

ANO  
2019

CAROLINI RODRIGUES FELDHAUS | INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE ENTRADA EM  
MODELOS DE SIMULAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS



**UDESC**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGE

A estimativa da produção de líquidos percolados ao longo da vida de um aterro, bem como o tempo que levam para serem formados são dados valiosos tanto para minimizar o impacto destes ao meio ambiente quanto para o dimensionamento dos sistemas de coleta e tratamento desses líquidos.

Este trabalho utilizou dois programas para modelagem e simulação dos processos hidrológicos dos aterros sanitário e industrial de Joinville. Foram avaliadas as influências da cobertura, características do resíduo, e da pluviometria na geração de percolado.

Orientadora: Virgínia Grace Barros

Joinville, 2019

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

## **INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE ENTRADA EM MODELOS DE SIMULAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS**

CAROLINI RODRIGUES FELDHAUS

JOINVILLE, 2019

CAROLINI RODRIGUES FELDHAUS

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE ENTRADA EM MODELOS DE SIMULAÇÃO  
DE ATERROS DE RESÍDUOS**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia civil, como requisito parcial para obtenção de Título de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Virgínia Grace Barros

JOINVILLE

2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Feldhaus, Carolini Rodrigues

Influência de parâmetros de entrada em modelos de  
simulação de aterros de resíduos / Carolini Rodrigues  
Feldhaus. -- 2019.

113 p.

Orientadora: Virgínia Grace Barros

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2019.

1. Simulação de aterro de resíduos. 2. percolado. 3.  
lixiviado. 4. resíduos sólidos . I. Barros, Virgínia Grace. II.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

# Influência de Parâmetros de Entrada em Simulações de Aterros de Resíduos

por

**Carolini Rodrigues Feldhaus**


Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de


**MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL**

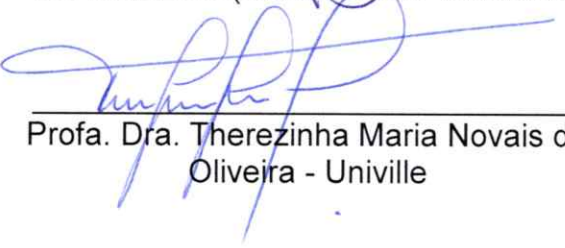
Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”  
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL  
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Virginia Grace Barros  
CCT/UDESC (Orientadora/Presidente)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Elisa Henning  
CCT/UDESC

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Therezinha Maria Novais de  
Oliveira - Univille

**Joinville, SC, 27 de fevereiro de 2019.**

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora Virginia Grace Barros por fazer muito além do necessário para conclusão dessa dissertação. Pelo conhecimento compartilhado, por abrir caminhos, e orientar sobre quais seguir.

Ao Grupo de Engenharia Ambiental da Universidade de Cantábria, Espanha, pela disponibilização do programa computacional MODUELO 4.0, especialmente à Dra. Amaya Lobo García de Cortázar e a Ana López Martínez, pelo suporte técnico, e dicas para simulações no programa.

A Dieter Klostermann, e Marcos da Defesa Civil de Joinville, por compilar e fornecer os dados das estações meteorológicas da cidade.

À EPAGRI, pela cessão de dados meteorológicos utilizados nesse trabalho.

À FAPESC por recursos para infraestrutura da UDESC.

Ao Eng. Willian Marcel Gorniack, e ao Sr. Luiz Antônio Weinand por providenciar e auxiliar na obtenção de dados e entendimento do aterro sanitário de Joinville.

Ao Eng. Cláudio Santos da Silva, a Bibiana Brum Azevedo, e a Jéssica Nazário Machado, por realizarem medições auxiliares, providenciando todas as informações disponíveis do aterro industrial.

Ao Professor Charles Christian Miers do Departamento de Ciência da Computação da UDESC, e ao LabP2D por assessorar no uso da Nuvem da UDESC para agilizar as simulações desse trabalho.

A John Neves Braga Santos do laboratório de solos da UDESC por auxiliar nos ensaios e entendimento deles.

Aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação, por dividirem o conhecimento, compartilhar trabalhos e experiências vivenciadas.

Ao acadêmico Valmor, por ajudar na elaboração e compilação das planilhas desse trabalho, por se mostrar sempre disposto em contribuir.

A minha amiga Sheila, por me dar palavras de incentivo para a conclusão desse trabalho.

A minha família, principalmente meu marido Gilberto por me ouvir e sempre me apoiar nas decisões quanto a esse trabalho.

E finalmente a Deus por colocar essa oportunidade no meu caminho, por me dar saúde e força para vencer as dificuldades encontradas.

## RESUMO

Entre os maiores desafios da sociedade moderna estão a redução da geração de resíduos sólidos e a garantia da disposição final e ambientalmente segura dos resíduos gerados. Mesmo sendo a última opção na ordem de prioridade da política nacional de resíduos sólidos, os aterros sanitários são a opção dominante para a disposição dos resíduos sólidos no Brasil. A estimativa de produção dos líquidos percolados ao longo da vida de um aterro, bem como o tempo que levam para serem formados, são dados valiosos tanto para minimizar o impacto destes no meio ambiente quanto para o dimensionamento dos sistemas de coleta e tratamento desses líquidos. A importância da coleta e tratamento do percolado, e a dificuldade de se obter uma estimativa precisa da sua qualidade e geração devido à ação de vários fatores justifica este trabalho, que teve como objetivo geral a avaliação da geração de percolado a partir da modelagem e simulação dos processos hidrológicos dos aterros sanitário e industrial de Joinville, SC. Foram utilizados dois programas, o HELP 3.07 e o MODUELO 4.0 para simular as gerações de percolado nos aterros estudados, e a partir de variações nos dados de entrada dos programas foram avaliadas as influências da cobertura, das características do resíduo e da pluviometria na geração de percolado. Os dados inseridos nos programas foram fornecidos pelas empresas que operam os aterros e obtidos a partir de estimativas e da bibliografia. O percolado gerado em campo foi estimado a partir de medições do nível da lagoa que recebe o percolado do aterro sanitário e do bombeamento de três poços do aterro industrial, sendo essa estimativa comparada com os valores simulados. Os resultados obtidos mostraram que a qualidade dos dados inseridos nos modelos é fundamental para que seja possível representar a realidade do ambiente físico. Os resultados mostraram que, mesmo com a baixa correlação entre os dados mensais simulados e os de campo aproximados, a ordem de grandeza deles foi a mesma e os valores acumulados ficaram próximos. A melhor simulação ocorreu com o MODUELO 4.0 no aterro sanitário com um volume de percolado de 375374m<sup>3</sup>, no período de abril de 2016 a julho de 2017, enquanto nesse mesmo período houve aproximadamente 373331m<sup>3</sup> em campo. As simulações apresentaram o evidente benefício de uma cobertura final impermeável aplicada sobre a camada final dos aterros. Quando comparadas as simulações no MODUELO 4.0 com e sem cobertura final impermeável observaram-se que as gerações de percolado poderiam ser reduzidas em até 89% na área 1 do aterro sanitário, até 76% no maciço classe I do aterro industrial, e até 15% e no maciço classe II considerando os volumes acumulados do primeiro ano após o fechamento caso tivessem cobertura impermeável.

**Palavras Chave:** Simulação de aterro de resíduos, percolado, lixiviado, resíduos sólidos.

## ABSTRACT

Among the major challenges of modern society are the reduction of solid waste generation and the guarantee of the final and environmentally safe disposal of waste generated. Although the last options of the national solid waste policy priority order, landfills are the dominant choice for solid waste disposal in Brazil. Estimates of the production of percolated liquids over the life of a landfill, as well as the time it takes to form, are valuable data to minimize their impact on the environment, and to design the collection and treatment systems for such liquids. The importance of the collection and treatment of percolate, and the difficulty of obtaining an accurate estimate of its quality and generation due to the action of several factors justifies this work, whose general objective was the evaluation of the generation of percolated from the modeling and simulation of the hydrological processes of the sanitary and industrial landfill of Joinville, SC. Two programs, HELP 3.07 and MODUELO 4.0, were used to simulate the percolation generations in the landfills studied, and from influences of the input data of the programs, are studied the influences of the cover, the characteristics of the residue and the rainfall in the percolate generation. The data entered in the programs were provided by the companies that operate the landfills, obtained from estimates and the bibliography. The field generated percolate was estimated from measurements of the level of the lagoon that receives the percolate from the sanitary landfill and from the pumping of three wells of the industrial landfill; these estimates were compared with the simulated values. The results showed that the quality of the data inserted in the models is fundamental so that it is possible to represent the reality of the physical environment. Even with the low correlation between the simulated monthly data and the approximate field data, their order of magnitude was the same and the accumulated values were very close. The best simulation occurred with MODUELO 4.0 in the sanitary landfill with a percolated volume of 375374m<sup>3</sup>, from April 2016 to July 2017, while in the same period there was approximately 373331m<sup>3</sup> in the field. The simulations had the obvious benefit of a final impermeable cover applied to the final layer of the landfill. When comparing the simulations in MODUELO 4.0 with and without impermeable final cover, it was observed that percolated generations could be reduced up to 89% in area 1 of the sanitary landfill, up to 76% in the class I of the industrial landfill, and up to 15% in the class II considering the accumulated volume of the first year after the closing.

**Keywords:** Waste landfill simulation, percolated, leachate, solid waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstrativo dos resíduos sólidos segundo os tipos, em toneladas/mês .....	16
Figura 2 - Aterro sanitário de resíduos sólidos, (a) em corte, (b) em planta.....	20
Figura 3 - Algoritmo geral do MODUELO 4.0 .....	34
Figura 4 - Fluxograma do cálculo hidrológico no MODUELO 4.0.....	36
Figura 5 - Fluxograma da metodologia desse trabalho .....	40
Figura 6 - Localização da área de estudo .....	41
Figura 7 - Aterros em estudo.....	42
Figura 8 - mapa de pluviosidade de Santa Catarina .....	43
Figura 9 - divisão das células dos aterros .....	44
Figura 10 - Drenagem do fundo do aterro industrial.....	49
Figura 11 - Drenagem de percolado no fundo da área 1 do aterro sanitário em planta .....	61
Figura 12 - Drenagem de percolado do fundo da área encerrada do aterro sanitário em planta.....	62
Figura 13 - Drenagem de percolado do fundo do maciço classe I do aterro industrial em planta.....	67
Figura 14 - Drenagem de percolado do fundo do maciço classe II do aterro industrial em planta.....	67
Figura 15 - Simulação da área 1 no MODUELO 4.0 - vista superior.....	79
Figura 16 - Simulação da área encerrada no MODUELO 4.0 - vista superior.....	79
Figura 17 - Simulação de percolado diário do aterro sanitário no MODUELO 4.0 ....	81
Figura 18 - Simulação de percolado mensal do aterro sanitário no MODUELO 4.0 .	82
Figura 19 - Simulação de percolado mensal do aterro sanitário no HELP 3.07 .....	85
Figura 20 - Simulação do maciço classe I no MODUELO 4.0 - vista superior.....	87
Figura 21 - Simulação do maciço classe II no MODUELO 4.0 - vista superior.....	88
Figura 22 - Simulação de percolado mensal do maciço classe I no MODUELO 4.0.	89
Figura 23 - Simulação de percolado mensal do maciço classe II no MODUELO 4.0	90
Figura 24 - Simulação de percolado mensal do maciço classe I no HELP 3.07.....	93
Figura 25 - Simulação de percolado mensal no maciço classe II com o HELP 3.07.	94
Figura 26 - Simulações do aterro sanitário até 2038.....	100
Figura 27 - Simulações da área 1 do aterro sanitário até 2038.....	100
Figura 28 - Simulações do maciço classe I do aterro industrial até 2038.....	101
Figura 29 - Simulações do maciço classe II do aterro industrial até 2038.....	101



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração e destinação dos resíduos no Brasil .....	18
Tabela 2 - Valores de K para aplicação do método suíço .....	27
Tabela 3 - Recebimento de resíduos no aterro sanitário municipal de Joinville .....	46
Tabela 4 - recebimento de resíduos mensal em toneladas no aterro sanitário municipal de Joinville.....	52
Tabela 5 - Composição dos resíduos do aterro sanitário .....	52
Tabela 6 - Recebimento mensal de resíduos no aterro industrial .....	53
Tabela 7 - Composição dos resíduos do aterro industrial .....	54
Tabela 8 - Características das células de resíduo do aterro sanitário.....	60
Tabela 9 - Características da drenagem de percolado no fundo do aterro sanitário ..	62
Tabela 10 - Valores propostos para taxa de infiltração na saturação.....	65
Tabela 11 - Valores propostos para taxa de infiltração inicial .....	65
Tabela 12 - Características das células de resíduos do aterro industrial .....	66
Tabela 13 - Características da drenagem de percolado no fundo do aterro industrial .....	68
Tabela 14 - Grupo de solo.....	69
Tabela 15 - CN de acordo com o grupo de solo.....	69
Tabela 16 - Dados inseridos no HELP 3.07 para simulação da área 1 do aterro sanitário.....	70
Tabela 17 - Dados inseridos no HELP 3.07 para simulação da área encerrada do aterro sanitário .....	71
Tabela 18 -Dados inseridos no HELP 3.07para simulação do aterro industrial classe I .....	73
Tabela 19-Dados inseridos no HELP 3.07para simulação do aterro industrial classe II .....	74
Tabela 20 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro sanitário no MODUELO 4.0 .....	76
Tabela 21 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro sanitário no HELP 3.07 .....	76
Tabela 22 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro industrial no MODUELO 4.0 .....	77
Tabela 23 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro industrial no HELP 3.07 .....	77
Tabela 24 - Resultados acumulados das simulações do aterro sanitário no MODUELO 4.0 .....	80
Tabela 25-Resultados acumulados das simulações do aterro sanitário no HELP 3.07 .....	84
Tabela 26 - Resultados acumulados das simulações do aterro industrial no MODUELO 4.0 .....	88
Tabela 27 - Resultados acumulados das diferentes simulações do aterro industrial no HELP 3.07 .....	92
Tabela 28 - Avaliação das melhores simulações .....	96
Tabela 29 - Comparação das simulações no MODUELO 4.0 e HELP 3.....	99

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	10
1.2	OBJETIVOS.....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO.....</b>	<b>13</b>
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	13
2.1.1	Definição .....	13
2.1.2	Classificação .....	13
2.1.3	Produção de resíduos .....	15
2.1.4	Tratamento e disposição final.....	16
2.2	ATERROS DE RESÍDUOS .....	19
2.3	O PERCOLADO.....	21
2.3.1	Origem e formação.....	21
2.3.2	Composição e características .....	23
2.3.3	Coleta e Tratamento.....	24
2.4	MÉTODOS DE PREVISÃO DA GERAÇÃO DE PERCOLADO .....	25
2.4.1	Métodos Empíricos.....	25
2.4.2	Métodos computacionais.....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	41
3.1.1	Economia .....	42
3.1.2	Clima .....	42
3.1.3	O aterro sanitário de Joinville .....	44
3.1.4	O aterro industrial de Joinville .....	47
3.2	COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS .....	50
3.2.1	Dados meteorológicos.....	50
3.2.2	Dados de recebimento de resíduos.....	51
3.2.2.1	Aterro Sanitário .....	51
3.2.3	Dados de geração de percolato aproximado.....	54
3.3	INSERÇÃO DE DADOS NO SOFTWARE MODUELO 4.0 .....	57
3.3.1	Configuração do aterro sanitário no MODUELO 4.0 .....	58

3.3.2	Configuração do aterro Industrial no MODUELO 4.0 .....	64
3.4	Inserção de dados no HELP 3.07 .....	68
3.4.1	Configuração do aterro sanitário no HELP 3.07 .....	69
3.4.2	Configuração do aterro industrial no HELP 3.07 .....	72
3.5	Calibração e avaliação dos resultados das Simulações .....	75
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>78</b>
4.1	SIMULAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO NO MODUELO 4.0.....	78
4.2	SIMULAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO NO HELP 3.07 .....	84
4.3	SIMULAÇÕES DO Aterro industrial NO MODUELO 4.0.....	87
4.4	SIMULAÇÕES DO ATERRO INDUSTRIAL NO HELP 3.07 .....	92
4.5	Comparação dos resultados .....	95
4.6	Previsão de geração de percolado .....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>104</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Entre os maiores desafios da sociedade moderna estão a redução da geração de resíduos sólidos e a garantia da disposição final e ambientalmente segura dos resíduos gerados. Para responder esses desafios são necessárias políticas e diretrizes para gerenciamento e disposição final adequada dos resíduos sólidos, além de soluções técnicas economicamente viáveis.

No Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS instituída pela lei nº 12.305/10 (Brasil, 2010) estabelece diretrizes, metas e ações a serem adotadas no país, visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Segundo a PNRS na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Mesmo sendo a última opção da ordem de prioridade da PNRS, entre alternativas, os aterros sanitários são opção dominante para a disposição dos resíduos sólidos no Brasil (IBAM 2001; SNIS 2016). Segundo Calabrò, *et al* (2018) o aterro ainda é o sistema de gerenciamento de resíduos mais utilizado no mundo, relativamente barato, simples e não está ligado a usos de tecnologias complicadas e patenteadas. Infelizmente, os impactos ambientais associados aos aterros não são desprezíveis.

Ainda assim segundo o SNIS (2016), que infere sobre 85,2% da massa de resíduos do Brasil, somente 59% são dispostos em aterros sanitários, 3,4% encaminhados para unidades de triagem e compostagem, e os outros 37,6% são destinados a lixões, aterros controlados ou sem informação.

Os impactos ambientais relacionados aos aterros são principalmente decorrentes da geração de percolados fortemente poluídos e gases potencialmente nocivos, que podem causar a poluição do ar, do solo e das águas subterrâneas, bem como contribui para o aquecimento global (Pantini *et al.*, 2015b). E apesar da evolução da tecnologia ter reduzido os riscos associados aos aterros, eles ainda podem representar uma fonte potencial de efeitos adversos nas áreas circundantes (Pantini *et al.*, 2015a).

A geração de percolados e gases pelos aterros devem ser levadas em conta também após o seu fechamento. Segundo as NBR13896(ABNT,1997) e 10157

(ABNT,1987) deve haver um monitoramento das águas subterrâneas por um período de 20 anos após o fechamento da instalação, que pode ser reduzido se constatado o término da geração de líquido percolado, ou estendido caso seja insuficiente. Também deve-se fazer a manutenção dos sistemas de drenagem e de detecção de vazamento de líquido percolado até o término de sua geração, manutenção da cobertura do aterro e manutenção do sistema de coleta de gases até que seja comprovado o término de sua geração, além da manutenção do sistema de tratamento de líquido percolado, até o término de sua geração ou até que esse líquido atenda aos padrões legais de lançamento.

Para Amrit Barmi em entrevista a Bennett (2016) um crescente problema em lidar com aterros é o custo cada vez maior do tratamento do percolado. Com o aumento da reciclagem e com as regulamentações ambientais mais exigentes, os aterros têm requisitos cada vez mais complexos que impactam muito na escolha de tecnologias adequadas para tratamento do percolado. O problema é que essa situação faz com que a receita diminua, enquanto quem opera os aterros tem responsabilidades contratuais de longo prazo com relação ao gerenciamento de percolados. Segundo Amrit *apud* Bennett (2006) os aterros estão passando de um gerador de receita para um custo líquido, aumentando o interesse no tratamento de percolado no local para reduzir os custos operacionais de longo prazo. Tecnologias com baixo custo operacional estão se tornando cada vez mais populares. Essa tecnologia de tratamento de percolado precisa ter baixo consumo de energia, baixo consumo de produtos químicos e baixa necessidade de mão de obra associada a uma vida útil mais longa.

Segundo São Mateus *et. al.* (2012) a qualidade e o volume do percolado podem variar fortemente com fatores locais, como características de resíduos, projeto de aterro, método de disposição, condições climáticas, bem como vários processos físicos e bioquímicos, como movimentos de líquidos e gases, degradação bioquímica e envelhecimento de resíduos.

A estimativa de produção dos líquidos percolados ao longo da vida de um aterro sanitário, bem como o tempo que levam para serem formados, são dados valiosos para minimizar o impacto destes ao meio ambiente, e para o dimensionamento dos sistemas de coleta e tratamento desses líquidos.

A importância da coleta e tratamento do percolado, e a dificuldade de se obter uma estimativa precisa da sua qualidade e geração devido à ação de vários fatores

justifica este trabalho na medida em que os principais processos que ocorrem em aterros (hidrologia, degradação, adensamento) estão intimamente ligados uns aos outros. Cada variável de projeto influencia todos os demais e, portanto, é difícil levar em conta todas essas interações para otimizar o projeto geral do aterro (Cuartas et. al. 2018). Assim, estudar a geração de percolado em dois aterros da região norte de Santa Catarina, com a modelagem e simulação dos seus processos hidrológicos visando avaliar a influência do tipo de resíduo, da pluviometria, da cobertura, da operação e outros parâmetros na gestão dos aterros na geração de percolado, é de grande importância para esta inevitável fase da gestão dos resíduos.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a **“Avaliar geração de percolado a partir da modelagem e simulação dos processos hidrológicos dos aterros sanitário e Industrial de Joinville”**.

E tem como objetivos específicos:

- Estudar a influência do tipo e quantidade de resíduo na geração de percolado;
- Analisar a influência da pluviometria na geração de percolado;
- Avaliar da eficiência da cobertura dos aterros de resíduos;
- Comparar os resultados de dois softwares em dois aterros de resíduos;
- A partir dos resultados, propor alternativas para melhorar a gestão de águas nos aterros estudados.

## 2 REVISÃO

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

#### 2.1.1 Definição

No Brasil a legislação e Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT dão as seguintes definições e classificações para os resíduos sólidos: A Política Nacional de Resíduos Sólidos Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), define resíduos sólidos como sendo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT,2004) na NBR10004 define os resíduos sólidos como: Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

#### 2.1.2 Classificação

Existem várias classificações dadas aos resíduos sólidos, cabe aqui destacar aquelas dadas pela PNRS (Brasil, 2010) e NBR10004 (ABNT,2004) quanto a origem e periculosidade dos resíduos.

Quanto a sua origem a PNRS classifica os resíduos em:

- a) domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;

- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Quanto à periculosidade a classificação da PNRS (Brasil, 2010) é feita em resíduos perigosos, e resíduos não perigosos. Os resíduos perigosos são aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica. Os resíduos não perigosos aqueles não enquadrados no descrito acima.

A NBR10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde em:

- Resíduos Classe I – Perigosos que apresentam elevado risco à saúde pública e ao meio ambiente, devido suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas. Apresenta ao menos uma das características: Reatividade, toxicidade, inflamabilidade, corrosividade e patogenicidade. São exemplos desta classe: Resíduos de saúde, borras ácidas, solventes, lodo de galvanoplastia e outras substâncias contendo metais pesados.
- Resíduos Classe II- Não perigosos: Os resíduos pertencentes a esta classe, não oferecem riscos e podem ser divididos em inertes e não inertes.
- Classe II A- Não inertes: Apresentam características como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B- Inertes: Estes resíduos quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004b), não apresentam nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água definidos pelo Anexo H da Norma NBR 10004, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Mesmo que existam diferentes classificações para os resíduos, é ético e claro na Lei, que cabe a cada gerador do resíduo seu correto destino, de acordo com a classificação dos resíduos apresentada pela ABNT e PNRS (Brasil, 2010). Dada a diversidade destes resíduos, não existe um processo de tratamento pré-estabelecido,



havendo sempre a necessidade de realizar pesquisas e desenvolvimento de processos economicamente viáveis.

### 2.1.3 Produção de resíduos

A produção de resíduos sólidos urbanos - RSU tem sido um grande problema no Brasil, pois além de não haver a priorização do que está previsto na PNRS, a saber: não geração, redução, reutilização, e reciclagem, boa parte ainda tem um destino final inadequado.

De acordo com SNIS (2016), é possível inferir sobre 85,2% da massa de resíduos sólidos urbanos coletada no Brasil, estimada em 58,9 milhões de toneladas. Desprezando-se, para efeito de segurança, a parcela que é recuperada, apurou-se que 59,0% são dispostas em aterros sanitários, 9,6% em aterros controlados, 10,3% em lixões e 3,4% encaminhados para unidades de triagem e de compostagem, restando então a parcela de 17,7% sem informação, a qual se refere sobretudo aos pequenos municípios até 30 mil habitantes. Admitindo-se que 3/4 desta “massa sem informação” seja encaminhada para lixões, pode-se dizer que 66,8% da massa total coletada no País é disposta de forma adequada, em aterros sanitários, sendo o restante distribuído por destinações em lixões e aterros controlados. Essa quantidade coletada quando relacionada à respectiva população urbana resulta valores extremos de massa coletada per capita de 0,85 a 0,90 kg/hab./dia para municípios com população até 250 mil habitantes e 0,93 a 1,03 kg/hab./dia para os municípios com população acima do valor referido, ficando, o indicador médio para o Brasil, em 0,94 kg/hab./dia. Isso significa, aproximadamente, 6% a menos do valor de 2015, para o qual também já havia registrada uma redução de 5% no passado (SNIS, 2016).

A associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais ABRELPE (2017) apresenta dados um pouco mais atuais e diferentes, indicando uma geração de RSU 71,6 milhões de toneladas em 2017 no país. Segundo esse diagnóstico cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, dispostos em aterros sanitários, o restante, que corresponde a 40,9% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados. A geração per capita segundo a ABRELPE (2017) estava em 1,032 kg/hab./dia em 2016 e chegou a 1,035 kg/hab./dia apresentando um acréscimo de 0,48% na geração de.

Considerando os dados de 2015 e 2016, enquanto a população brasileira apresentou um crescimento de 0,8% (IBGE, 2018), a geração per capita de RSU registrou uma queda de 3% pela ABRELPE (2016) e 6% pelo SNIS (2016).

Considerando-se o estado de Santa Catarina, 295 municípios, há informações no SNIS (2016) apenas sobre 242 municípios, ou seja, 82% do total. Para este foi apresentado um valor de geração de resíduos de 0,80Kg/hab/dia.

O plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do município de Joinville (Joinville, 2013) indicava que a geração per capita, quando se trata da coleta de resíduos domiciliares era de, aproximadamente, 0,6156 kg/hab/dia. Do ano de 2011 a 2012, houve um aumento expressivo de resíduos recicláveis coletados em Joinville, o que correspondia, respectivamente, a 5.943 toneladas e 11.045 toneladas, um aumento de 5.102 toneladas em um ano, que eram enviados a oito galpões de reciclagem. Joinville (2017) apresenta um demonstrativo referente aos resíduos sólidos coletados conforme a figura 1.

Figura 1 - Demonstrativo dos resíduos sólidos segundo os tipos, em toneladas/mês

TIPO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Coleta Domiciliar (t/mês)	9.490	9.727	9.855	10.628	10.543	11.031	10.468
Coleta Especiais <sup>1</sup> (t/mês)	39	74	76	99	111	154	160
Coleta Especiais (solicitações atendidas/mês)	209	451	651	829	1.080	1.418	1.682
Coleta dos Serviços Gerais Limpeza <sup>2</sup> (t/mês)	781	663	343	440	889	781	903
Coleta Seletiva t/mês	567	495	920	991	974	984	874
Coleta de Serviços de Saúde (t/mês)	43	48	59	70	73	80	79
Coletas Indústrias e particulares <sup>3</sup> (t/mês)	1.798	743	1.938	601	-	-	-
Resíduos de Terceiros <sup>4</sup>	-	-	-	-	338	316	359
TOTAL	12.927	12.201	13.842	13.658	14.008	14.764	14.525

Fonte: Joinville (2017)

#### 2.1.4 Tratamento e disposição final

Define-se tratamento como uma série de procedimentos destinados a reduzir a quantidade ou o potencial poluidor dos resíduos sólidos, seja impedindo descarte de lixo em ambiente ou local inadequado, seja transformando-o em material inerte ou biologicamente estável IBAM (2001).

Existem diversos tipos de tratamentos dos resíduos que visam reduzir a quantidade, e diminuir a poluição causada por eles. Entre outros princípios e instrumentos introduzidos pela PNRS (Brasil, 2010) destacam-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e logística reversa que trata de um

conjunto de ações para viabilizar a coleta e restituição dos RSU para reaproveitamento em seu ciclo produtivo ou outra destinação ambientalmente adequada. Além da logística reversa podem ser dados outros tratamentos como a reciclagem e recuperação dos resíduos, os processos de secagem e desidratação dos lodos, a compostagem, e a incineração citados por Bacelar (2010).

Os resíduos podem ser reciclados e parcialmente utilizados, o que traz grandes benefícios à comunidade, como a proteção da saúde pública e a economia de divisas e de recursos naturais. Segundo Pinto (2011) a destinação mais comum para resíduos urbanos e industriais não perigosos no Brasil são os aterros sanitários. Outros tratamentos incluem o co-processamento em fornos de produção de cimento, incineração, tratamentos biológicos para solos contaminados, descontaminação de transformadores e de lâmpadas.

A PNRS (Brasil, 2010) em seu artigo 20, estabelece que os geradores são responsáveis pelo gerenciamento, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos. Estão sujeitos à elaboração de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos os responsáveis pelos serviços públicos de saneamento (o município), as indústrias, os serviços de saúde, a construção civil, as empresas de serviços de transporte, responsáveis pelas atividades agrossilvopastoris, e empresas de mineração. A gestão e gerenciamento de resíduos sólidos deve observar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

No gerenciamento integrado de resíduos sólidos são preconizados programas da limpeza urbana, enfocando meios para que sejam obtidos a máxima redução da produção de lixo, o máximo reaproveitamento e reciclagem de materiais e, ainda, a disposição dos resíduos de forma sanitária e ambientalmente adequada, abrangendo toda a população e a universalidade dos serviços (IBAM, 2001). Essas atitudes contribuem significativamente para a redução dos custos do sistema, além de proteger e melhorar o ambiente. Porém em geral, diferentemente do conceito de gerenciamento integrado, os municípios costumam tratar o lixo produzido na cidade apenas como um material não desejado, a ser recolhido, transportado, podendo, no máximo, receber algum tratamento manual ou mecânico para ser finalmente disposto em aterros (IBAM, 2001). Trata-se de uma visão distorcida em relação ao foco da questão social, encarando o lixo mais como um desafio técnico no qual se deseja receita política que aponte eficiência operacional e equipamentos especializados.

A tabela 1 apresenta informações sobre a geração e destinação de resíduos no Brasil em 2016 e 2017. Mesmo os dados do SNIS (2016) sendo diferentes dos da ABRELPE (2016, 2017) as duas fontes apontam que uma boa parte dos resíduos sólidos urbanos tem destino inadequado no Brasil.

Tabela 1 - Geração e destinação dos resíduos no Brasil

Descrição	SNIS (2016)	ABRELPE (2016)	ABRELPE (2017)	Unidade
Quanto infere sobre o total de resíduos do país	85,2	91		%
Geração anual	58,9	78,3	78,4	Milhões de toneladas
Coletados no ano	49,5	71,3	71,6	
Disposto em aterros sanitários	59	58,4	59,1	%
Dispostos aterros controlados	9,6	41,6	40,9	%
Dispostos em lixões	10,3			
Encaminhados para triagem e compostagem	3,4	-	-	%
Sem informação	17,7	-	-	%

Fonte: SNIS (2016) e ABRELPE (2016,2017)

Com relação ao quadro da destinação final de resíduos sólidos no País, é notório o contraste entre as regiões. O sistema nacional de informações sobre saneamento em seu diagnóstico anual do manejo de resíduos sólidos urbanos SNIS (2016) apurou que as melhores situações são encontradas nas regiões Sul e Sudeste, principalmente na primeira. Nesta, destaca-se o estado de Santa Catarina, cujo resultado acusa que, pelo menos, 82% de seus municípios se utilizam de aterros sanitários, não havendo nenhum registro de lixão dentre os 242 municípios que responderam o SNIS-RS de um total de 295.

