. Foram encontrados os valores de coeficiente de escoamento superficial da estação úmida de 0,31, 0,58 e 0,43 para os meses de junho, julho e agosto de 2009, respectivamente, e de 0,55, 0,58 e 0,43 para os meses de junho, junho e agosto de 2010, respectivamente. Nos demais meses não houve percolação significativa. Após os ajustes dos coeficientes, foi obtido um novo coeficiente de correlação de 0,9997.

A Figura 68 mostra os resultados da percolação do modelo totalmente ajustado aos dados de campo para período monitorado (junho de 2009 a dezembro de 2010).

Figura 68 – Comparação da percolação calculada (modelo calibrado) com a infiltração medida na camada oxidativa



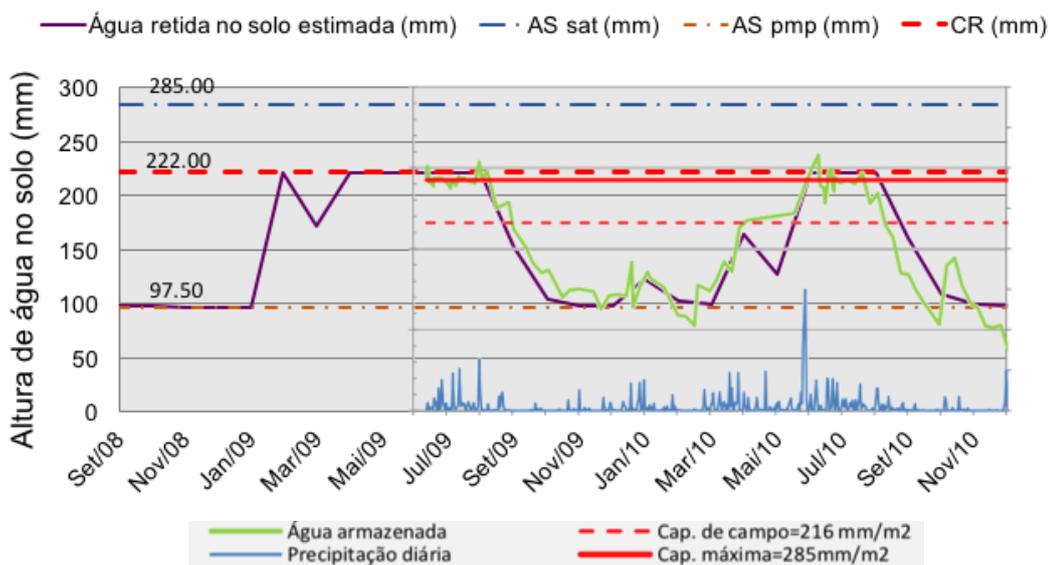
Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Em seguida, a variação da água armazenada camada oxidativa pelo modelo e medida pelos sensores de umidade em campo foram comparados para avaliar a qualidade dos parâmetros de entrada.

A sobreposição dos gráficos com dados de campo e do modelo está expressa na Figura 69:

Figura 69 – Sobreposição dos gráficos de altura de água na camada do modelo e medidos em campo através de sensores de umidade por Lopes (2011)

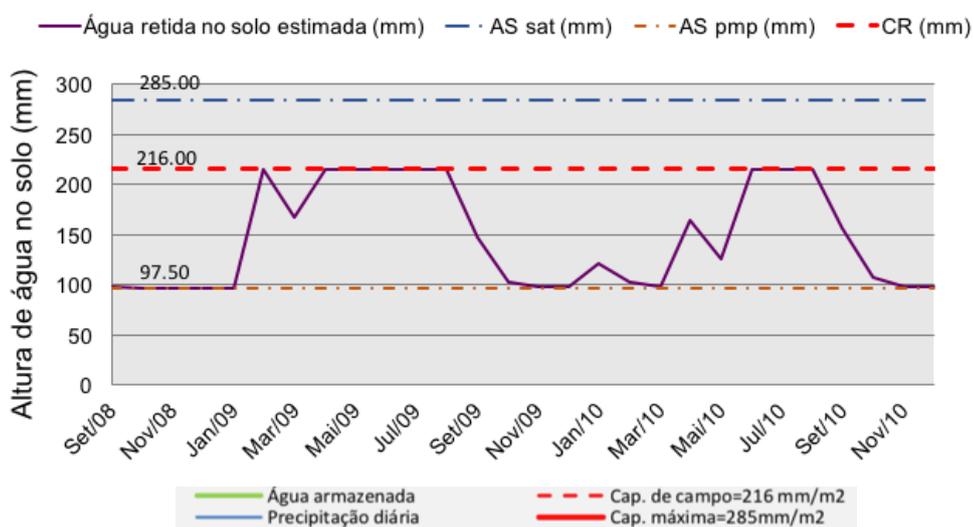


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 70 mostra a sobreposição no armazenamento

Figura 70 - Armazenamento de água na camada oxidativa do modelo ajustado

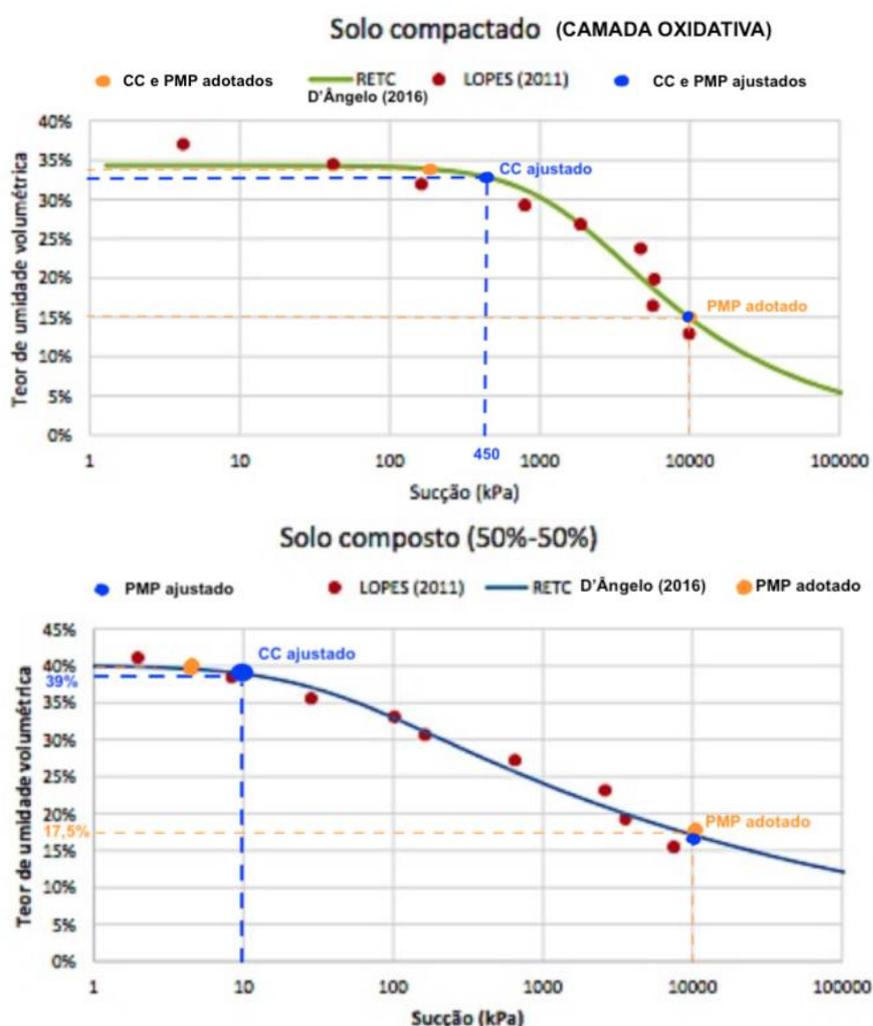


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 71 ilustra os ajustes nos parâmetros de retenção das curvas características do solo puro compactado e do solo composto (50% - 50%) da camada oxidativa:

Figura 71 - Ilustração dos ajustes nos parâmetros de retenção de água dos solos da camada oxidativa



Fonte: O Autor (2021), adaptado de D'Ángelo (2016)

Comparando os dois gráficos da Figura 69, percebe-se que os resultados do modelo estão bastante ajustados aos dados de campo, a camada oxidativa se comportou em campo de forma similar ao que foi previsto pelo modelo. A porosidade maior e a presença de matéria orgânica favoreceram o desenvolvimento da vegetação, que por sua vez, fizeram com que a água fosse retirada do solo em maior quantidade no período seco.

Comparando os resultados, observou-se uma pequena diferença entre a capacidade de retenção de água do modelo ($CR = 222$ mm) e do valor com os resultados de campo ($CR = 226$). Essa diferença se deve ao fato de que a umidade de capacidade de campo utilizada por Lopes (2011) foi menor do que a adotada nesse estudo. Então, fazendo um pequeno ajuste da capacidade de campo (θ_{cc}) de 34%

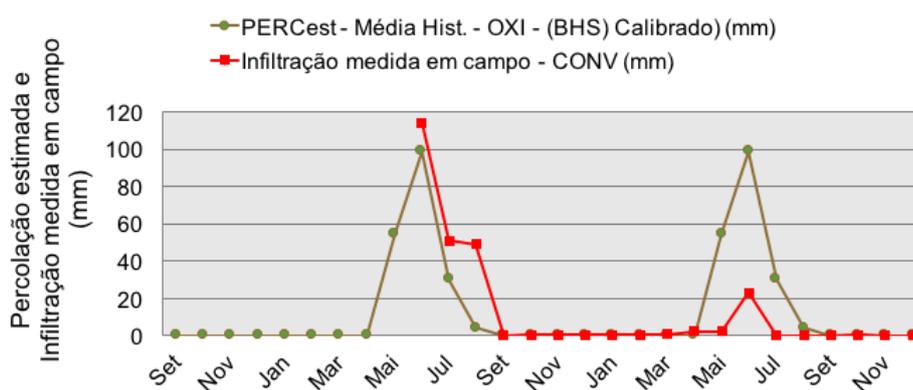
para 33% na camada de solo puro e da camada de solo + matéria orgânica estabilizada de θ_{cc} de 40% para 39%, as curvas ficaram mais bem ajustadas

4.6.3 Cálculo do balanço hídrico (modelo calibrado)

A planilha do balanço hídrico foi calculada para o ano típico (média histórica), fazendo o ajuste dos valores de coeficiente de escoamento superficial dos últimos três meses do período úmido e dos parâmetros de retenção de água, como pode ser observado no Apêndice I. Foram utilizadas as médias dos valores de "C" encontrados para o ano de 2009 e 2010, equivalentes a 0,43, 0,58 e 0,43 para os meses de junho, julho e agosto, respectivamente. Os parâmetros de retenção de água utilizados foram θ_{cc} de 33% para solo puro e de θ_{cc} de 40% para solo + compostado.

A Figura 72 mostra a comparação entre a percolação do modelo para o ano típico e da medida em campo. Apesar de apresentarem dados de precipitação e evapotranspiração diferentes do período monitorado, a percolação calculada para média histórica apresentou uma boa correlação com infiltração medida na camada oxidativa durante o período monitorado, sendo encontrado o coeficiente de correlação de 0,6615.