O Município de Joinville conta com um aterro sanitário que está localizado em sua região industrial e é operado por uma empresa concessionária. Segundo Joinville (2013) esse aterro recebe também resíduos da cidade de Balneário Barra do Sul. São encaminhados para este aterro os RSU de coleta domiciliar, de limpeza pública e de serviços de saúde que passam por processo de autoclavagem para posterior de disposição no aterro.

A ausência de um inventário nacional e de vários inventários estaduais, como o de Santa Catarina, por exemplo, aliado à desatualização e falta de padronização na apresentação dos dados estaduais, não permitiu a compilação de informações, nem a quantificação dos resíduos industriais no país, conforme assinala o Diagnóstico dos Resíduos Industriais (PAIXÃO, 2012).

Quando o processo produtivo não permite redução, reuso ou reciclagem do resíduo uma das alternativas é a destinação dos resíduos a um aterro que utiliza de técnicas que permitem a disposição controlada destes resíduos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública, e minimizando os impactos ambientais.

## 2.2 ATERROS DE RESÍDUOS

O aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, cuja finalidade é garantir a disposição dos resíduos sólidos urbanos sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente (IBAM,2007)

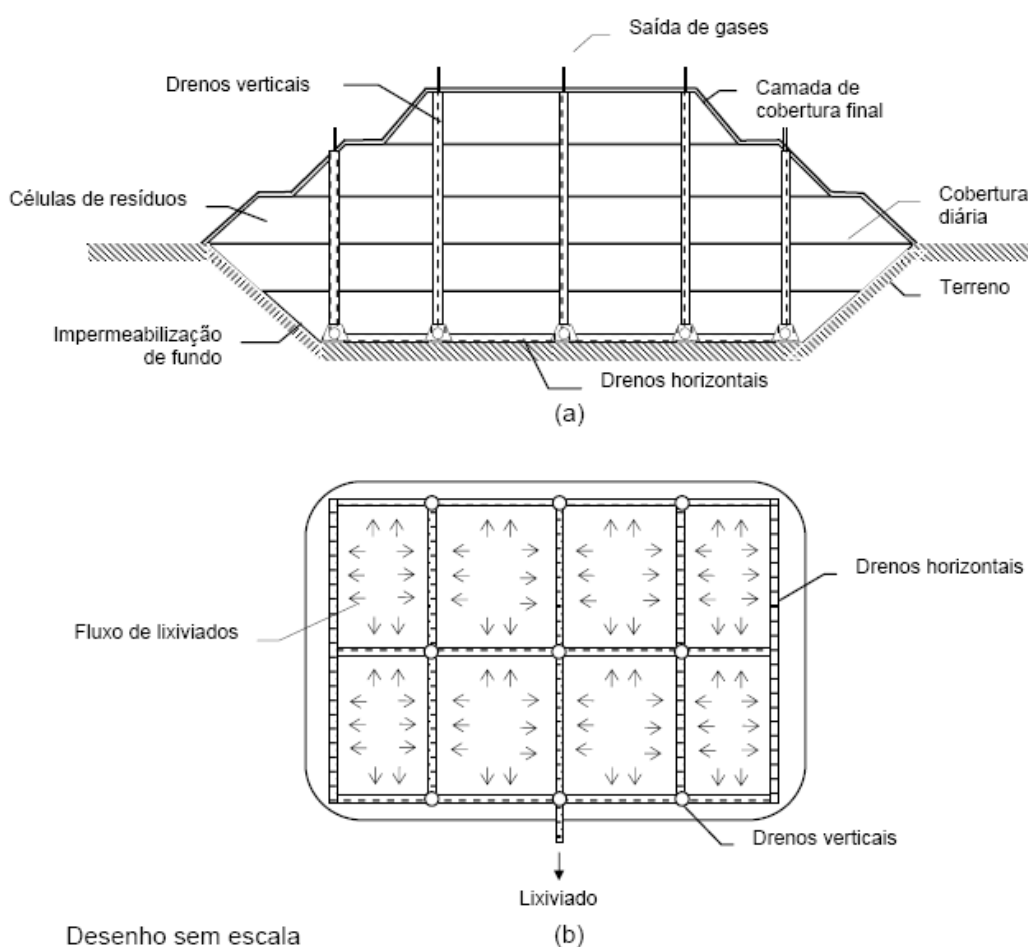
A norma brasileira que regulamenta os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos é a NBR 8419/92 (ABNT,1996), que determina as diretrizes técnicas dos elementos essenciais aos projetos de aterros, tais como impermeabilização da base e impermeabilização superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de lixiviados e de gases, exigência de células especiais para resíduos de serviços de saúde, apresentação do manual de operação do aterro e definição de qual será o uso futuro da área do aterro após o encerramento das atividades. Também deve-se consultar a NBR 10157 (ABNT, 1987) para apresentação de projetos de aterros de resíduos perigosos e a NBR 13896 (ABNT, 1997) para projetos de aterros de resíduos não perigosos.

Os projetos de aterros sanitários baseiam-se em algumas premissas básicas, como a construção de uma camada de baixa condutividade hidráulica, representada pela impermeabilização de fundo da base do aterro, que restringe a infiltração do percolado no terreno natural, e de um sistema de drenagem para coletar estes líquidos, como apresentado na Figura 2. De acordo com Tozetto (2008) a instalação de uma camada de baixa condutividade hidráulica para cobertura final do aterro também é de fundamental importância, colaborando para a minimização da infiltração da água no maciço. Alguns aspectos operacionais também têm influência na quantidade de percolado gerada. A prática de cobertura sistemática dos resíduos com frequência regular, configurando as denominadas células, independentemente da cota final de projeto, também é muito importante para minimizar a geração de percolado.

O aterro industrial, de acordo com Pinto (2011), é uma alternativa de destinação de resíduos industriais, que se utiliza de rigorosas técnicas nacionais e internacionais

que permitem a disposição controlada destes resíduos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública, minimizando os impactos ambientais, visando garantir proteção total ao meio ambiente. Técnicas estas que consistem em confinar os resíduos industriais na menor área e volume possíveis (por meio de compactação, geomembranas, drenagem, tratamento de efluentes, e poços de monitoramento do lençol freático), cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho ou intervalos menores, caso necessário.

Figura 2 - Aterro sanitário de resíduos sólidos, (a) em corte, (b) em planta



Fonte: Tozetto (2008)

Pinto (2011) ressalta que um cuidado especial na operação de aterros industriais é o controle dos resíduos a serem dispostos, pois, em aterros industriais, só podem ser dispostos resíduos quimicamente compatíveis, ou seja, aqueles que não reagem entre si, nem com as águas de chuva infiltradas. Os fenômenos mais comuns que podem ter origem na mistura de resíduos incompatíveis são geração de calor, fogo ou

explosão, produção de fumos e gases tóxicos e inflamáveis, solubilização de substâncias tóxicas e polimerização violenta. Antes de se dispor os resíduos no aterro, deve-se consultar as listagens de compatibilidade publicadas pelos órgãos de controle ambiental.

## 2.3 O PERCOLADO

De acordo com a ABNT (1992) o chorume é o líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio). Já os líquidos percolados ou lixiviados são formados pela percolação de águas que atravessam a massa de lixo arrastando o chorume, além de outros materiais em solução e/ou suspensão (Padilla, 2007). Neste trabalho os termos lixiviado e percolado serão utilizados como sinônimos.

### 2.3.1 Origem e formação

De acordo com Padilla (2007) os líquidos percolados que são recolhidos pelo sistema de drenagem de um aterro são os resultados de três fontes principais: da infiltração da água proveniente da precipitação, da umidade natural dos resíduos sólidos depositados e da água liberada durante a degradação biológica dos resíduos, constituindo assim em um fluxo altamente agressivo para o meio ambiente.

De uma forma mais abrangente a quantidade de líquido lixiviado produzido em um aterro sanitário depende de vários fatores como: condições meteorológicas do local (umidade, precipitação, evaporação, temperatura e ventos); geologia e geomorfologia (escoamento superficial e/ou infiltração subterrânea, grau de compactação e capacidade do solo em reter umidade); condições de operação do aterro (conformação e cobertura das células, grau de compactação dos resíduos, tipo de equipamento, recirculação do percolado); idade e natureza dos resíduos sólidos (tipo, umidade, nível de matéria orgânica, características); topografia (área e perfil do aterro); qualidade e quantidade de recicláveis e hábitos da população. (Oliveira e Pasqual, 2000).

Pinto (2011) descreve que o índice pluviométrico que ocorre na área onde o aterro está instalado influencia diretamente a quantidade (volume) e a qualidade do



líquido percolado gerado. Portanto, quanto maior o índice pluviométrico do local, maior geração de lixiviado. Segundo Loureiro (2005) o problema maior reside nas águas pluviais não desviadas da área de disposição, como também na precipitação sobre o aterro, nos períodos de chuva prolongada. Essas águas podem infiltrar-se no aterro e, após atingirem o ponto de saturação da massa de lixo, arrastam o chorume e outros elementos formando o percolado.

De acordo com Oliveira e Pasqual (2000), os resíduos sólidos inicialmente agem como uma esponja e simplesmente absorvem a água, entretanto, o material atinge um teor de umidade conhecido como capacidade de campo ou de retenção. Qualquer acréscimo adicional de água resulta na percolação de igual quantidade e massa. Os autores ainda afirmam que alguma percolação poderá se formar antes de atingida a capacidade de campo, uma vez que os resíduos, não sendo homogêneos, apresentam canais e alguns destes não absorvem a água prontamente.

De acordo com El-Fadel et al. (2001), o processo de formação do percolado é influenciado por muitos fatores que podem ser divididos nos que contribuem diretamente com a umidade do aterro (chuva, águas subterrâneas, conteúdo de umidade inicial, recirculação, líquido codisposto ao lixo e a decomposição do mesmo) e aqueles que afetam o lixiviado ou a distribuição de umidade dentro do aterro (idade do resíduo, pré-tratamento, recalque, material utilizado na parede lateral do aterro, compactação, permeabilidade e tamanhos das partículas, densidade, vegetação, cobertura, geração e transporte de calor e gás).

Para aterros sanitários em operação, ainda não encerrados, a liberação de água contida nos poros dos resíduos, devido ao seu peso próprio e das camadas de resíduos a serem sobrepostas, influencia nas taxas de geração de lixiviado. Um fator que contribui para o aumento da quantidade de lixiviado é a codisposição de resíduos com grande teor de umidade (Tozzeto, 2008).

Bortolazzo (2010) explica que a matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos é responsável pela formação do chorume e pode sofrer dois processos de decomposição: a anaeróbia (em ausência de oxigênio) e a aeróbia (em presença de oxigênio). A decomposição anaeróbia ocorre quando a massa de lixo se encontra recoberta e bem compactada com argila, enquanto a aeróbia ocorre quando a massa de lixo está em contato com o ar, devido à ausência de recobrimento ou por má compactação da camada de cobertura. A decomposição anaeróbia é considerada lenta, gerando, em seu processo, alguns subprodutos como amônia e ácidos



orgânicos e gases como o biogás. Já na decomposição aeróbia, a matéria orgânica, em contato com o ar, sofre um processo de oxidação, iniciando a degradação progressiva do material e, assim, gerando alguns subprodutos como o gás carbônico, sais minerais de nitrogênio, fósforo, potássio, entre outros. A decomposição aeróbia é um processo bem mais acelerado do que o anterior, devido à presença das bactérias aeróbias que auxiliam na deterioração do material. O processo de decomposição dos resíduos resulta na liberação de gases como o metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dentre outros.

Em pesquisa realizada por MELO et al. (2002), que analisou o grau de contaminação ao longo da profundidade, de uma célula antiga (16 anos) de um aterro de RSU (resíduos sólidos urbanos), foi observado, tanto para o chorume quanto para o resíduo sólido, que, com o aumento da profundidade havia uma diminuição gradativa do grau de contaminação assim como uma maior disponibilidade de nutrientes. De acordo com os autores, a diminuição e até o desaparecimento da toxidade com o aumento da profundidade pode representar um indicador da maturidade da massa de resíduos.

A vazão de lixiviado em aterros sanitários é, portanto, bastante específica para cada local e se apresenta como função da disponibilidade de água e das condições climáticas, bem como das características dos resíduos, da superfície do aterro e do solo do local.

### 2.3.2 Composição e características

Os lixiviados podem conter substâncias extraídas dos resíduos, assim como substâncias produzidas por reações químicas e pela atividade biológica no interior do aterro, que dependem basicamente da composição dos resíduos e das condições internas do aterro como temperatura, conteúdo de umidade, altura do aterro, fase da decomposição e a qualidade da água que entra no aterro. (Lins, 2003).

A análise da composição qualitativa do percolado é de grande importância para o conhecimento do nível de contaminação que o aterro pode provocar ao meio ambiente, permitindo avaliar o processo de biodegradação que ocorre no aterro, além de fornecer subsídios para a escolha do melhor mecanismo de tratamento para esse líquido (Bortolazzo, 2010).

A composição química do percolado gerado em aterros de resíduos sólidos urbanos varia de acordo com as diversas fases de decomposição dos resíduos. Bortolazzo (2010) ressalta que em um mesmo aterro, a existência de resíduos velhos e recém dispostos, torna complexa a caracterização do efluente gerado.

Para a caracterização do percolado, devem ser analisados parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dentre os quais destacam-se o potencial hidrogeniônico – pH, alcalinidade, nitrogênio, demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), metais pesados, sólidos em suspensão totais (SST), componentes orgânicos, e componentes inorgânicos.

Bastiani (2011) ressalta que o lixiviado gerado nos aterros tem como principal característica a grande quantidade de matéria orgânica e necessita de um sistema de captação e tratamento adequado, a fim de se evitar a contaminação, principalmente dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

### 2.3.3 Coleta e Tratamento

Para minimizar a geração de lixiviado e os consequentes impactos ambientais, é necessário que haja um planejamento e dimensionamento de estruturas específicas para cada local, expressas em um projeto elaborado em função das características próprias de onde será implantado o aterro.

Loureiro (2005) descreve que os sistemas de coleta de lixiviados mais utilizados no Brasil são os planos inclinados e tubos de coleta. No caso dos planos inclinados, o fundo do aterro é constituído de vários planos inclinados, que vão direcionar a drenagem do percolado para os canais de coleta, e em cada canal de coleta são instalados tubos perfurados que vão conduzir o percolado para fora do corpo do aterro.

O sistema que compõe a drenagem horizontal, também conhecido como espinha de peixe, é dividido em faixas retangulares na base do aterro, composto de “espinhas dorsais” ou drenos primários, para onde convergirão os drenos secundários, como explica Pinto (2011).

Bacelar (2010) avalia que diversas técnicas podem ser empregadas para o manejo do percolado dentro de um aterro sanitário, dentre as quais se destacam: recirculação, evaporação, tratamento biológico seguido de disposição e tratamento combinado em estações de tratamento de esgotos domésticos.

## 2.4 MÉTODOS DE PREVISÃO DA GERAÇÃO DE PERCOLADO

As taxas de geração de percolado em aterros variam significativamente, sendo que existem diferentes métodos para a quantificação. Segundo Bagchi (2004), a influência da precipitação pluviométrica é bastante expressiva, entretanto, apresenta elevada complexidade. Por questões práticas, a maioria dos métodos negligencia a parcela de percolado proveniente da biodegradação dos resíduos (Bagchi, 2004).

Fatores não controláveis como o regime pluviométrico a que está submetida a região onde se localiza o aterro, e a velocidade de degradação dos resíduos pela ação dos microrganismos tornam difícil uma estimativa precisa da geração de percolados.

Para estimar a geração de líquidos percolados existem métodos empíricos como o Suíço, Racional, e do balanço hídrico citados por Silva, Gomes e Grabin (2006), porém métodos e modelos computacionais para estimar o volume de percolado gerado vêm sendo desenvolvidos e aprimorados, entre eles o HELP (EPA,2017) e o MODUELO (GIA,2017). Os métodos serão apresentados a seguir.

### 2.4.1 Métodos Empíricos

#### 2.4.1.1 Método Racional

Segundo Silva, Gomes e Grabin (2006), o cálculo da vazão superficial por este método baseia-se em três parâmetros: área da bacia de contribuição; intensidade e duração das chuvas e o coeficiente de escoamento. Entretanto, para obter a parcela da precipitação que infiltra, deve-se subtrair o volume total precipitado sobre a área do aterro, do volume escoado, que é calculado pelo método racional, dentro do mesmo intervalo de tempo. Devendo, deste resultado, subtrair a parcela de água devida à evapotranspiração. Tem-se, portanto a Equação 1.

$$Q = \frac{(P-ES-EP)}{t} \times A \quad (1)$$

Onde:

Q = Vazão do percolado (l/s);

P = Precipitação média mensal (mm);

EP = Evaporação Potencial (mm);

A = Área de contribuição em (m<sup>2</sup>);

t = Número de segundos em 1 mês (2592000 s);

ES = (P x C) = Escoamento superficial (mm);

C = Coeficiente de escoamento superficial ("run-off", adimensional).

#### 2.4.1.2 Método Suíço

Segundo Bortolazzo (2010), baseando-se em estudos para avaliar a relação entre a precipitação pluviométrica e o escoamento de líquidos percolados para diversos aterros, Hans Jürgen Eling, de origem suíça, criou uma sistemática empírica para a determinação das descargas de percolados, daí a origem do nome do método.

Neste método, estima-se que certa porcentagem de precipitação infiltra na massa de resíduos e atinge a camada de impermeabilização na base do aterro e, conseqüentemente deve ser drenada. Esta porcentagem é estipulada em função do peso específico dos resíduos e também pelo conhecimento prático do projetista.

Este é um método de formulação semelhante ao método Racional, entretanto não considera os efeitos da evaporação potencial (Silva, Gomes e Grabin, 2006). A formulação algébrica é apresentada na Equação 2

$$Q = \frac{(P \times A \times K)}{t} \quad (2)$$

Onde:

Q = Vazão média do percolado (l/s);

P = Precipitação média mensal (mm);

A = Área total do aterro (m<sup>2</sup>);

t = Número de segundos em 1 mês que é de 2592000 segundos;

K = Coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos sólidos urbanos.

Segundo Rocca (1981) os valores de K podem ser obtidos pela tabela 2.

Tabela 2 - Valores de K para aplicação do método suíço

<b>Tipo de Aterro</b>	<b>Peso específico dos resíduos Urbanos Compactados</b>	<b>K</b>
Aterros fracamente compactados	0,4 a 0,7 ton/m <sup>3</sup>	0,25 a 0,50
Aterros fortemente compactados	Acima de 0,7 ton/m <sup>3</sup>	0,15 a 0,25

Fonte: ROCCA (1981)

#### 2.4.1.3 Método do Balanço Hídrico

O método do balanço hídrico global permite quantificar os líquidos percolados em um aterro considerando o balanço das entradas e saídas de água no maciço de resíduos, em um determinado período de tempo.

Padilla (2007) ressalta que a estimativa do balanço hídrico em aterros sanitários é a chave para o projeto de sistemas de cobertura final e de impermeabilização do fundo, significa também entender a variação de umidade no interior da massa de resíduos com o tempo, que tem importância fundamental na análise dos processos de degradação dos resíduos e na avaliação de propriedades geotécnicas dos mesmos, o que permite a avaliação da estabilidade estrutural dos aterros sanitários. O potencial de geração de líquidos percolados em aterros pode ser estudado pela avaliação de seu balanço hídrico, que é influenciado diretamente pelos seguintes fatores:

- Propriedades dos materiais: composição gravimétrica, permeabilidade, capacidade de campo etc.;
- Condições iniciais dos materiais: teor de umidade e peso específico;
- Condições climatológicas: precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa, etc.;
- Configurações dos sistemas de revestimento de fundo;
- Configurações dos sistemas de drenagem internos;
- Configurações dos sistemas de cobertura intermediários e final;
- Dados operacionais: histórico de enchimento do aterro;
- Conhecimento dos processos de degradação dos resíduos.

A água está presente em um aterro através da infiltração da água gerada pela precipitação ou através da umidade presente no lixo depositado. Uma parte da precipitação pode escoar pela superfície, e outra pode evaporar do material do resíduo ou ser removida pela transpiração da cobertura vegetal. Uma pequena parte ainda

pode ser consumida por processos biológicos. O restante deve ser acumulado ou ser eliminado pela drenagem (Bengtsson, et al. 1994). A equação do balanço hídrico em aterros pode ser descrita pela equação 3.

O método do balanço hídrico global é relativamente simples e por isso foi utilizado com grande frequência até o início da década de 1980 para prever as taxas de geração de percolado. Entretanto, quando se comparam os resultados de sua aplicação com a vazão medida em campo, os padrões de geração de percolado nem sempre são reproduzidos adequadamente (Guyonnet et al.1998).

$$L = P - E - E_s - A_s \quad (3)$$

Onde:

L = lixiviado/percolado que sai do aterro pela drenagem;

P = precipitação;

E = evapotranspiração,

E<sub>s</sub> = escoamento superficial;

A<sub>s</sub> = armazenamento de umidade pelos resíduos.

#### 2.4.2 Métodos computacionais

Na área de simulação de aterros existem métodos e modelos computacionais que preveem a geração de percolado pela simulação da infiltração da água através da cobertura dos resíduos, do fluxo de percolado no interior do maciço e através dos drenos, que utilizam os mesmos processos descritos pelo método do balanço hídrico global. Dentre os programas existentes que fazem o balanço hídrico em aterros, podem ser citados o HELP (EPA, 2017) e o MODUELO (GIA, 2017).

##### 2.4.2.1 HELP - Hydrologic Evaluation of Landfill Performance

O HELP começou a ser desenvolvido em 1982, por Paul Schoereder e vários co-desenvolvedores (Schroeder, et. al, 1984), sua primeira versão foi publicada em 1984 pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos a US-EPA (United States Environmental Protection Agency). Segundo EPA (2017) é um modelo utilizado para simulação do balanço hídrico de aterros sanitários e outros sistemas de

disposição de terra, dividindo sua altura em camadas, através das quais se calcula o fluxo de água. Ele inclui também um modelo de fluxo horizontal até o sistema de drenagem. O modelo calcula estimativas anuais, diárias, e mensais, estimando os valores de escoamento superficial, evapotranspiração, drenagem de percolado; e infiltração lateral.

Os dados de entrada no programa são: precipitação, temperatura, radiação solar, profundidade da zona de evaporação (profundidade máxima em que a água pode ser removida por evaporação), índice de área foliar, data do início e final da estação de crescimento da vegetação (considera-se o início da típica estação de crescimento quando a temperatura alcança 10 a 12,7 °C e o término quando a temperatura baixa), velocidade média dos ventos durante o ano, umidade relativa média do ano, e características do aterro como a espessura das camadas, e características e composição dos resíduos entre outros.

O programa realiza análises do balanço hídrico de aterros considerando nos cálculos o armazenamento de água na superfície que também pode ser em forma de neve, escoamento superficial, infiltração, evaporação, evapotranspiração, armazenamento de umidade pelo solo, percolação, drenagem vertical e lateral para sistemas de coleta, e recirculação de percolado. É possível simular aterros em operação, parcialmente encerrados e encerrados.

De acordo com Berger (2000) o HELP é considerado “quase” bidimensional, pois combina dois sistemas unidimensionais em série e o fluxo em meio não saturado, que ocorre logo abaixo da camada de cobertura; sendo avaliado através de uma abordagem empírica, de forma relativamente simples.

Para o processo de escoamento superficial é utilizado o método do SCS *Soil Conservation Service* (1985) *apud* Schroeder *et. al* (1994) *apresentado na equação 4.*

$$Q = \frac{(P - 0,2S^2)}{(P + 0,8S)} \quad (4)$$

Onde:

Q = escoamento superficial(mm);

P = precipitação(mm);

S = capacidade máxima de infiltração (mm)

A equação 4 é válida para  $P > 0,2S$ . No caso de  $P < 0,2S$ ,  $Q=0$ . A capacidade máxima de infiltração é relacionada a um número CN conforme a equação 5. O número de escoamento ou simplesmente “CN” é um parâmetro empírico utilizado em hidrologia para obter previsões do escoamento direto ou infiltração em função do volume de precipitação. Como esse método foi desenvolvido pelo *Natural Resources Conservation Service do USDA*, anteriormente designado por *Soil Conservation Service* ou *SCS*, é frequentemente designado por método da curva número do *SCS*.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (5)$$

O usuário pode inserir diretamente um valor CN sem modificação, pode inserir um CN, inclinação da superfície e comprimento da inclinação, para que o programa calcule um “S” com essas características, ou ainda fazer com que o programa calcule um valor com base na inclinação da superfície, no comprimento da inclinação, na textura do solo, e na quantidade de cobertura vegetal.

De acordo com Schroeder *et. al* (1994) no início da precipitação parte da água é interceptada pela vegetação, esse processo é aproximado no programa pela equação 6:

$$INT_i = \begin{cases} 0,05 \left( \frac{CV_i}{1400} \right) & \text{se } CV < 1400 \\ 0,05 & \text{se } CV \geq 1400 \end{cases} \quad (6)$$

Onde:

$INT_i$  = interceptação em polegadas no dia i

$CV_i$  = biomassa de vegetação acima do solo no dia i, em quilogramas por hectare.

Para o cálculo da evapotranspiração potencial é utilizado o método de Penman modificado, desenvolvido por Ritchie (1972) apud Schroeder *et. al* (1994).

No HELP a evaporação superficial é exercida primeiramente na água disponível na superfície do aterro, que pode ser proveniente da chuva interceptada pela vegetação, de poças, ou do acumulo e derretimento de neve. Se não houver neve a evapotranspiração potencial é aplicada a qualquer interceptação calculada, nesta situação a porção da demanda evaporativa que é atendida pela evaporação da



umidade da superfície é dada pela equação 7. Se a demanda por evaporação é menor que a interceptação calculada, a quantidade de interceptação é ajustada para igualar o potencial evaporativo, equação 8.

A infiltração é considerada como a precipitação menos evaporação e interceptação superficial menos o escoamento superficial. Considerando a água retida no solo, esta é retirada primeiramente pela evaporação e depois pela transpiração das plantas.

O fluxo vertical da umidade é determinado pela lei de Darcy (1856) de acordo com a metodologia proposta por Campbell (1974) *apud* Schroeder *et. al* (1994), que considera o efeito da porosidade sobre o fluxo de água no meio, adaptando a Lei de Darcy para meios porosos não saturados, sem deixar de utilizar o parâmetro condutividade hidráulica saturada. A vazão por unidade de área normal ao fluxo é determinada pela Equação 9.

$$ESSi = \begin{cases} Eoi & \text{para } Eoi \leq INTi + PWi(1 - PRF) \\ INTi + PWi(1 - PRF) & \text{para } Eoi > INTi + PWi(1 - PRF) \end{cases} \quad (7)$$

$$INTi = Eoi \text{ para } Eoi < INTi \quad (8)$$

Onde:

ESSi = evaporação da umidade superficial

PWi = água armazenada na superfície que é incapaz de escoar ou infiltrar

PRF = fração de área onde o escoamento pode ocorrer

Eoi = evapotranspiração potencial

$$q = Ks \left( \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right)^{3 + \frac{2}{\lambda}} \cdot i \quad (9)$$

Onde:

q = vazão específica por área (polegadas/dia)

Ks = condutividade hidráulica saturada (polegadas/dia)

$\theta$  = umidade volumétrica do resíduo

$\theta_r$  = umidade volumétrica residual

$\phi$  = porosidade total

$\lambda$  = índice de distribuição do tamanho dos poros

i = gradiente hidráulico

A drenagem lateral saturada é modelada por uma aproximação analítica ao estado estacionário, solução da equação de Boussinesq, empregando as suposições de Forchheimer, 1930, *apud* Schroeder *et. al* (1994).

O modelo ainda permite determinar o vazamento vertical do percolado através das camadas de fundo do aterro, empregando uma série de equações de Giroud *et al.* (1989, 1992) *apud* Schroeder *et. al* (1994).

Todos os processos citados anteriormente são interligados no HELP de uma forma sequencial, iniciando com um balanço hídrico superficial, partindo para a evapotranspiração e perfil do solo, e finalmente drenagem e *routing* (propagação de cheias) da água que começa na superfície com a infiltração e percola para o fundo através do perfil do aterro. O procedimento é feito repetidamente para cada dia da simulação.

Berguer (2015) resume o histórico do modelo HELP incluindo referências sobre a validação das três versões atuais. Segundo este, algumas limitações do programa estão relacionadas à resolução máxima do tempo na entrada de dados (dados meteorológicos diários, dando apenas uma estimativa aproximada do escoamento superficial). Ainda de acordo com Berguer (2015) qualquer modelo que utilize dados diários de precipitação não consegue reproduzir os picos de drenagem da camada de drenagem lateral das coberturas finais. Porém é difícil superar essas limitações porque os dados meteorológicos com resolução de tempo menores não estão disponíveis em muitos locais, também porque o modelo deveria considerar as variações diurnas da evapotranspiração, além de resultar em um tempo maior de computação.

Berguer (2015) planeja as seguintes melhorias em uma versão futura do HELP 4D:

- O fluxo vertical não saturado será melhorado incluindo o potencial matricial no gradiente hidráulico. Além disso pretende-se adicionar uma opção de infiltração no limite inferior de uma camada de percolação.
- Na versão atual do HELP, independentemente de sua profundidade, a zona evaporativa é sempre subdividida em sete segmentos para os cálculos. As camadas fora da zona evaporativa são subdivididas em um a três segmentos, dependendo da espessura da camada. Porém nesse modelo os segmentos podem ser muitos espessos, por isso Berguer (2015) pretende fazer um refinamento nos segmentos com uma espessura padrão de 10cm e mais refinamentos onde necessários, como perto

da superfície do aterro. Em combinação com o gradiente hidráulico codificado o cálculo do fluxo vertical insaturado e da quantidade de água com a profundidade se tornarão mais realistas. O tempo de computação deve ser mantido, espera-se que permaneça aceitável (Berguer, 2015).

- Por último o autor pretende melhorar os modelos de evapotranspiração e submodelos de crescimento e decaimento vegetativo para incluir mais tipos de vegetação além das gramíneas.

Nesse estudo foi utilizado o HELP 3.07 – versão 3.07 do programa que está disponível gratuitamente no site da EPA.

#### 2.4.2.2 MODUELO

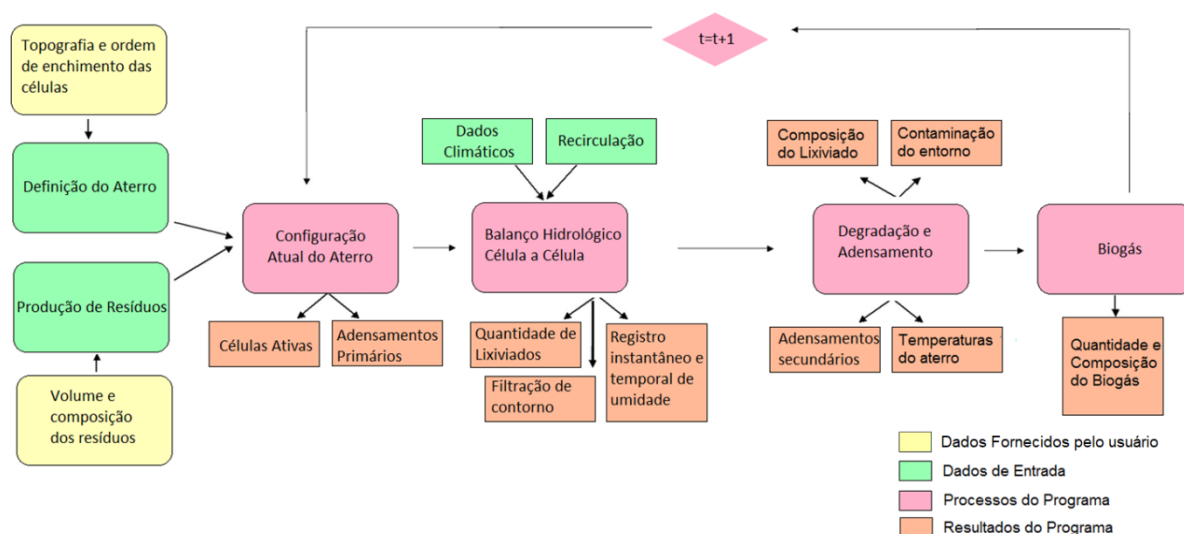
O modelo computacional MODUELO possui como finalidade a simulação e a estimativa da geração de lixiviado e gases em aterros sanitários. Em essência, consiste na aplicação da equação de continuidade nas entradas e saídas de água na unidade elementar do trabalho, as células unitárias, que podem ser de solo ou resíduo, de acordo com o aterro a estudar. De acordo com GIA (2009a), O MODUELO 4.0 (versão 4) é um programa 3D, subdividido em três blocos de gestão de dados (meteorologia, configuração do aterro e produção de resíduos) e seis módulos principais de cálculo: o hidrológico, climatológico, de biodegradação, de temperaturas, de adensamentos, e de recirculação de percolado a figura 3 apresenta o algoritmo geral do programa.

O programa simula a história do aterro, a variação das características hidráulicas do resíduo com a profundidade, oferece a possibilidade de conectar a água do escoamento superficial ao sistema de coleta de percolados e também define um modelo de recirculação e armazenamento de percolado (GIA, 2009a).

No bloco de produção de resíduos é calculada a evolução dos resíduos depositados no aterro. A configuração do aterro é inserida no programa por uma malha que define o fundo e outra que define as células unitárias de resíduos. O tamanho das células determina a precisão e o tempo de cálculo do modelo.

No bloco de configuração do terreno podem ser definidos quatro tipos de células as de terreno inicial, de terreno encerradas, de resíduos e de resíduos encerradas, a essas células são atribuídas características do resíduo e da cobertura.

Figura 3 - Algoritmo geral do MODUELO 4.0



Fonte: Adaptado de GIA (2009b)

Os dados meteorológicos necessários ao bloco de clima, correspondentes ao período de simulação, são a precipitação média horária; a temperatura média diária; a radiação solar média diária; a velocidade média diária do vento e a umidade relativa do ar média diária.

Com base no histórico operacional da planta do aterro e da evolução da disposição através do tempo, o módulo hidrológico calcula o fluxo de água através das células do aterro. Em seguida, a partir dos resultados do módulo hidrológico, pode ser realizada a simulação da biodegradação da parte orgânica presente nos resíduos.

O balanço hídrico mostrado na equação 10 constitui a base fundamental do processo, consiste na aplicação da equação da continuidade às entradas e saídas de água de cada célula. Para o cálculo do balanço hídrico superficial são considerados os fenômenos de evaporação superficial e subsuperficial, armazenamento superficial, infiltração e escoamento superficial.

O fluxograma do cálculo hidrológico é realizado conforme o fluxograma da figura 4. Com a precipitação horária em milímetros o modelo calcula a evaporação nas células tipo resíduo, compostas de resíduo e cobertura diária, pela equação de Hargreaves, equação 11 (HARGREAVES e SAMANI), citado por GIA, (2009b).

Caso se disponha de dados completos de clima (número de horas diárias de insolação, temperatura média diária, umidade relativa do ar média diária e velocidade

média diária do vento) são empregadas as equações de Penman tanto para evaporação como para evapotranspiração— Equações 12 a 19.

$$\frac{\Delta L_d}{\Delta t} = P(t) + R(t) + Lfv(t) \mp Lfh(t) - Es(t) - EVT(t) - CCr(t) + H_{drenada} \quad (10)$$

Onde:

$\Delta L_d / \Delta t$  = variação da quantidade de lixiviado no tempo

$P(t)$  = Precipitação sobre a célula

$R(t)$  = recirculação sobre a célula

$Lfv(t)$  = Lixiviado infiltrado verticalmente proveniente da célula superior

$Lfh(t)$  = Lixiviado infiltrado horizontalmente proveniente das 4 células laterais

$Es(t)$  = Escoamento superficial

$EVT(t)$  = Evapotranspiração, quando existirem plantas na superfície

$H_{drenada}(t) = H_{min}(t^1) - H_{minima}(t)$ . Umidade na forma de  $H_{minima}$  que passa para umidade na forma de  $\Delta L_d / \Delta t$  devido à variação de  $H_{minima}$  pela compressão da RSU. Só aparecerá quando o  $H_{minima}(t) = 0$ , caso contrário, a compressão primeiro causará a saída de ar.

$H_{min}(t)$  = Humidade mínima remanescente, humidade que ainda será preenchida. Supõe-se que primeiramente a água preenche os vazios e satura o  $H_{min}$  para se tornar lixiviado disponível.

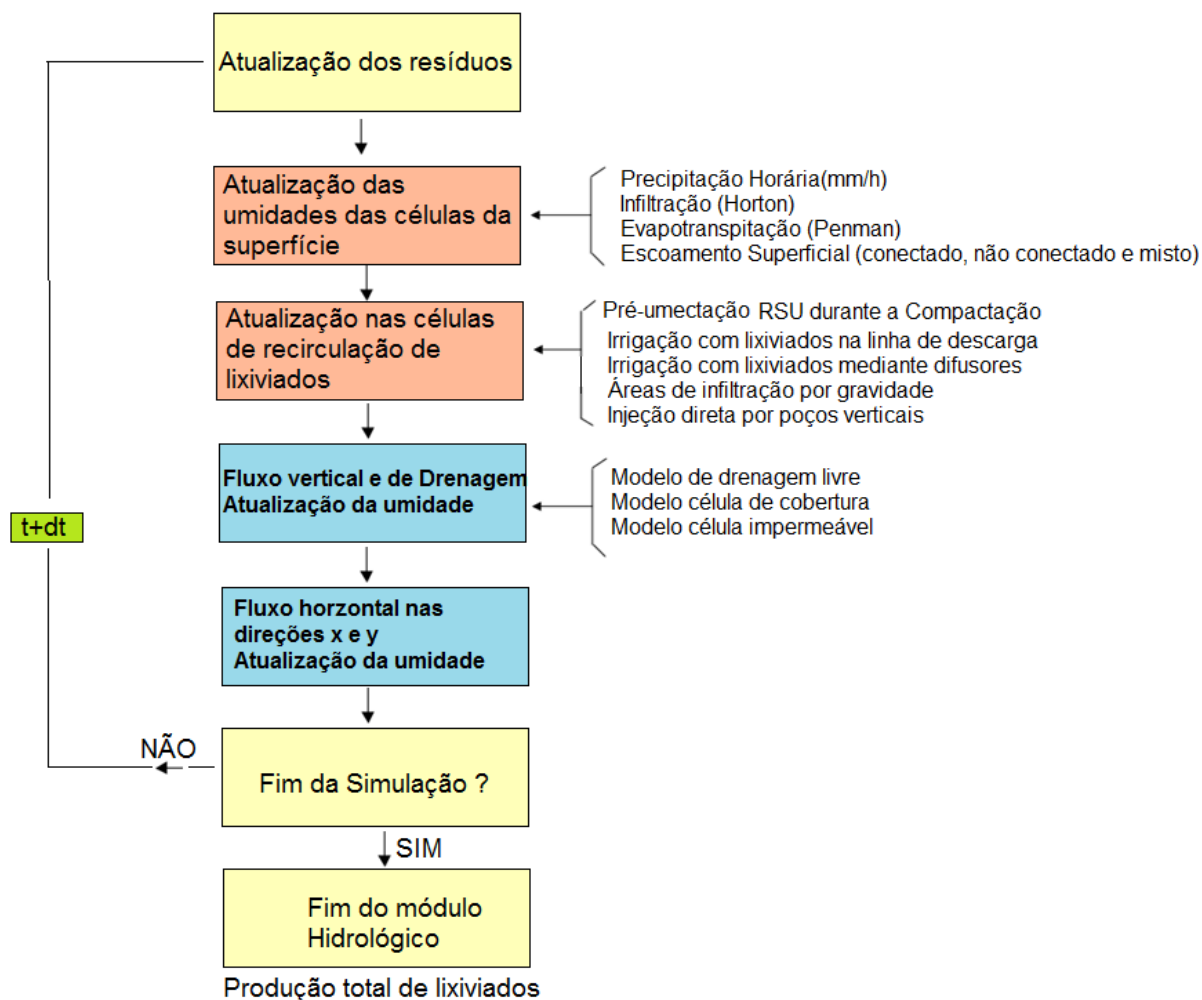
Para definir a profundidade máxima de evaporação é utilizada a equação 20 desenvolvida por Schroeder e colaboradores (1994, citado por GIA, 2009b).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial nas células encerradas, quando a cobertura final possui algum tipo de vegetação é utilizada uma relação empírica estabelecida como uma fração da evaporação potencial de uma superfície de água pré-calculada pela equação de Penman.

A evapotranspiração é estimada pelo método de Penman com alterações em parâmetros proposta por Lobo (2003), onde o valor do albedo adotado é de 0,25, para representar a variação das propriedades refletivas da vegetação em relação ao solo. Para cálculo da energia aerodinâmica para evaporação ( $E_a$ ), o termo somado à velocidade do vento passa de 0,5 para 1, para simular o efeito da rugosidade produzida pela vegetação. A equação para cálculo da radiação refletida ( $R_o$ ) a

constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ) é multiplicada por um coeficiente redutor, de 0,95, para refletir a diminuição da radiação pela vegetação.

Figura 4 - Fluxograma do cálculo hidrológico no MODUELO 4.0



Fonte: GIA (2009b, tradução nossa)

$$E = \frac{0,0023(T_{\max} - T_{\min})^{0,5} Ra \left( \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} + 17,8 \right)}{59,732 - 0,0564 \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}} \quad (11)$$

Onde:

E=evaporação em mm/dia

$T_{\max}$ = temperatura máxima do dia em °C

$T_{\min}$ = temperatura mínima do dia em °C

Ra= Radiação solar em função da latitude e época do ano

$$E = \frac{\Delta x Rn + \gamma x E_a}{\Delta x \gamma} \quad (12)$$

$$Rn = \frac{Ri \times (1-r) - Ro}{\lambda} \quad (13)$$

$$\lambda = 59,732 - 0,0564T \quad (14)$$

$$Ri = Rs \quad (15)$$

$$Ro = (T + 273)^4 \times (0,56 - 0,09\sqrt{e}) \times \left(0,1 \times 0,9 \times \frac{n}{N}\right) \quad (16)$$

$$e = \varepsilon \times \frac{e_a}{100} \quad (11)$$

$$e_a = 7,501 \times \exp\left(\frac{16,78 \times T - 116,9}{273,3 + T}\right) \quad (17)$$

$$E_a = 0,35 \times (0,5 + 0,54v) \times (e_a - e) \quad (18)$$

$$v = \frac{R \times 1000}{3600 \times 24} \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{4098}{(T + 273,3)^2} \times 7,5 \times \exp\left(\frac{16,78 - 116,9}{273 + T}\right) \quad (19)$$

Onde:

E= evaporação em mm/dia

$\gamma$ = constante psicrométrica = 0,485 mm Hg/°C

$\Delta$  = inclinação da curva de tensão de saturação *versus* temperatura (mmHg/°C)

Ea= energia aerodinâmica para evaporação (mm).

Rn = energia de radiação (mm)

Ri=radiação incidente (cal/cm²/d)

Ro= Radiação refletida (cal/cm/d)

R= albedo, relação entre radiação de onda curta (solar) refletida e a radiação global incidente.

T= temperatura média diária do ar (°C)

Rs = radiação solar, de acordo com a latitude e época do ano (cal/cm²/d)

n/N = fração de horas de sol com relação ao máximo período de insolação

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann =  $1,18944 \times 10^{-7}$  (cal/cm²/d/°K)

e = tensão de vapor do ar (mmHg)

$\varepsilon$  = umidade relativa

ea = tensão de vapor de saturação à temperatura T (mm Hg)

v = velocidade do vento a 2 m da superfície (m/s)

R = distância percorrida pelo vento em 24 horas (km)

$$E_{eva} = 4,6068 \times 1,5952^{\log_{10} K} \quad (20)$$

Onde:

E<sub>eva</sub>=profundidade máxima de evaporação [L]

K= Condutividade hidráulica saturada da superfície [LT<sup>-1</sup>]

O armazenamento de água nas depressões existentes na superfície do aterro é simulado através do conceito de altura máxima de empoçamento de água sobre a superfície. A chuva precipitada acumula-se até atingir esta altura, acima dessa altura ocorre o escoamento superficial, e essa água acumulada está sujeita aos efeitos de evapotranspiração e infiltração. Nesse modelo o escoamento pode ser definido como conectado à rede de drenagem de lixiviado.

Para o cálculo da infiltração o modelo utiliza a equação de Horton, equação 21.

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-\beta t} \quad (21)$$

Onde:

$f_c$  = taxa de infiltração na saturação

$f_o$  = capacidade de infiltração inicial

$\beta$  = coeficiente empírico que pode ser relacionado à difusividade

O parâmetro  $\beta$  corresponde à inclinação da linha  $f$  versus  $t$ .

Para o cálculo do fluxo de umidade é utilizada uma solução por diferenças finitas e elementos finitos de tipo Garlekin e a equação unidimensional de fluxo saturado e não saturado desenvolvida por Van Genuchten, equação 22 e 23.

$$q = q_{res} + \frac{(q_{sat} - q_{res})}{[1 + (a|h|)^n]^m} \quad (22)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (23)$$

Onde:

$q$  = teor de umidade volumétrico (vol/vol)

$q_{res}$  = teor de umidade volumétrico residual (vol/vol)

$q_{sat}$  = teor de umidade volumétrico na saturação (vol/vol)

$h$  = altura de sucção mátrica (cm), correspondente a pressão aplicada

$a, n, m$  = parâmetros de ajuste.

O modelo calcula os escoamentos horizontal e vertical de maneira independente. O fluxo vertical de água de uma célula para outra e através dos drenos é calculado em cada intervalo de tempo, e em cada intervalo de tempo a umidade da célula é atualizada e determinado o fluxo horizontal do líquido.

Segundo o modelo o fluxo vertical nos resíduos ocorre quando é alcançada a umidade residual definida pelo usuário. As condições de contorno são a umidade mínima e residual da célula, sendo que nas camadas de fundo não é considerado fluxo vertical sendo a condutividade hidráulica nula.



O modelo também estima a biodegradabilidade a partir do conhecimento da composição dos resíduos do aterro a partir de estudos de potencial bioquímico de metano. A classificação é feita entre os componentes do resíduo inertes, lentamente hidrolisáveis e rapidamente hidrolisáveis.

Existe ainda o modelo de adensamento e de temperaturas. O modelo de temperaturas considera duas fontes de calor: o calor proveniente das reações aeróbicas e a das reações anaeróbicas.

A concepção do modelo MODUELO 4.0 em células permite evitar muitas das limitações de outros modelos, pois considera a heterogeneidade dos resíduos (no nível da célula) onde é possível variar as propriedades térmicas dos resíduos em função da variação da umidade das células e do volume de vazios oferecendo a distribuição de temperaturas no aterro em 3D.

A teoria do adensamento unidimensional foi escolhida como filosofia, com a divisão dos adensamentos em diferentes estágios (inicial, primário e secundário). A célula é calculada como a unidade de cálculo, sujeita a incrementos de carga e evoluindo em seu processo de biodegradação.

Padilla (2007) utilizou o Programa MODUELO 4.0 para uma célula experimental construída na área da CTRS (Central de Tratamento de Resíduos Sólidos) de Belo Horizonte, e obteve valores acumulados de percolado em uma faixa entre 20% e 30% inferiores aos valores medidos no campo.

Tozetto (2008) utilizou a segunda versão do MODUELO para calcular a quantidade de lixiviado em um aterro sanitário da cidade de Curitiba, Paraná-Brasil, calibrando-o de acordo com os dados medidos em campo, o resultado da calibração mostrou que a condutividade hidráulica equivalente do solo de cobertura era de  $1 \times 10^{-3}$  cm/s, duas ordens de grandeza maior do que a determinada pelos ensaios realizados em laboratório sendo reflexo da qualidade da execução da cobertura, a execução de uma cobertura com uma condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s resultaria em uma diminuição de 57,6% no volume de lixiviado produzido. Com a calibração Tozetto (2008) não conseguiu reproduzir o volume total de lixiviado registrado em campo, entretanto a resposta obtida com a modelagem mostrou uma tendência de variação semelhante à observada em campo, sugerindo que o modelo conceitual representa, de certa forma, a realidade do aterro sanitário, apesar de todas as simplificações e suposições adotadas.

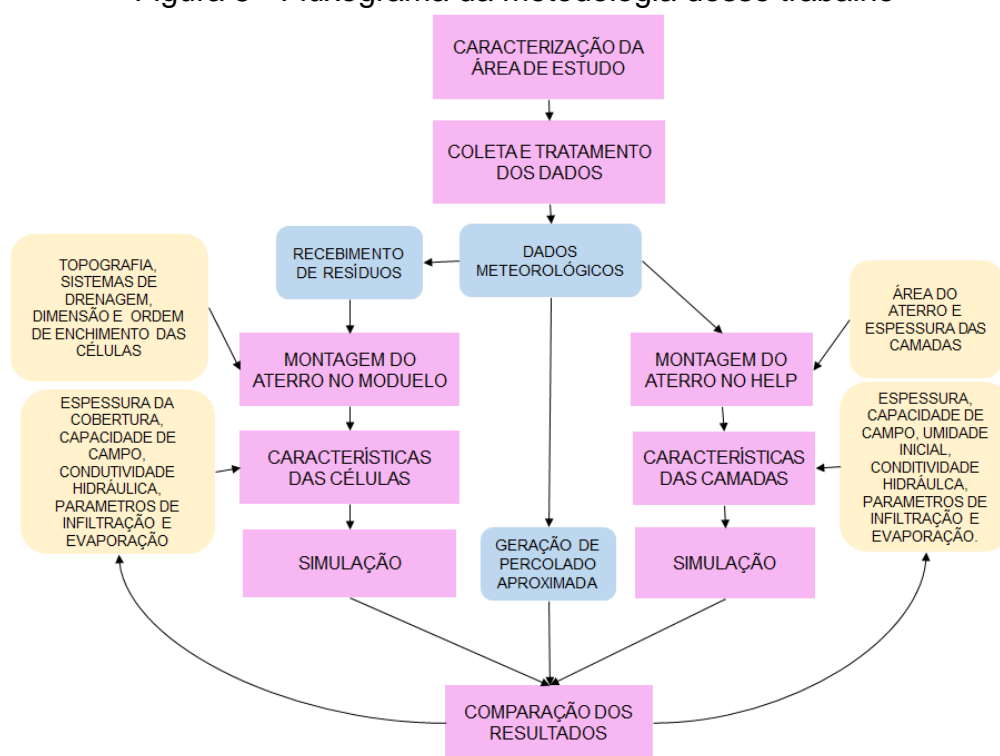
### 3 METODOLOGIA

Para realização deste trabalho, inicialmente estudou-se a região dos aterros industrial e sanitário de Joinville, e coletaram-se todas as informações disponíveis referentes à operação, quantidade e qualidade dos resíduos dos aterros. As informações foram fornecidas pelas empresas que os operam. Também foi necessário fazer a coleta e tratamento de dados meteorológicos, e de geração de percolado.

Foi realizada modelagem digital dos aterros nos softwares MODUELO 4.0 e HELP 3.07, com a inserção dos dados coletados e simulação da geração de líquidos percolados, em ambos os aterros, utilizando os dois softwares. Posteriormente compararam-se os dados gerados nas simulações com os valores aproximados de geração de percolado em campo.

Para o aterro sanitário foram feitas onze simulações do no MODUELO 4.0, e dez no HELP 3.07. Para o aterro industrial foram realizadas doze simulações no MODUELO 4.0, e nove no HELP 3.07. Em cada simulação foi alterado um parâmetro de entrada no programa para chegar ao valor mais próximo possível da condição real e para verificar a influência de cada item na geração de percolado. O fluxograma, figura 5, apresenta as etapas da metodologia descrita em detalhes ao longo do capítulo.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia desse trabalho

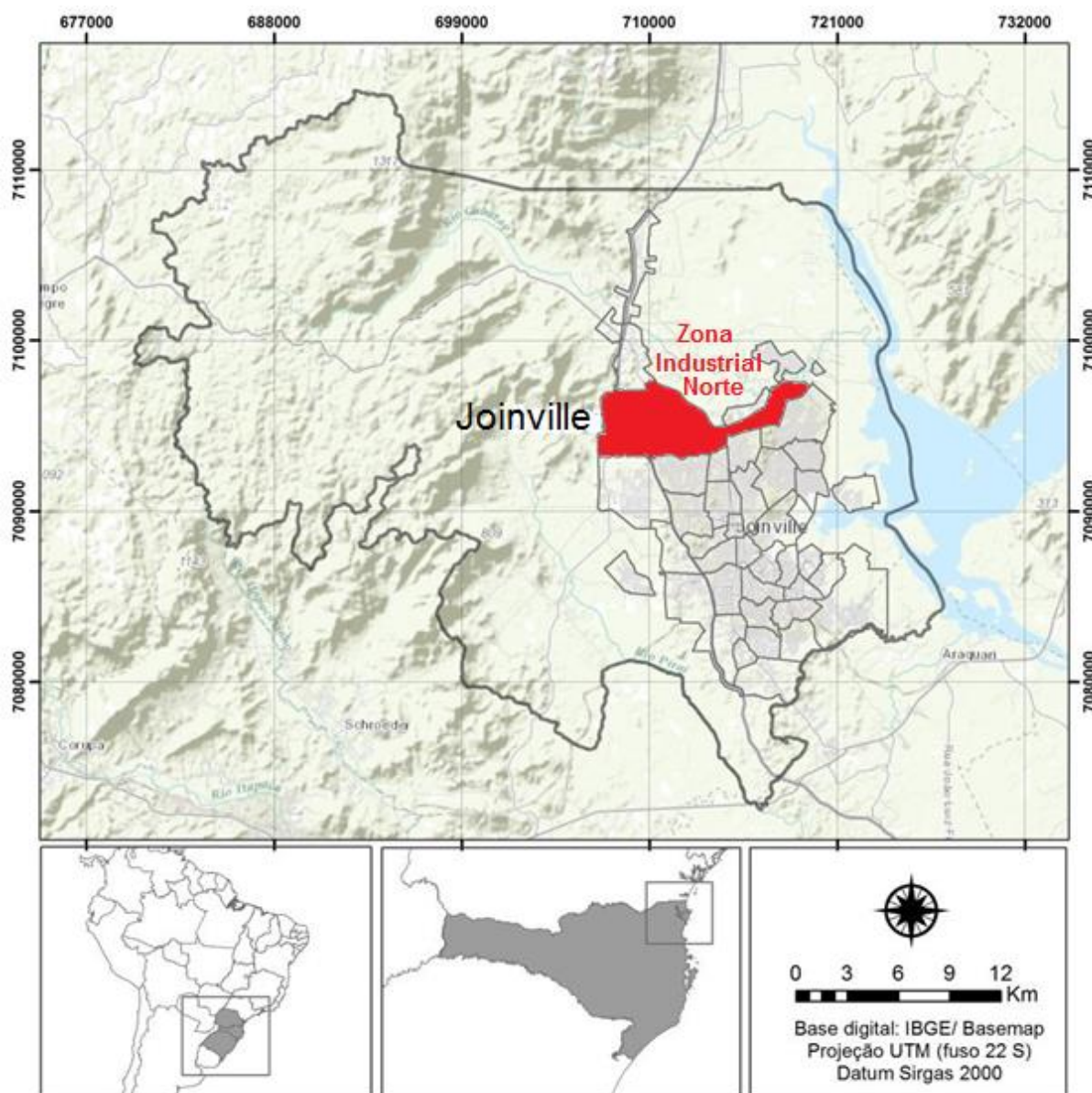


Fonte: A autora

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os aterros sanitários e industrial, avaliados neste trabalho, estão localizados na Zona Industrial Norte do município de Joinville, na rua dos Bororós, na região nordeste do estado de Santa Catarina no Brasil, figuras 6 e 7.

Figura 6 - Localização da área de estudo



Fonte: A autora.



Figura 7 - Aterros em estudo



Fonte: Google Earth (2018).

### 3.1.1 Economia

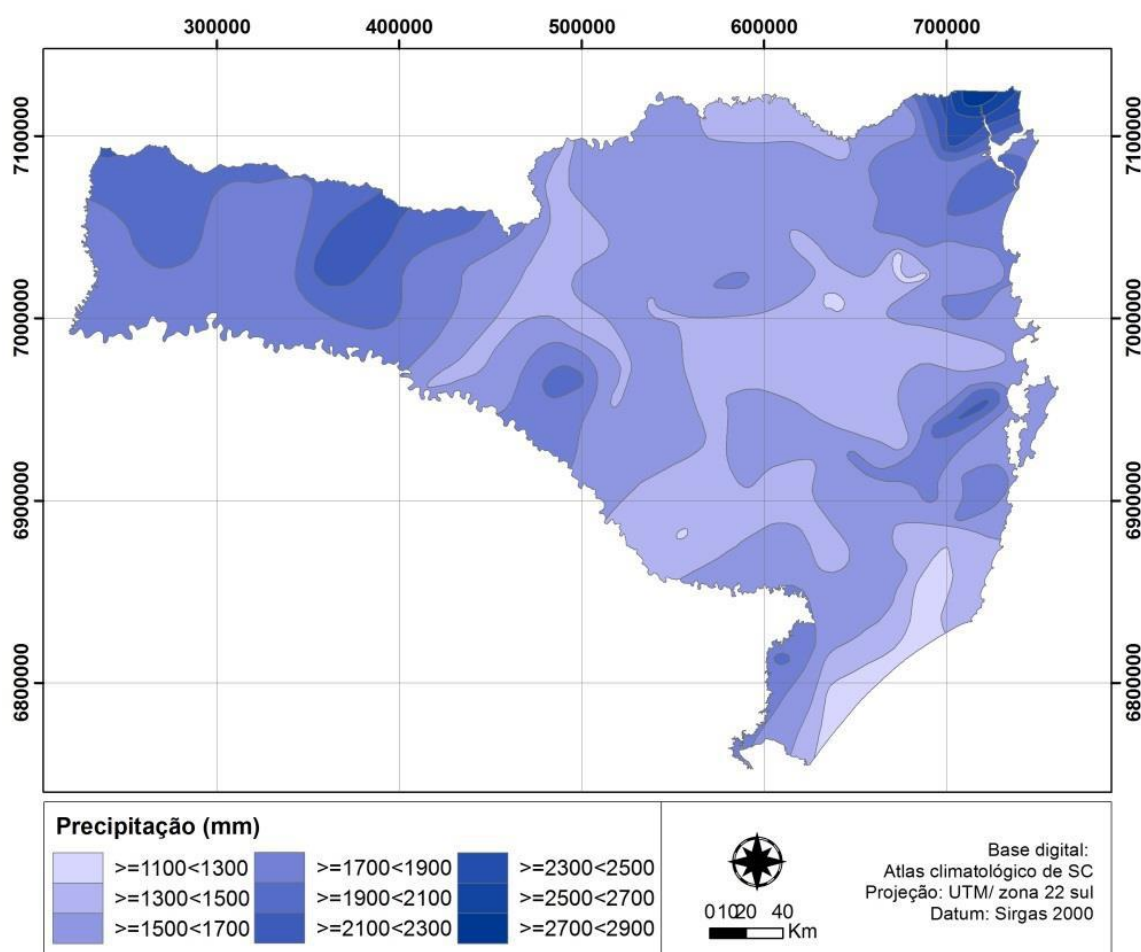
O município de Joinville tem uma área de 1124,46 km<sup>2</sup>, e população estimada em 2017 de 577.077 habitantes (IBGE 2018). É polo industrial da região Sul, concentra grande parte da atividade econômica na indústria com destaque para os setores metalmeccânico, têxtil, plástico, metalúrgico, químico e farmacêutico (Joinville, 2017). O Produto Interno Bruto - PIB per capita de Joinville também é um dos maiores do país, R\$45.538,31 por ano (IBGE 2018).

### 3.1.2 Clima

O clima da região é do tipo úmido a super úmido, mesotérmico, com curtos períodos de estiagem. A umidade relativa média anual do ar é de 76,04%. (Joinville, 2017). A distribuição média anual de precipitação no Estado é maior na região nordeste, próximo ao município de Garuva, que fica muito próximo da área em estudo, onde são encontrados valores superiores a 2.700 mm (Figura 8). Mello et. al. (2013) mencionam que o pluviômetro Estrada dos Morros, localizado na região do rio Piraí,

em Joinville (SC), registra uma média anual de 3.004,7 mm, representando uma série de 23 anos de dados, de 1987 a 2009. Ou seja, existem valores pontuais de precipitação que excedem os 2.900 mm registrados no Atlas Climatológico de Santa Catarina, figura 8. A área em estudo localiza-se na região nordeste próximo as coordenadas X:700000 e Y: 7100000, em uma das partes mais escuras do mapa.

Figura 8 - mapa de pluviosidade de Santa Catarina



Fonte: Mello *et. Al.* (2013)

O relevo do município é formado por três grandes compartimentações topográficas, sendo elas: a planície costeira, a leste; a escarpa da Serra do Mar, na porção central, e o planalto, a oeste.



### 3.1.3 O aterro sanitário de Joinville

O manejo dos resíduos domiciliares no Município de Joinville é realizado por meio de concessão pública. O aterro sanitário recebe também, desde 2009, resíduos do município de Balneário Barra do Sul, cidade vizinha.

O aterro sanitário de Joinville tem atualmente 5 maciços, o maciço antigo (antigo lixão e aterro controlado) encerrado, novas células (abaixo da área emergencial) encerradas, área emergencial encerrada, área 1 em operação e área 2 que está em construção e é utilizada como jazida para recobrimento da área em operação, e existe um projeto em processo de aprovação para ocupação do local entre o maciço antigo e área1. A figura 9 apresenta a localização das áreas citadas.