Figura 72 – Comparação entre a percolação estimada pelo modelo e medida em campo para camada oxidativa (ano típico)

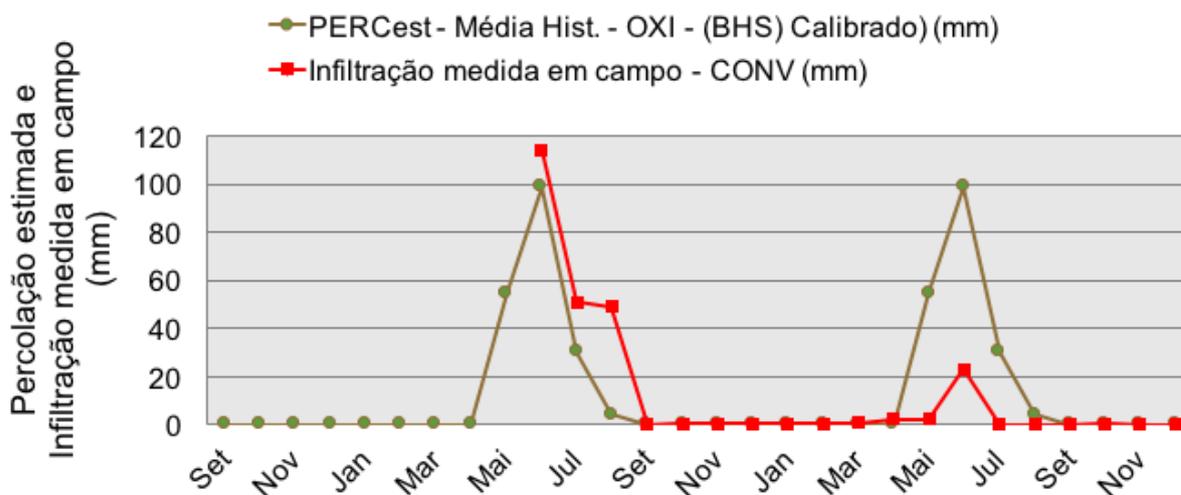


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 73 mostra o armazenamento de água na camada oxidativa para o ano típico (média histórica):

Figura 73 – Armazenamento de água na camada oxidativa (ano típico)

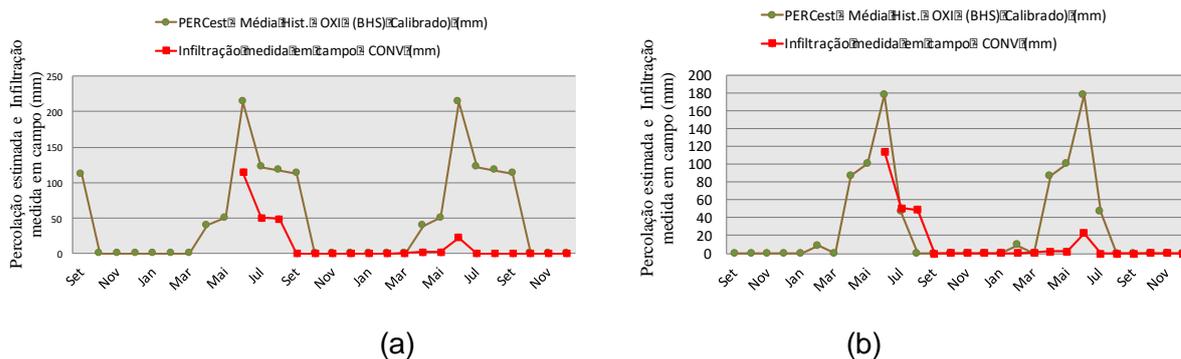


Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

O cálculo do balanço hídrico da camada oxidativa para o ano mais úmido e o percentil de 95% da precipitação estão mostrados no Apêndice J e K, respectivamente. A Figura 74 mostra a comparação entre o armazenamento de água na camada oxidativa do ano mais úmido e do percentil de 95% e a infiltração medida durante o período monitorado.

Figura 74 – Comparação entre a infiltração medida em campo e a percolação calculada pelo modelo para (a) o ano mais úmido e (b) o percentil de 95% da precipitação



(a)

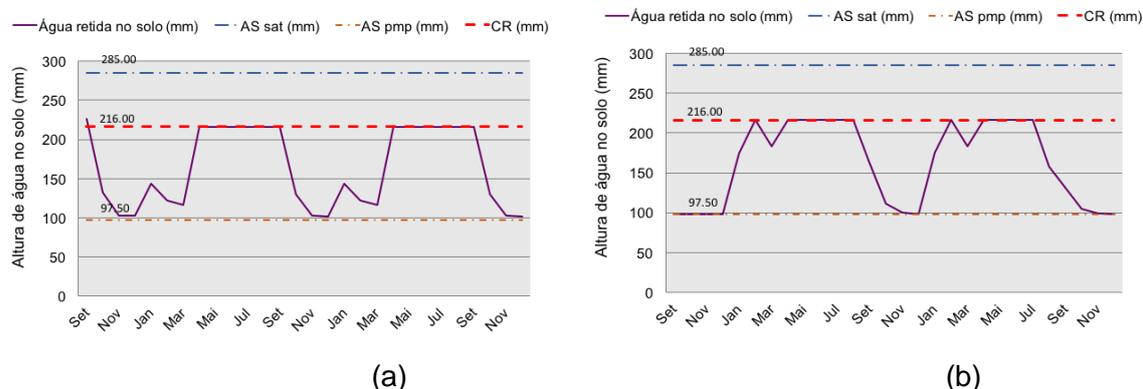
(b)

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 75 mostra o armazenamento de água na camada oxidativa para o ano mais úmido e para o percentil de 95% da precipitação:

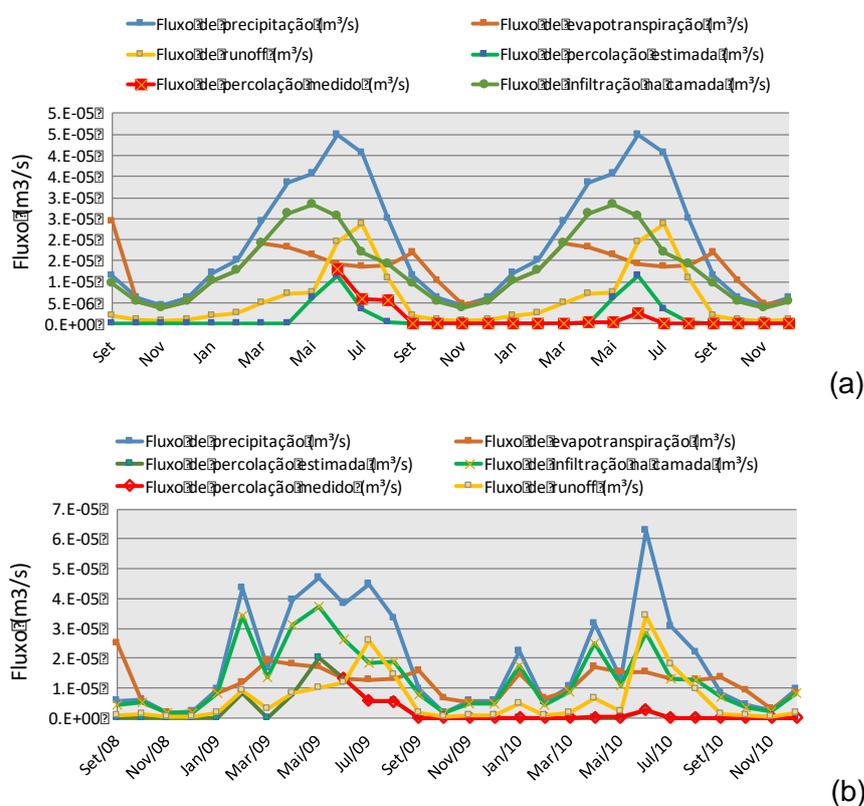
Figura 75 – Armazenamento de água na camada oxidativa para (a) o ano mais úmido e para (b) o percentil de 95% da precipitação



Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A Figura 76 mostra o fluxo de água através da cobertura para o período monitorado e para a média histórica.

Figura 76 – Variação do fluxo de água na camada de cobertura oxidativa para (a) média histórica (b) período monitorado



Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

4.6.4 Cálculo da espessura da camada

A espessura da camada oxidativa foi calculada para ano típico, para o ano mais úmido e para o percentil de 95% da precipitação. O cálculo foi realizado para os dados de precipitação e evapotranspiração das médias mensais históricas de 1981-2010.

4.6.4.1 Cálculo da espessura da camada para o ano típico.

A Tabela 42 apresenta o cálculo da espessura necessária para armazenar a água que infiltra na camada oxidativa, para armazenar (I-ETP) e a espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação.

Tabela 42 - Cálculo da espessura de camada oxidativa (ano típico)

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA NECESSÁRIA													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	87,85	109,63	165,95	228,91	245,70	222,93	147,40	124,19	82,97	45,71	32,04	45,79
	Espessura das camadas H1 e H2 (m)	0,22	0,28	0,42	0,58	0,62	0,56	0,37	0,31	0,21	0,12	0,08	0,12
	Espessura da camada total necessária para armazenar toda a água infiltrada Ht	0,44	0,56	0,84	1,16	1,24	1,13	0,75	0,63	0,42	0,23	0,16	0,23
	Ht é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	SIM	SIM	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM
Hipótese 2	Armazenamento necessário (I - ETR) mm	0,00	0,00	0,00	70,71	102,40	98,83	30,20	4,19	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura das camadas necessárias Hnec1 e Hnec2 (mm)	0,00	0,00	0,00	0,18	0,26	0,25	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura da camada total necessária Hnec (mm)	0,00	0,00	0,00	0,36	0,52	0,50	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hnec é suficiente para armazenar toda infiltração subtraindo a evapotranspiração real?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	Asnec (0,9P - ETR - R)	0,00	0,00	0,00	41,66	71,22	59,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação (H1 = H2)	0,00	0,00	0,00	0,11	0,18	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura da camada total necessária Hnec (mm)	0,00	0,00	0,00	0,21	0,36	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ASnec/ASdisp	0,00	0,00	0,00	2,09	3,58	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para limitar a percolação a no máximo 10% da	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

A espessura de camada máxima para armazenar toda a água infiltrada foi de 1,24m para o mês de maio e para armazenar toda a água infiltrada menos a parcela de evapotranspiração foi de 0,52m para o mesmo mês. Enquanto para reduzir a percolação a no máximo 10% da precipitação a espessura máxima necessária foi de 0,36m no mês de maio.

4.6.4.2 Cálculo da espessura da camada para o ano mais úmido e percentil de 95%

A Tabela 43 e a Tabela 44 mostram o cálculo da espessura da camada oxidativa para ano mais úmido e para percentil de 95%.

Tabela 43 - Espessura de camada oxidativa (ano mais úmido)

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA - ANO MAIS ÚMIDO													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	162,01	69,88	98,97	237,27	140,82	293,55	204,91	209,60	212,84	36,93	3,81	109,06
	Espessura das camadas H1 e H2 (m)	0,41	0,18	0,25	0,60	0,36	0,74	0,52	0,53	0,54	0,09	0,01	0,28
	Espessura da camada total necessária para armazenar toda a água infiltrada Ht	0,82	0,35	0,50	1,20	0,71	1,49	1,04	1,06	1,08	0,19	0,02	0,55
	Ht é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	Não	SIM	SIM	Não	Não	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM
Hipótese 2	Armazenamento necessário (I - ETR) mm	41,09	0,00	0,00	139,45	50,75	213,87	122,31	117,46	112,77	0,00	0,00	0,00
	Espessura das camadas necessárias Hnec1 e Hnec2 (mm)	0,10	0,00	0,00	0,35	0,13	0,54	0,31	0,30	0,29	0,00	0,00	0,00
	Espessura da camada total necessária Hnec (mm)	0,21	0,00	0,00	0,71	0,26	1,08	0,62	0,59	0,57	0,00	0,00	0,00
	Hnec é suficiente para armazenar toda infiltração subtraindo a evapotranspiração real?	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	Não	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	Asnec (0,9P - ETR - R)	20,53	0,00	0,00	109,34	32,88	162,37	0,00	0,00	85,76	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação (H1 = H2)	0,05	0,00	0,00	0,28	0,08	0,41	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00
	Espessura da camada total necessária Hnec (mm)	0,10	0,00	0,00	0,55	0,17	0,82	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
	ASnec/ASdisp	1,03	0,00	0,00	5,49	1,65	8,16	0,00	0,00	4,31	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para limitar a percolação a no máximo 10% da	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Tabela 44 - Espessura de camada oxidativa (Percentil 95% da precipitação)

CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAMADA - PERCENTIL DE 95% DA PRECIPITAÇÃO													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Hipótese 1	Armazenamento necessário (I) - mm	198,65	160,67	94,32	218,91	189,83	256,67	127,69	51,15	65,16	23,93	16,64	17,14
	Espessura das camadas H1 e H2 (m)	0,50	0,41	0,24	0,55	0,48	0,65	0,32	0,13	0,16	0,06	0,04	0,04
	Espessura da camada total necessária para armazenar toda a água infiltrada Ht	1,01	0,81	0,48	1,11	0,96	1,30	0,65	0,26	0,33	0,12	0,08	0,09
	Ht é suficiente para armazenar toda água infiltrada?	Não	Não	SIM	Não	Não	Não	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 2	Armazenamento necessário (I - ETR) mm	77,36	49,48	0,00	119,60	100,64	177,63	46,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura das camadas necessárias Hnec1 e Hnec2 (mm)	0,20	0,13	0,00	0,30	0,25	0,45	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura da camada total necessária Hnec (mm)	0,39	0,25	0,00	0,61	0,51	0,90	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hnec é suficiente para armazenar toda infiltração subtraindo a evapotranspiração real?	SIM	SIM	SIM	Não	SIM	Não	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Hipótese 3	Asnec (0,9P - ETR - R)	52,15	29,09	0,00	91,82	76,55	132,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura necessária para limitar a percolação a no máximo 10% da precipitação (H1 = H2)	0,13	0,07	0,00	0,23	0,19	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Espessura da camada total necessária Hnec (mm)	0,26	0,15	0,00	0,46	0,39	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ASnec/ASdisp	2,62	1,46	0,00	4,61	3,85	6,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	A espessura adotada é suficiente para limitar a percolação a no máximo 10% da	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