Figura 9 - divisão das células dos aterros



Fonte: Google Earth (2018)

Segundo Arruda (2007), até a década de 80 não existia no município disposição adequada para os resíduos, sendo esta feita na forma de lixão, no mesmo local onde hoje é localizado o aterro sanitário. De acordo com informações da empresa que opera

o aterro em 1991 o aterro passou a ser operado como aterro controlado e a partir de 2007 como aterro sanitário.

Toda a área encerrada tem 14,89 (quatorze vírgula oitenta e nove) hectares com aproximadamente 2.555.021 (dois milhões, quinhentos e cinquenta e cinco mil e vinte uma) toneladas, e 3.512.503 (três milhões, quinhentos e doze mil e quinhentos e três) metros cúbicos aterrados até maio de 2012. A área 1 tem 7,37 (sete vírgula trinta e sete) hectares, com um total de 914.639 (novecentos e quatorze mil, seiscentos e trinta e nove) toneladas aterradas até julho de 2018, levantadas em aproximadamente 1.006.126 (um milhão, seis mil e cento e vinte e seis) metros cúbicos. A tabela 3 apresenta os dados referentes a massa e volume de resíduos recebida no aterro sanitário de 1991 a 2017.

O aterro sanitário recebe os resíduos sólidos urbanos de coleta domiciliar, resíduos de limpeza urbana e resíduos de serviço de saúde que são esterilizados via autoclavagem antes de serem aterrados.

O aterro opera 24 horas por dia, os veículos de coleta passam por um controle de entrada e pesagem e seguem para a frente de serviço para a descarga. Os resíduos são empurrados e espalhados com tratores de esteira e posteriormente compactados em camadas de 20 a 30 cm de espessura.

A base da área 1 e novas células tem uma camada de impermeabilização de argila e manta PEAD de 1,5mm, uma camada de drenagem formada por uma camada de pedrisco, de aproximadamente 80 centímetros, e manta geotêxtil tecido com inclinação de 1%. E, segundo a empresa operadora do aterro, a área mais antiga que é aterro controlado, tem o fundo de argila compactada a 95% proctor normal.

A drenagem horizontal do percolado no fundo das células consideradas aterro sanitário é formada por drenos principais, e secundários. Os drenos principais são de PEAD (polietileno de alta densidade) de 170 milímetros perfurados e envoltos por uma trincheira de brita 3, e os secundários são formados por trincheiras de brita 3, formando uma drenagem horizontal em malha de 30X30 metros. A rede de drenagem está interligada a drenos verticais formado por tubos de concreto de 400 milímetros de diâmetro preenchidos e envoltos (espessura de 20 a 30cm de pedra) por pedra pulmão e envoltos por uma malha de aço que servem como drenagem de gás e conduzem o percolado até os drenos principais e em seguida para a tubulação de coleta e condução do percolado até o sistema de tratamento.

Tabela 3 - Recebimento de resíduos no aterro sanitário municipal de Joinville

<b>ANO</b>	<b>Massa Total Recebida (ton)</b>	<b>Volume (m³)</b>	<b>Área em Operação no Período</b>
1991	42.122	60.175	<b>Maciço Antigo</b>
1992	58.324	83.320	
1993	68.003	97.147	
1994	71.435	102.050	
1995	6.297	123.281	
1996	99.218	141.740	
1997	112.490	160.700	
1998	145.558	207.940	
1999	149.293	213.275	
2000	155.360	221.943	
2001	174.368	249.098	
2002	168.645	240.922	
2003	156.238	223.197	
2004	153.729	219.613	
2005	129.714	185.306	
2006	116.613	166.590	
2007	121.925	174.179	<b>Novas Células</b>
2008 (Jan a Abr)	44.210	63.157	
2008 (Maio a Dez)	88.420	126.314	<b>Área Emergencial</b>
2009 (Jan a Set)	104.594	149.419	
2009 (Out a Dez)	32.309	31.399	<b>Ampliação Área Emergencial</b>
2010	145.130	121.854	
2011	147.222	101.821	
2012 (Jan a Mai)	63.804	48.063	
2012 (Jun a Dez)	81.791	100.704	<b>Área I</b>
2013	154.293	175.283	
2014	143.544	174.772	
2015	150.792	158.426	
2016	144.799	151.232	
2017	149.480	145.776	
2018 (Jan a Jul)	89.940	99.932	

Fonte: Empresa operadora do aterro sanitário (2018)



A drenagem de cada camada de todas os maciços do aterro sanitário é feita em valas de 80x80 centímetros que se ligam aos drenos verticais, refazendo uma malha na mesma posição da malha de drenagem do fundo. Essas valas são preenchidas com pedra pulmão (densidade  $1,58\text{kg/m}^3$ ). Na linha que circunda a camada são utilizados tubos de concreto de 200mm de diâmetro perfurado.

As camadas de resíduos da área 1 têm 5 metros de espessura com uma cobertura de argila de 40 centímetros nas células ativas, nas células encerradas a camada de resíduos é de 3 metros de espessura. O material de cobertura das células é proveniente da área 2.

A drenagem de águas pluviais tem objetivo promover o afastamento destas, com o intuito de evitar o seu contato com os resíduos e, conseqüentemente, diminuir o volume de percolados, além de garantir condições para operação normal em dias de chuva. A drenagem superficial é feita por canaletas de concreto tipo meia-cana de 400 milímetros, instaladas nas cristas e pés de taludes interligadas em caixas de passagem e direcionadas ao corpo hídrico.

Atualmente é coletado percolado de todas as células por gravidade em uma lagoa de equalização (inclusive do antigo aterro controlado e lixão) e depois enviado para o tratamento. A lagoa de equalização tem por finalidade homogeneizar o efluente a ser tratado e manter vazão constante de 6 L/s, bombeada para o tratamento.

#### 3.1.4 O aterro industrial de Joinville

O aterro industrial iniciou suas atividades em abril de 2002, segundo o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (Joinville,2013), anteriormente a essa data as indústrias locais faziam a disposição de seus resíduos, gerados durante os processos industriais, em cidades próximas como Curitiba ou Blumenau.

O aterro recebe resíduos industriais de Joinville e região, que é polo industrial de Santa Catarina. Esta unidade de tratamento realiza também serviços de pré-tratamento de resíduos como solidificação, neutralização, estabilização e encapsulamento de resíduos perigosos, além de fazer o tratamento dos líquidos percolados do aterro e tratamento de efluentes industriais. Recebe resíduos classes I e II de indústrias da região norte de Santa Catarina. Possui duas células em operação,

uma recebe somente resíduos classe II e outra recebe também resíduos classe I – perigosos, figura 9. As duas células têm previsão de ampliação.

Antes do recebimento no aterro, os resíduos industriais passam por uma avaliação prévia para definição do tipo de tratamento. Os resíduos que não necessitam de tratamento são destinados à disposição direta no aterro, podendo ser classe I ou II conforme a definição em um laudo prévio do laboratório. A entrada dos resíduos no aterro passa por pesagem e inspeção, que conta com medição de temperatura, radioatividade, inspeção visual e coleta de amostras para verificação de conformidade. Os caminhões são encaminhados para a frente de serviço, porém não entram em contato com os demais resíduos, o resíduo é então espalhado e compactado. Toda área do aterro não finalizada é coberta com manta geotêxtil para evitar a infiltração de águas pluviais, essa manta é removida quando a célula recebe mais resíduos.

Desde a inauguração em abril de 2002 até julho de 2018 o maciço que recebe resíduos classe I estava com aproximadamente 2,29 hectares, e um total de resíduos aterrados de 311.075,48 (trezentos e onze mil e setenta e cinco vírgula quarenta e oito) metros cúbicos. Já o maciço que recebe os resíduos classe II estava com aproximadamente 7,78 hectares em julho de 2018 tendo um total aterrado de 1.494.894,43 (um milhão quatrocentos e noventa e quatro mil oitocentos e noventa e quatro vírgula quarenta e três) metros cúbicos. As toneladas recebidas não foram fornecidas para todo o período de operação do aterro.

Na célula Classe I a impermeabilização do fundo é composta por 1,5 metros de solo argiloso, geomembrana PEAD de 2 milímetros de espessura, uma camada de 0,25 metros de areia fina na qual estão instalados drenos testemunhas, geomembrana PEAD de 2,5 milímetros, uma manta geotêxtil de proteção e uma camada drenante de brita de 30 centímetros.

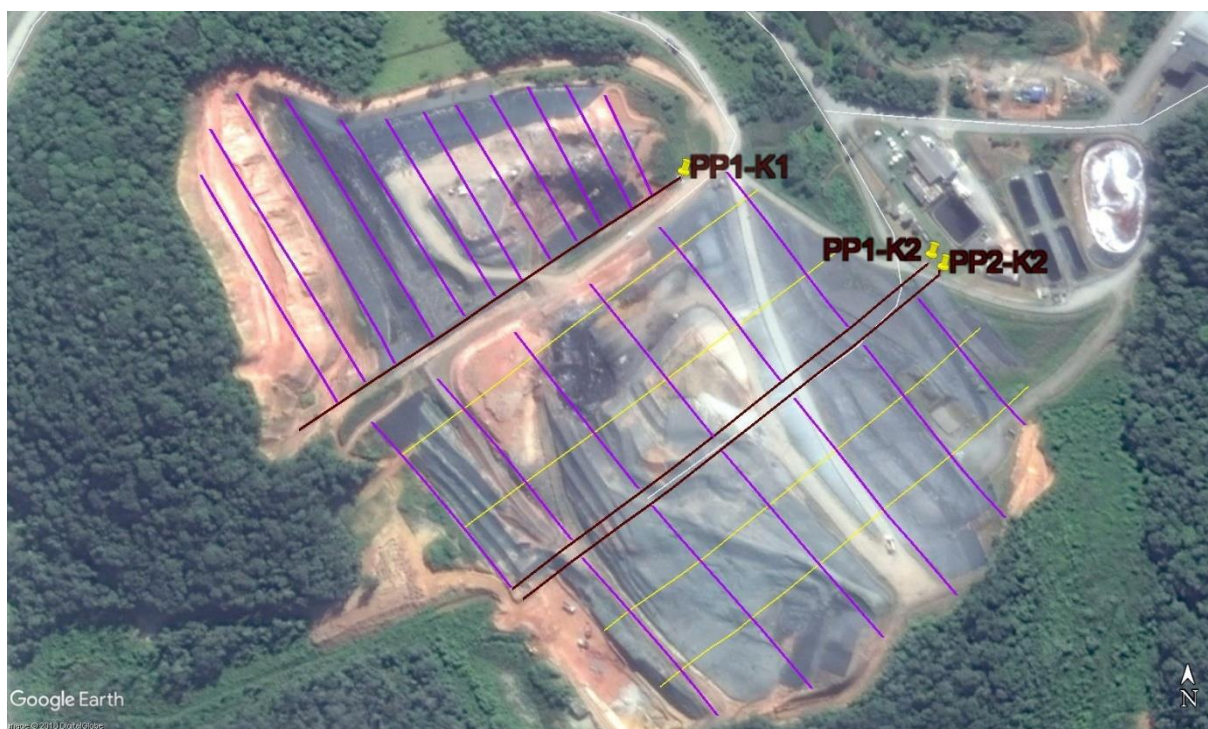
Na Célula Classe II a impermeabilização de fundo é composta por uma camada de 3 metros de solo natural insaturado, uma camada de 1 metro de argila, geomembrana PEAD de 2 milímetros um geotêxtil de proteção e camada drenante de brita de 30 centímetros.

Cada camada do aterro tem 9,8 metros de espessura, as frentes de serviço operam com no máximo 4.000m<sup>2</sup>, de área descoberta para deposição, sendo aproximadamente 800m<sup>2</sup> no classe I e 2800m<sup>2</sup> no classe II. A figura 10 representa a disposição da drenagem do fundo do aterro industrial. No classe I ela consiste de tubo

PEAD perfurado de 200 mm (roxo) com declividade 1% a cada 10m interligando em uma tubulação PEAD 250mm (marrom) com declividade 3% que vai até o poço denominado PP1-K1. No classe II é feita por Tubo PEAD perfurado de 160mm (amarelo) a cada 30m com declividade de 1% interligando em PEAD perfurado 200 mm (roxo) com declividade 1% a cada 40m interligando em duas tubulações centrais de PEAD 250mm (marrom) com declividade 3% que vai até os poços PP1-K2 e PP2-K2.

A drenagem das camadas é executada em valas de rachão de 80x80cm que fazem uma malha de 50x50m onde, em cada interligação, existe a drenagem vertical. Sendo a drenagem vertical em tubo PEAD 160mm perfurado envolto por manda geotêxtil e aproximadamente 50cm de rachão.

Figura 10 - Drenagem do fundo do aterro industrial



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

A drenagem de fundo do aterro é encaminhada para 3 poços de coleta, um do aterro Classe I e dois do Classe II nos quais os líquidos percolados são bombeados para a estação de tratamento que possui capacidade máxima de tratamento de 20m<sup>3</sup>/h.

## 3.2 COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

A seguir apresenta-se a forma de obtenção e correção dos dados meteorológicos necessários para simulação em ambos os modelos dessa pesquisa, apresentam-se também os dados de recebimento de resíduos que são utilizados apenas no MODUELO 4.0, além da metodologia seguida para obter o valor aproximado da geração de percolado nos aterros, visto que os mesmos não dispunham de medição controlada.

### 3.2.1 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos necessários para inserção nos dois softwares são a são precipitação, temperatura média máximas e mínimas, humidade relativa do ar, radiação solar, insolação, e a velocidade média do vento.

Optou-se por utilizar os dados da estação meteorológica da defesa civil de Joinville localizada no CEASA, que coleta os dados necessários e está a, aproximadamente, 1,5km da área de estudo. Esta estação está em operação desde 2012 e apresenta vários períodos com falhas, por isso foi feito um preenchimento de falhas pelo método da regressão linear múltipla com outras estações da defesa civil localizadas no Jardim Paraíso, Cubatão, Bucarein, e Centro, utilizando-se o software Microsoft Excel. Ledra (2017) e Mello (2015) encontram bons resultados utilizando a regressão linear múltipla no Município de Joinville.

Os dados de 1996 a 2012 foram obtidos a partir da estação meteorológica da Univille que possui 3 medições diárias, por isso foi necessário fazer a desagregação de chuvas de um dia para 24 horas e de 24h para períodos horários. Para a desagregação de chuva de um dia para chuva máxima de 24 horas, Taborga apud Tucci *et. al.* (2014), indica um fator de 1,10, que foi o adotado nesse estudo. E para fazer a desagregação da chuva de 24H em chuvas horárias foi utilizado o coeficiente calculado de acordo com a equação 24, determinada por ISSA (2017). Apesar de não serem os dados ideais para a simulação, esta estação meteorológica é próxima ao local, 5km de distância, e uma das poucas estações que possuem medições anteriores a 2012. Também foi preciso preencher algumas falhas a partir de regressão linear com os dados da estação localizada em Itapoá do Instituto Nacional de

Meteorologia - INMET, e com as estações 663 e 1051 da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI.

Os dados de precipitação anteriores a 1996 foram obtidos a partir da estação número 02648014 disponível no site da Agência Nacional de Águas - ANA, a desagregação da chuva foi feita da mesma forma já descrita, com as equações de Torga apud Tucci et. I. (2014) e Issa (2017). Como não existem dados de temperatura, umidade e velocidade do vento nesse período, esses itens foram preenchidos com a média mensal da estação meteorológica do CEASA.

Os dados de insolação diária foram obtidos a partir do mapa de insolação disponível no site do Instituto Nacional de Meteorologia \_INMET (INMET,2017). Os dados de radiação solar média diária foram obtidos do mapa solarimétrico apresentado por Tiba *et. al.* (2000)

$$C24(d) = e^{1,3 \ln(\frac{Ind}{7,7})} \quad (24)$$

Onde: d=duração em minutos.

### 3.2.2 Dados de recebimento de resíduos

#### 3.2.2.1 Aterro Sanitário

A empresa que opera o aterro sanitário forneceu dados de recebimento de resíduos em toneladas de janeiro de 2010 até julho de 2018 em quantidades mensais, Tabela 4. Os dados anteriores a 2010 foram fornecidos em massa e volume total, de acordo com o maciço em que se encontraram como mostra a tabela 3. Para inserção no MODUELO 4.0 os dados da tabela 3 foram divididos pelos meses de operação do aterro, e considerados como dados mensais para inserção no MODUELO 4.0.

A composição média dos resíduos do aterro sanitário, também fornecida pela operadora do aterro, é: alumínio, metal ferroso, vidro, plástico filme, PET, PEAD, PP, plásticos diversos, papel, papelão, embalagem acartonada, matéria orgânica, rejeitos, material inerte e perdas. Para maior facilidade na interpretação dos resultados os materiais plásticos e metais foram agrupados em um único item. A tabela 5 apresenta a composição dos resíduos considerada. A densidade média dos resíduos da área 1 adotada foi de 0,9ton/m<sup>3</sup> que foi calculado com base na tabela 3, dividindo-se o peso



em toneladas pelo volume em m<sup>3</sup>, que foi obtido por meio de levantamentos topográficos. Para a área encerrada a densidade adotada foi de 0,7ton/m<sup>3</sup>, também calculado pela tabela3.

Tabela 4 - recebimento de resíduos mensal em toneladas no aterro sanitário municipal de Joinville

<b>RELATÓRIO DOS ÚLTIMOS ANOS DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS ATERRADOS NO ATERRO SANITÁRIO – DE 2010 A 2017</b>													
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO ANO 2010</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2010	12.979	11.925	13.458	13.456	12.146	11.734	11.854	11.167	11.201	11.374	12.191	12.777	146.262
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO ANO 2011</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2011	13.360	12.396	13.804	12.122	12.059	11.278	11.317	11.864	11.155	12.022	11.725	13.200	146.302,85
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO ANO 2012</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2012	12.416	12.043	12.783	11.595	12.627	12.142	11.825	12.489	11.161	12.472	12.212	12.570	146.336,32
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO – ANO 2013</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2013	13.039	12.256	12.819	13.153	11.717	10.995	12.262	12.747	12.372	13.414	11.609	12.427	148.810
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO – ANO 2014</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2014	12.376	10.782	12.486	11.911	11.981	11.700	12.064	11.637	11.846	12.236	11.555	12.971	143.546
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO – ANO 2015</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2015	13.260	12.033	13.364	12.277	12.297	12.514	12.378	11.890	11.722	12.282	12.713	14.009	150.739
<b>RELATÓRIO DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO – ANO 2016</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2016	12.677	12.465	12.989	12.133	12.236	11.385	11.635	11.652	11.479	11.683	11.654	12.750	144.737
<b>RELATÓRIO MENSAL DE OPERAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO – 2017</b>													
Serviço	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Aterrados 2017	12.933	12.059	12.997	12.006	13.201	12.555	12.210	12.502	11.666				112.129

Fonte: Empresa operadora do aterro sanitário (2018)

Tabela 5 - Composição dos resíduos do aterro sanitário

<b>Composição dos Resíduos</b>	
Aterro Sanitário	%
Metais	3,12
Vidro	3,85
Plástico	15,46
Papel	5,49
Papelão	3,27
Embalagem cartonada	1,75
Matéria Orgânica	42,06
Rejeitos	21,2
Material Inerte	2,69
Perdas	1,11
Total	100

Fonte: Empresa operadora do aterro sanitário

### 3.2.2.2 Aterro industrial

A empresa que opera o aterro industrial forneceu os dados trimestrais de volume em metros cúbicos de resíduos, desde a implantação em 2002 até julho de 2018. Segundo a empresa, esse volume foi calculado com base no levantamento topográfico trimestral dos maciços. O recebimento em toneladas mensais foi fornecido somente para o período de 2012 a julho de 2018. Com o fornecimento de parte dos dados de recebimento de resíduos em toneladas foi possível calcular a densidade média para cada um dos maciços do aterro industrial. A densidade adotada inicialmente para o maciço classe I foi de 1,0ton/m<sup>3</sup>, e 1,44 ton/m<sup>3</sup> para o classe II. A tabela 6 apresenta os dados de pesagem disponíveis. A medição de massa e volume trimestrais encontram-se no link: <https://www.dropbox.com/sh/muto2b98fia8fb9/AADc0Sew3jJys-g0kMcSvrlqa?dl=0>. A inserção do recebimento de resíduos no MODUELO 4.0 é feita em toneladas, então de 2002 a 2011 o volume trimestral de resíduos aterrados foi dividido por três e multiplicado pela densidade calculada, tendo assim uma estimativa das toneladas recebidas.

Tabela 6 - Recebimento mensal de resíduos no aterro industrial

Toneladas	jan-12	fev-12	mar-12	abr-12	mai-12	jun-12	jul-12	ago-12	set-12	out-12	nov-12	dez-12
Aterro classe I	952,44	1.167,72	1.353,27	1.110,61	1.719,34	1.403,00	1.407,71	1.441,29	2.018,66	1.926,92	2.173,63	1.598,80
Aterro classe II	11.425,87	10.624,59	12.750,37	11.107,27	13.795,27	12.640,23	11.916,18	14.842,30	10.853,19	14.427,82	12.700,39	9.929,70

Toneladas	jan-13	fev-13	mar-13	abr-13	mai-13	jun-13	jul-13	ago-13	set-13	out-13	nov-13	dez-13
Aterro classe I	1.887,36	2.254,73	1.784,24	1.849,56	1.694,00	3.331,73	1.850,92	1.621,92	5.264,05	5.800,22	2.682,92	1.848,57
Aterro classe II	11.657,14	10.632,25	14.120,95	16.313,45	16.207,30	15.852,62	15.886,32	18.654,10	19.115,41	19.186,84	15.301,88	12.133,74

Toneladas	jan-14	fev-14	mar-14	abr-14	mai-14	jun-14	jul-14	ago-14	set-14	out-14	nov-14	dez-14
Aterro classe I	2.329,61	1.861,72	2.226,91	1.955,92	2.077,31	2.078,33	1.969,28	2.164,97	2.223,86	2.404,57	2.055,72	1.851,14
Aterro classe II	11.892,55	14.921,02	15.030,37	14.504,72	14.245,88	11.463,39	13.130,46	12.323,26	12.231,96	12.923,04	12.158,33	10.059,09

Toneladas	jan-15	fev-15	mar-15	abr-15	mai-15	jun-15	jul-15	ago-15	set-15	out-15	nov-15	dez-15
Aterro classe I	1.971,04	1.682,16	3.021,60	2.257,84	1.680,38	1.766,62	1.845,39	1.580,33	1.781,80	2.267,53	1.570,66	1.486,59
Aterro classe II	12.516,63	12.500,82	13.345,56	14.202,11	12.214,42	13.055,13	11.113,26	11.909,57	12.254,86	11.219,64	13.138,54	9.614,25

Toneladas	jan-16	fev-16	mar-16	abr-16	mai-16	jun-16	jul-16	ago-16	set-16	out-16	nov-16	dez-16
Aterro classe I	1.696,21	1.798,89	1.761,87	2.195,45	2.342,64	1.213,80	1.893,37	1.900,98	1.672,75	1.661,69	1.799,74	1.938,63
Aterro classe II	10.338,39	12.569,35	13.469,61	12.496,97	10.928,88	11.700,42	9.683,46	11.546,08	11.053,29	10.277,48	11.309,09	9.434,18

Toneladas	jan-17	fev-17	mar-17	abr-17	mai-17	jun-17	jul-17	ago-17	set-17	out-17	nov-17	dez-17
Aterro classe I	1.728,63	1.594,66	2.086,59	1.961,74	2.252,18	1.998,99	1.995,90	1.753,00	1.459,00	2.172,00	1.301,00	3.644,00
Aterro classe II	11.022,56	11.690,13	14.416,24	10.738,69	16.990,08	12.882,23	11.873,24	13.931,00	12.119,00	10.947,00	12.329,00	11.073,00

Toneladas	jan-18	fev-18	mar-18	abr-18	mai-18	jun-18	jul-18	ago-18	set-18	out-18	nov-18	dez-18
Aterro classe I	1.446,00	1.268,00	1.826,00	1.291,00	976,00	1.176,00	1.476,00	1.261,00	1.102,00	1.375,00	1.249,00	1.088,00
Aterro classe II	11.937,00	13.825,00	14.433,00	13.518,00	12.133,00	14.268,00	14.162,00	16.661,00	13.852,00	16.676,00	15.787,00	10.906,00

Fonte: Empresa operadora do aterro industrial

A composição média dos resíduos do aterro industrial foi determinada pela empresa que o opera. A tabela 7 apresenta a composição dos resíduos do aterro industrial.

Sólidos não-contaminados incluem madeira, plástico, mantas, moldes, tecido, estopa, embalagens entre outros. Sólidos contaminados incluem equipamentos de proteção individual e outros itens contaminados com tinta, solvente, óleo ou outra substância contaminante. Escória são as impurezas provenientes de indústrias de fundição. Durante o processo de fundição é utilizado um escorificante (nome comercial) que faz com que as impurezas do material que está sendo fundido sejam separadas, formando a escória que é um dos resíduos que o aterro recebe. O campo outros é amplo, e inclui todos os resíduos industriais que não se encaixam nas outras categorias que, porém, não são recebidos em quantidade (ou frequência) significativa para que seja criada uma categoria exclusiva.

Tabela 7 - Composição dos resíduos do aterro industrial

Aterro industrial	%
Classe II	
Areia	33,44
Lodo	22,57
Escória	6,38
Sólidos não-contaminados	0,93
Gesso	0,2
Isopor	0,03
Orgânico	3,47
Outros	32,98
Total	100
Classe I	
Areia	1,32
Lodo	9,81
Escória	5,52
Sólidos contaminados	38,37
Outros	44,98
Total	100

Fonte: A Autora

### 3.2.3 Dados de geração de percolado aproximado

#### 3.2.3.1 Aterro Sanitário

A avaliação da produção de percolado de todo o aterro sanitário foi feita com base na medição diária do nível da lagoa de equalização, que recebe o percolado por gravidade de todos os maciços do aterro sanitário e possui medições de nível a partir



de abril de 2016. Sendo necessário o cálculo e subtração da evaporação e adição da precipitação diária conforme indicado na equação 25.

$$\Delta V_{\text{lagoa}} = E_{\text{lagoa}} - S_{\text{lagoa}} = Li + P - Eo - Tr \quad (25)$$

Onde:

$\Delta V_{\text{lagoa}}$ : Variação do volume na lagoa (m<sup>3</sup>)

$E_{\text{lagoa}}$ : Volume que entra na lagoa (m<sup>3</sup>)

$S_{\text{lagoa}}$ : Volume que sai da lagoa (m<sup>3</sup>)

Li: Lixiviado gerado diariamente (m<sup>3</sup>)

P: Precipitação sobre a lagoa (m<sup>3</sup>)

Eo: Evaporação sobre a lagoa (m<sup>3</sup>)

Tr: Tratamento de lixiviado (m<sup>3</sup>)

A precipitação sobre a área utilizou os dados corrigidos da estação de monitoramento do Ceasa e os dados de tratamento de percolado foram tabulados conforme as informações fornecidas pela empresa. Já a estimativa da evaporação foi realizada segundo a equação de Penman (1948, apud Tucci 2014) que utiliza o método de balanço de energia que pode ser resolvido pelas seguintes Equações:

$$\frac{q_{ef}}{L} = \left[ G(1 - a) - \delta T^4 x \left( 0,56 - 0,09ea^{\frac{1}{2}} \right) x (0,1 + 0,9p) \right] x \frac{1}{L} \quad (26)$$

$$G = Rt(0,24 + 0,58p) \quad (27)$$

$$ea = \frac{U_{es}}{100} \quad (28)$$

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640 \times 10^{\frac{7,5 \times T}{(237,3+T)}}}{(237,3+T)} \quad (29)$$

$$Ei = 0,35 \left( 0,5 + \frac{w_2}{160} \right) (es - ea) \quad (30)$$

$$Eo = \frac{\left( \frac{\Delta}{\gamma} x \frac{q_{ef}}{L} + Ei \right)}{\left( \frac{\Delta}{\gamma} + 1 \right)} \quad (31)$$

Onde:

$\frac{q_{ef}}{L}$ : Balanço de energia (mm/dia).

G: Radiação incidente de onda curta  $\left(\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \times \text{dia}}\right)$ .

a : Valor do albedo (0,05).

$\delta$  :  $1,19 \times 10^{-7}$  cal/cm<sup>2</sup>dia.

T : Temperatura (K).

ea: Tensão parcial do vapor de água (mm de Hg).

p: Proporção entre o nº efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível.

L: Calor latente de vaporização por unidade de massa  $\left(59 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \times \text{mm}}\right)$ .

Rt: Radiação no topo da atmosfera  $\left(\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \times \text{dia}}\right)$ .

U: Umidade relativa do ar (%).

es: Tensão de vapor saturado (mm de Hg).

$\frac{\Delta}{\gamma}$ : Derivada da tensão de vapor saturado (es).

Ei: Evaporação para condições isotérmicas. (mm/dia).

w<sub>2</sub>: Velocidade do ar a 2 metros de altitude (km/dia).

Eo: Evaporação (mm/dia).

Os valores referentes ao calor latente de vaporização por unidade de massa ( $\delta$ ) e do albedo foram retirados de Tucci (2014).

Essa abordagem permitiu estimar a geração de percolado aproximada para o período de abril de 2016 (instalação da régua na lagoa no aterro sanitário) a julho de 2018, para posterior comparação com as simulações de ambos os modelos utilizados nesse estudo.

### 3.2.3.2 Aterro industrial

No aterro industrial o percolado é bombeado diretamente do fundo do aterro por meio de 3 poços, dois para o classe II e um poço para o classe I. Então foi feita a medição diária do nível dos poços desde janeiro de 2018 até maio de 2018, às 8h da manhã, com o intuito de calcular o volume de percolado. O volume de percolado gerado diariamente seria a variação do nível do poço multiplicado pela área do poço, mais o volume bombeado. Porém as medições apresentaram variações incoerentes, indicando o bombeamento durante a medição do nível, ou ainda que o poço ainda estivesse sob o efeito do bombeamento. Devido a esse fato esse estudo considerou como valor aproximado de geração de percolado o valor bombeado diariamente.

A empresa forneceu dados de bombeamento diário de cada maciço (classe I e classe II) de janeiro de 2014 até julho de 2018, por isso esse foi o período utilizado para comparação com as simulações.

A seguir apresentam-se as formas de inserção de dados nos softwares utilizados neste trabalho, MODUELO 4.0 e HEP3.

### 3.3 INSERÇÃO DE DADOS NO SOFTWARE MODUELO 4.0

A simulação da geração de percolado dos aterros sanitário e industrial de Joinville foi feita utilizando o modelo computacional MODUELO 4.0 (GIA, 2017) desenvolvido pelo grupo de engenharia ambiental da Universidade de Cantábria, a partir de um termo de compromisso entre o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina e a Universidade de Cantábria. A simulação foi feita para todas as células dos aterros.

Para o aterro sanitário foram montados dois maciços, um para a área encerrada e outro para a área 1, então a geração de percolado simulada foi somada e comparada com o percolado aproximado calculado conforme a metodologia descrita no capítulo anterior.

Para as simulações do aterro industrial, também foram montados dois maciços, um para os resíduos classe I, e outro para os classe II. A intenção era calibrar os modelos com a medição diária do nível dos poços de bombeamento durante seis meses de 2018, porém observaram-se variações durante a medição, então a opção foi comparar com a quantidade de percolado bombeado diariamente de cada maciço (classe I e classe II). Ressalta-se que o volume bombeado não necessariamente traduz a quantidade de percolado produzida.