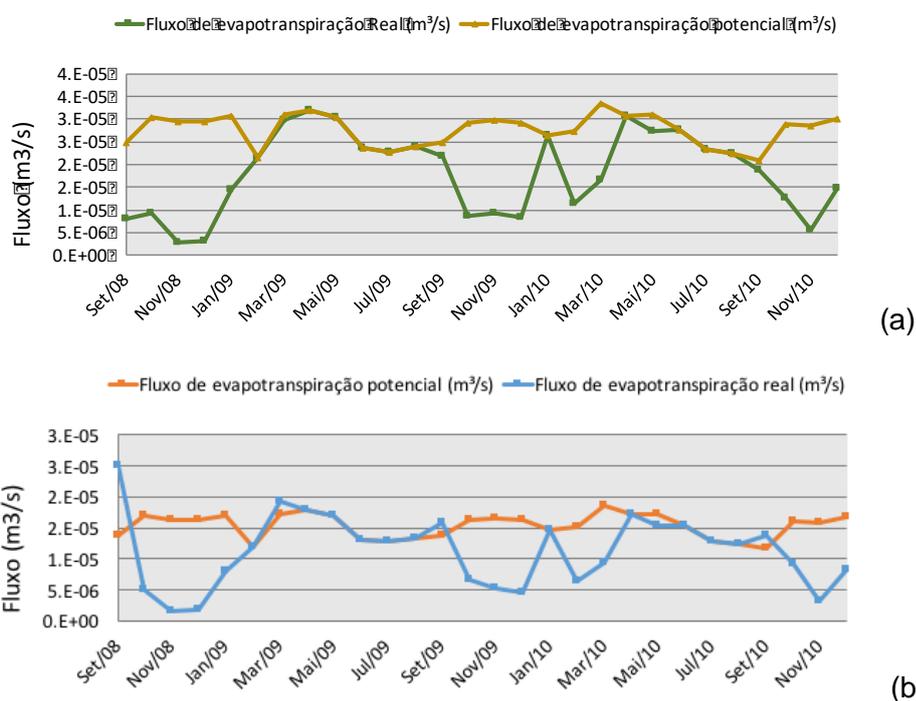
Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

4.7 ANÁLISE DA EVAPORAÇÃO REAL PREVISTA PELO MÉTODO

Os resultados mostrados a seguir referem-se aos valores de ETP obtidos do INMET e os valores de ETR estimados pelo método. A Figura 77 mostra a variação no fluxo de evapotranspiração potencial e real da camada convencional e oxidativa durante o período monitorado.

Figura 77 – Variação do fluxo de evapotranspiração potencial e real estimados pelo modelo para o período monitorado (a) camada convencional (b) camada oxidativa



Fonte: O Autor (2021)

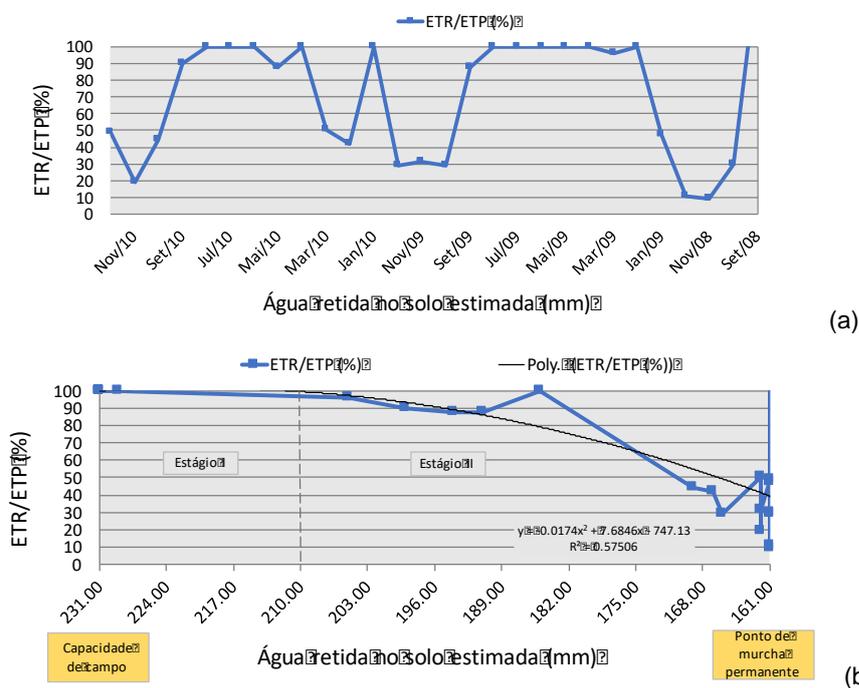
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Como observados por outros autores (GRAY, 1970; MORTON, 1975; BRUTSEART, 1982 *apud* WILSON, 1994), percebe-se que a evapotranspiração real começa a diminuir quando a água disponível na camada se torna cada vez mais limitada.

Wilson *et al.* (1994) observou que a evaporação real é controlada pelas condições climáticas, que define a taxa de evaporação potencial, e pelas propriedades do solo como coeficiente de permeabilidade e difusividade de vapor (Wilson *et al.*, 1994).

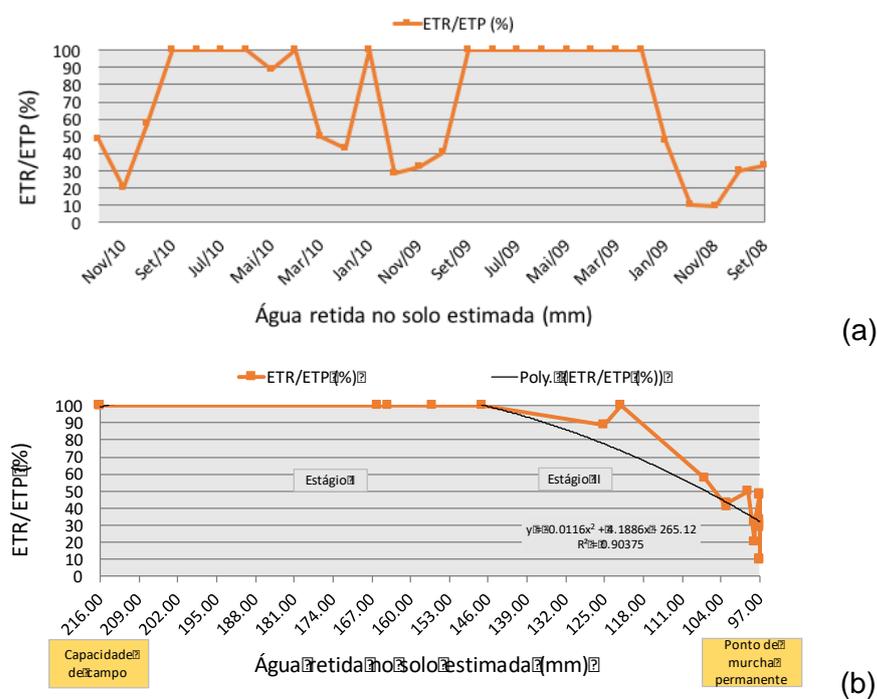
A Figura 78 e 79 mostram a variação da relação entre a evapotranspiração real e potencial nas camadas estudadas:

Figura 78 - Variação da relação de ETR/ETP na camada convencional em função do tempo (a) e da água retida no solo (b)



Fonte: O Autor (2021). Dados Obtidos do INMET

Figura 79 – Variação da relação de ETR/ETP na camada oxidativa em função do tempo (a) e da água retida no solo (b)



Fonte: O Autor (2021). Dados Obtidos do INMET

A forma da curva de secagem (ETR/ETP x água disponível) é descrita por alguns autores (HILLEL, 1980; WILSON et al. 1994) apresentando basicamente três

estágios. No Estágio I, a evaporação do solo é máxima, o solo se encontra na saturação ou próximo da saturação (a secagem é governada pelas condições climáticas). O estágio II começa quando a condutividade hidráulica começa a limitar evapotranspiração potencial do solo (a secagem do solo é governada pelas condições climáticas e pelas propriedades do solo). Essa taxa de evaporação vai diminuindo até alcançar o estágio III.

Os resultados das curvas de secagem previstas pelo método do balanço hídrico não mostram o desenvolvimento do estágio III. A curva apresenta no início um trecho onde $ETR/ETP = 100\%$ (estágio I), e depois essa relação começa a diminuir gradativamente (Estágio II). De acordo com Wilson *et al.* (1994), a taxa de evaporação real é aproximadamente igual a taxa de evapotranspiração potencial quando ($ETR/ETP = 100\%$) quando o solo na capacidade de campo ou acima dela. Hillel (1980) *apud* Wilson *et al.* (1994) diz que as taxas baixas de evaporação no estágio III ocorrem quando o solo se torna suficientemente dessecado causando descontinuidade da fase líquida.

O cálculo da evapotranspiração pela equação de Thornthwaite é baseado nas condições climáticas (temperatura média diária e máxima insolação diária), portanto esse método é adequado para aplicações onde apenas as condições climáticas governam (estágio I). De acordo com Wilson (1990), nos solos não saturados, a evapotranspiração geralmente é superestimada, uma vez que a evapotranspiração real é limitada.

Nesse estudo, a evapotranspiração potencial foi determinada utilizando o modelo empírico de Thornthwaite (1948) mostrado na equação 35. Nos meses de excedente hídrico, a evapotranspiração real foi condicionada ao valor máximo da taxa de evapotranspiração potencial, e nos meses de déficit hídrico a evapotranspiração potencial foi calculada através da diferença entre a infiltração e a quantidade de água retida na camada. E essa quantidade de água retida também foi calculada através da Equação simplificada de Pereira (2005) adaptada de Thornthwaite e Mather (1948) que leva em consideração a umidade antecedente, a quantidade de água infiltrada na camada, a evapotranspiração potencial e a capacidade de água disponível do solo. Logo, a quantidade de água retida na camada leva em consideração tanto as condições climáticas como as características do solo da cobertura.

4.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Foi realizada uma análise de sensibilidade dos dados de entrada variando os seus valores para verificar seu efeito nos dados de saída. A análise de sensibilidade foi realizada para os parâmetros que refletem na capacidade de retenção de água do solo e na infiltração, tais como: espessura da camada, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, coeficiente de escoamento superficial e precipitação.

4.8.1 Camada convencional

Os resultados para análise de sensibilidade para camada convencional estão mostrados a seguir:

Espessura da camada – mantendo todas as condições da camada e variando a espessura de solo, verificou-se que o nível de percolação na base da camada é pouco sensível à mudança do valor da espessura da camada, pois logo no início da estação chuvosa a camada atinge sua capacidade de campo, então a chuva excedente que não escoa superficialmente percola através da camada. Para reduzir a percolação, seria necessária uma camada muito espessa para poder armazenar toda a água adicional durante o todo período chuvoso. Para o caso estudado, seria necessária uma camada de 3,20m para que toda água infiltrada fosse armazenada pela camada.

Capacidade campo do solo – mantendo as outras condições da camada e variando a umidade de capacidade de campo do solo, verificou-se que o nível de percolação também é pouco sensível à sua variação. No caso estudado, mesmo aumentando o valor θ_{cc} de 34% para o teor de umidade volumétrica máxima do solo de 43%, ainda não seria possível zerar os níveis de percolação através da camada.

Ponto de murcha permanente – Mantendo as outras condições da camada e variando o valor de θ_{pmp} , verifica-se que os níveis de percolação na camada são pouco sensíveis a sua variação. Mesmo com valor de θ_{pmp} de 0%, não seria suficiente para zerar os valores de percolação.

Coeficiente de escoamento superficial – o coeficiente de escoamento superficial da camada reflete na quantidade de água que vai infiltrar no solo. Mantendo todas outras características da camada e variando o coeficiente de escoamento

superficial, percebe-se que a quantidade de água percolada através da camada é bastante sensível a mudança dos coeficientes de escoamento superficial, principalmente nos meses da estação chuvosa. Valores de coeficientes de escoamento superficial variando de 0,60 a 0,70 são suficientes para reduzir a percolação a 0 no período chuvoso.

Precipitação – a quantidade de água precipitada exerce grande influência da quantidade de água infiltrada principalmente nos períodos chuvosos prolongados, onde a capacidade de campo é excedida e a evapotranspiração não é suficiente para remover a água do solo. Para a camada convencional do caso estudado, valores de precipitação superiores a 300 mm são suficientes para gerar percolação de água para massa de lixo.

Através da análise da sensibilidade dos parâmetros de entrada, observa-se que os parâmetros que influenciam mais na percolação de água são o coeficiente de escoamento superficial da camada e os níveis de precipitação local.

4.8.2 Camada oxidativa

A análise de sensibilidade dos dados de entrada da camada oxidativa também foi realizada para verificar sua influência nos resultados. Foi analisado o impacto da variação dos seguintes parâmetros: espessura da camada, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, coeficiente de escoamento superficial e precipitação.

Espessura da camada – mantendo todas as condições da camada e variando apenas a espessura de solo, verificou-se que o nível de percolação é pouco sensível à sua mudança. Para camada oxidativa, seria necessária uma camada de 1,60m para que toda água infiltrada fosse armazenada pelo solo.

Capacidade campo do solo – conservando as outras características da camada, verificou-se que o nível de percolação é pouco sensível às mudanças no valor da capacidade de campo. Fazendo a umidade de capacidade de campo atingir o seu valor máximo, ou seja, igual a porosidade do solo, a percolação na camada é reduzida de 98,83 mm para 84,43mm no mês de junho.

Ponto de murcha permanente – Assim como na camada convencional, mesmo com valor de θ_{pmp} de 0%, não seria suficiente para zerar os valores de percolação.

Coeficiente de escoamento superficial – a quantidade de água percolada é bastante sensível às mudanças nos valores de coeficiente de escoamento superficial do solo. Os valores de coeficientes de escoamento superficial variando de 0,40 a 0,70 são suficientes para reduzir a percolação a 0 no período chuvoso para os níveis de precipitação da área estudada;

Precipitação – a quantidade de água infiltrada também sofre grande influência da quantidade de água precipitada, principalmente nos meses onde esse valor é elevado e excede a capacidade de campo do solo.

4.9 ERROS, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES DO MÉTODO

- A estimativa da água retida na camada pela equação de Thornthwaite (1948) considera que a superfície do solo está recoberta por vegetação, o que não ocorre na camada convencional;
- Nesse estudo, no cálculo do armazenamento de água na camada pela equação simplificada de Pereira (2005) adaptada do Método de Thornthwaite & Mather (1955) foi utilizada a precipitação e não a precipitação como tem indicado na equação;
- As quantidades de cada componente do balanço hídrico estão bastante interligadas, então qualquer alteração em uma componente poderá afetar outra. Da mesma forma, um erro na estimativa ou medição de um parâmetro pode alterar a quantidade de outro parâmetro;
- É assumido que a camada de solo se encontra permanentemente não saturada, e que a umidade máxima que o solo atinge é a capacidade de campo do solo em condições de livre drenagem e a umidade mínima que o solo é submetido fica limitado a sua capacidade de campo;
- O cálculo da espessura da camada é feito de forma iterativa, portanto é necessário assumir uma espessura inicial para calcular outras componentes;
- Em coberturas formadas por mais de uma camada, a água só percola para camada inferior quando a camada superior atinge a sua capacidade de campo.

5 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou os resultados da aplicação do método do balanço hídrico calibrado utilizando dados secundários de medições em campo em uma cobertura convencional e uma cobertura oxidativa e a estimativa da espessura de camada baseada nos princípios de armazenamento de água pelo solo para um ano típico, para o ano mais úmido e para o percentil de 95% da precipitação. A partir das análises tem-se as seguintes conclusões:

- Os parâmetros de retenção de água como capacidade de campo e ponto de murcha permanente, determinados a partir da curva característica teórica de amostras retiradas de campo foram satisfatórios para camada que desenvolveu vegetação, ou seja, a camada oxidativa;
- O armazenamento de água na camada convencional previsto pelo modelo não refletiu a condição de campo nos períodos secos, possivelmente por conta da ausência de vegetação, e isso refletiu em um ponto de murcha permanente para uma sucção menor do que a adotada nesse estudo (sucção de 10.000 kpa). Em outras palavras a escassa vegetação que se desenvolveu na camada convencional retirou uma menor quantidade de água do solo nos períodos secos;
- O armazenamento de água na camada oxidativa previsto pelo modelo foi mais próximo do comportamento da camada em campo pois as condições consideradas no modelo foram similares às de campo, por exemplo, a presença de vegetação e uma porosidade maior da camada;
- Os coeficientes de escoamento superficial não são uniformes ao longo do ano, atingindo coeficientes maiores nas estações chuvosas. Os coeficientes encontrados após ajustes variaram de 0,31 a 0,71 nos meses de junho, junho e agosto;
- As principais dificuldades para calibração do modelo se deram nos meses em que não se teve percolação expressiva, impossibilitando fazer o ajuste do coeficiente de escoamento superficial;
- A determinação da espessura da camada foi realizada de forma simplificada, considerando os princípios de armazenamento de água pelo solo para um período mensal, no entanto sua determinação não se leva em consideração a

umidade do mês antecedente, o que pode superestimar a quantidade de água que pode ser armazenada, principalmente nos últimos meses da estação úmida;

- Como as camadas estão em uma região de clima úmido, onde há um considerável excedente hídrico, seria necessária uma camada muito espessa para armazenar toda a água infiltrada na camada;
- Estudos prévios e medições realizadas em campo sugerem que o volume de lixiviado acompanha os valores de excedente hídrico. Assim, a distribuição das precipitações médias históricas, pode servir de instrumento para previsão dos níveis de geração de lixiviado e fazer o dimensionamento do sistema de drenagem de lixiviados;
- Os resultados mostraram que a percolação estimada pelo modelo, quando calibrado, apresenta uma boa correlação com os dados medidos em campo, sendo esta uma alternativa eficaz para analisar a performance da cobertura a curto e longo prazo;
- A teoria do balanço hídrico considera que a quantidade de água retida no solo é uma função exponencial da demanda (P-ETP), logo ao inserir os valores de ETP considera-se que a camada possui vegetação;
- As principais dificuldades para calibração do modelo se deram nos meses em que não se teve percolação expressiva, impossibilitando fazer o ajuste do coeficiente de escoamento superficial;
- A distância da estação pluviométrica para o local de implantação da camada de cobertura é considerada válida para análise, embora que existe a possibilidade de as chuvas variarem significativamente entre áreas relativamente próximas;
- A análise da variabilidade dos fatores climáticos foi importante para estabelecer critérios para valores de infiltração de água máximos e admissíveis durante a vida útil do aterro;
- O método é uma alternativa viável para aplicação em municípios de pequeno porte pois exige um número limitado de dados que podem ser facilmente obtidos;

- Os dados climáticos, basicamente a precipitação e evapotranspiração, podem ser obtidos facilmente através de estações meteorológicas que estão distribuídas por todo território nacional;
- Os parâmetros de retenção de água no solo como a capacidade de campo e ponto de murcha permanente podem ser determinados através da curva característica dos solos (sua forma reflete as características intrínsecas do solo como compactação, granulometria, teor orgânico, permeabilidade, etc.) para sucções correspondentes.

SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

1. Determinação do coeficiente de escoamento superficial para solos compactados e misturas de solo + matéria orgânica estabilizada compactados com e sem presença de vegetação;
2. Avaliar a relação dos parâmetros do solo e capacidade de retenção de água do solo compactado puro e com adição de matéria orgânica estabilizada;
3. Realizar análise do balanço hídrico utilizando parâmetros de amostras após serem submetidas a ciclos de umedecimentos e secagem para avaliar o efeito da degradação hidráulica das camadas a longo prazo no comportamento da camada;
4. Realizar análise do balanço hídrico utilizando parâmetros de amostras em diferentes graus de compactação para avaliar o efeito a longo prazo no comportamento da camada.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A.E.S.; MAFORT, D.P.; MIGUEL, M.G.; PEREIRA, S.Y. (2019) *Balanço hídrico de célula experimental de resíduos sólidos urbanos construída em Campinas, SP: modelagem de aterros encerrados*. REGEO/Geossintéticos 2019, São Carlos/SP, Brasil.
- AGVISE LABORATORIES (2020) *Water Holding Capacity*. Disponível em <<https://www.agvise.com/educational-articles/water-holding-capacity>> Acesso em: 09 set. 2020.
- ALBRECHT, B. A. & BENSON, C. H. (2000) *Effect of Desiccation on Compacted Natural Clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- ALBRIGHT, W. H; BENSON, C. H; GEE, G. W.; ABICHOU, T.; MCDONALD, E. V.; TYLER, S. W.; AND ROCK, S. A. (2006) *Field Performance of a Compacted Clay Landfill Final Cover at a Humid Site*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 11. ASCE, ISSN 1090- 0241/2006/11-1393–1403.
- ALBRIGHT, W.; BENSON, C.; GEE, G.; ROESLER, A.; ABICHOU, T.; APIWANTRAGOON, P.; LYLES, B.; AND ROCK, S. (2004) *Field Water Balance of Landfill Final Covers*. J. of Environmental Quality, 33;2317-2332.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. (2011) *Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.15, n.2, p.111–116. Campina Grande, PB.
- ANGELOTTI NETTO, A. (2007) *Estimativa da retenção de água no solo a partir do uso de equipamentos não convencionais: redes neurais artificiais e funções de pedotransferência*. Tese de doutorado. São Carlos – São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10157 (1987). *Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13896 (1997). *Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15113 (2004). *Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – diretrizes para projeto implantação e operação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15849 (2010) *Aterros sanitários de pequeno porte*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8418 (1984) *Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419 (1992). *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro. 7 p.

BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF ENVIRONMENT - BCME (2016) *Landfill Criteria For Municipal Solid Waste*. Second Edition. British Columbia. Disponível em <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/wastemanagement/garbage/landfill_criteria.pdf> Acesso em: 01 fev. 2020.

BECK-BROICHSITTER, S.; GERKE, H. H.; HORN, R. (2018) *Assessment of Leachate Production from a Municipal Solid-Waste Landfill through Water-Balance Modeling*. *Geosciences* 2018, 8, 372.

BENSON, C. H. & BAREITHER, C. A. (2012) *Landfill Covers: Water Balance, Unsaturated Soils, and a Pathway from Theory to Practice*. Disponível em <<https://ceprofs.civil.tamu.edu/briaud/Buchanan%20Web/Twentysecond%20Buchanan%20Lecture.pdf>> Acesso em: 09 set. 2020.

GROSS, B. A. & GROSS, P.E. (2016) *Landfill Cover. Design and Operation*. US-EPA Workshop on Bioreactor Landfills. GeoSyntec Consultants.

BOHNHOFF, G. L.; OGORZALEK, A. S.; BENSON, C. H.; SHACKELFORD, C. D.; AND APIWANTRAGOON, P. (2009) *Field Data And Water-Balance Predictions For A Monolithic Cover In A Semiarid Climate*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Asce. Vol. 135, No. 3, P. 333-348.

BRASIL, Lei N° 12.305 (2010) Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

BRASIL. Lei n. 11.107 (2005) *Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências*. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11107.htm> Acesso em: 03 ago. 2020.

BRASIL. Lei nº 11.445 (2007) *Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências*. Brasília.

BRITO, A. S. (2011) *Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35:1939-1948.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION – MAINE, US (2001) *An Assessment Of Landfill Cover System Soil Barrier Layer Hydraulic Performance - Final Paper*. Bureau of Remediation And Waste Management. Department of Environmental Protection. Maine.

CAETANO, A. R. (2020) *Capacidade de campo em solos brasileiros*. Monografia (graduação). Curso de engenharia civil - UFRJ. Rio de Janeiro.

CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L.R.F. (2006) *Efeitos da compactação em atributos do solo*. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>> Acesso em: 8 dez. 2019.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT - CCME (2006) *National Guidelines For Hazardous Waste Landfills*. CCME Documents PN 1365. Winnipeg, Manitoba. Canada.

CARNEIRO, T. F.; ISAAC, R.L.; PEREZ, M.G. (2011) *Gerenciamento de Resíduos Sólidos com Alta Carga Orgânica na Europa e no Brasil*. In: SIGERA -II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, 2011, Foz de Iguaçu. Anais do II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais.

CARVALHO, D. F. & SILVA, L. D. B (2006). *Infiltração*. Capítulo 5. Hidrologia. Disponível em <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>> Acesso em: 01 set. 2020.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. (2003) *Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável Para Municípios De Pequeno Porte*. Abes. Rio De Janeiro.

COSTA, D. M.; MARIANO, M. O. H; ARAÚJO, L. B; JUCÁ, J. F. T (2018) *Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações*. Eng. Sanit. Ambient. vol.23 no.1 Rio de Janeiro.

COSTA, M.D. (2015) *Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos*. 144f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CAZZUFFI, D.; GIOFFRE, D; RECALCATI, P. (2017) *Recent Developments On The Use Of Drainage Geocomposites In Capping Systems*. Proceedings Sardinia 2017 / Sixteenth International Waste Management And Landfill Symposium. Cagliari, Italy. Cisa Publisher, Italy.

D'ÂNGELO, R.G. (2016) *Análise Numérica De Infiltração Em Camada De Cobertura De Aterro Sanitário*. Projeto de Graduação - UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Civil.