Os dados necessários para efetuar uma simulação estão divididos em quatro blocos: meteorologia, produção de resíduos, armazenamento de lixiviados e configuração do aterro.

Os dados meteorológicos para inserção no MODUELO são a temperatura média diária, temperatura máxima e mínima diária, umidade relativa do ar média diária e velocidade média do vento diária, insolação média diária, precipitação horária, precipitação diária. Esses dados foram obtidos e corrigidos conforme o capítulo 3.2.1, e os de recebimento de resíduos obtidos e descritos conforme o capítulo 3.2.2.

No software MODUELO 4.0 (GIA, 2009a) é possível escolher 5 tipos de análise de produção de resíduos, foi utilizada a opção “Geração global mensal” que deve ser utilizada quando se conhece a geração mensal no período analisado. Essa opção se adequou às características de coleta de dados dos dois aterros em função da dificuldade de se definir a população exata e o crescimento desta para o período estudado.

Cabe ressaltar que os volumes de resíduos recebidos foram calculados com base em levantamentos topográficos dos maciços, com os resíduos já compactados. O peso em toneladas e o volume dos resíduos já foram apresentados para o aterro sanitário nas tabelas 3 e 4, e para o aterro industrial no link: <https://www.dropbox.com/sh/muto2b98fia8fb9/AADc0Sew3jJys-g0kMcSvrlqa?dl=0> e na tabela 6. A densidade foi calculada a partir desses valores.

### 3.3.1 Configuração do aterro sanitário no MODUELO 4.0

Quando disponível, a definição do terreno de fundo e drenagem foi feita a partir dos projetos do aterro sanitário que foram fornecidos pela empresa que o opera. A única célula sem projeto é o maciço antigo da área encerrada do Aterro Sanitário, desta forma, o terreno de fundo e drenagem foram estimados. Segundo a empresa concessionária o fundo do maciço antigo fica, aproximadamente, 3 metros abaixo da cota da guarita, com camadas de 3 metros, e drenagem semelhante à da área 1. Com o levantamento aerofotogramétrico de Joinville do ano de 2007, disponibilizado pela prefeitura de Joinville no site: <https://geoprocessamento.joinville.sc.gov.br/download>, foi possível modelar o terreno de fundo dessa área e também verificar as alturas das camadas.

Para a modelagem e digitalização dos desenhos foi utilizado o AutoCAD Civil 3D versão de estudante, e nesse mesmo software foi feita a conversão para “DXF”, extensão aceita no MODUELO 4.0.

As células unitárias de resíduos foram numeradas de acordo com a ordem de ocupação do aterro, que foi definida pelos engenheiros responsáveis da empresa.

Na área 1 as células unitárias foram compostas com dimensões de 10mx10mx0,8m na camada de base granular, 10mx10mx5m na 1ª a 3ª camadas e 10mx10mx4m para a quarta camada, sendo largura, comprimento e altura (x, y, z). A

dimensão de 10 metros foi utilizada para facilitar a modelagem dos drenos horizontais, já que esses se encontram a cada 30m, assim a cada 3 células existe um dreno. A dimensão z foi inserida para coincidir com a espessura da camada de resíduos nos aterros.

Na área encerrada as células unitárias foram simuladas com dimensão de 10mx10mx3m para as 9 primeiras camadas e 10mx10mx2m para última camada, também foi considerada uma camada de 80 centímetros de material granular no fundo das novas células e área emergencial. Nos locais dos antigos lixão e aterro controlado não foi considerada camada drenante inferior.

A espessura da cobertura das camadas de resíduos foi adotada na simulação como 0,4 metros, de acordo com informação recebida pela empresa operadora do aterro sanitário.

Para definição das características da cobertura foi coletada uma amostra indeformada da cobertura do aterro sanitário e utilizado o laboratório de geotecnia da UDESC para ensaiar a umidade inicial e umidade higroscópica de acordo com a NBR6457 (ABNT, 2016), massa específica real dos grãos com picnômetro da NBR6508 (ABNT, 1984), de permeabilidade, com permeâmetro acordo com a NBR14545 (ABNT, 2000), e de granulometria da NBR7181 (ABNT, 1984). Porém o ensaio de permeabilidade mostrou valores muito baixos, provavelmente pela dificuldade de coleta da amostra indeformada e pela região de coleta ser uma área onde passavam caminhões pesados. Em outros locais não foi possível coletar uma amostra de corpo de prova porque a camada não tinha espessura suficiente, ou eram de difícil acesso. Por esse motivo foram considerados valores de permeabilidade indicados no próprio software e na bibliografia.

Os ensaios de umidade e granulometria serviram para calcular a capacidade de campo de forma empírica de acordo com as equações 32 e 33 defendidas por Giarola et. al (2002), e comparar com os valores da célula básica já constante no software que segundo López (2018) do Grupo de Engenharia Ambiental, da Universidade da Cantábria são valores coletados da literatura ou que foram utilizados em diferentes projetos para modelar aterros sanitários.

$$\theta_{cc} (m^3m^{-3}) = 0,081 + 0,005Silte + 0,004 Argila \quad (32)$$

$$\theta_{PMP} (m^3m^{-3}) = 0,024 + 0,005Silte + 0,003 Argila \quad (33)$$

Onde  $\theta_{cc}$  é a capacidade de campo, “Silte” e “Argila” é a porcentagem desse item no solo, e  $\theta_{PMP}$  é o ponto de murchamento permanente.

A tabela 8 apresenta as características das células de resíduos adotadas na primeira simulação do aterro sanitário.

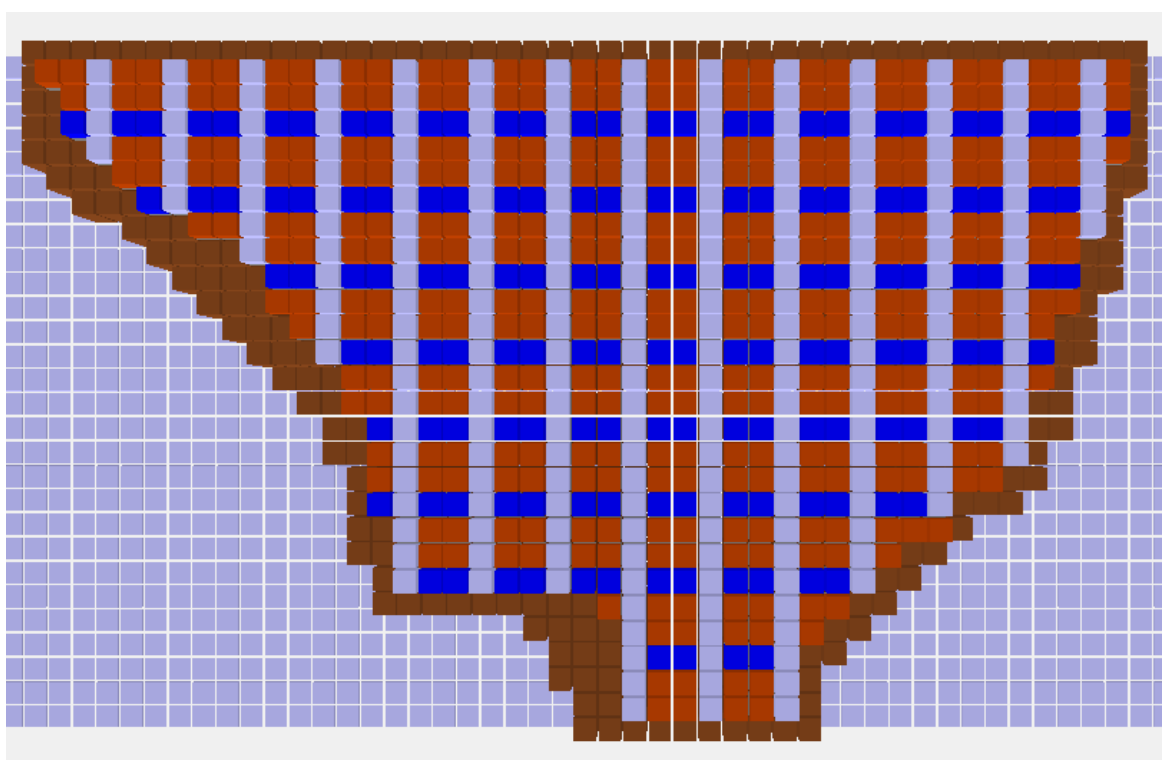
Tabela 8 - Características das células de resíduo do aterro sanitário

CÉLULA RESÍDUO - Aterro Sanitário		
Dimensões – Área 1		Comentários
10x10x0,8(m)		Camada de base granular (pedrisco)
10x10x5(m)		1ª, 2ª e 3ª camada de resíduos
10x10x4(m)		4ª camada de resíduos
Dimensões – Área Encerrada		Comentários
10x10x0,8(m)		Camada de base granular (pedrisco) – somente na área emergencial e novas células
10x10x3(m)		1ª a 9ª camada de resíduos
10x10x2(m)		10ª camada de resíduos
Características do resíduo		Comentários
Umidade residual inicial	16%	-
Capacidade de campo inicial	29%	-
Umidade de saturação inicial	48%	-
Permeabilidade vertical inicial	2x10-6 m/s	-
Permeabilidade horizontal inicial	1x10-5 m/s	-
Características da Cobertura		Comentários
Espessura	0,4m	Indicado pela empresa operadora do aterro
Umidade inicial	27%	-
Densidade inicial	1300 kg/m³	-
Umidade residual inicial	26%	-
Capacidade de campo inicial	27%	-
Umidade de saturação	30%	-
Permeabilidade vertical inicial	2x10-7 m/s	-
Modelo de infiltração superficial		Comentários
Velocidade de infiltração mínima	1,30mm/h	-
Velocidade de infiltração máxima	50,80mm/h	-
Parâmetro de Horton	4,14l/s	-
Modelo de evapotranspiração		Comentários
Profundidade de evaporação	0,30m	-
Ponto de murcha permanente	100%	-
Modelo de escoamento Superficial		Comentários
Máxima acumulação superficial	0,005m	Visitas a campo
Modelo de Fluxo Preferencial		Comentários
Fração de volume da célula afetada por canais preferenciais	25%	-
Fator de permeabilidade do material na zona canalizada.	100%	-
Modelo de umidade residual		Comentários
Umidade residual mínima do resíduo	5%	-
Influência da carga na umidade residual	4536 kg/m²	-

Fonte: A Autora

Os parâmetros de drenagem do fundo do aterro sanitário foram adotados de acordo com os projetos fornecidos da área 1, área emergencial e Novas células. O resumo desses dados está apresentado na tabela 9. A figura 11 apresenta a inserção da drenagem de fundo da área 1 no MODUELO 4.0. Os itens em azul claro correspondem à drenagem longitudinal com tubo PEAD, e em azul escuro a drenagem transversal. No ponto de interseção das duas drenagens foi considerada a drenagem longitudinal com as mesmas características da transversal.

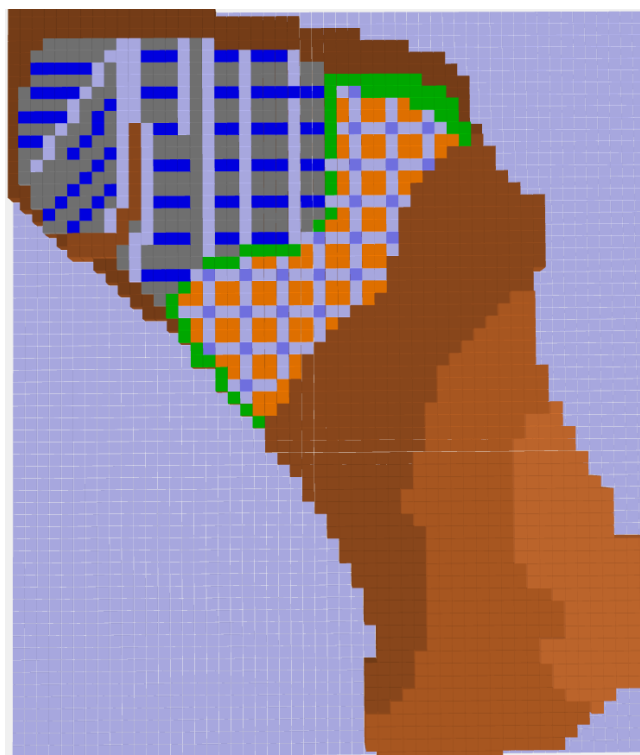
Figura 11 - Drenagem de percolado no fundo da área 1 do aterro sanitário em planta



Fonte: MODUELO 4.0

A figura 12 apresenta a drenagem de fundo da área encerrada, sendo o cinza a camada granular, o azul claro a drenagem longitudinal, o azul escuro a drenagem transversal, que corresponde à área emergencial e novas células. O alaranjado e verde representam os resíduos, o azul claro as drenagens de camada, e o azul médio a drenagem vertical, que corresponde a parte da área de lixão e aterro controlado, onde não foi inserida uma drenagem de fundo.

Figura 12 - Drenagem de percolado do fundo da área encerrada do aterro sanitário em planta



Fonte: MODUELO 4.0

Tabela 9 - Características da drenagem de percolado no fundo do aterro sanitário

Drenagem Longitudinal		Comentários
Declividade do dreno	0,02 m/m	Retirado do Projeto
Número de células servidas pelo dreno	1 unidade	Retirado do Projeto
Declividade da camada até o dreno	0,01 m/m	Retirado do Projeto
Condutividade hidráulica	0l/s	Retirado do Projeto
Diâmetro	0,170m	Retirado do Projeto
Coeficiente de Manning.	0,016	Maccaferri (2017)
Drenagem Transversal		Comentários
Declividade do dreno	0,01m/m	Retirado do Projeto
Número de células servidas pelo dreno	1 unidade	Retirado do Projeto
Declividade da camada até o dreno	0,02 m/m	Retirado do Projeto
Condutividade hidráulica da base	0l/s	Retirado do Projeto
Espessura da camada	0,8m	Retirado do Projeto
Condutividade hidráulica	1m/s	DNIT (2006)

Fonte: A autora



Para simular a drenagem das camadas foram modificadas as características hidrológicas das células que tem a drenagem passando por elas, considerando que o líquido circula através dessas células mais facilmente. Foi modificado o valor da condutividade hidráulica horizontal inicial do resíduo para as células que tem drenagem horizontal, e condutividade hidráulica vertical dos resíduos para as células que tem drenagem vertical. Essa condutividade foi calculada pela média ponderada das áreas de resíduo e de pedra pulmão que o percolado atravessa na célula conforme as equações 34 e 35:

$$k_h = \frac{(Arv \times Krh) + (Adv \times kd)}{Arv + Adv} \quad (34)$$

$$k_v = \frac{(Arh \times Krv) + (Adh \times kd)}{Arh + Adh} \quad (35)$$

Onde:

Kh = condutividade hidráulica horizontal da célula

Krh = condutividade hidráulica horizontal do resíduo

Kd = condutividade hidráulica do dreno

Arv = área vertical do resíduo na célula (da seção transversal do fluxo vertical)

Adv = área vertical do dreno na célula (da seção transversal do fluxo vertical)

Arh = área horizontal do resíduo na célula (da seção transversal do fluxo horizontal)

Adh = área horizontal do dreno na célula (da seção transversal do fluxo horizontal)

Considerando que a pedra pulmão tem dimensões próximas à da brita 5 (entre 50 e 100mm) utilizou-se como base de cálculo a condutividade hidráulica dessa brita, 100 cm/s (DNIT,2006).

Foi considerado que todo fluxo horizontal excedente foi imediatamente coletado pelos drenos que circundam a camada.

De acordo com a mesma metodologia também foi criada uma outra célula de resíduo modificando somente a condutividade hidráulica vertical para simular a presença do dreno vertical de gás e percolado.

### 3.3.2 Configuração do aterro Industrial no MODUELO 4.0

O modelo do fundo das duas células desse aterro já foi disponibilizado em dwg, sendo somente feita a conversão para “DXF” no AutoCAD Civil 3D versão de estudante.

Tanto para o Classe I como para o Classe II células unitárias foram compostas com dimensões de 5mx5mx0,3m na camada de base granular (brita), e 5mx5mx9,8m nas demais camadas, sendo largura, comprimento e altura (x, y, z) respectivamente. A dimensão de 5 metros foi escolhida para facilitar a montagem do modelo e reduzir o tempo de simulação. A dimensão é menor que a do aterro sanitário pois o aterro é menor.

Estimar as características do resíduo industrial a partir da bibliografia é tarefa muito complexa, visto sua diversidade e dependência de cada região, e mesmo sendo controladas algumas características na entrada de cada resíduo, eles têm características diferentes quando misturados, tratados e compactados. Por isso na primeira simulação foram adotadas as mesmas características do resíduo sanitário urbano.

Como as camadas de resíduos são cobertas com uma manta PEAD foi considerado que não há infiltração nessas áreas, a não ser na frente de serviço que é mantida descoberta para deposição de material. Considerou-se a taxa de infiltração final (fc) na frente de serviço igual a permeabilidade inicial do resíduo,  $2 \times 10^{-6}$  m/s ou 7,2mm/h. A taxa de infiltração final (fc) corresponde a um silte-arenoso nos valores propostos por Musgrave (1955) e Huber e Dickinson (1988), tabelas 10 e 11 citadas por Lobo (2003), por isso adotou-se a taxa de infiltração inicial (fo) como sendo 76mm/h que corresponde a solo siltoso.

A frente de serviço dos maciços do aterro industrial corresponde a 4% da área total do aterro, logo para simular a área total reduziram-se os parâmetros de infiltração em 96% na primeira simulação. Adotou-se a profundidade de infiltração como 1cm em vez de 30cm, fo como 3,04mm/h e fc como 0,29mm/h. Além disso, foram zeradas as características da cobertura intermediária inseridas no modelo, já que nesse aterro não existe essa cobertura.

Tabela 10 - Valores propostos para taxa de infiltração na saturação

Tipo de Solo	fc (mm/h)
Areias	11,4 - 7,6
Silte-Arenoso	7,6 - 3,8
Silte- Argiloso	3,8 - 1,3
Argilas	1,3 - 0

Fonte: Musgrave (1955) apud Lobo (2003)

Tabela 11 - Valores propostos para taxa de infiltração inicial

Tipo, estado e vedação do solo	fo(mm/h)
Seco, com vegetação escassa ou nula	
Arenoso	127
Siltoso	76
Argiloso	25
Seco, com vegetação densa	Valores acima/2
Úmido	
Com teor de umidade próximo a capacidade de campo	valores acima/3
Com teor de umidade próximo à saturação	Valor próximo a fc
Com teor de umidade abaixo da capacidade de campo	anteriores/1,5-2,5

Fonte: Huber e Dickinson (1988) apud Lobo (2003)

A tabela 12 apresenta as características das células de resíduos adotadas na primeira simulação do aterro industrial.

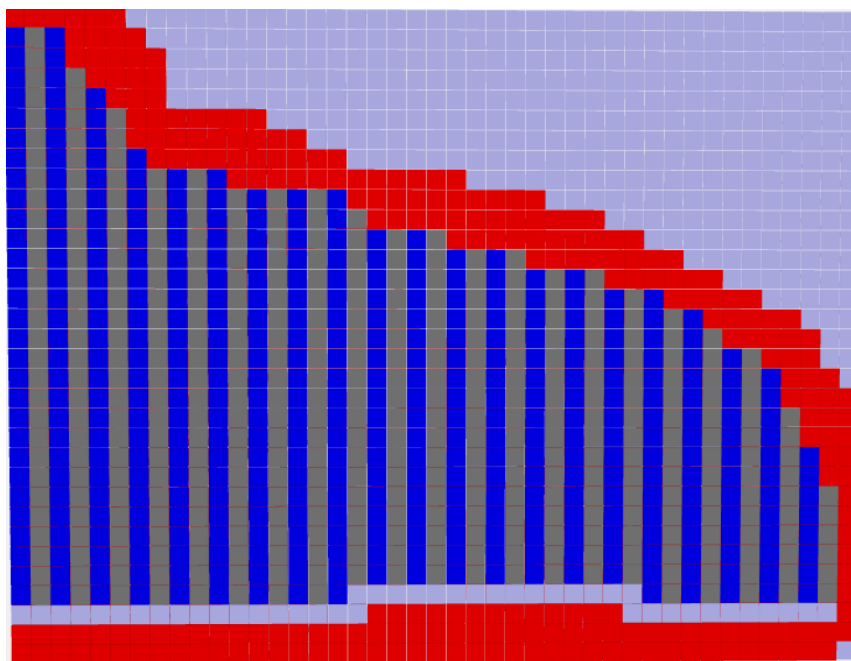
Os parâmetros de drenagem do fundo do aterro industrial foram adotados de acordo com o indicado pela empresa que o opera. As figuras 13 e 14, apresentam o posicionamento da drenagem das células Classe I e Classe II. Os itens em azul claro correspondem à drenagem longitudinal, em azul escuro à drenagem transversal, em verde a drenagem complementar de tubo PEAD 160mm que interligam na transversal, as células cinzas correspondem a camada drenante de brita e as vermelhas o terreno que circunda o aterro.

Tabela 12 - Características das células de resíduos do aterro industrial

CÉLULA RESÍDUO - Aterro INDUSTRIAL		
Dimensões Classe I e II		Comentários
5x5x0,3		Camada de base granular (Brita)
5x5x9,8		Camadas de resíduos
Características do resíduo		Comentários
Umidade residual inicial	16%	-
Capacidade de campo inicial	29%	-
Umidade de saturação inicial	48%	-
Permeabilidade vertical inicial	$2 \times 10^{-6}$ m/s	-
Permeabilidade horizontal inicial	$1 \times 10^{-5}$ m/s	-
Características da Cobertura		Comentários
Espessura	0	-
Umidade inicial	0	-
Densidade inicial	0	-
Umidade residual inicial	0	-
Capacidade de campo inicial	0	-
Umidade de saturação	0	-
Permeabilidade vertical inicial	0	-
Modelo de infiltração superficial		Comentários
Velocidade de infiltração mínima	0,29mm/h	-
Velocidade de infiltração máxima	3,04mm/h	-
Parâmetro de Horton	0,16l/s	-
Modelo de evapotranspiração		Comentários
Profundidade de evaporação	0,01m	-
Ponto de murcha permanente	100%	-
Modelo de escoamento Superficial		Comentários
Máxima acumulação superficial	0,005m	-
Modelo de Fluxo Preferencial		Comentários
Fração de volume da célula afetada por canais preferenciais	25%	-
Fator de permeabilidade do material na zona canalizada.	100%	-
Modelo de umidade residual		Comentários
Umidade residual mínima do resíduo	5%	-
Influência da carga na umidade residual	4536 kg/m <sup>2</sup>	-

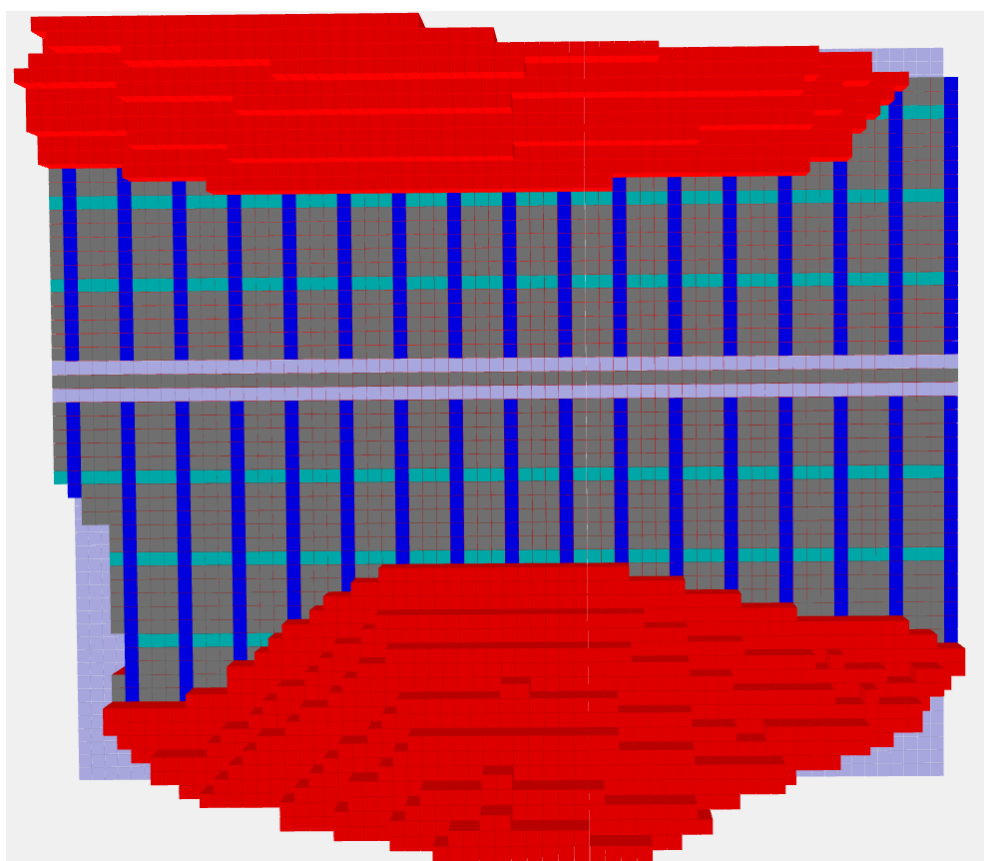
Fonte: A Autora

Figura 13 - Drenagem de percolado do fundo do maciço classe I do aterro industrial em planta



Fonte: MODUELO 4.0

Figura 14 - Drenagem de percolado do fundo do maciço classe II do aterro industrial em planta



Fonte: MODUELO 4.0

Tabela 13 - Características da drenagem de percolado no fundo do aterro industrial

Drenagem Longitudinal		Comentários
Declividade do dreno	0,03 m/m	fornecido
Número de células servidas pelo dreno	1 unidade	fornecido
Declividade da camada até o dreno	0,01 m/m	fornecido
Condutividade hidráulica	0l/s	fornecido
Diâmetro	0,250m	fornecido
Coeficiente de Manning.	0,016	Maccaferri (2017)
Drenagem Transversal		Comentários
Declividade do dreno	0,01m/m	fornecido
Número de células servidas pelo dreno	1 unidade	fornecido
Declividade da camada até o dreno	0,01 m/m	fornecido
Condutividade hidráulica da base	0l/s	fornecido
Diâmetro	0,200m	fornecido
Coeficiente de Manning.	0,016	Maccaferri (2017)
Drenagem Complementar		Comentários
Declividade do dreno	0,01m/m	fornecido
Número de células servidas pelo dreno	1 unidade	fornecido
Declividade da camada até o dreno	0,01 m/m	fornecido
Condutividade hidráulica da base	0l/s	fornecido
Diâmetro	0,160m	fornecido
Coeficiente de Manning.	0,016	Maccaferri (2017)

Fonte: A autora

A drenagem das camadas e drenagem vertical foi inserida no Software da mesma forma que o aterro Sanitário. Descrita no capítulo 3.3.1.

### 3.4 INSERÇÃO DE DADOS NO HELP 3.07

No HELP 3.07 a simulação é feita em camadas, são inseridos dados meteorológicos, a área do aterro, e as características de cada camada. Não é possível simular algum desnível no fundo ou entre as camadas, a ordem de enchimento do aterro e nem a geração de percolado com a construção do aterro, o aterro é simulado como se o maciço já estivesse totalmente preenchido desde o início até o fim da simulação. A seguir estão descritos como os dados foram inseridos.

Os dados meteorológicos inseridos são precipitação diária, temperatura média diária, radiação solar diária, umidade relativa média para cada trimestre do ano, e velocidade média do vento. Foram utilizados os mesmos dados de precipitação e temperatura inseridos no MODUELO 4.0 e corrigidos conforme o explicado no capítulo 3.4.1. A radiação solar diária foi obtida do atlas solarimétrico do Brasil (Chigueru Tiba

et. al, 2000). A umidade e velocidade média do vento são as mesmas inseridas no MODUELO 4.0, conforme o descrito no item 3.4.1.

### 3.4.1 Configuração do aterro sanitário no HELP 3.07

Foi feita separadamente a simulação da área encerrada e da área 1. As tabelas 16 e 17 apresentam os dados inseridos no software. A primeira camada representa o topo do aterro e a última camada representa o fundo do aterro.

O resultado da geração de percolado no HELP é dado em milímetros, para obter o volume gerado multiplicou-se esse resultado pela área do aterro.

O CN utilizado foi obtido das tabelas 14 e 15, conforme a capacidade de infiltração mínima do solo, sendo a mesma que a do MODUELO. A capacidade de infiltração mínima de 1,30mm/h corresponde ao grupo de solo C, e para pastagens ou terrenos em más condições o CN adotado inicialmente foi de 86.