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S.; REISSER JUNIOR, C.; TIMM, L. C.; BRIXNER, G. F. (2010) *Uso Do Balanço Hídrico Simplificado Em Sistemas De Conservação Em Um Solo Classificado Como Argissolo Vermelho Amarelo*. In: Reunião Sul-Brasileira De Ciência Do Solo, 8., 2010, Santa Maria. A Ciência Do Solo Frente À Diversidade Da Agricultura: Do Saraquá À Agricultura De Precisão. Santa Maria: Sociedade Brasileira De Ciência Do Solo, UFSC. 1 CD-ROM.

- EMBRAPA (1979) *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, 235 pp.
- COM (1996) *European Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control*. Official Journal of the European Communities L 257, 10/10/1996:0026–0040.
- FERREIRA, M. A. S. & MAHLER, C. F. (2006) *Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais – Estudo de Caso*. In: COBRAMSEG. p.1377-1382.
- FIRTA, I. N.; CASTILHOS JR., A. V. (2014) *Método do Balanço Hídrico*. Apêndice 3. Disponível em <<http://jararaca.ufsm.br/websites/ces/download/A11.pdf>> Acesso em: 09 set. 2020.
- FOURIE, A. B. E.; MOONSAMMY, M. (2002) *Store and release covers for landfills in semi-arid climates*. Unsaturated soils, Recife, Brasil Anais, p. 823-826.
- FREDLUND D. G.; RAHARDJO, H. (1993) *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, John Wiley & sons. Ins. P. 1-6.
- FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. (1994) *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal. 31, 533-546.
- FREDLUND, D. G. (1979) *Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils*. Canadian Geotechnical Journal 16(1): 121-139.
- FREDLUND, D. (1998) *Bringing unsaturated soil mechanics into engineering practice*. Key Note Address, Proceeding of the Second International Conference on Unsaturated soils. Beijing, China. Vol. 2. pp. 1-36.
- FREDLUND, D.G. (2000) *The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering*. Canadian Geotechnical Journal, 37(5): 963–986. doi:10.1139/cgj-37-5-963.
- FREDLUND, M.D.; FREDLUND, D.G. & WILSON, G.W. (1997) *Prediction of the soil-water characteristic curve from grain size distribution and volume-mass properties*. Proc. 3rd Brazilian Symp. Unsaturated Soils NSAT'97, Brazil.
- GONÇALVES, F. V. (2012) *Estudo das Curvas de Retenção e Condutividade Hidráulica Estimadas pela Equação de Van Genutchen (1980) para Diferentes Tipos de Solos*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal Do Espírito Santo. Vitória.
- HUBER-HUMER, M.; RÖDER, S.; LECHNER, S. (2009) *Approaches to assess biocover performance on landfills*. Waste Management, v. 29, p. 2092-2104.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ - IAP (2019) *Manual Para Implantação De Aterros Sanitários em Valas De Pequenas Dimensões*. Anexo I - Disponível em <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Atividades/MANUAL_DO_ATERRO.pdf> Acesso em: 09 set. 2020.

JUCÁ, J.F.T. & MACIEL, F. J. (2006) *Gas permeability of a compacted soil used in a landfill cover layer*. Conference Paper in Geotechnical Special Publication.

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.

JOAQUIM JÚNIOR, G. O. (2015) *Comparação de desempenho de sistemas de cobertura em relação à infiltração de água pluvial no aterro sanitário de Seropédica (RJ), durante a fase de operação*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química/UFRJ. 210 p.

KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. (2000) *Capillary Barriers: Design Variables and Water Balance*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 8.

KOERNER, R. M. (2002) *The Questionable Strategy of Soil-Only Landfill Covers*. Geosynthetic Research Institute. GRI Report #28. Folsom, PA. USA.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. (1997) *Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Drumps*. Thomas Telford & ASCE Press.

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.

LINS, E. A. M. & JUCÁ, J. F. T (2005) *A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no Aterro da Muribeca*. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande/MS.

LOPES, R.L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. 274f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

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 (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MANCINI, S. D. (2018) *Dimensionamento de Aterros Sanitários*. Notas de aula da disciplina de Manejo de Resíduos Sólidos – Pós-Graduação em Engenharia Civil e

Ambiental. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba. Sorocaba.

MARIANO, M. O. H. (2020) Comunicação Pessoal.

MARINHO, F. A. M. (2019) *Camadas de Cobertura Capilares e Metanotróficas*. Notas de aula. Universidade de São Paulo. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4972500/mod_resource/content/1/Aula%2013%20-%20Coberturas%20de%20Aterro%20de%20RSU.pdf> Acesso em: 09 set. 2020.

MELCHIOR, S.; SOKOLLEK, V.; BERGERM K.; VIELHABER, B. (2010) *Results from 18 years of in situ performance testing of Landfill cover system in Germany*. Journal of Environmental Engineering. Vol. 136, no. 8, p. 815-223.

MEYER, P.D. & GEE, G.W. (1999) *Flux-based estimation of field capacity*. J. Geotechn. Geoenviron. Eng., 125:595-599.

MITCHELL, H.; CAMPANELLA, R. G. (1965) *Permeability of compacted clay*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 91(4) (1965): 41-66.

MOLINARI, D. C. & VIEIRA, A. F. G. (2004) *Considerações Preliminares sobre a Capacidade de Infiltração de Água no Solo no Distrito Industrial II Manaus*. V Simpósio Nacional de Geomorfologia I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia UFSM - RS, Rio Grande do Sul.

MORAIS, N.B.; SOUZA, C.C; DIAS, E. O.; BERTOLINO, A V. F. A; BERTOLINO, L. C. (2018) *Variabilidade da Condutividade Hidráulica e do Potencial Matricial em um Cambissolo com diferentes coberturas*. XII SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia - UGB - União da Geomorfologia Brasileira. Crato -Ceará.

FREDLUND, M. D. (2016) *Numerical Modeling of Unsaturated Soils Problems*. Soils and Rocks. São Paulo, 39(1): 97-109. 97.

OLIVEIRA, L. R. G. (2013) *Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Recife, Pernambuco.

OLIVEIRA, R. F. & BRAGA, R. M. Q. L. (2017) *Sistema De Cobertura Final De Um Aterro Sanitário Para a RMB de Belém-PA Com Emprego De Resíduos Da Construção Civil*. R. gest. sust. ambient., Florianópolis-SC, v. 6, n. 3, p. 573-596.

OTTONI FILHO, T. B.; OTTONI, M. V.; OLIVEIRA, M. B.; MACEDO, J. R., & REICHARDT, K. (2014) *Revisiting field capacity (FC): Variation of definition of FC and its estimation from pedotransfer functions*. R. Bras. Ci. Solo, 38, 1750-1764.

PADILLA, R. S. (2007) *“Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários”*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte.

PEREIRA, A. R. (2005) *Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather*. Bragantia, Campinas, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000687052005000200019&lng=en&nrm=iso > Acesso em: 04 maio 2020.

PILAU, F. G. (2014) *Balanço Hídrico*. Notas de aula: Leb0495 – Análise Física Do Ambiente. Universidade De São Paulo, Escola Superior De Agricultura 'Luiz De Queiroz', Departamento De Engenharia De Biosistemas. Disponível em <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/leb495/Aula_5.pdf> Acesso em: 30 abr. 2020.

RAMOS, T. B.; GONÇALVES, M. C.; MARTINS, J. C.; PEREIRA, L. S. (2016) *Características de retenção de água no solo para utilização na rega das culturas*. Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária. Oeiras, Portugal.

REICHARDT, K. (1988) *Capacidade de campo*. R. Bras. Ci. Solo. 12:221-216. Resolução CONAMA Nº 404 (2008). "Critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos" - Data da legislação: 11/11/2008 - Publicação DOU nº 220, de 12/11/2008, pág. 93.

ROCCA, A.C.C. *et al.* (1993) *Resíduos sólidos industriais*. 2.ed. São Paulo. CETESB, 234p.

ROSE, J. L. (2009) *Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camada oxidativas experimentais*. 166f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SALTON, J. C. & TOMAZI, M. (2014) *Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo*. Comunicado técnico (Embrapa). Dourados, MS. Disponível em <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1005326/1/COT198.pdf>> Acesso em: 08 dez. 2019.

SANTOS, M. A. L.; SANTOS, C. G.; SANTOS, D. P.; VIEIRA, J. H.; SANTOS, L. J. S.; DIVINCULA, J. S. (2015) *O fenômeno da histerese nas curvas de retenção da água no solo e no manejo da irrigação*. XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. UFS - São Cristóvão/SE.

SÃO MATEUS, M. S. C.; MACHADO, S. L.; BARBOSA, M. C. (2012) *An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill*. Waste Management, v.32, p.471– 481, 2012.

SENTELHAS & ANGELOCCI (2012) *Balanço Hídrico – Climatológico Normal e Sequencial de Cultura e para Manejo de Irrigação*. Notas de aula – Meteorologia Agrícola. EASL/USP. São Paulo.

SOILVISION (2018) *SVFlux – 1D, 2D, 3D saturated, unsaturated finite element groundwater seepage modeling*. Verification Manual. SoilVision Systems Ltd. Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

SQUILLACE, M.; BABB, E.; KEAN, B.; SNIDER, C. J. (2012) *Landfill Cover Design: Evapotranspiration Landfill Cover Systems Provide A Natural, Cost-Effective, High-Performance Solution*. A Burns & McDonnell Publication. No. 3.

STERN, J.C.; CHANTON, J.; ABICHOU, 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.

TEIXEIRA, P.F. (2008) *Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos*. 168f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. (1955) *The water balance*. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p.

THUSYANTHAN, I.; MADABHUSHI, S.P.G. (2003) *Experimental study of vibrations in underground structures*. ICE Proc. of Civil Engineering, Journal of Geotechnical Engineering, No.2, Vol .GT 156, pp 75-82.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (2003). *Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet. Solid Waste and Emergency Response*. EPA 542-F-03-015 Agency (5102G). Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>> Acesso em: 09 set. 2020.

USEPA - 40 CFR Part 258 (1997) *Revisions to Criteria for Municipal. Rules and Regulations*. Federal Register / v. 62, n. 145.

USEPA – EPA/530-SW-91-084 (1992) *Final Cover Requirements for Municipal Solid Waste Landfill*. Environmental Fact Sheet. EPA. United States.

USEPA 542-F-03-015 (2003) *Evapotranspiration Landfill Cover System*. United Stated Environmental Protection Agency.

USEPA (1989) *Technical Guidance Document, Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments*. EPA/530–SW–89–047.

US Interstate Technology & Regulatory Council – ITRC (2003) *Technical and Regulatory Guidance for Design, Installation, and Monitoring of Alternative Final Landfill Covers*. Technical and Regulatory Guidance. December 2003. United States. Disponível em: <<https://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=2> > Acesso em: 09 set. 2020.

USEPA (2014) *Municipal Solid Waste Landfills Economic Impact Analysis for the Proposed New Subpart to the New Source Performance Standards*. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air and Radiation. North Carolina. US.

- VALENÇA, J. M. M. S. (2002) *Aplicação de um modelo não constitutivo para análise das deformações em um solo compactado não saturado*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco- UFPE, Engenharia Civil.
- VIEIRA, A. F. G. (1988) *Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM)*. Florianópolis. Departamento de Geografia da UFSC (dissertação de Mestrado).
- Wilson, G. W. (1990) *Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems*. Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- WILSON, G. W.; FREDLUND D. G; BARBOU (1994) *Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation*. *Canadian Geotechnical Journal*. 31, 151-161.
- YANG, H.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C. (2006) *Behaviour of unsaturated layered soil columns during infiltration*. *Journal of hydrologic engineering*. 2006. Disponível em: <https://dr.ntu.edu.sg/handle/10220/7348>. Acesso em: 09 jul. 2019.
- YARON B.; CALVET R.; PROST R. (1996) *Volatilization into the Soil Atmosphere*. In: *Soil Pollution*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61147-6_4.
- YUAN, J. P.; DING, G. (2011) *Size effect in soil-water characteristic curve of clay-gravel mixture*. *Unsaturated Soils. Theory and Practice*. Kasetsart university. Thailand. ISBN 978-616-7522-77-7.
- ZHAN, L.; QIU, Q.; XU, Q.; XU, W.; CHEN, Y. (2016) *Field measurement of gas permeability of compacted loess used as an earthen cover for a municipal solid waste landfill*. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. 2016 17(7): 541-552. Hangzhou, China.