Tabela 14 - Grupo de solo

Grupo de solo	Capacidade mínima de infiltração (mm/h)	Média
A	7,62 - 11,43	9,53
B	3,81 - 7,62	5,72
C	1,27 A 3,81	2,54
D	0 - 1,27	0,64

Fonte: Tucci et. al. (2014)

Tabela 15 - CN de acordo com o grupo de solo

Utilização ou cobertura do solo	Grupo de Solos			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
Zonas cultivadas: com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78

Fonte: Tucci et. al. (2014)

Tabela 16 - Dados inseridos no HELP 3.07 para simulação da área 1 do aterro sanitário

Área 1 - Aterro Sanitário - HELP		
Item	valor	comentários
Latitude	-26,28°	
Profundidade da zona evaporativa	30cm	
Índice máximo de área foliar	15%	15% da área 1 está coberta com vegetação que cresce em todas as épocas do ano
início da estação de crescimento da vegetação	0	
final da estação de crescimento da vegetação	367	
Velocidade média do vento	1,80Km/h	
Umidade relativa no primeiro trimestre	88,72%	
Umidade relativa no segundo trimestre	91,14%	
Umidade relativa no terceiro trimestre	89,48%	
Umidade relativa no quarto trimestre	88,48%	
Área do Aterro	7,37ha	
Área onde existe escoamento superficial	100%	
CN	86	
CAMADAS 1, 3, 5, e 7		
Tipo	1- percolação vertical	simula a cobertura diária de solo
Espessura	40cm	
Porosidade	0,4270 vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,27 vol/vol	igual o simulado no Modulo
Ponto de murcha	0,26 vol/vol	valor retirado do manual
umidade inicial	0,27 vol/vol	igual o simulado no Modulo
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-5</sup> cm/s	igual o simulado no Modulo
CAMADA 2, 4, 6, e 8		
Tipo	1-percolação vertical	simula a camada de resíduo
Espessura	500cm	
Porosidade	0,6710 vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,29vol/vol	igual o simulado no Modulo
Ponto de murcha	0,077 vol/vol	valor retirado do manual
umidade inicial	0,40vol/vol	igual o simulado no Modulo
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-4</sup> cm/s	igual o simulado no Modulo
CAMADA 9		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula a camada granular (pedrisco) no fundo
Espessura	80cm	
Porosidade	0,397vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,032vol/vol	
Ponto de murcha	0,013 vol/vol	
Umidade inicial	0,032 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,3cm/seg	
CAMADA 10		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula a os drenos do fundo
Espessura	0,5	
Porosidade	0,85vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,01 vol/vol	
Ponto de murcha	0,005vol/vol	
Umidade inicial	0,01 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	33cm/seg	
Declividade	1%	Indicado em projeto
Extensão do dreno	15m	Indicado em projeto
CAMADA 11		
Tipo	4 - geomembrana	Simula a impermeabilização do fundo
Espessura	0,25cm	
Porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha e umidade inicial	0,000vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,2x10 <sup>-12</sup> cm/seg	

Fonte: A autora



Tabela 17 - Dados inseridos no HELP 3.07 para simulação da área encerrada do aterro sanitário

Área Encerrada - Aterro Sanitário - HELP		
Item	valor	comentários
Latitude	-26,28°	
Profundidade da zona evaporativa	30cm	
Índice máximo de área foliar	100%	toda a área encerrada está coberta com vegetação que cresce em todas as épocas do ano
início da estação de crescimento da vegetação	0	
final da estação de crescimento da vegetação	367	
Velocidade média do vento	1,80Km/h	
Umidade relativa no primeiro trimestre	88,72%	
Umidade relativa no segundo trimestre	91,14%	
Umidade relativa no terceiro trimestre	89,48%	
Umidade relativa no quarto trimestre	88,48%	
Área do Aterro	14,89ha	
Área onde existe escoamento superficial	100%	
CN	86	
CAMADAS 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 e 15		
Tipo	1- percolação vertical	simula a cobertura diária de solo
Espessura	40cm	
Porosidade	0,4270 vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,27 vol/vol	igual o simulado no Modulo
Ponto de murcha	0,26 vol/vol	valor retirado do manual
umidade inicial	0,27 vol/vol	igual o simulado no Modulo
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-5</sup> cm/s	igual o simulado no Modulo
CAMADA 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, e 16		
Tipo	1-percolação vertical	simula a camada de resíduo
Espessura	300cm	
Porosidade	0,6710 vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,29vol/vol	igual o simulado no Modulo
Ponto de murcha	0,077 vol/vol	valor retirado do manual
umidade inicial	0,40vol/vol	igual o simulado no Modulo
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-4</sup> cm/s	igual o simulado no Modulo
CAMADA 17		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula os drenos de fundo
Espessura	80cm	
Porosidade	0,397vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,032vol/vol	
Ponto de murcha	0,013 vol/vol	
Umidade inicial	0,0594 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,3cm/seg	
Declividade	1%	Igual ao projeto da área 1
Extensão do dreno	100m	Valor estimado
CAMADA 18		
Tipo	4 - Geomembrana	Simula a impermeabilização do fundo
Espessura	0,25cm	
Porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha e umidade inicial	0,000vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,2x10 <sup>-12</sup> cm/seg	

Fonte: A autora

### 3.4.2 Configuração do aterro industrial no HELP 3.07

Foi feita separadamente a simulação dos Aterros Classe I e Classe II, assim como foi feito no MODUELO 4.0, já que os dois maciços têm a coleta de percolato separadas. As tabelas 18 e 19 apresentam os dados inseridos no software. A primeira camada representa o topo do aterro e a última camada representa o fundo do aterro. O CN utilizado foi 96, considerando que apenas 4% da precipitação infiltra na célula, já que apenas a frente de serviço é mantida descoberta. A frente de serviço corresponde a 4% da área total do aterro.

Tabela 18 -Dados inseridos no HELP 3.07para simulação do aterro industrial classe I

CLASSE I - Aterro Industrial- HELP		
Item	valor	comentários
Latitude	-26,28°	
Profundidade da zona evaporativa	4 cm	conforme moduelo
Índice máximo de área foliar	0%	
início da estação de crescimento da vegetação	0	
final da estação de crescimento da vegetação	367	
Velocidade média do vento	1,80Km/h	
Umidade relativa no primeiro trimestre	88,72%	
Umidade relativa no segundo trimestre	91,14%	
Umidade relativa no terceiro trimestre	89,48%	
Umidade relativa no quarto trimestre	88,48%	
Área do Aterro	2,29ha	
Área onde existe escoamento superficial	100%	
CN	96	
CAMADA 1		
Tipo	1- percolação vertical	simula a cobertura de geomembrana utilizada no aterro. O programa não roda se considerar uma camada tipo 4 - geomembrana, na cobertura.
Espessura	0,2cm	
Porosidade	0,005vol/vol	
Capacidade de Campo	0,003vol/vol	
Ponto de murcha	0,001 vol/vol	
umidade inicial	0,0vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-5</sup> cm/s	igual o simulado no Moduelo
CAMADA 2, 3, 4 ,e 5		
Tipo	1-percolação vertical	simula a camada de resíduo
Espessura	500cm	
Porosidade	0,6710 vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,29vol/vol	igual o simulado no Moduelo
Ponto de murcha	0,077 vol/vol	valor retirado do manual
umidade inicial	0,40vol/vol	igual o simulado no Moduelo
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-4</sup> cm/s	igual o simulado no Moduelo
CAMADA 6		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula a camada granular (pedrisco) no fundo
Espessura	30cm	
Porosidade	0,397vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,032vol/vol	
Ponto de murcha	0,013 vol/vol	
Umidade inicial	0,032 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,3cm/seg	
CAMADA 7		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula a os drenos do fundo
Espessura	20cm	
Porosidade	0,85vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,01vol/vol	
Ponto de murcha	0,005vol/vol	
Umidade inicial	0,01 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	10cm/seg	
Declividade	1%	Indicado em projeto
Extensão do dreno	95m	Indicado em projeto
CAMADA 8		
Tipo	4 - geomembrana	Simula a impermeabilização do fundo
Espessura	0,25cm	
Porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha e umidade inicial	0,000vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,2x10 <sup>-12</sup> cm/seg	

Fonte: A autora

Tabela 19-Dados inseridos no HELP 3.07 para simulação do aterro industrial classe II

CLASSE II - Aterro Industrial- HELP		
Item	valor	comentários
Latitude	-26,28°	
Profundidade da zona evaporativa	4 cm	conforme moduelo
Índice máximo de área foliar	0%	
início da estação de crescimento da vegetação	0	
final da estação de crescimento da vegetação	367	
Velocidade média do vento	1,80Km/h	
Umidade relativa no primeiro trimestre	88,72%	
Umidade relativa no segundo trimestre	91,14%	
Umidade relativa no terceiro trimestre	89,48%	
Umidade relativa no quarto trimestre	88,48%	
Área do Aterro	7,78ha	
Área onde existe escoamento superficial	100%	
CN	96	
CAMADA 1		
Tipo	1- percolação vertical	simula a cobertura de geomembrana utilizada no aterro. O programa não roda se considerar uma camada tipo 4 - geomembrana, na cobertura.
Espessura	0,2cm	
Porosidade	0,005vol/vol	
Capacidade de Campo	0,003vol/vol	
Ponto de murcha	0,001 vol/vol	
umidade inicial	0,0vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-5</sup> cm/s	igual o simulado no Moduelo
CAMADA 2 a 13		
Tipo	1-percolação vertical	simula a camada de resíduo
Espessura	500cm	
Porosidade	0,6710 vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,29vol/vol	igual o simulado no Moduelo
Ponto de murcha	0,077 vol/vol	valor retirado do manual
umidade inicial	0,40vol/vol	igual o simulado no Moduelo
Condutividade hidráulica saturada	2x10 <sup>-4</sup> cm/s	igual o simulado no Moduelo
CAMADA 14		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula a camada granular (pedrisco) no fundo
Espessura	30cm	
Porosidade	0,397vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,032vol/vol	
Ponto de murcha	0,013 vol/vol	
Umidade inicial	0,032 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,3cm/seg	
CAMADA 15		
Tipo	2- drenagem lateral	Simula a os drenos do fundo
Espessura	20cm	
Porosidade	0,85vol/vol	valor retirado do manual
Capacidade de Campo	0,01vol/vol	
Ponto de murcha	0,005vol/vol	
Umidade inicial	0,01 vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	10cm/seg	
Declividade	1%	Indicado em projeto
Extensão do dreno	95m	Indicado em projeto
CAMADA 16		
Tipo	4 - geomembrana	Simula a impermeabilização do fundo
Espessura	0,25cm	
Porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha e umidade inicial	0,000vol/vol	
Condutividade hidráulica saturada	0,2x10 <sup>-12</sup> cm/seg	

Fonte: A autora

### 3.5 CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas para calibração dos modelos e posterior verificação da influência da cobertura, da meteorologia e do tipo de resíduo na geração de percolado. A calibração visou a comparação entre a geração real e a simulada.

No aterro sanitário a geração calculada a partir da medição do nível da lagoa de equalização foi considerada como a geração aproximada de percolado. Foi calculada a geração diária de percolado no aterro sanitário para o período de abril de 2016 a julho de 2018 conforme o descrito no capítulo 3.2.

Foi feita a medição diária do nível dos poços no aterro industrial com a intenção de verificar a geração de percolado a partir da variação do nível e dos valores bombeados diariamente. Porém as medições se mostraram incoerentes, mostrando que talvez o poço estivesse sob o efeito do bombeamento, e inviabilizando a utilização desses dados. Então foram utilizados para a calibração os dados de bombeamento diário acumulados fornecidos pela empresa. Essa situação não é a ideal para a calibração, mas foram os dados disponíveis.

O conhecimento da geração de percolado é de suma importância para a calibração dos modelos e verificação da demanda de percolado a ser tratado. Com uma calibração confiável dos modelos seria possível estimar as gerações futuras de percolado, de acordo com a previsão do tempo e de recebimento de resíduos.

Realizou-se a calibração com base na similaridade da resposta da produção de lixiviado em relação aos valores observados em campo, tendo sido observados os picos de geração e seu decaimento.

A primeira simulação foi realizada adotando-se todos os parâmetros citados na metodologia. Em sequência foi iniciada a calibração, por meio de mais simulações, com mudanças paramétricas nas propriedades hidráulicas dos resíduos e do solo de cobertura, sendo esses parâmetros: a condutividade hidráulica dos resíduos e da cobertura, a capacidade de campo do resíduo, e a umidade inicial do resíduo. No MODUELO 4.0 também foi alterada a fração do volume afetada por canais preferenciais. Em cada simulação foi alterado apenas um parâmetro para avaliar a resposta e proceder nova simulação.

As diferentes simulações realizadas estão apresentadas como SIM. Os números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 representam cada simulação com a alteração dos

parâmetros conforme o indicado nas tabelas 20 a 23, sendo que na primeira simulação (SIM1) foram adotados todos os parâmetros descritos na metodologia.

A segunda simulação do aterro sanitário foi feita com cobertura diária de 20cm em vez de 40cm, visto que em campo foi observada uma espessura menor de cobertura na área encerrada.

Tabela 20 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro sanitário no MODUELO 4.0

Simulações do aterro sanitário no MODUELO 4.0									
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM7	SIM10	SIM12
Espessura da cobertura(m)	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Capacidade de campo (%)	29	29	40	20	29	29	29	29	29
Condutividade hidráulica vertical do resíduo (m/s)	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$
Condutividade hidráulica vertical da cobertura (m/s)	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
Taxa de infiltração inicial $f_0$ (mm/h)	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	76	50,8	25	25
Taxa de infiltração final $f_c$ (mm/h)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	3,8	1,3	0,65	0,65
Fração do volume afetado por canais preferenciais(%)	25	25	25	25	25	25	35	25	55

Fonte: A autora

Tabela 21 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro sanitário no HELP 3.07

Simulações do aterro sanitário no HELP 3.07									
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM8	SIM10	SIM11
Espessura da cobertura(m)	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Capacidade de campo (%)	29	29	40	20	29	29	29	29	29
Condutividade hidráulica vertical do resíduo (m/s)	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-7}$
Condutividade hidráulica vertical da cobertura (m/s)	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
Valor CN	86	86	86	86	86	78	86	89	86
umidade inicial do resíduo (%)	40	40	40	40	40	40	50	40	40

Fonte: A autora

Tabela 22 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro industrial no MODUELO 4.0

Simulações do aterro industrial no MODUELO										
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM7	SIM9	SIM11	SIM12
Capacidade de campo (%)	29	29	29	29	20	40	29	29	29	29
Condutividade hidráulica vertical do resíduo (m/s)	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	4x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-7</sup>	2x10 <sup>-6</sup>
Profundidade de evaporação (m)	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Taxa de infiltração inicial fo (mm/h)	3,04	15,2	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04
Taxa de infiltração final fc (mm/h)	0,29	1,44	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Fração do volume afetado por canais preferenciais(%)	25	25	25	25	25	25	35	7	25	55

Fonte: A autora

Tabela 23 - Parâmetros alterados nas diferentes simulações do aterro industrial no HELP 3.07

Simulações do aterro industrial no HELP 3.07								
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM8	SIM11
Capacidade de campo (%)	29	29	29	29	20	40	29	29
Condutividade hidráulica vertical do resíduo (m/s)	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	4x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-7</sup>
número CN	96	80	96	96	96	96	96	96
Umidade inicial (%)	25	25	25	25	25	25	20	25

Fonte: A autora

Por fim, foram escolhidas as simulações que melhor se ajustaram, e repetidos os dados hidrológicos do último ano (agosto de 2017 a julho de 2018), para verificar a tendência de geração futura até 2038. Nessas simulações considerou-se que o aterro foi finalizado em julho de 2018. No MODUELO 4.0, também foram feitas simulações até 2038, zerando os parâmetros de infiltração, considerando uma camada impermeável após o fechamento do aterro.

No HELP 3.07 essa mesma abordagem não representaria a realidade, pois o programa não considera a evolução do aterro com o recebimento de resíduos, ele considera a percolação através de todas as camadas para todo o período estudado. Se fosse colocada uma camada impermeável no topo do aterro, nunca ocorreria percolação.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

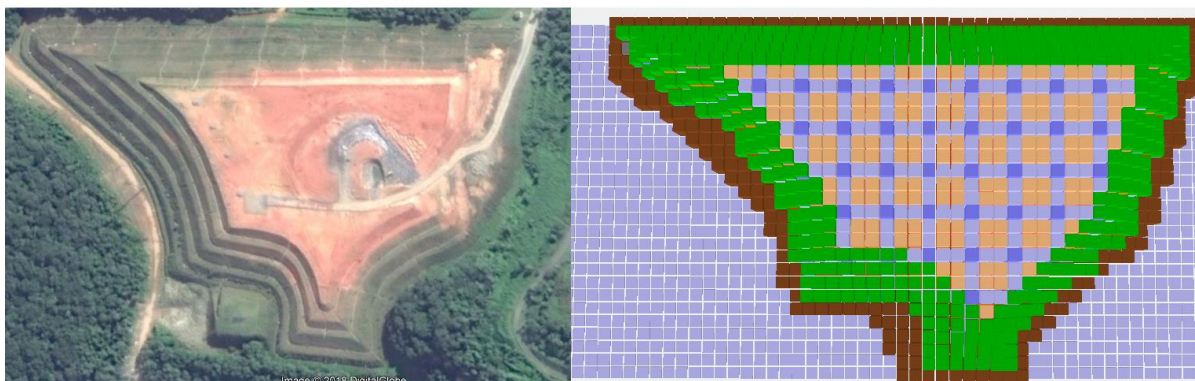
Nesse estudo foram utilizados os programas MODUELO 4.0 e HELP 3.07 para simular a geração de perolado no aterro sanitário e aterro industrial localizados em Joinville, SC. As planilhas com os resultados obtidos estão disponibilizadas no link: <https://www.dropbox.com/sh/muto2b98fia8fb9/AADc0Sew3jJys-g0kMcSvrlqa?dl=0>. A seguir descrevem-se os resultados.

### 4.1 SIMULAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO NO MODUELO 4.0

As figuras 15 e 16 indicam que o módulo de produção de resíduos do MODUELO 4.0 se comportou de maneira adequada, com o preenchimento total das células da área encerrada e até a quarta camada da área 1, e com densidade dos resíduos aterrados de 0,9ton/m<sup>3</sup>. Na área encerrada a densidade adotada foi de 0,7ton/m<sup>3</sup> e houve o preenchimento total do maciço, como se observa em campo. As densidades adotadas estão de acordo com Younes et al. 2016, para a densidade média de resíduos compactados.

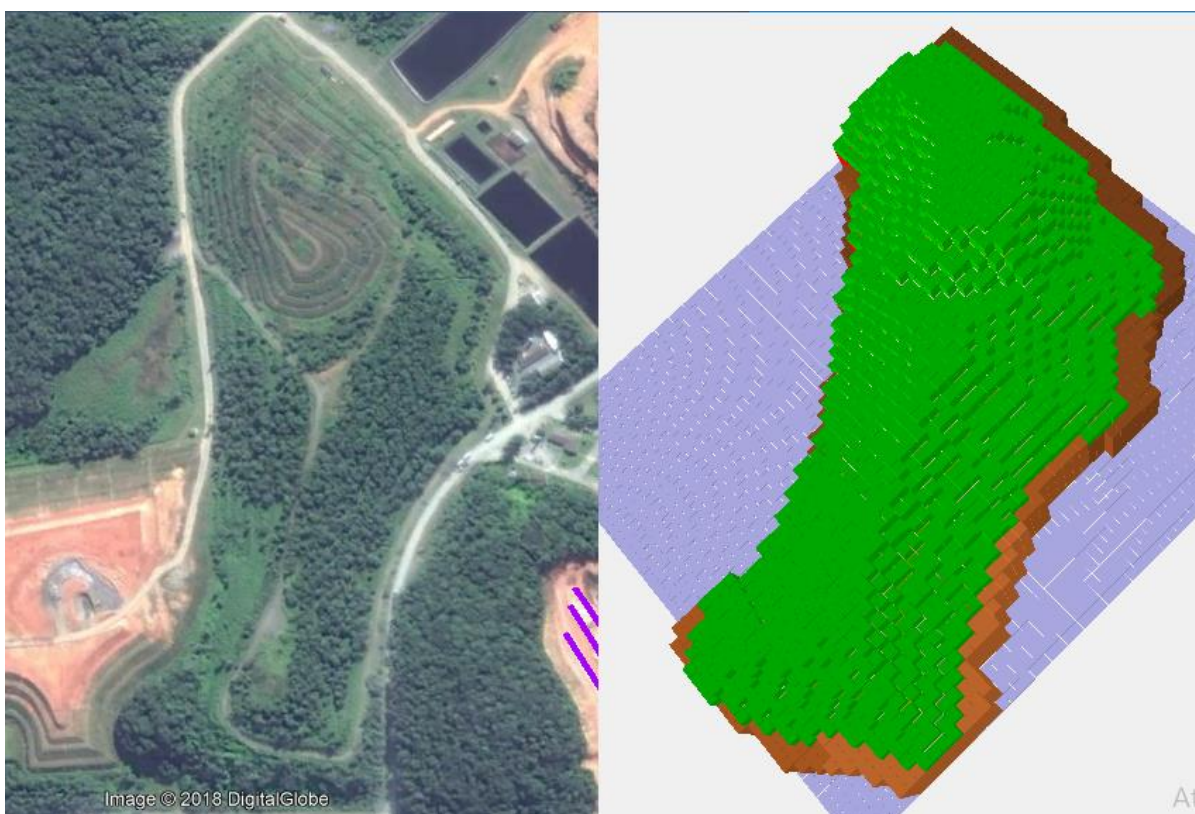
O grau de decomposição dos resíduos, fatores ambientais e a profundidade da amostra influenciam o valor do peso específico e densidade. Assim, em aterros mais antigos, esta propriedade, geralmente, aumenta com a profundidade como resultado do processo de compressão e consolidação do resíduo sólido urbano (KONIG & JESSBERGER, 1997). Considerando esse fator, a densidade dos resíduos da área encerrada deveria ser maior que o da área 1 e não o contrário, como foi adotado, porém a área encerrada possui uma parte que era lixão e aterro controlado que possivelmente não foram compactados de forma adequada, ainda assim pode ocorrer que os resíduos tenham diferentes composições com diferente teor de plásticos ou materiais menos densos.

Figura 15 - Simulação da área 1 no MODUELO 4.0 - vista superior



Fonte: Adaptado de MODUELO 4.0 e GoogleEarth (2018)

Figura 16 - Simulação da área encerrada no MODUELO 4.0 - vista superior



Fonte: Adaptado de MODUELO 4.0 e GoogleEarth (2018)

As figuras 17 e 18 apresentam respectivamente os valores diários e mensais simulados no MODUELO 4.0, e também os valores de geração de percolado aproximados. A tabela 24 apresenta os resultados das simulações acumulados no período de abril de 2016 a julho de 2018 (período de medição do nível da lagoa do aterro sanitário).

Tabela 24 - Resultados acumulados das simulações do aterro sanitário no  
MODUELO 4.0

Simulações do aterro sanitário no MODUELO 4.0									
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM7	SIM10	SIM12
Percolado gerado aproximado (m³)	373331	373331	373331	373331	373331	373331	373331	373331	373331
Percolado calculado na simulação (m³)	445738	421892	445738	446173	456418	463674	445186	421990	375374
SIMULADO/APROXIMADO	<b>1,19</b>	<b>1,13</b>	<b>1,19</b>	<b>1,20</b>	<b>1,22</b>	<b>1,24</b>	<b>1,19</b>	<b>1,13</b>	<b>1,01</b>

Fonte: A autora

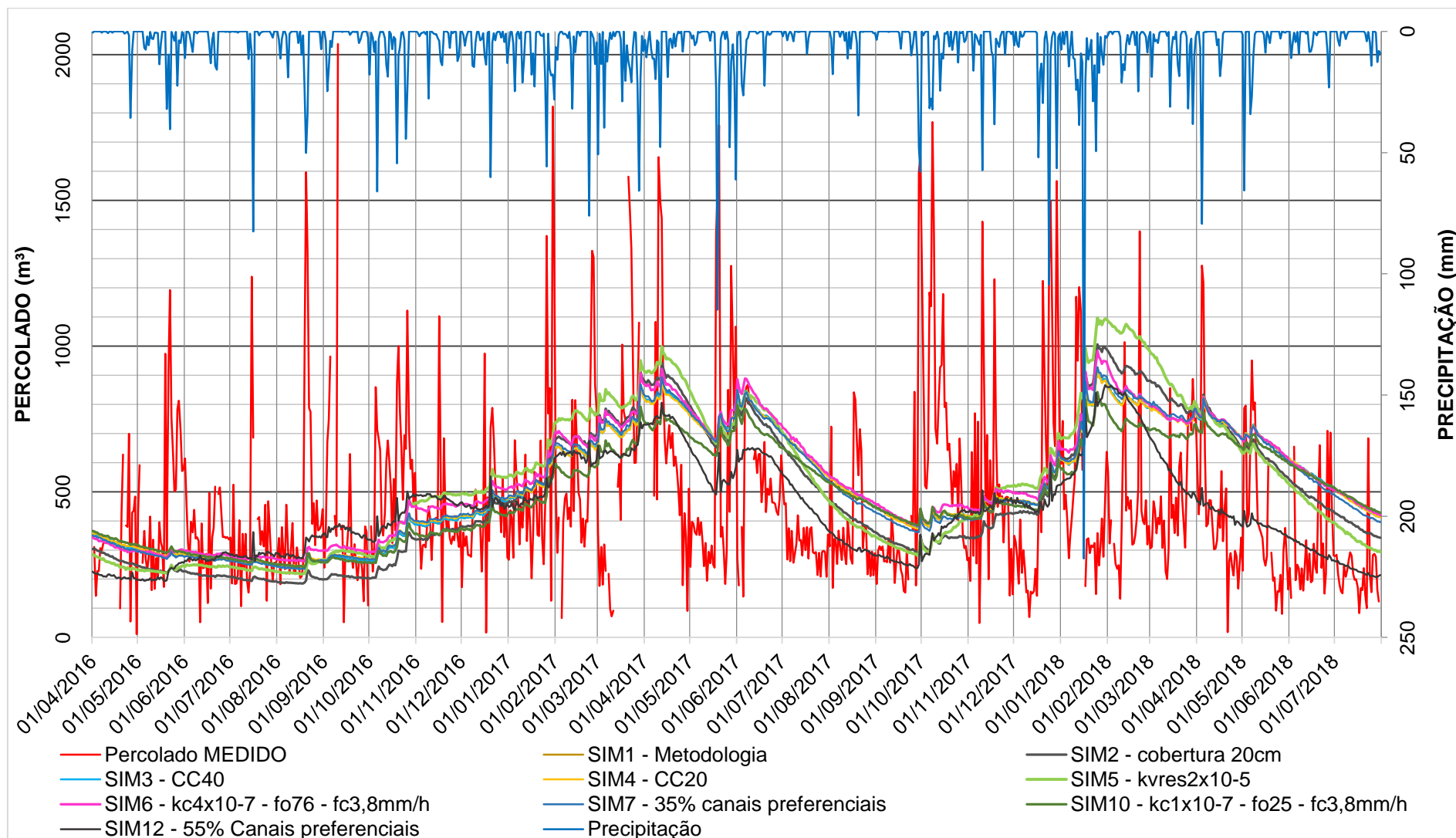
Observa-se que as simulações não apresentam os mesmos picos de geração de lixiviados apresentados nas medições. Esse fator pode ser reflexo da operação do aterro, pois muitas vezes não é possível fazer a cobertura diária devido a longos períodos de chuva da região. A partir da figura 17, observam-se as grandes variações pontuais nos dados diários, esse fato não contribuiu a avaliação e discussão dos resultados, desta forma, decidiu-se fazer a discussão avaliando os resultados mensais.

A primeira simulação – SIM1 foi realizada com os dados descritos na metodologia. Nas simulações SIM2, SIM6 e SIM10 o objetivo foi verificar a influência da qualidade da cobertura. Foram alteradas a espessura da cobertura de 40 para 20cm na SIM2, e nas SIM6 e SIM10 foram alterados os parâmetros de infiltração de Horton.

Na SIM2, a redução da cobertura diária de 40cm para 20cm na SIM2, fez reduzir a geração de percolado, isso porque não foram alterados os parâmetros de infiltração, então o modelo considerou que infiltra a mesma quantidade de precipitação no aterro, porém a umidade que vem junto com a cobertura (27%) reduziu por causa da própria redução da cobertura. Wang *et. al* (2017) observam que uma cobertura mais espessa poderia atenuar o efeito indesejado de macroporos e fissuras que teriam como resultado uma redução da infiltração da precipitação através da própria cobertura.

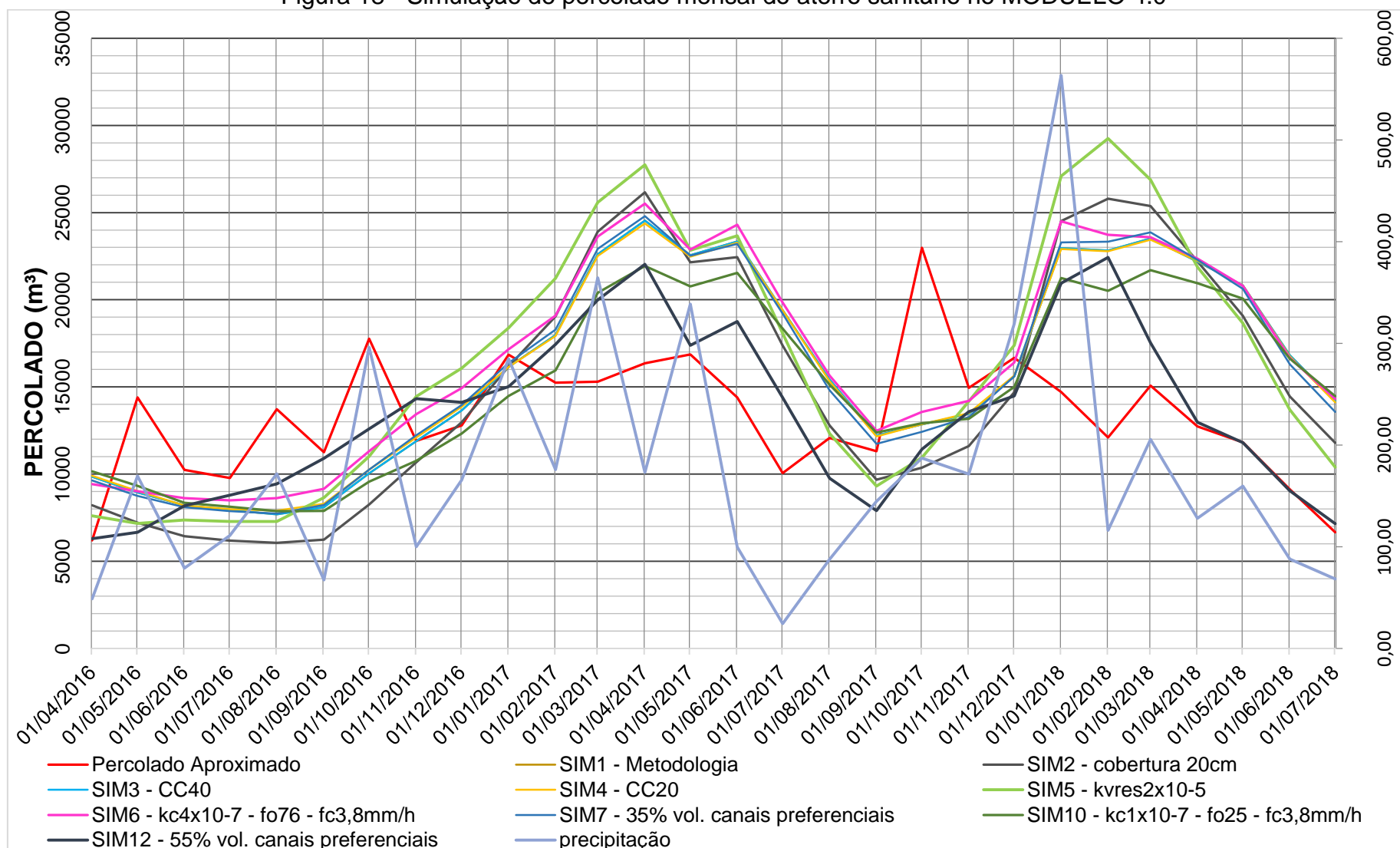
O ensaio granulométrico da cobertura do aterro sanitário apresentou 27% de argila 65% silte e 35% de areia, então na SIM6 a taxa de infiltração vertical da cobertura foi dobrada de  $2 \times 10^{-7}$  para  $4 \times 10^{-7}$  m/s, e utilizada uma infiltração inicial de  $f_0=76\text{mm/h}$ , final de  $f_c=3,8\text{mm/h}$ , já que esses são os parâmetros intermediários entre argila e areia apresentados por Musgrave (1955) e Huber e Dickinson (1988) – tabelas 10 e 11 citadas por Lobo (2003).

Figura 17 - Simulação de percolado diário do aterro sanitário no MODUELO 4.0



Fonte: A autora.

Figura 18 - Simulação de percolado mensal do aterro sanitário no MODUELO 4.0



Fonte: A autora.



Os resultados da simulação SIM6 são coerentes já que um aumento nos parâmetros de infiltração fez com que a geração de percolado aumentasse, pela maior infiltração no aterro. Porém essa alteração só fez os valores se afastarem do percolado aproximado. Por esta razão na SIM10 a taxa de infiltração vertical da cobertura foi diminuída para  $1 \times 10^{-7}$  m/s, e os parâmetros de infiltração para  $f_o=25\text{mm/h}$  e  $f_c=0,65\text{mm/h}$ , para verificar a permeabilidade da cobertura. Nessa simulação a geração de percolado diminuiu em 6%, além da diminuição dos picos de geração.