APÊNDICE A - DADOS DE PRECIPITAÇÃO (SÉRIE INMET 1961-2008) EM ORDEM CRONOLÓGICA

Tabela 1 - Dados de precipitação (série INMET 1961-2008) em ordem cronológica

ANO	P	Prefetiva	ETP	EH
2008	1989,3	561.61	230.20	607,97
2007	1731,2	362.02	219.02	424,7
2006	1552,9	227.28	244.59	243,85
2005	1.795,80	409.67	252.06	464,01
2004	2.089,20	639.10	239.42	627,05
2003	1.801,20	416.24	245.33	357,49
2002	1.925,10	515.17	239.35	469,8
2001	1300,5	036.82	240.86	104,84
2000	2727,4	132.72	236.33	062,27
1999	1100,6	74.81	241.66	58,04
1998	877,8	00.92	268.91	0
1997	1459	147.58	247.84	207,85
1996	1752,7	372.71	243.42	224,89
1995	1316,2	036.15	237.62	374,28
1994	1795,2	411.39	239.22	324,48
1993	809,3	648.85	244.85	19,76
1992	1665,4	314.77	235.41	164,14
1991	1597,2	254.87	229.80	310,93
1990	1289,6	017.20	238.72	129,47
1989	1916,3	515.71	234.95	437,95
1988	1512,9	191.90	244.23	179,69
1987	1366,9	073.40	249.80	146,28
1986	2342,2	834.78	226.05	635,46
1985	1843,9	445.61	229.64	438,73
1984	1813,7	428.87	243.01	474,97
1983	1118,3	82.83	243.42	0
1982	1458,3	150.48	226.64	250,24
1981	1281,5	012.25	221.67	98,26
1980	1624,7	280.91	234.22	245,92
1979	1500,3	182.45	232.51	246,42
1978	1739,7	361.96	223.31	310,57
1977	1607,6	264.96	224.67	324,45
1976	1392,9	097.72	211.07	107,85
1975	1566,2	230.51	217.75	173,96
1974	1670,8	318.33	214.62	290,25
1973	1435,1	132.83	245.14	99,3
1972	1526,7	205.95	230.17	268,88
1971	1364,7	071.41	217.68	76,6
1970	1652,2	297.27	226.20	365,37
1969	1554,4	229.90	237.51	324,18
1968	1207,2	52.48	227.41	86,27
1967	1325,1	044.22	219.33	77,85
1966	1621,9	275.15	227.19	250,51
1965	1436,5	136.65	217.42	179,31
1964	1708,2	334.54	224.78	253,5
1963	1377,7	084.40	221.73	50,59
1962	1590,8	256.05	226.88	291,4
1961	1744,5	371.84	221.99	401,69
MÉDIA				228,21

Fonte: INMET

APÊNDICE B - DADOS DE PRECIPITAÇÃO (SÉRIE INMET 1961-2008) EM ORDEM CRESCENTE

Tabela 2 - Dados de precipitação (série INMET 1961-2008) em ordem crescente

	ANO	P	Prefeitura	ETP	EH
1	1993	809,3	648.85	244.85	19,76
2	1998	877,8	700.92	268.91	0
3	1999	1100,6	874.81	241.66	58,04
4	1983	1118,3	882.83	243.42	0
5	1968	1207,2	952.48	227.41	86,27
6	1981	1281,5	1012.25	221.67	98,26
7	1990	1289,6	1017.20	238.72	129,47
8	2001	1300,5	1036.82	240.86	104,84
9	1995	1316,2	1036.15	237.62	374,28
10	1967	1325,1	1044.22	219.33	77,85
11	1971	1364,7	1071.41	217.68	76,6
12	1987	1366,9	1073.40	249.80	146,28
13	1963	1377,7	1084.40	221.73	50,59
14	1976	1392,9	1097.72	211.07	107,85
15	1973	1435,1	1132.83	245.14	99,3
16	1965	1436,5	1136.65	217.42	179,31
17	1982	1458,3	1150.48	226.64	250,24
18	1997	1459	1147.58	247.84	207,85
19	1979	1500,3	1182.45	232.51	246,42
20	1988	1512,9	1191.90	244.23	179,69
21	1972	1526,7	1205.95	230.17	268,88
22	2006	1552,9	1227.28	244.59	243,85
23	1969	1554,4	1229.90	237.51	324,18
24	1975	1566,2	1230.51	217.75	173,96
25	1962	1590,8	1256.05	226.88	291,4
26	1991	1597,2	1254.87	229.80	310,93
27	1977	1607,6	1264.96	224.67	324,45
28	1966	1621,9	1275.15	227.19	250,51
29	1980	1624,7	1280.91	234.22	245,92
30	1970	1652,2	1297.27	226.20	365,37
31	1992	1665,4	1314.77	235.41	164,14
32	1974	1670,8	1318.33	214.62	290,25
33	1964	1708,2	1334.54	224.78	253,5
34	2007	1731,2	1362.02	219.02	424,7
35	1978	1739,7	1361.96	223.31	310,57
36	1961	1744,5	1371.84	221.99	401,69
37	1996	1752,7	1372.71	243.42	224,89
38	1994	1795,2	1411.39	239.22	324,48
39	2005	1.795,80	1409.67	252.06	464,01
40	2003	1.801,20	1416.24	245.33	357,49
41	1984	1813,7	1428.87	243.01	474,97
42	1985	1843,9	1445.61	229.64	438,73
43	1989	1916,3	1515.71	234.95	437,95
44	2002	1.925,10	1515.17	239.35	469,8
45	2008	1989,3	1561.61	230.20	607,97
46	2004	2.089,20	1639.10	239.42	627,05
47	1986	2342,2	1834.78	226.05	635,46
48	2000	2727,4	2132.72	236.33	6062,27
	MÉDIA				228,21

Fonte: INMET

**APÊNDICE C - FAIXAS DE PRECIPITAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS
FREQUÊNCIAS SIMPLES (fi) E ACUMULADA**

Tabela 3 - Faixas de precipitação com suas respectivas frequências simples (fi) e acumuladas

	PRECIPITAÇÃO	fi	Fi
1	800-900	2	2
2	901-1000	0	2
3	1001-1100	1	3
4	1001-1200	1	4
5	1201-1300	3	7
6	1301-1400	7	14
7	1401-1500	4	18
8	1500-1601	8	26
9	1601-1700	6	32
10	1701-1800	7	39
11	1801-1900	3	42
12	1901-2000	3	45
13	2001-2100	1	46
14	2101-2200	0	46
15	2201-2300	0	46
16	2301-2400	1	47
17	2401-2500	0	47
18	2501-2600	0	47
19	2601-2700	0	47
20	2701-2800	1	48
		48	

PERCENTIL 95% = 2061

Fonte: INMET

APÊNDICE D - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA CONVENCIONAL PARA O ANO TÍPICO (MODELO NÃO CALIBRADO)

Tabela 4 - Cálculo do balanço hídrico da camada convencional para o ano típico (modelo não calibrado)

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL												
1 Evapotranspiração Potencial (média hist.) - ETP (mm)	174,50	160,60	173,50	158,20	143,30	124,10	117,20	120,00	130,40	152,40	159,30	171,70
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	788,30	948,90	1122,40	1280,60	1423,90	1548,00	1665,20	1785,20	1915,6	2068,0	2227,3	2399,0
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO												
3 Precipitação total mensal (média hist.) - P (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,20	55,20	38,70	55,30
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	355,50	487,90	698,50	989,00	1300,80	1691,90	2045,60	2263,40	2363,60	2418,80	2457,50	2512,80
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,43	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43
7 C	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,17	0,17	0,17	0,17
8 ETP - P (mm)	68,40	28,20	-37,10	-132,30	-168,50	-267,00	-236,50	-97,80	30,20	97,20	120,60	116,40
9 Escoamento superficial - R (mm)	18,25	22,77	44,65	61,59	66,10	82,91	74,98	46,17	17,23	9,49	6,66	9,51
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	61,15	83,92	128,57	190,15	256,25	339,17	414,15	460,32	477,56	487,05	493,71	503,22
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	87,85	109,63	165,95	228,91	245,70	308,19	278,72	171,63	82,97	45,71	32,04	45,79
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-86,65	-50,97	-7,55	70,71	102,40	184,09	161,52	51,63	-47,43	-106,69	-127,26	-125,91
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)												
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	3,40	2,32	2,19	72,90	133,00	133,00	133,00	133,00	93,10	41,74	16,03	6,22
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	167,94	170,25	172,44	245,34	378,34	511,34	644,34	777,34	870,4	912,2	928,2	934,4
16 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-3,12	-1,08	-0,13	70,71	60,10	0,00	0,00	0,00	-39,9	-51,4	-25,7	-9,8
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	90,97	110,71	166,08	158,20	143,30	124,10	117,20	120,00	122,86	97,07	57,75	55,60
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	430,26	540,97	707,05	865,25	1008,55	1132,65	1249,85	1369,85	1492,7	1589,8	1647,5	1703,1
19 DEF (mm)	83,53	49,89	7,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,5	55,3	101,5	116,1
20 EXC (mm)	0,00	0,00	0,00	61,59	108,40	267,00	236,50	97,80	0,0	0,0	0,0	0,0
21 Reposição (mm)	90,97	110,71	166,08	228,91	203,40	124,10	117,20	120,00	122,9	97,1	57,8	55,6
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR												
22 PERC _{est} - Média Hist. - CONV - (BHS) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	42,3	184,1	161,5	51,6	0,0	0,0	0,0	0,0
23 Percolação Acumulada - mm	0,00	0,00	0,00	0,00	42,30	226,39	387,90	439,53	439,5	439,5	439,5	439,5
24 Linha de checagem - CK (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,2	55,2	38,7	55,3
25	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26 Fluxo de percolação - Qperc (m³/s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	9,E-06	4,E-05	3,E-05	1,E-05	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,57%	47,07%	45,66%	23,70%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Infiltração medida em campo - CONV (mm)						43,98	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Erro (%)						318,6%	64506,2%					
Erro absoluto (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	42,3	140,1	161,3	51,6	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O Autor (2021)

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

APÊNDICE E - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA CONVENCIONAL (ANO TÍPICO)

Tabela 5 - Cálculo do balanço hídrico para camada convencional (ano típico) utilizando os coeficientes C=0,60 em junho, C=0,65 em julho e C=0,52 em agosto e os parâmetros θ_{cc} de 33% e θ_{mp} de 23%

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL												
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	174,50	160,60	173,50	158,20	143,30	124,10	117,20	120,00	130,40	152,40	159,30	171,70
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	788,30	948,90	1122,40	1280,60	1423,90	1548,00	1665,20	1785,20	1915,6	2068,0	2227,3	2399,0
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO												
3 Precipitação total mensal- P (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,20	55,20	38,70	55,30
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	355,50	487,90	698,50	989,00	1300,80	1691,90	2045,60	2263,40	2363,60	2418,80	2457,50	2512,80
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,43	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43
7 C	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,60	0,65	0,52	0,17	0,17	0,17	0,17
8 ETP - P (mm)	68,40	28,20	-37,10	-132,30	-168,50	-267,00	-236,50	-97,80	30,20	97,20	120,60	116,40
9 Escoamento superficial - R (mm)	18,25	22,77	44,65	61,59	66,10	234,66	229,91	113,26	17,23	9,49	6,66	9,51
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	61,15	83,92	128,57	190,15	256,25	490,91	720,82	834,07	851,31	860,80	867,46	876,97
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	87,85	109,63	165,95	228,91	245,70	156,44	123,80	104,54	82,97	45,71	32,04	45,79
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-86,65	-50,97	-7,55	70,71	102,40	32,34	6,59	-15,46	-47,43	-106,69	-127,26	-125,91
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)												
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	0,12	0,06	0,05	70,00	70,00	70,00	70,00	56,13	28,50	6,21	1,01	0,17
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	89,18	89,24	89,29	159,29	229,29	299,29	369,29	425,42	453,93	460,13	461,14	461,31
16 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-0,29	-0,06	-0,01	69,95	0,00	0,00	0,00	-13,87	-27,63	-22,30	-5,20	-0,84
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	88,14	109,69	165,96	158,20	143,30	124,10	117,20	118,41	110,59	68,00	37,24	46,63
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	433,53	543,22	709,18	867,38	1010,68	1134,78	1251,98	1370,39	1481,0	1549,0	1586,2	1632,9
19 DEF (mm)	86,36	50,91	7,54	0,00	0,00	0,00	0,00	1,59	19,8	84,4	122,1	125,1
20 EXC (mm)	0,00	0,00	0,00	62,35	168,50	267,00	236,50	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
21 Reposição (mm)	88,14	109,69	165,96	228,15	143,30	124,10	117,20	118,41	110,6	68,0	37,2	46,6
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR												
22 PERC _{est} - Média Hist. - CONV - (BHS calibrado) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,8	102,4	32,34	6,59	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
23 Percolação Acumulada - mm	0,00	0,00	0,00	0,77	103,16	135,50	142,10	142,10	142,1	142,1	142,1	142,1
24 Linha de checagem - CK (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,2	55,2	38,7	55,3
25	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26 Fluxo de percolação - Qperc (m ³ /s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	2,E-07	2,E-05	7,E-06	1,E-06	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,26%	32,84%	8,27%	1,86%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Infiltração medida em campo - CONV (mm)						43,98	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Erro (%)						26,47%	2538,00%					
Erro absoluto (mm)						11,6	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