Os resultados das simulações SIM2, SIM6 e SIM10 mostram a importância da qualidade, e não da quantidade, do material utilizado na cobertura do aterro e da qualidade da sua execução. Uma cobertura eficaz diminui a geração de percolado, significando uma economia no seu tratamento.

Nas SIM3 e SIM4, o valor da capacidade de campo foi alterado para 40%, e 20% respectivamente, em vez de 29% visto que se encontram na bibliografia valores variando de 15 a 60% (Rocha,2008), (Padilla, 2007), (Lins,2003). Porém o percolado gerado pelo MODUELO 4.0 não apresentou alteração significativa.

Na quinta simulação – SIM5 foi aumentada a condutividade hidráulica vertical dos resíduos para  $2 \times 10^{-5}$  m/s, em vez de  $2 \times 10^{-6}$  m/s, Rocha (2008) cita valores entre  $3 \times 10^{-4}$  e  $9 \times 10^{-6}$  m/s, gerando um aumento de aproximadamente 3% na geração de percolado nos dois modelos.

A SIM7 teve a fração do volume atingida por canais preferenciais para 35%, porém não ocorreu alteração significativa na geração de percolado, por isso foi feita a SIM12 com 55% do volume de resíduos atingido por canais preferenciais e essa foi a que melhor representou o percolado aproximado. Essa alta porcentagem de canais preferenciais pode ser por causa do alto teor de plásticos no aterro sanitário de Joinville, representando 15,46% do total de resíduos, tabela 5. López, Calero e Lobo (2018) utilizaram o MODUELO4 para simular um aterro de resíduos, com 12,8% de plástico, e calibraram o modelo com 45% do volume afetado por canais preferenciais, na mesma proporção que a SIM12.

As simulações com o MODUELO 4 para as condições do aterro sanitário de Joinville não permitiram reproduzir as variações diárias e mensais. Porém, apesar de todas as simplificações e suposições adotadas, a ordem de grandeza e o volume acumulado para o período analisado estão bem próximos do valor real estimado. Em alguns períodos como de 03/2018 a 07/2018 a resposta obtida com a modelagem

mostrou uma tendência de comportamento de variação semelhante à observada em campo, com redução da geração de percolado tanto no valor aproximado como no valor gerado, e é interessante observar que nesse período também houve uma redução da precipitação.

Em janeiro de 2018, houve um aumento significativo da precipitação, em um único dia (16/01/2018) choveu 217 milímetros, e a geração de percolado aproximada diminuiu, enquanto que todas as simulações apresentaram um acréscimo imediato. Esse fato, provavelmente, aponta um erro na leitura da régua da lagoa de equalização, mostrando que as medições fornecidas podem apresentar erros.

#### 4.2 SIMULAÇÕES DO ATERRO SANITÁRIO NO HELP 3.07

A figura 19 representa os valores mensais simulados no HELP 3.07, e a tabela 25 apresenta os resultados acumulados das simulações para o período de medição do nível da lagoa (abril de 2016 a julho de 2018).

Tabela 25-Resultados acumulados das simulações do aterro sanitário no HELP 3.07

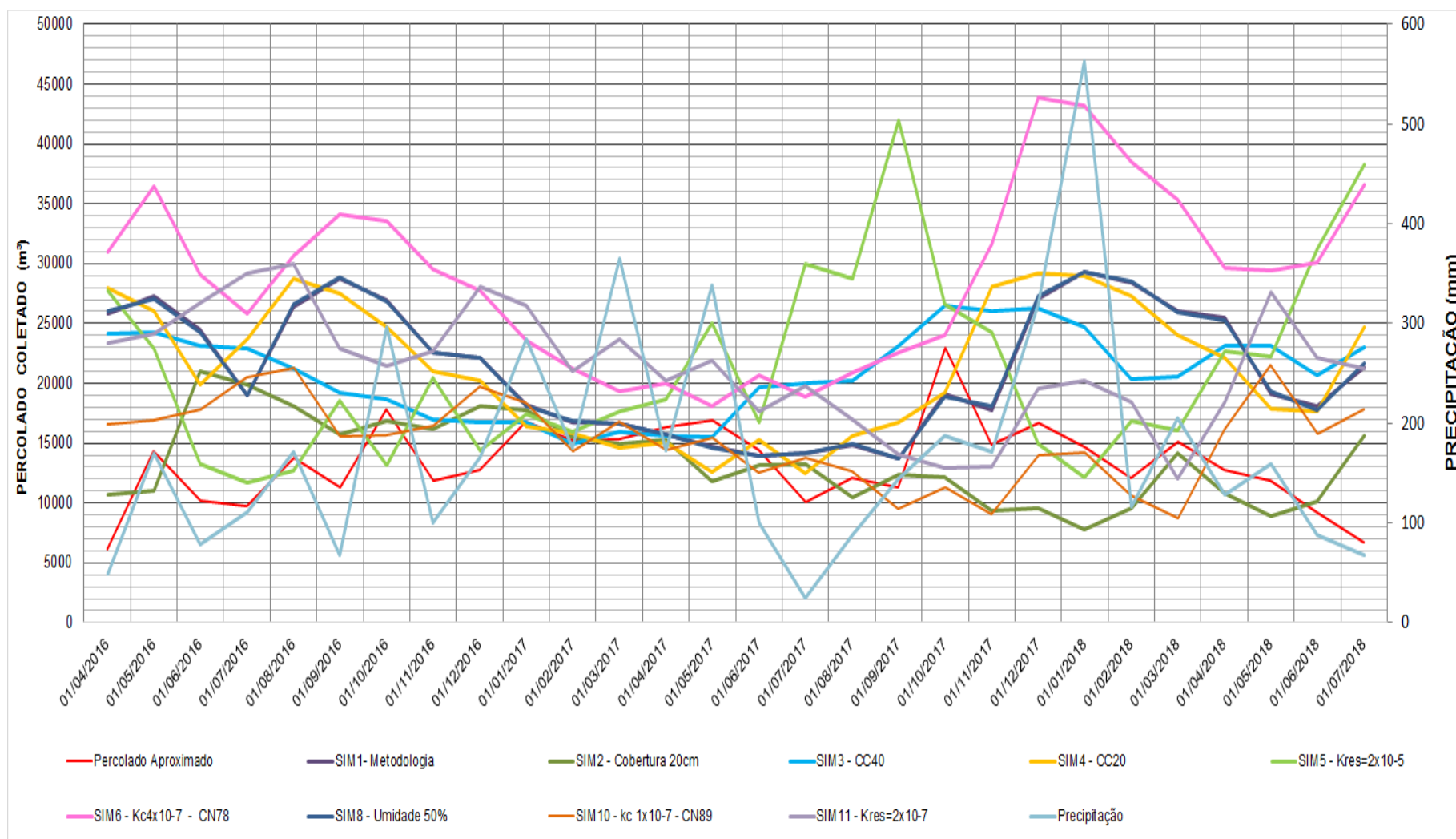
Simulações do aterro sanitário no HELP 3.07									
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM8	SIM10	SIM11
Percolado gerado aproximado (m <sup>3</sup> )	368624	368624	368624	368624	368624	368624	368624	368624	368624
Percolado calculado na simulação (m <sup>3</sup> )	594009	380048	594009	593799	592462	805937	594071	427653	595967
SIMULADO/APROXIMADO	1,61	1,03	1,61	1,61	1,61	2,19	1,61	1,16	1,62

Fonte: A autora

A SIM1 foi feita com os dados descritos na metodologia. Nas demais simulações foram feitas praticamente as mesmas alterações que no MODUELO 4.0 para comparar os dois modelos, então na SIM2 a cobertura intermediária foi alterada para 20cm em vez de 40cm gerando um aumento de volume de percolado acumulado. Assim como nas simulações com o MODEULEO4.0, ocorreu que a geração de percolado reduziu pois não foram alterados os parâmetros de infiltração, então o modelo considerou que a quantidade de precipitação que infiltra é a mesma, então a umidade reduziu, porque a umidade que vem com a cobertura também reduziu.



Figura 19 - Simulação de percolado mensal do aterro sanitário no HELP 3.07



Fonte: A autora.

Albright et. al. 2013 não encontraram nenhuma correspondência entre as taxas de percolação previstas e medidas através da camada de cobertura de sete aterros avaliados nos Estados Unidos utilizando o HELP. O período monitorado variou entre 3 e 5 anos. Os autores verificaram que, embora os valores das taxas de geração de percolação previstas e medidas tenham sido diferentes, elas foram da mesma ordem de grandeza. Esses achados sugerem que as previsões feitas com o HELP devem empregar propriedades hidráulicas que reflitam as condições em serviço das camadas do solo.

Nas SIM3 e SIM4 foi alterada a capacidade de campo dos resíduos para 40 e 20% respectivamente. O aumento da capacidade de campo diminuiu a geração de percolado, e a diminuição aumentou a geração de percolado. Essa variação está de acordo com a definição de capacidade de campo apresentada por Lins (2003) que define como o conteúdo de umidade medido após toda a água livre da massa saturada ser drenada por gravidade, ou seja, quando o material atinge certo teor de umidade, de acordo com a sua capacidade de campo, qualquer acréscimo de água resulta na percolação dentro da massa de resíduos. Logo quanto mais baixa a capacidade de campo, mais líquido percola, e vice-versa. A capacidade de campo do resíduo apresenta valores que podem variar entre 15% e 44% (Rocha, 2008, Padilla, 2007, Lins 2003), porém segundo Lobo (2003) os resíduos liberam líquidos percolados com umidades globais de 25% a 35%. Já que esse é um valor tão variável na bibliografia, alguns ensaios para determinação da capacidade de campo dos resíduos do aterro sanitário melhoraria a qualidade de todas as simulações.

Xu et al. 2011, indicaram que a condutividade hidráulica saturada do resíduo enterrado é muito menor do que o valor padrão do modelo HELP que indica  $1 \times 10^{-5}$  m/s, provavelmente devido a práticas modernas de compactação. Como SIM1 já foi feita com uma condutividade hidráulica do resíduo de  $2 \times 10^{-6}$  na SIM5 e SIM11 elas foram alteradas para  $2 \times 10^{-5}$  m/s e  $2 \times 10^{-7}$  m/s respectivamente. Essas alterações representaram variações significativas nos valores mensais simulados, porém nenhuma delas chegou perto do percolado aproximado. Os valores acumulados ficaram muito parecidos nessas simulações, representando 161% da geração de percolado aproximada.

Nas SIM6 e SIM10 optou-se por alterar os parâmetros de infiltração, considerando uma cobertura mais permeável na SIM6 e menos permeável na SIM10. Os resultados acumulados dessas simulações foram coerentes consistindo em mais geração de

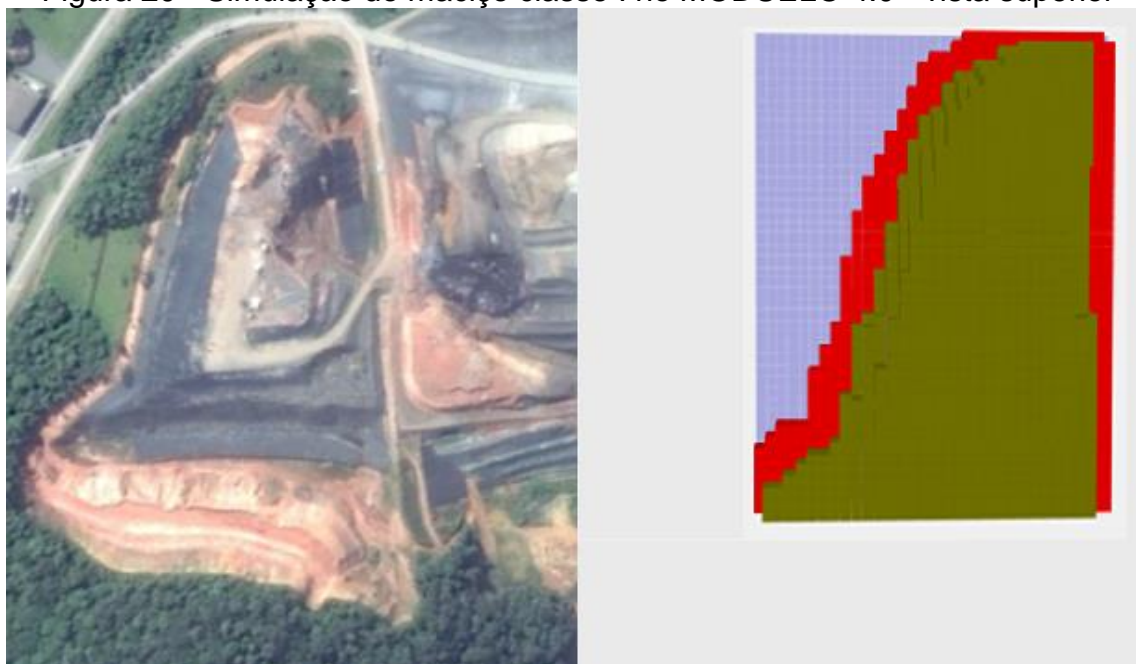
percolado na SIM6 e menos geração na SIM10, porém novamente as variações mensais não representaram as variações da geração aproximada.

#### 4.3 SIMULAÇÕES DO ATERRO INDUSTRIAL NO MODUELO 4.0

O módulo e produção de resíduos do MODUELO 4.0 se comportou de forma adequada com o preenchimento de todas as células do maciço classe I, figura 20. Esse preenchimento foi de duas camadas de 9,8 metros de resíduos, em uma área de 2,29 hectares até julho de 2018, e a densidade adotada de  $1\text{ton/m}^3$ . No maciço Classe II houve o preenchimento aproximado de 4 camadas de resíduos, figura 21, em 7,78 hectares, e a densidade adotada foi de  $1,44\text{ton/m}^3$ .

A tabela 13 apresenta todas as alterações feitas nas diferentes simulações. Cabe ressaltar que no aterro industrial não existe cobertura intermediária, os resíduos são cobertos temporariamente com uma geomembrana, sendo mantida somente a frente de serviço descoberta, por isso as simulações foram feitas alterando principalmente os parâmetros de infiltração e do resíduo. As figuras 22 e 23 apresentam o resultado mensal das simulações para o maciço classe I e classe II respectivamente, e as tabelas 26 e 27 apresentam os resultados acumulados para o período de janeiro de 2014 a julho de 2018 (período com dados de bombeamento disponível).

Figura 20 - Simulação do maciço classe I no MODUELO 4.0 - vista superior



Fonte: Adaptado de MODUELO 4.0 e GoogleEarth (2018)

Figura 21 - Simulação do maciço classe II no MODUELO 4.0 - vista superior



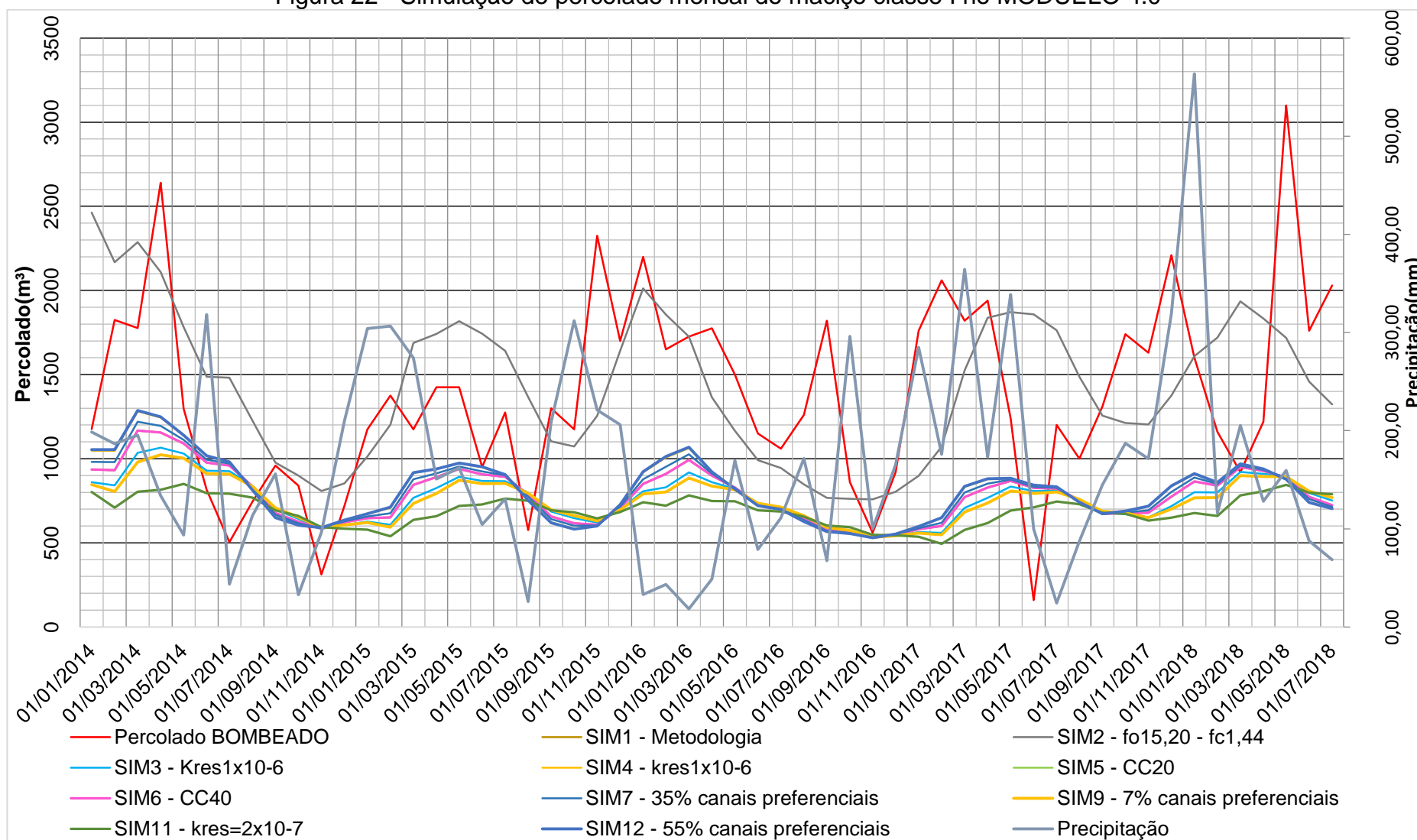
Fonte: Adaptado de MODUELO 4.0 e GoogleEarth (2018)

Tabela 26 - Resultados acumulados das simulações do aterro industrial no MODUELO 4.0

Simulações do aterro industrial no MODUELO										
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM7	SIM9	SIM11	SIM12
Percolado gerado aproximado na célula Classe I(m³)	75823	75823	75823	75823	75823	75823	75823	75823	75823	75823
Percolado gerado aproximado na célula Classe II(m³)	125598	125598	125598	125598	125598	125598	125598	125598	125598	125598
Percolado simulado na célula Classe I(m³)	43303	78781	41922	44570	43303	43303	43859	41351	38093	44606
Percolado simulado na célula Classe II(m³)	238805	350626	230275	240546	235260	235260	237219	230224	219731	240085
Bombeado/Simulado - Classe I	<b>0,57</b>	<b>1,04</b>	<b>0,55</b>	<b>0,59</b>	<b>0,57</b>	<b>0,57</b>	<b>0,58</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	<b>0,59</b>
Bombeado/Simulado - Classe II	<b>1,90</b>	<b>2,79</b>	<b>1,83</b>	<b>1,92</b>	<b>1,87</b>	<b>1,87</b>	<b>1,89</b>	<b>1,83</b>	<b>1,75</b>	<b>1,91</b>

Fonte: A autora

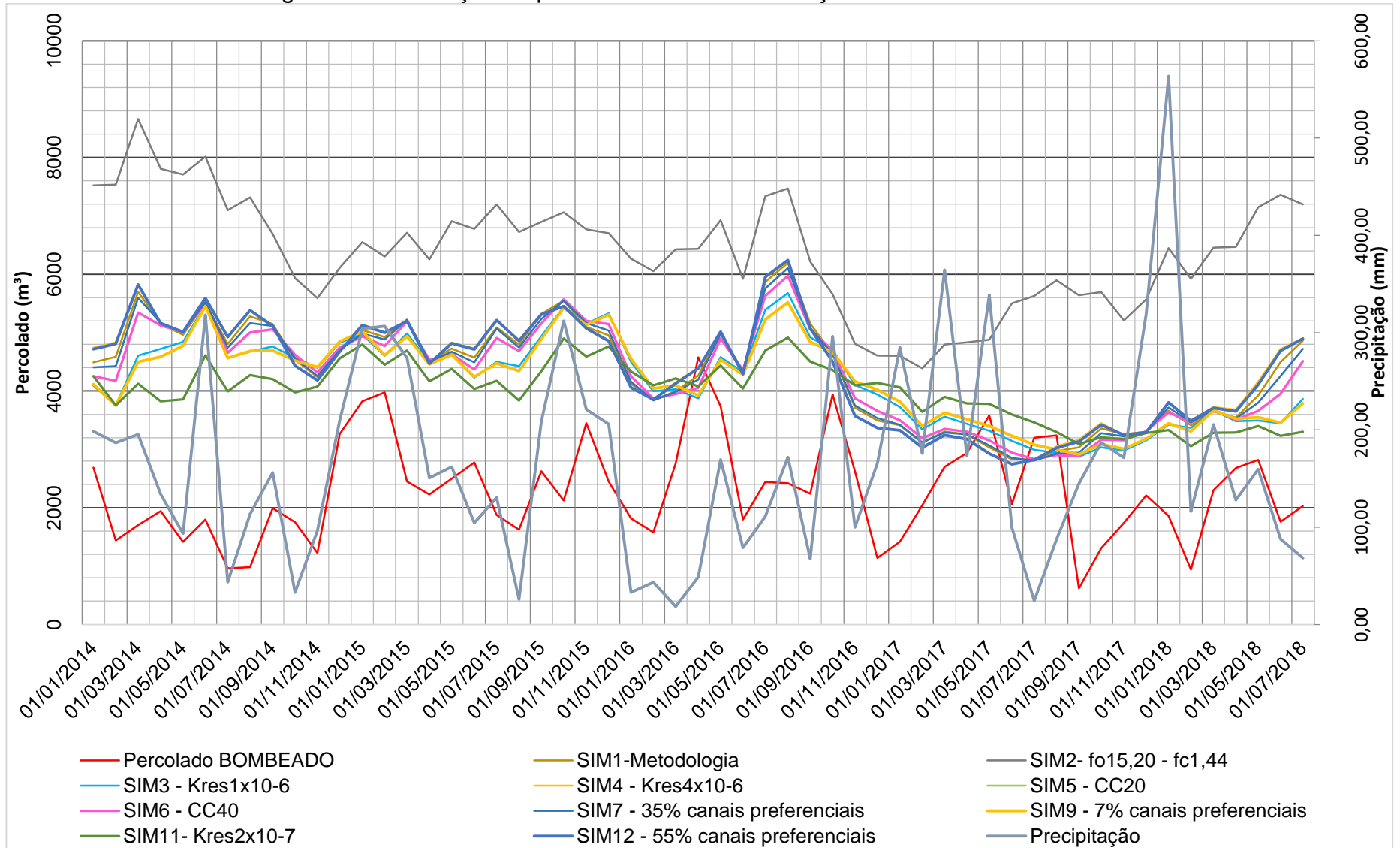
Figura 22 - Simulação de percolado mensal do maciço classe I no MODUELO 4.0



Fonte: A Autora



Figura 23 - Simulação de percolado mensal do maciço classe II no MODUELO 4.0



Fonte: A autora

A primeira simulação foi feita como o descrito na metodologia, apresentando resultados bem diferentes para os dois maciços do aterro industrial, no maciço classe I a SIM1 ficou bem abaixo do valor bombeado, e no classe II bem acima. Essa diferença pode estar ligada ao fato do maciço classe I receber muitos sólidos contaminados, que incluem plásticos, mantas e outros materiais que podem estar formando canais preferenciais em meio ao aterro. Porém, como a comparação foi feita com o volume bombeado, pode ser que a gestão do aterro esteja dando mais prioridade de bombeamento ao maciço classe I por receber resíduos perigosos.

Na simulação SIM2, em vez de reduzidos em 96%, os parâmetros de infiltração foram reduzidos em 80%, fazendo a geração de percolado acumulada chegar muito próxima do valor bombeado no maciço classe I. Possivelmente infiltra mais precipitação nos dois maciços do que apenas na frente de serviço. Albright et. al. 2013, avaliando sete aterros de resíduos com diferentes camadas de cobertura em diferentes regiões e condições climáticas nos EUA, afirmam que a frequência de defeitos para geomembranas cuidadosamente construídas é de 5 furos/ha, com cada furo tendo uma área de aproximadamente 100 mm<sup>2</sup>. Neste trabalho, a percolação no aterro que continha geomembrana danificada foi da ordem de 5 a 30 vezes maior comparado aos outros monitorados.

As SIM 3, SIM4 e SIM11 foram realizadas alterando a condutividade hidráulica do resíduo para  $1 \times 10^{-6}$  m/s,  $4 \times 10^{-6}$  m/s e  $2 \times 10^{-7}$  m/s respectivamente. A SIM11 apresentou valores simulados mais próximos ao bombeado para o maciço classe II.

Nas simulações SIM5 e SIM6 foram variadas as capacidades de campo do resíduo, porém assim como nas simulações do aterro sanitário com o MODUELO, não tiveram nenhuma diferença em relação a SIM1.

Nas SIM7, SIM9 e SIM12 foi alterado a fração do volume afetada por canais preferenciais, e observou-se que uma grande variação nessa fração resultou em pouca alteração no percolado acumulado.

Nenhuma das simulações do aterro industrial representou as variações mensais apresentadas pelo volume bombeado, nem mesmo os valores acumulados ficaram próximos, porém, se mantiveram na mesma ordem de grandeza.



#### 4.4 SIMULAÇÕES DO ATERRO INDUSTRIAL NO HELP 3.07

A Tabela 27 e as figuras 24 e 25 apresentam os resultados acumulados e mensais das simulações do aterro industrial realizadas no HELP 3.07. O período de análise coincide com os dados disponíveis de bombeamento de percolado (janeiro de 2014 a julho de 2018)

Assim como descrito nos capítulos anteriores, a primeira simulação, SIM1, foi feita com os dados descritos na metodologia. Optou-se por fazer as mesmas alterações feitas nas simulações do aterro industrial com o MODUELO 4.0, exceto pelo parâmetro de infiltração adotado, que no HELP 3.07 é incluso como CN. O CN adotado na primeira simulação foi de 96, considerando que toda precipitação sobre a frente de serviço infiltraria.

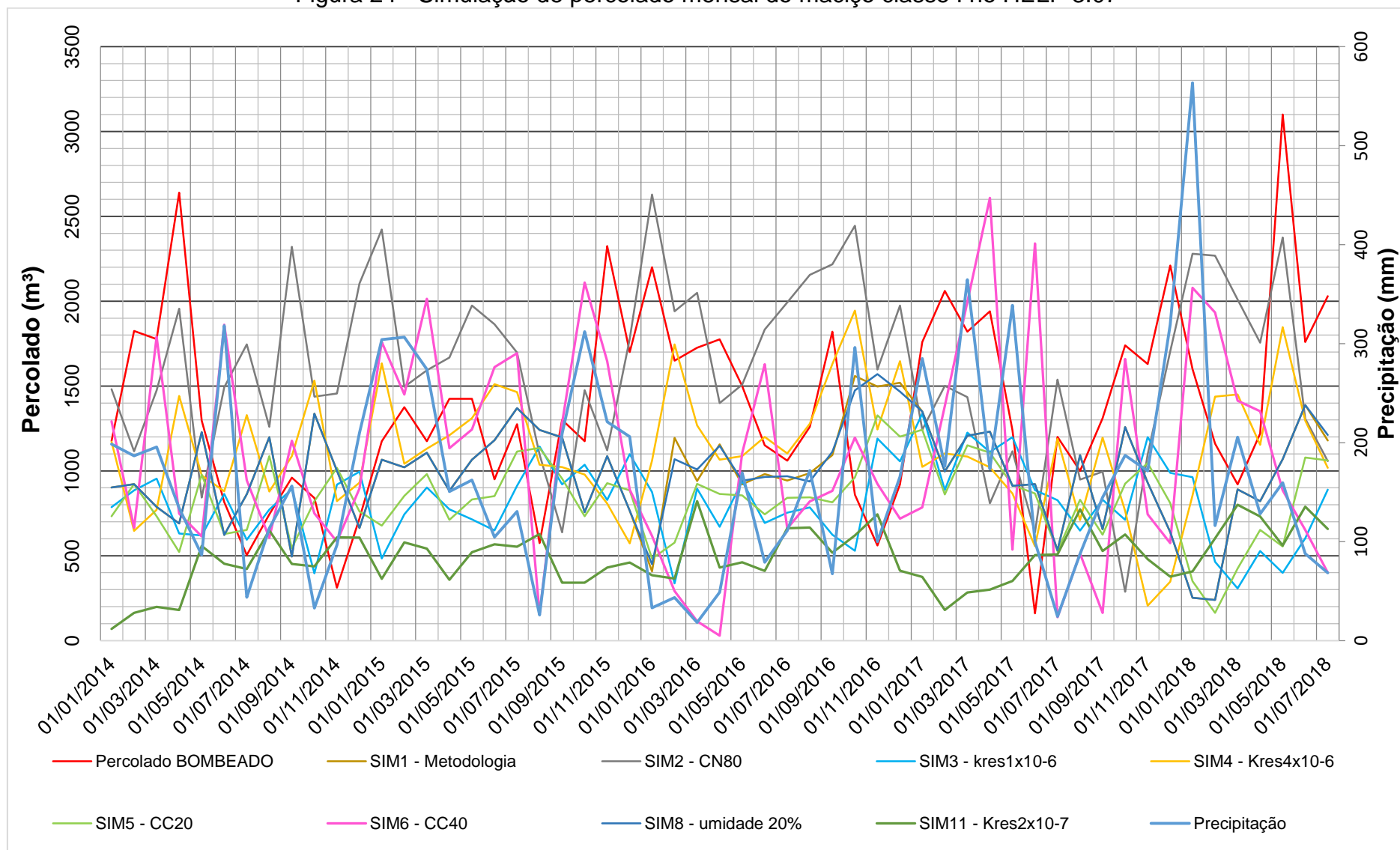
Os resultados da SIM1 mostraram valores acumulados muito abaixo do bombeado no aterro classe I, por esse motivo na segunda simulação o CN foi alterado para 80 considerando que infiltra 20% de precipitação sobre todo o aterro, resultando em um percolado acumulado muito próximo ao bombeado no classe I.