APÊNDICE F - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA CONVENCIONAL (ANO TÍPICO)

Tabela 6 - Cálculo do balanço hídrico para camada convencional (ano típico) utilizando os coeficientes $C=0,60$ em maio, $C=0,60$ em junho, $C=0,65$ em julho e $C=0,52$ em agosto e os parâmetros θ_{cc} de 33% e θ_{mp} de 23%

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL												
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	174,50	160,60	173,50	158,20	143,30	124,10	117,20	120,00	130,40	152,40	159,30	171,70
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	788,30	948,90	1122,40	1280,60	1423,90	1548,00	1665,20	1785,20	1915,6	2068,0	2227,3	2399,0
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO												
3 Precipitação total mensal- P (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,20	55,20	38,70	55,30
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	355,50	487,90	698,50	989,00	1300,80	1691,90	2045,60	2263,40	2363,60	2418,80	2457,50	2512,80
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,43	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43
7 C	0,17	0,17	0,21	0,21	0,60	0,60	0,65	0,52	0,17	0,17	0,17	0,17
8 ETP - P (mm)	68,40	28,20	-37,10	-132,30	-168,50	-267,00	-236,50	-97,80	30,20	97,20	120,60	116,40
9 Escoamento superficial - R (mm)	18,25	22,77	44,65	61,59	187,08	234,66	229,91	113,26	17,23	9,49	6,66	9,51
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	61,15	83,92	128,57	190,15	377,23	611,89	841,80	955,05	972,29	981,78	988,44	997,95
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	87,85	109,63	165,95	228,91	124,72	156,44	123,80	104,54	82,97	45,71	32,04	45,79
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-86,65	-50,97	-7,55	70,71	-18,58	32,34	6,59	-15,46	-47,43	-106,69	-127,26	-125,91
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)												
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	0,12	0,06	0,05	70,00	53,68	70,00	70,00	56,13	28,50	6,21	1,01	0,17
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	89,18	89,24	89,29	159,29	212,97	282,97	352,97	409,10	437,61	443,82	444,82	444,99
16 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	-0,29	-0,06	-0,01	69,95	-16,32	16,32	0,00	-13,87	-27,63	-22,30	-5,20	-0,84
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	88,14	109,69	165,96	158,20	141,04	124,10	117,20	118,41	110,59	68,00	37,24	46,63
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	433,53	543,22	709,18	867,38	1008,42	1132,52	1249,72	1368,13	1478,7	1546,7	1584,0	1630,6
19 DEF (mm)	86,36	50,91	7,54	0,00	2,26	0,00	0,00	1,59	19,8	84,4	122,1	125,1
20 EXC (mm)	0,00	0,00	0,00	62,35	0,00	250,68	236,50	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
21 Reposição (mm)	88,14	109,69	165,96	228,15	141,04	140,42	117,20	118,41	110,6	68,0	37,2	46,6
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR												
22 PERC _{est} - Média Hist. - CONV - (BHS calibrado) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	16,02	6,59	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
23 Percolação Acumulada - mm	0,00	0,00	0,00	0,77	0,77	16,79	23,38	23,38	23,4	23,4	23,4	23,4
24 Linha de checagem - CK (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,2	55,2	38,7	55,3
25	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26 Fluxo de percolação - Qperc (m ³ /s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	2,E-07	0,E+00	3,E-06	1,E-06	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,26%	0,00%	4,10%	1,86%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Infiltração medida em campo - CONV (mm)						43,98	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Erro (%)						63,57%	2538,00%					
Erro absoluto (mm)						28,0	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Período úmido				Dados de entrada			Checagem dos cálculos			
		Período seco				Dados de saída						

Fonte: O Autor (2021)

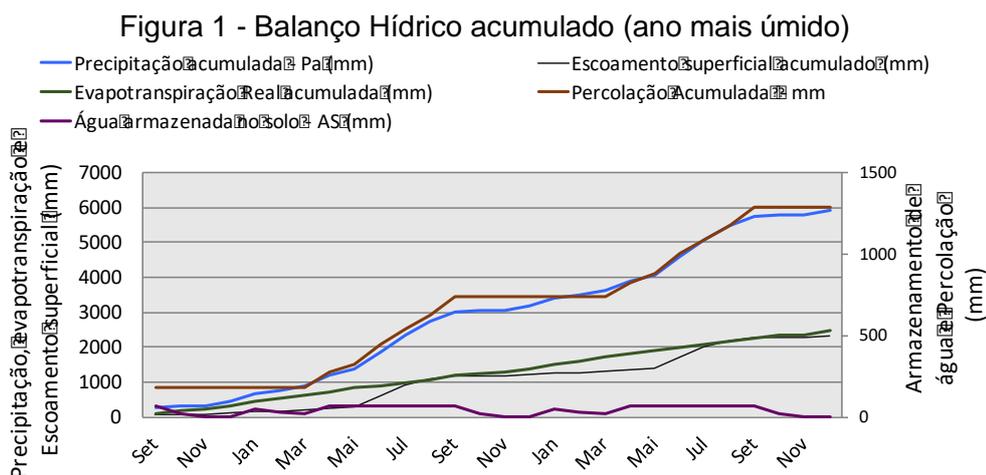
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

APÊNDICE G - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA CONVENCIONAL PARA ANO MAIS ÚMIDO (MODELO CALIBRADO)

Tabela 7 - Cálculo do balanço hídrico da camada convencional para ano mais úmido (modelo calibrado)

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO - ANO MAIS ÚMIDO												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL												
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	120,92	111,19	114,58	97,82	90,07	79,68	82,60	92,14	100,07	115,07	115,29	116,90
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	568,25	679,44	794,02	891,84	981,91	1061,59	1144,19	1236,33	1336,4	1451,5	1566,8	1683,7
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO												
3 Precipitação total mensal- P (mm)	205,60	84,40	125,60	301,10	178,70	515,00	491,70	367,60	270,10	44,60	4,60	138,40
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	663,30	747,70	873,30	1174,40	1353,10	1868,10	2359,80	2727,40	2997,50	3042,10	3046,70	3185,10
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,53	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,53
7 C	0,21	0,17	0,21	0,21	0,21	0,60	0,65	0,52	0,21	0,17	0,17	0,21
8 ETP - P (mm)	-84,68	26,79	-11,02	-203,28	-88,63	-435,32	-409,10	-275,46	-170,03	70,47	110,69	-21,50
9 Escoamento superficial - R (mm)	43,59	14,52	26,63	63,83	37,88	309,00	319,61	191,15	57,26	7,67	0,79	29,34
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	138,65	153,17	179,80	243,63	281,51	590,51	910,12	1101,27	1158,53	1166,20	1166,99	1196,33
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	162,01	69,88	98,97	237,27	140,82	206,00	172,10	176,45	212,84	36,93	3,81	109,06
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	41,09	-41,31	-15,61	139,45	50,75	126,32	89,50	84,31	112,77	-78,14	-111,48	-7,84
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)												
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	45,26	25,09	20,07	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	22,92	4,66	4,17
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	147,02	172,10	192,18	262,18	332,18	402,18	472,18	542,18	612,18	635,10	639,76	643,93
16 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	41,09	-20,17	-5,01	49,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-47,08	-18,26	-0,49
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	120,92	90,06	103,99	97,82	90,07	79,68	82,60	92,14	100,07	84,00	22,07	109,55
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	436,62	526,68	630,66	728,48	818,55	898,23	980,83	1072,97	1173,0	1257,0	1279,1	1388,7
19 DEF (mm)	0,00	21,13	10,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,1	93,2	7,3
20 EXC (mm)	43,59	0,00	0,00	153,35	88,63	435,32	409,10	275,46	170,00	0,00	0,00	0,00
21 Reposição (mm)	162,01	90,06	103,99	147,75	90,07	79,68	82,60	92,14	100,1	84,0	22,1	109,6
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR												
22 PERC _{est} - Ano mais úmido - (BHS calibrado) (mm)	0,0	0,0	0,0	89,5	50,7	126,32	89,50	84,31	112,8	0,0	0,0	0,0
23 Percolação Acumulada - mm	182,07	182,07	182,07	271,59	322,33	448,65	538,15	622,46	735,2	735,2	735,2	735,2
24 Linha de checagem - CK (mm)	205,60	84,40	125,60	301,10	178,70	515,00	491,70	367,60	270,1	44,6	4,6	138,4
25	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26 Fluxo de percolação - Q _{perc} (m ³ /s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	2,E-05	1,E-05	3,E-05	2,E-05	2,E-05	2,E-05	0,E+00	0,E+00	0,E+00
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	29,73%	28,40%	24,53%	18,20%	22,93%	41,75%	0,00%	0,00%	0,00%
			Período úmido			Dados de entrada				Checagem dos cálculos		
			Período seco			Dados de saída						

Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)



Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

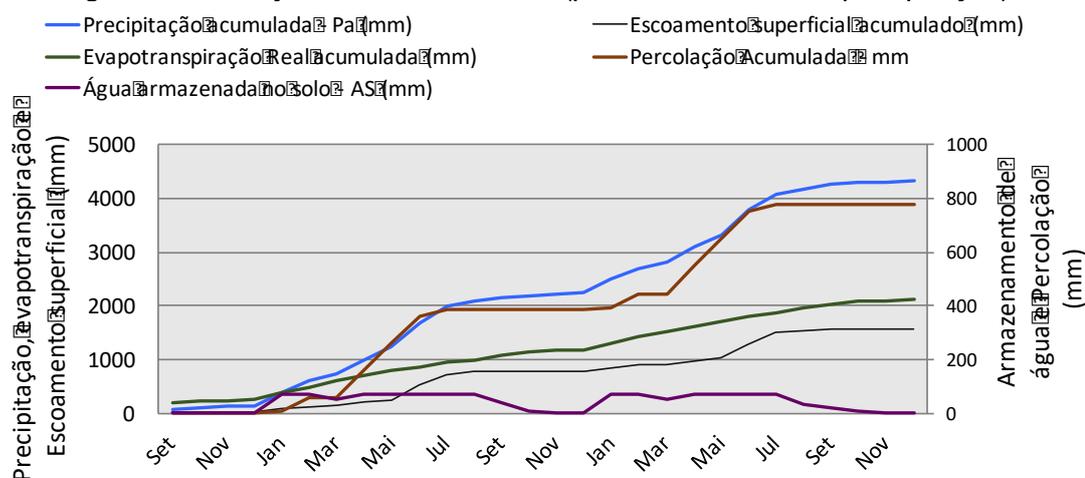
APÊNDICE H - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO DA CAMADA CONVENCIONAL PARA PERCENTIL DE 95% DA PRECIPITAÇÃO (MODELO CALIBRADO)

Tabela 8 - Cálculo do balanço hídrico da camada convencional para percentil de 95% da precipitação (modelo calibrado)

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO - PERCENTIL DE 95%												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL												
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	121,29	111,19	113,38	99,31	89,19	79,04	80,98	91,16	100,97	115,07	117,37	120,46
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	575,16	686,35	799,73	899,04	988,23	1067,27	1148,25	1239,41	1340,4	1455,5	1572,8	1693,3
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO												
3 Precipitação total mensal- P (mm)	252,10	203,90	119,70	277,80	240,90	450,30	306,40	89,70	78,70	28,90	20,10	20,70
4 Precipitação acumulada - Pa (mm)	400,50	604,40	724,10	1001,90	1242,80	1693,10	1999,50	2089,20	2167,90	2196,80	2216,90	2237,60
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
7 C	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,65	0,52	0,17	0,17	0,17	0,17
8 ETP - P (mm)	-130,81	-92,71	-6,32	-178,49	-151,71	-371,26	-225,42	1,46	22,27	86,17	97,27	99,76
9 Escoamento superficial - R (mm)	53,45	43,23	25,38	58,89	51,07	270,18	199,16	46,64	13,54	4,97	3,46	3,56
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	78,97	122,20	147,57	206,47	257,54	527,72	726,88	773,52	787,06	792,03	795,49	799,05
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	198,65	160,67	94,32	218,91	189,83	180,12	107,24	43,06	65,16	23,93	16,64	17,14
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	77,36	49,48	-19,06	119,60	100,64	101,08	26,26	-48,10	-35,81	-91,14	-100,73	-103,32
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)												
13 Água armazenada no solo - AS (mm)	70,00	70,00	53,32	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	41,97	11,42	2,71	0,62
15 Armazenamento de água acumulado (mm)	70,25	140,25	193,57	263,57	333,57	403,57	473,57	543,57	585,54	596,96	599,66	600,28
16 Troca de Armazenamento de água - Δ AS	70,00	0,00	-16,68	16,68	0,00	0,00	0,00	0,00	-28,03	-30,56	-8,71	-2,09
17 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	121,29	111,19	111,01	99,31	89,19	79,04	80,98	43,06	93,19	54,48	25,35	19,23
18 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	383,46	494,65	605,66	704,97	794,16	873,20	954,18	997,23	1090,4	1144,9	1170,3	1189,5
19 DEF (mm)	0,00	0,00	2,37	0,00	0,00	0,00	0,00	48,10	7,8	60,6	92,0	101,2
20 EXC (mm)	60,81	92,71	0,00	161,81	151,71	371,26	225,42	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
21 Reposição (mm)	191,29	111,19	111,01	115,99	89,19	79,04	80,98	43,06	93,2	54,5	25,4	19,2
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR												
22 PERC _{est} - Percentil de 95% - (BHS calibrado) (mm)	7,4	49,5	0,0	102,9	100,6	101,08	26,26	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
23 Percolação Acumulada - mm	7,37	56,85	56,85	159,76	260,40	361,48	387,74	387,74	387,7	387,7	387,7	387,7
24 Linha de checagem - CK (mm)	252,10	203,90	119,70	277,80	240,90	450,30	306,40	89,70	78,7	28,9	20,1	20,7
25	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26 Fluxo de percolação - Qperc (m ³ /s)	2,E-06	1,E-05	0,E+00	2,E-05	2,E-05	2,E-05	5,E-06	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
27 Percentual percolado	2,92%	24,27%	0,00%	37,05%	41,78%	22,45%	8,57%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
		Período úmido			Dados de entrada				Checagem dos cálculos			
		Período seco			Dados de saída							

Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Figura 2 - Balanço Hídrico acumulado (percentil de 95% da precipitação)



Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

APÊNDICE I - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA OXIDATIVA (ANO TÍPICO)

Tabela 9 - cálculo do balanço hídrico para camada oxidativa (ano típico) utilizando os coeficientes C=0,43 em maio, C=0,58 em junho, C=0,43 em julho, e os valores de θ_{cc} de 33% para solo puro e de θ_{cc} de 40% para solo + composto

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO													
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL													
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	174,50	160,60	173,50	158,20	143,30	124,10	117,20	120,00	130,40	152,40	159,30	171,70	4184,20
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	788,30	948,90	1122,40	1280,60	1423,90	1548,00	1665,20	1785,20	1915,6	2068,0	2227,3	2399,0	
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO													
3 Precipitação total mensal- P (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,20	55,20	38,70	55,30	4776,20
4 Precipitação acumulada (mm)	355,50	487,90	698,50	989,00	1300,80	1691,90	2045,60	2263,40	2363,60	2418,80	2457,50	2512,80	
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,43	0,43	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
7 C	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,43	0,58	0,43	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
8 ETP - P (mm)	68,40	28,20	-37,10	-132,30	-168,50	-267,00	-236,50	-97,80	30,20	97,20	120,60	116,40	
9 Escoamento superficial - R (mm)	18,25	22,77	44,65	61,59	66,10	168,17	206,30	93,61	17,23	9,49	6,66	9,51	1491,58
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	61,15	83,92	128,57	190,15	256,25	424,43	630,73	724,34	741,58	751,07	757,73	767,24	
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	87,85	109,63	165,95	228,91	245,70	222,93	147,40	124,19	82,97	45,71	32,04	45,79	3284,62
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	-86,65	-50,97	-7,55	70,71	102,40	98,83	30,20	4,19	-47,43	-106,69	-127,26	-125,91	-899,58
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)													
13 Água armazenada no solo +compostado - AS1 (mm)	0,00	0,00	0,00	64,50	64,50	64,50	64,50	64,50	30,92	5,91	0,82	0,12	720,66
14 Água armazenada no solo puro compactado - AS2 (mm)	0,00	0,00	0,00	6,21	54,00	54,00	54,00	54,00	22,43	3,11	0,29	0,03	496,20
15 Armazenamento de água total - AS (mm)	0,00	0,00	0,00	70,71	118,50	118,50	118,50	118,50	53,35	9,02	1,12	0,15	1216,86
16 Armazenamento de água acumulado (mm)	0,08	0,08	0,08	70,80	189,30	307,80	426,30	544,80	598,15	607,17	608,29	608,43	
17 Troca de Armazenamento de água - Δ AS	0,00	0,00	0,00	70,71	47,79	0,00	0,00	0,00	-65,15	-44,33	-7,91	-0,97	-128,25
18 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	87,85	109,63	165,95	158,20	143,30	124,10	117,20	120,00	148,12	90,03	39,95	46,76	3037,21
19 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	422,75	532,38	698,33	856,53	999,83	1123,93	1241,13	1361,13	1509,25	1599,28	1639,23	1685,99	
20 DEF (mm)	86,65	50,97	7,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-17,72	62,37	119,35	124,94	1146,99
21 EXC (mm)	0,00	0,00	0,00	61,59	120,71	267,00	236,50	97,80	0,00	0,00	0,00	0,00	1567,21
22 Reposição (mm)	87,85	109,63	165,95	228,91	191,09	124,10	117,20	120,00	148,12	90,03	39,95	46,76	3274,20
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR													
23 PERC _{est} - Média Hist. - OXI - (BHS) (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	54,6	98,8	30,2	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	375,66
24 Percolação Acumulada - mm	0,00	0,00	0,00	0,00	54,61	153,44	183,64	187,82	187,8	187,8	187,8	187,8	
25 Linha de checagem - CK (mm)	106,10	132,40	210,60	290,50	311,80	391,10	353,70	217,80	100,2	55,2	38,7	55,3	4776,20
26 Fluxo de percolação - Qperc (m ³ /s)	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	6,E-06	1,E-05	3,E-06	5,E-07	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	
27 Percentual percolado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	17,52%	25,27%	8,54%	1,92%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
		Período úmido				Dados de entrada			Checagem dos cálculos				
		Período seco				Dados de saída							

Fonte: O Autor (2021)
Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

APÊNDICE K - CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO PARA CAMADA OXIDATIVA (PERCENTIL DE 95% DA PRECIPITAÇÃO)

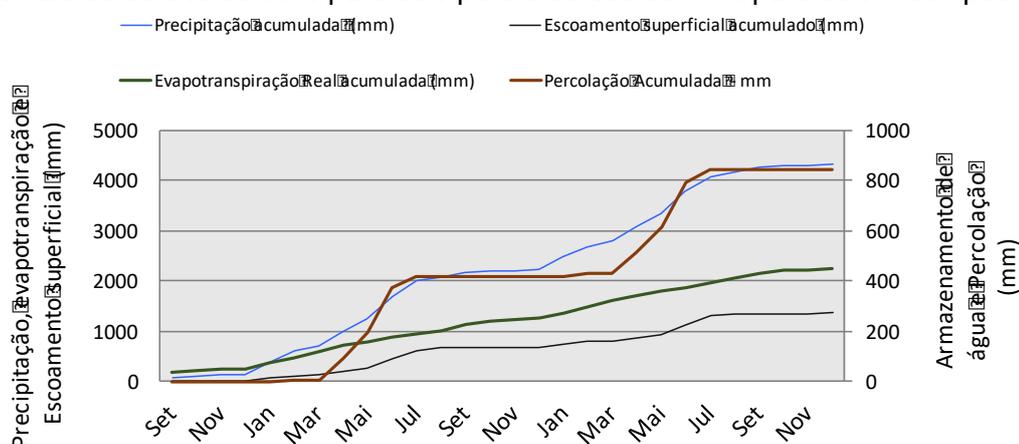
Tabela 11 - Cálculo do balanço hídrico para camada oxidativa (percentil de 95% da precipitação) utilizando os coeficientes $C=0,43$ em maio, $C=0,58$ em junho, $C=0,43$ em julho e os valores de θ_{cc} de 33% para solo puro e de θ_{cc} de 40% para solo + composto

BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL												
1 Evapotranspiração Potencial - ETP (mm)	121,29	111,19	113,38	99,31	89,19	79,04	80,98	91,16	100,97	115,07	117,37	120,46
2 Evapotranspiração potencial acumulada (mm)	575,16	686,35	799,73	899,04	988,23	1067,27	1148,25	1239,41	1340,4	1455,5	1572,8	1693,3
CÁLCULO DO BALANÇO DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO												
3 Precipitação total mensal- P (mm)	252,10	203,90	119,70	277,80	240,90	450,30	306,40	89,70	78,70	28,90	20,10	20,70
4 Precipitação acumulada (mm)	400,50	604,40	724,10	1001,90	1242,80	1693,10	1999,50	2089,20	2167,90	2196,80	2216,90	2237,60
5 C'	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
6 α	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
7 C	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,43	0,58	0,43	0,17	0,17	0,17	0,17
8 ETP - P (mm)	-130,81	-92,71	-6,32	-178,49	-151,71	-371,26	-225,42	1,46	22,27	86,17	97,27	99,76
9 Escoamento superficial - R (mm)	53,45	43,23	25,38	58,89	51,07	193,63	178,71	38,55	13,54	4,97	3,46	3,56
10 Escoamento superficial acumulado (mm)	78,97	122,20	147,57	206,47	257,54	451,17	629,88	668,43	681,97	686,94	690,40	693,96
11 Infiltração - I = (P-R) (mm)	198,65	160,67	94,32	218,91	189,83	256,67	127,69	51,15	65,16	23,93	16,64	17,14
12 Balanço - (I-ETP) (mm)	77,36	49,48	-19,06	119,60	100,64	177,63	46,71	-40,01	-35,81	-91,14	-100,73	-103,32
CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR)												
13 Água armazenada no solo +compostado - AS ₁ (mm)	64,50	64,50	48,00	64,50	64,50	64,50	64,50	64,50	37,02	9,01	1,89	0,38
14 Água armazenada no solo puro compactado - AS ₂ (mm)	12,87	54,00	37,94	54,00	54,00	54,00	54,00	54,00	27,82	5,15	0,80	0,12
15 Armazenamento de água total - AS (mm)	77,37	118,50	85,94	118,50	118,50	118,50	118,50	118,50	64,85	14,16	2,69	0,50
16 Armazenamento de água acumulado (mm)	77,56	196,06	282,00	400,50	519,00	637,50	756,00	874,50	939,35	953,51	956,19	956,69
17 Troca de Armazenamento de água - ΔAS	77,36	41,13	-32,56	32,56	0,00	0,00	0,00	0,00	-53,65	-50,69	-11,47	-2,19
18 Evapotranspiração Real - ETR (mm)	121,29	111,19	126,88	99,31	89,19	79,04	80,98	51,15	118,82	74,62	28,11	19,33
19 Evapotranspiração Real acumulada (mm)	372,56	483,75	610,63	709,94	799,13	878,17	959,15	1010,30	1129,12	1203,73	1231,85	1251,18
20 DEF (mm)	0,00	0,00	-13,50	0,00	0,00	0,00	0,00	40,01	-17,85	40,45	89,26	101,13
21 EXC (mm)	53,45	51,58	0,00	145,93	151,71	371,26	225,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22 Reposição (mm)	198,65	152,32	126,88	131,87	89,19	79,04	80,98	51,15	118,82	74,62	28,11	19,33
CÁLCULO DO FLUXO DE PERCOLAÇÃO PARA CAMADA INFERIOR												
23 PERC _{est} - Média Hist. - OXI - (BHS) Calibrado (mm)	0,0	8,3	0,0	87,0	100,6	177,6	46,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24 Percolação Acumulada - mm	0,00	8,35	8,35	95,39	196,03	373,66	420,37	420,37	420,4	420,4	420,4	420,4
25 Linha de checagem - CK (mm)	252,10	203,90	119,70	277,80	240,90	450,30	306,40	89,70	78,7	28,9	20,1	20,7
26 Fluxo de percolação - Qperc (m ³ /s)	0,E+00	1,E-06	0,E+00	1,E-05	1,E-05	2,E-05	5,E-06	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00
27 Percentual percolado	0,00%	4,09%	0,00%	31,33%	41,78%	39,45%	15,24%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
		Período úmido				Dados de entrada			Checagem dos cálculos			
		Período seco				Dados de saída						

Fonte: O Autor (2021).

Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)

Figura 4 - Balanço hídrico acumulado para camada oxidativa (percentil de 95% da precipitação) utilizando os coeficientes $C=0,43$ em maio, $C=0,58$ em junho, $C=0,43$ em julho e os valores de θ_{cc} de 33% para solo puro e de θ_{cc} de 40% para solo + composto



Fonte: O Autor (2021). Dados Obtidos do INMET; Lopes (2011); Rocca *et al.* (1993)