Tabela 27 - Resultados acumulados das diferentes simulações do aterro industrial no HELP 3.07

Simulações do aterro industrial no HELP 3.07								
	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM8	SIM11
Percolado bombeado da célula Classe I(m³)	75823	75823	75823	75823	75823	75823	75823	75823
Percolado bombeado da célula Classe II(m³)	125598	125598	125598	125598	125598	125598	125598	125598
Percolado acumulado na célula Classe I(m³)	54215	87611	44861	61572	45677	60053	54158	26813
Percolado acumulado na célula Classe II(m³)	195232	311820	166713	220840	89	204162	195308	1716
Bombeado/Simulado - Classe I	<b>0,72</b>	<b>1,16</b>	<b>0,59</b>	<b>0,81</b>	<b>0,60</b>	<b>0,79</b>	<b>0,71</b>	<b>0,35</b>
Bombeado/Simulado - Classe II	<b>1,55</b>	<b>2,48</b>	<b>1,33</b>	<b>1,76</b>	<b>0,00</b>	<b>1,63</b>	<b>1,56</b>	<b>0,01</b>

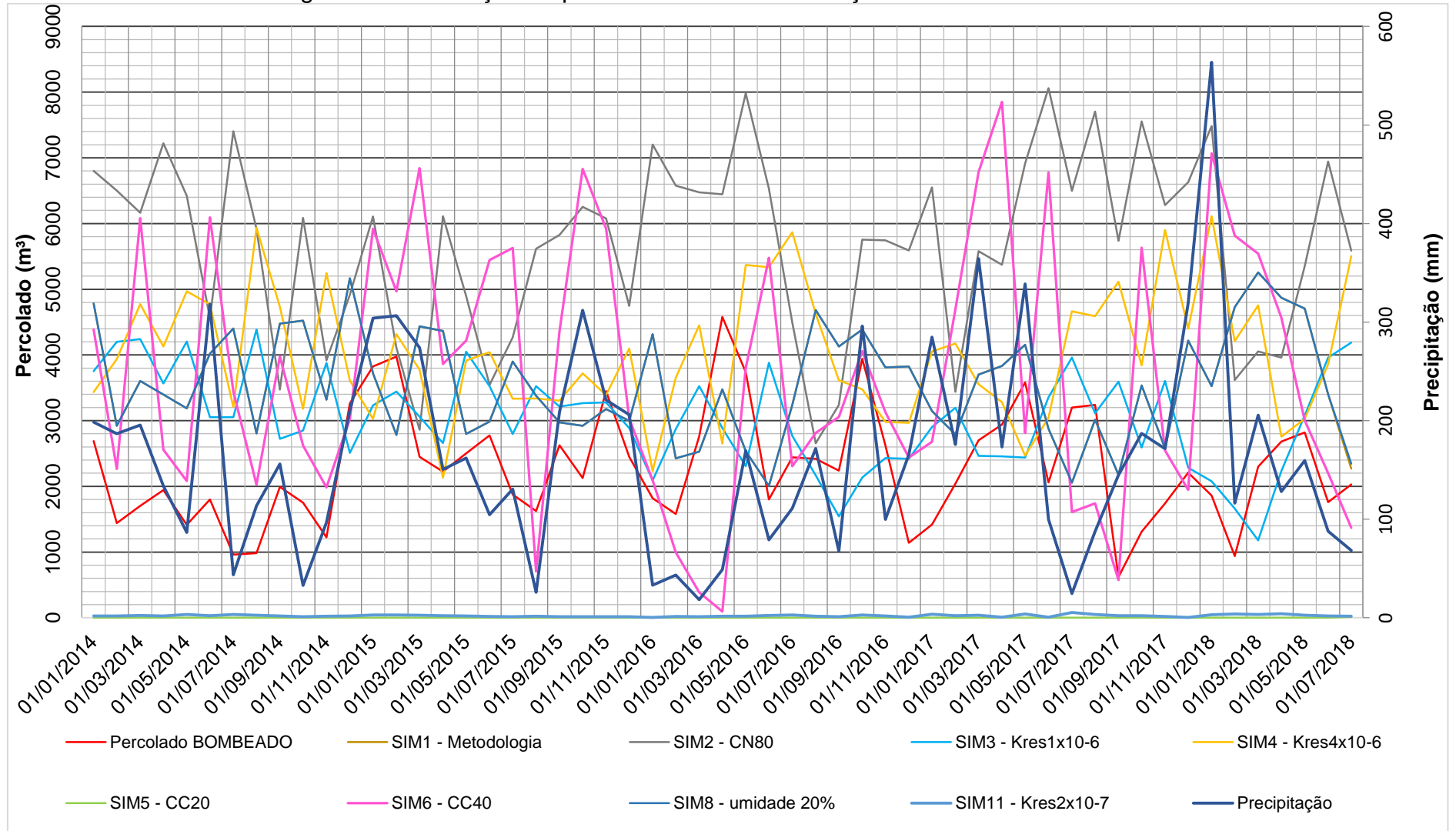
Fonte: A autora

Figura 24 - Simulação de percolado mensal do maciço classe I no HELP 3.07



Fonte: A autora

Figura 25 - Simulação de percolado mensal no maciço classe II com o HELP 3.07



Fonte: A autora

Nas simulações SIM3, SIM4 e SIM11 foram alteradas a condutividade hidráulica do resíduo de  $2 \times 10^{-6}$  para  $1 \times 10^{-6}$  m/s,  $4 \times 10^{-6}$  m/s e  $2 \times 10^{-7}$  m/s respectivamente, gerando grandes variações mensais de percolado.

Na SIM11 do maciço classe II a ordem de grandeza teve uma queda significativa, o que aconteceu também na SIM 5, que alterou a capacidade de campo do resíduo de 29 para 20%. Essas simulações mostraram a importância de se realizar ensaios para caracterização dos resíduos, e correta inserção nos programas.

Assim como nas simulações do aterro industrial com o MODUELO 4.0, no HELP 3.07 nenhuma simulação apresentou as variações apresentadas pelo volume bombeado. Aqui ainda ocorreram volumes acumulados com ordem de grandeza muito diferentes entre as simulações e volume bombeado.

#### 4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A avaliação do percolado aproximado e das melhores simulações mostraram bons resultados no aterro sanitário quando utilizado o MODUELO 4.0, pois a geração de percolado aproximada tem alta correlação com a precipitação, tabela 28, e as simulações do MODUELO 4.0 tem moderada correlação com a precipitação e com o percolado aproximado, já as simulações com o HELP 3.0 mostraram correlação muito baixa. A avaliação das simulações no aterro industrial mostrou correlação muito baixa com a precipitação e percolado bombeado, tanto no maciço classe I como no classe II. A qualidade dos dados de entrada nos modelos, as simplificações adotadas e problemas operacionais dos aterros são alguns fatores podem ter contribuído para resultados de simulação de lixiviados diferentes dos gerados em campo.

Entre as simplificações assumidas está a permeabilidade da cobertura intermediária e cobertura final, adotada como sendo igual tanto para a área 1 como para área encerrada do aterro sanitário. Ambas as simulações foram executadas com uma superfície de solo argiloso como cobertura, não levando em conta a camada de vegetação que existe in loco na área encerrada. Sendo que a vegetação altera os parâmetros de infiltração e evapotranspiração, e que as raízes da vegetação implementada podem aumentar a porosidade do solo, consequentemente elevando a infiltração como o relatado por Kargas (2016). Tais acontecimentos podem gerar um resultado diferente do simulado das duas áreas.

Pode estar ocorrendo infiltração no fundo dos aterros, principalmente na área encerrada do aterro sanitário, que tinha uma área utilizada como lixão, esse fato

geraria divergência nos resultados. Nesse mesmo local foram estimadas as drenagens das camadas igual as áreas que possuem projeto.

Tabela 28 - Avaliação das melhores simulações

Descrição	Medido	HELP		Moduelo	
Sanitário					
Simulação	Aproximado	SIM2		SIM12	
Média	13333,25073	13573,1273		13406,19778	
Desvio padrão	3537,19727	3581,602086		4774,963393	
Relação (DesvP/Med)	26,53%	26,39%		35,62%	
Correlação	PrecipitxAprox	PrecipxSIM2	AproximxSIM2	PrecxSIM12	AproximxSIM12
r	<b>0,59</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,50</b>	<b>0,47</b>
Tendência	Crescente	Decres	Leve decresc	Cresc	Cresc
Industrial					
K1					
Simulação	Bombeado	SIM2		SIM3	
Média	1378,6	1592,929872		22677,35554	
Desvio padrão	570,845	514,3273242		12102,77022	
Relação (DesvP/Med)	41,41%	32,28%		53,37%	
Correlação	PrecipxBombeado	PrecipxSIM2	BombeadoxSIM2	PrecipxSIM3	BombeadoxSIM3
r	<b>0,12</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>-0,19</b>	<b>0,16</b>
Tendência	Leve cresc	Levem cresc	Leve cresc	Leve decresc	Leve cresc
K2					
Simulação	Bombeado	SIM3		SIM11	
Média	2283,6	3031,150663		3995	
Desvio padrão	864,3821943	739,67038		511,73	
Relação (DesvP/Med)	37,85%	24,40%		12,81%	
Correlação	PrecpxBombeado	PrecipxSIM3	BombeadoxSIM3	PrecipxSIM11	BombeadoxSIM11
r	<b>0,21</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,31</b>
Tendência	Leve cresc	Leve decresc	Leve drecresc	Leve cresc	Leve cresc

Fonte: A autora

Em consulta o processo de licenciamento ambiental do aterro sanitário junto ao IMA – Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina, foi encontrada uma estimativa de geração de percolado diária de 479,77m³/dia para uma área de aterro de 111054m². Essa estimativa foi feita com base na medição de geração de uma célula já existente, e considera uma vazão de geração diária constante, oque não ocorre na realidade. Também foi feita uma estimativa pelo método suíço que resultou em 223,64m³/dia. Posteriormente a essa estimativa foi construída a lagoa reguladora de vazão, que serve justamente para comportar a variação do efluente gerado.

Vale ressaltar que no ano de 2019 o aterro sanitário já possui mais que o dobro de área, 22600m<sup>2</sup> somando a área 1 e área encerrada, e gera uma média diária de 444m<sup>3</sup>/dia, um pouco menor que o valor estimado no licenciamento ambiental, mostrando que a geração de percolato foi superestimada, e que as simulações podem apresentar um resultado mais realista.

Podem ter ocorrido falhas de ordem operacional no aterro sanitário que fizeram com que os picos apresentados nas medições de lixiviado fossem maior do que o esperado, como frentes de serviço muito amplas, com exposição dos resíduos à água precipitada; manutenção inadequada dos elementos de drenagem superficial, que trincam com o tempo, devido às movimentações do maciço, entre outros. Outro fato que pode ser melhor analisado é a composição média dos resíduos, que pode não estar refletindo a realidade, e pode não representar as variações gravimétricas com o decorrer dos anos, e também das estações.

Ocorreram também dados pluviométricos com falhas, e períodos sem dados de temperatura por exemplo. Além de possíveis erros na leitura da régua da lagoa do aterro sanitário, e utilização do bombeamento no aterro industrial para comparação. As simplificações adotadas afetam a resposta, como suposições de condições idealizadas e adoção de dados médios de bibliografia que não condizem com a realidade do campo.

Mesmo com todas as simplificações, a ordem de grandeza dos resultados é a mesma se comparados os resultados acumulados para o período. E em uma análise simplista se forem comparadas as gerações médias mensais do aterro sanitário e do industrial, proporcionalmente à área de cada um, estima-se que o aterro sanitário gere mais percolato. Enquanto o aterro industrial tem 10,07 hectares e bombeia mensalmente 3662,2m<sup>3</sup>, o aterro sanitário tem 22,26 hectares e gera aproximadamente 13333,2 m<sup>3</sup> ao mês. Ressalta-se que, pela localização, a precipitação é a mesma sobre as duas áreas.

Quando comparadas as simulações entre os programas, tabela 29, os melhores resultados ocorreram com a simulação SIM2 no aterro sanitário, com coeficiente de Pearson “r” 0,38, apresentando mesmo assim uma baixa correlação entre a simulação no HELP3 e no MODUELO 4.0, mas maior parte das correlações estudadas é muito baixa e negativa, mostrando que os resultados mensais mostrados no MODUELO são bem diferentes e menores que no HELP. Esse fato é devido aos diferentes métodos de cálculo e simplificações adotadas nos próprios programas, no HELP 3.07 não é

considerada a forma do aterro e seu preenchimento gradual de resíduos, e no MODUELO 4.0 o formato das células unitárias não permite a simulação de diferentes inclinações para os taludes e o terreno de fundo é considerado perfeitamente impermeável, não sendo possível simular uma possível falha na camada de impermeabilização inferior e infiltração de lixiviado no solo.

A qualidade dos dados inseridos nos modelos é fundamental para que seja possível representar a realidade do ambiente físico. Neste trabalho, foram encontradas algumas dificuldades quanto à qualidade dos dados, seja pela simples falta de informações ou pela inconsistência das informações disponíveis.

Abunama et al. (2019) avaliando aterros de resíduos urbanos na Malásia, em uma região com precipitação anual média 2155mm, avaliou um método simplificado utilizando redes neurais para geração de percolado, que levava em consideração apenas quantidade de resíduos, nível de precipitação e emissão de gases. A comparação dos resultados do percolado medido versus simulado foi satisfatória e confiável. Abunama et al. (2019) referem, ainda, as dificuldades de coleta de dados e complexidade e necessidade de processamento de dados em modelos mais complexos, como o MODUELO. Desta forma, utilização de modelos mais simples, como o HELP, e uso de inteligência artificial seria uma boa alternativa para países em desenvolvimento devido à deficiência ou indisponibilidade dos dados precisos.

#### 4.6 PREVISÃO DE GERAÇÃO DE PERCOLADO

No que diz respeito à gestão a longo prazo dos aterros, é importante avaliar diferentes cenários para o impacto das variáveis de projeto como tipo de resíduo disposto, cobertura, localização do aterro, etc. Cuartas et. al. 2018 verificaram a redução da variabilidade de geração de percolado quando havia uso de cobertura intermediária temporária em um clima mediterrâneo, usando resíduos característicos gerados na união europeia. Quando houve a simulação com resíduos de características diferentes, essa variabilidade aumentou. Esses resultados revelam a necessidade de analisar diferentes cenários para poder generalizar as conclusões.

De acordo com Fellner & Brunner (2010) embora a quantidade de percolado gerado em aterros ao longo do tempo possa ser predita, razoavelmente bem, a variação da taxa descarga de percolado é difícil de descrever.



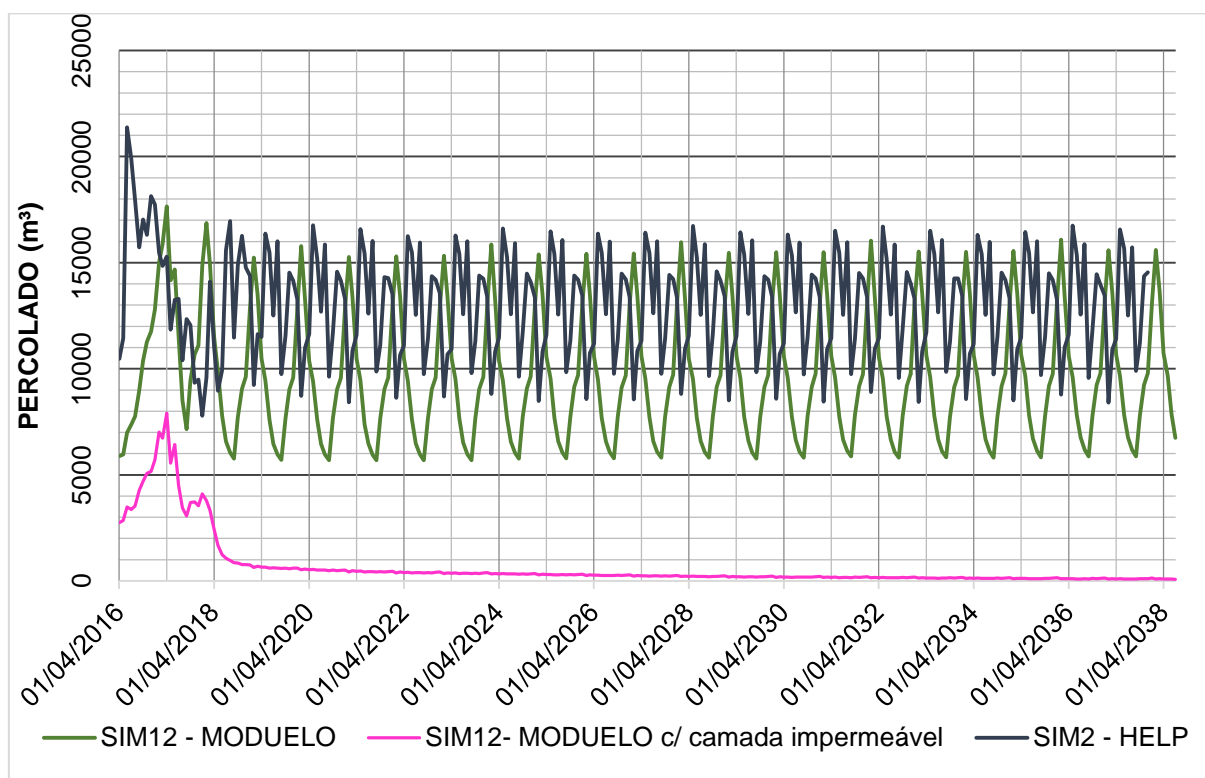
Tabela 29 - Comparação das simulações no MODUELO 4.0 e HELP 3

Sanitário								
Simulação		SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM10
HELP	Percolado acumulado	594009	380048	594009	593799	592462	805937	427653
	Média	21215	13573	20832	21207	21159	28783	15273
	Desvio Padrão	5220	3581,6	3484,1	5492,4	7826,6	7262,6	3471,9
MODUELO	Percolado acumulado	445738	421892	445738	446173	456418	463674	421990
	Média	15919	15068	15919	15935	16301	16560	15071
	Desvio Padrão	5709,2	6877,3	5709,2	5633,9	7229	5753,4	4948,4
Correlação HELPxMODUELO		-0,285	-0,383	-0,309	-0,41	-0,262	-0,18	-0,345
Industrial K1								
Simulação		SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM11
HELP	Percolado acumulado	54215	87611	44861	61572	45677	60053	26813
	Média	985,73	1592,9	815,65	1119,5	830,5	1091,9	487,5
	Desvio Padrão	295,55	514,33	236,36	350,34	231,52	623,31	170,42
MODUELO	Percolado acumulado	43303	78781	41922	44570	43303	43303	38093
	Média	1378,6	22677	40845	21790	23527	22677	21442
	Desvio Padrão	570,85	12103	21578	11765	12402	12103	11626
Correlação HELPxMODUELO		-0,297	-0,072	-0,307	-0,036	-0,366	0,027	0,126
Industrial K2								
Simulação		SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM11
HELP	Percolado acumulado	195232	311820	166713	220840	88,598	204162	1715,5
	Média	3549,7	5669,5	3031,2	4015,3	1,6109	3712	31,191
	Desvio Padrão	835,51	1372,7	739,67	973,52	1,8951	1967	15,571
MODUELO	Percolado acumulado	238805	350626	230275	240546	235260	235260	219731
	Média	4341,9	6375	4186,8	4373,6	4277,5	4277,5	3995,1
	Desvio Padrão	875,06	955,38	753,77	895,19	829,63	829,63	511,74
Correlação HELPxMODUELO		0,095	-0,038	0,030	0,153	0,102	0,100	-0,276

Fonte: A autora

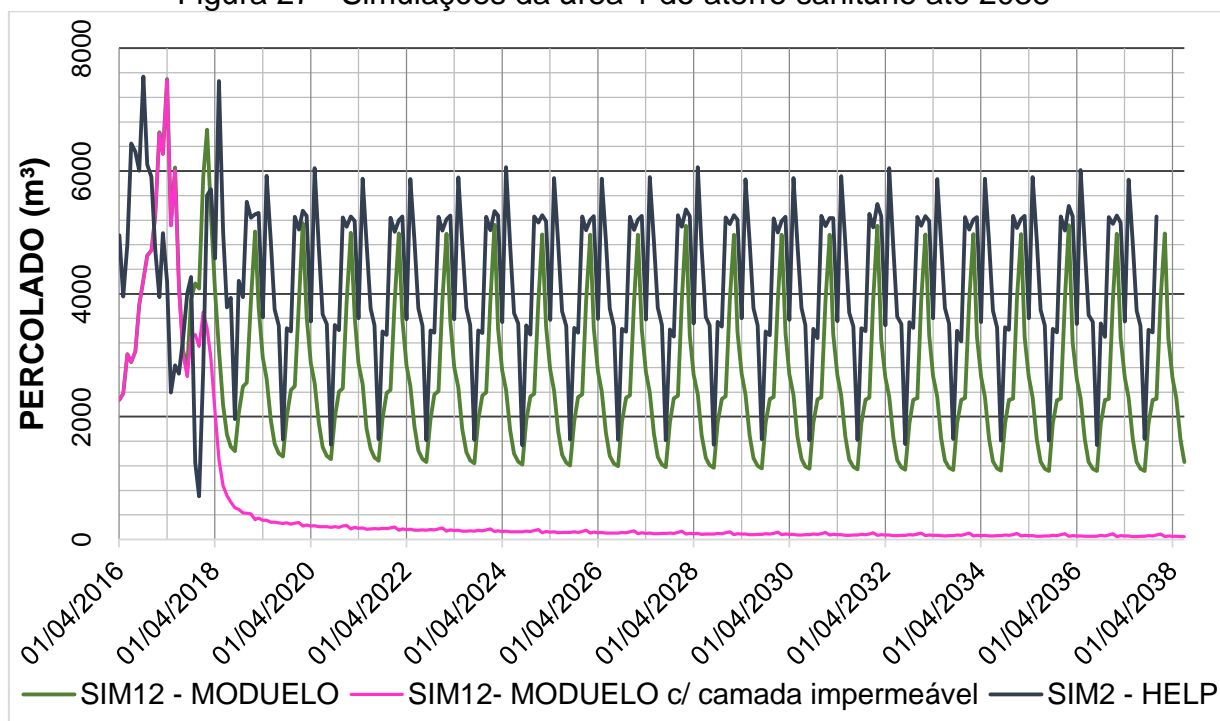
As figuras 26 a 29 mostram simulações nas quais foram repetidos os dados meteorológicos e de recebimento de resíduos do ano de 2018, até 2038 para verificar a tendência de geração futura de percolado. No MODUELO 4.0 foram realizadas também simulações considerando a camada de cobertura final impermeável.

Figura 26 - Simulações do aterro sanitário até 2038



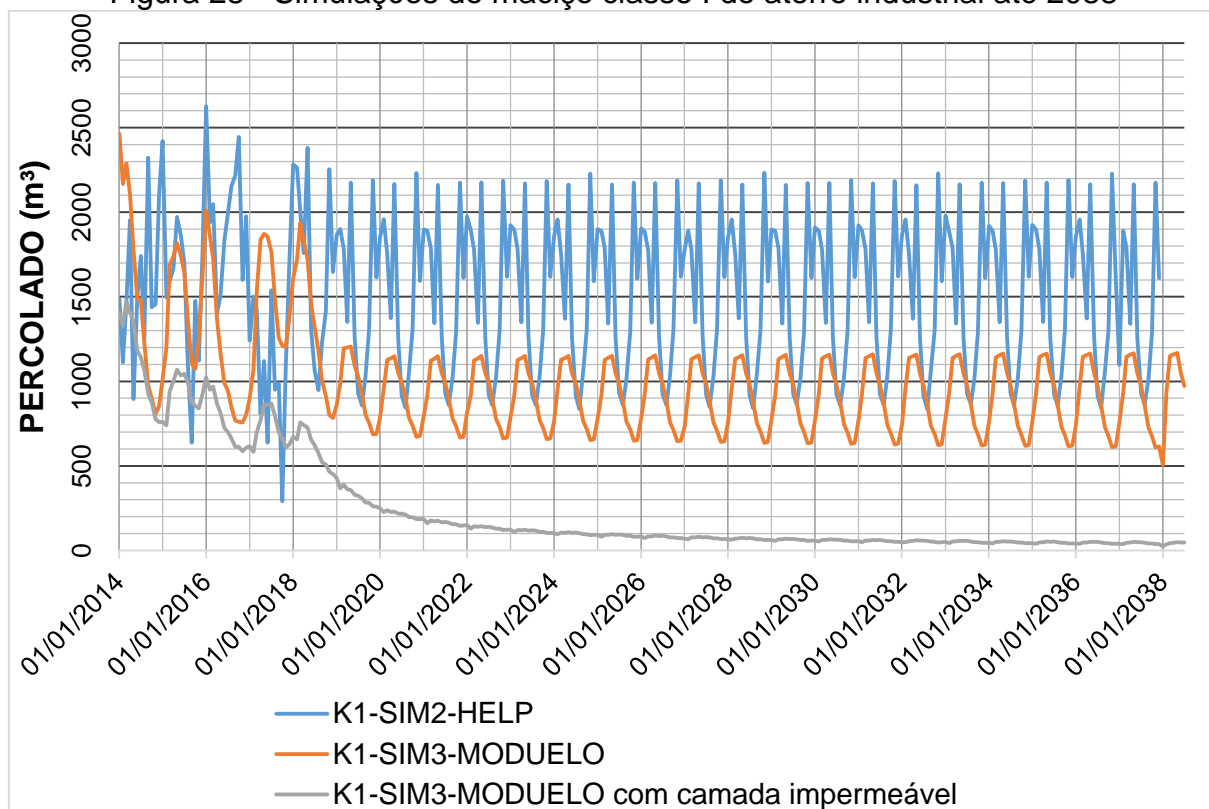
Fonte: A autora

Figura 27 - Simulações da área 1 do aterro sanitário até 2038



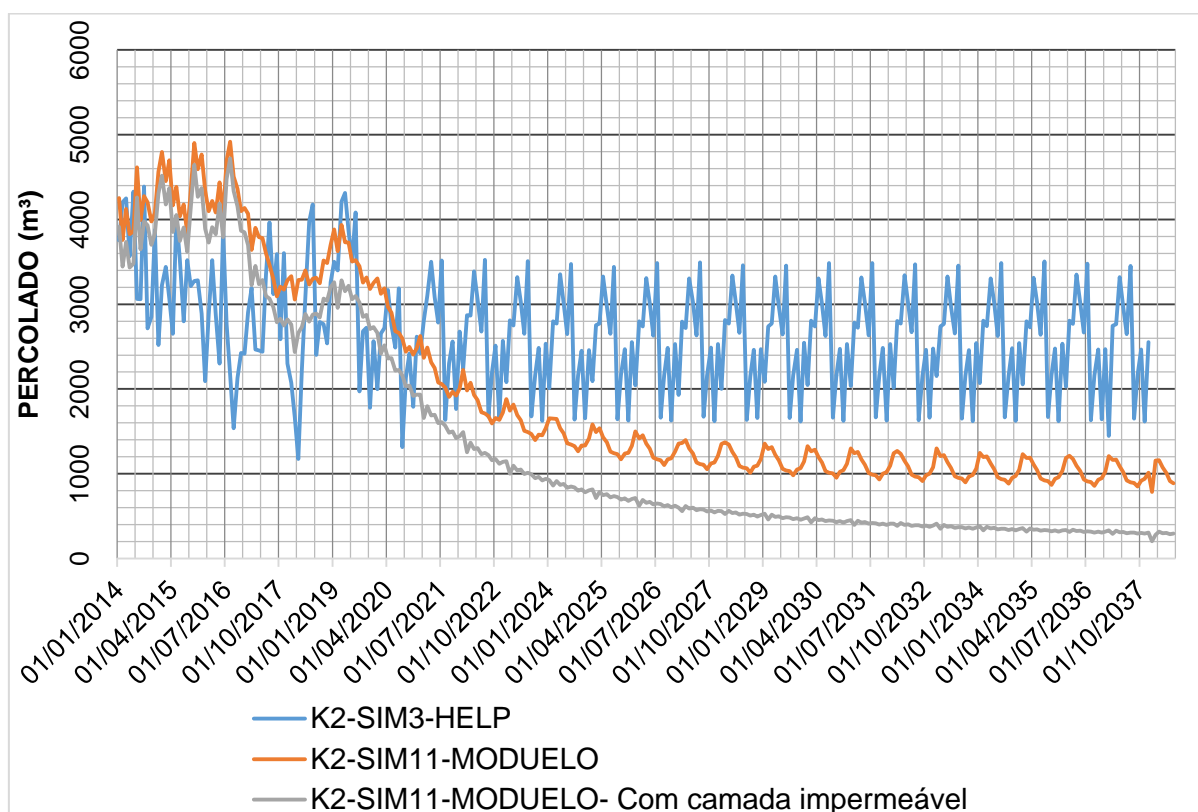
Fonte: A autora

Figura 28 - Simulações do maciço classe I do aterro industrial até 2038



Fonte: A autora

Figura 29 - Simulações do maciço classe II do aterro industrial até 2038



Fonte: A autora

As simulações do aterro sanitário até 2038 com as características atuais dos aterros mostrou uma repetição da geração, provavelmente pela repetição dos dados meteorológicos. No aterro industrial existiu uma leve queda da geração com o passar dos anos para o maciço classe I, e uma redução um pouco maior para o maciço classe II, provavelmente por causa da geomembrana já utilizada como cobertura nesse aterro. Cuartas et. al 2018, simulando parâmetros de influência em aterros, verificaram que a prática mais eficaz para reduzir o volume de chorume seria o uso de revestimento temporário de geomembranas impermeáveis durante a operação, e em menor grau, o uso de coberturas intermediárias ou cobertura final impermeável.

No MODUELO 4.0 foi possível simular a aplicação de uma camada impermeável conforme fosse sendo finalizada a última camada dos aterros. Para isso foram zerados os parâmetros de infiltração da última camada. No HELP 3.07 não foi possível fazer essa mesma abordagem porque esse modelo não considera o preenchimento gradual de resíduos no aterro. Ele simula a infiltração através de todas as camadas do aterro desde o início do período inserido no modelo, caso contrário, se fosse colocada uma camada impermeável superior, a simulação resultaria em nenhuma infiltração.

As simulações apresentaram o evidente benefício de uma cobertura final impermeável aplicada sobre a camada final dos aterros. Foram comparadas as simulações feitas no MODUELO 4.0 até 2038 com e sem camada impermeável para os dois aterros. Quando comparada a geração de percolato total do aterro sanitário (área1 e área encerrada juntas), figura 26, observa-se uma grande redução do percolato, isso porque o modelo considerou que a área encerrada também foi coberta com uma camada impermeável na época do seu fechamento, em 2012. Como a área encerrada é mais antiga, já possui vegetação, tem uma parte como antigo lixão e teve sua forma estimada para inserção no programa, optou-se por analisar a área 1 separadamente, nesse caso.

A comparação entre as simulações com e sem camada impermeável mostrou que a geração de percolato poderia ser reduzida em até 89% na área 1 do aterro sanitário no primeiro ano após o fechamento, considerando o percolato total gerado nesse ano. No maciço classe I do aterro industrial a redução seria de até 76% e no maciço classe II até 15% também considerando os volumes acumulados no período de um ano após o fechamento. Vale ressaltar que as simulações foram feitas como se nenhuma

precipitação infiltrasse após a colocação dessa camada, o que pode não ocorrer na realidade.

Albright *et. al.* (2013) avaliaram uma geomembrana como cobertura final para aterros em sete locais dos Estados Unidos, com precipitação anual de 740 a 1032 mm, eles monitoraram o balanço hídrico com um lisímetro de grande porte (10x20m), e verificaram a infiltração média de 0,4% da precipitação, isso quando utilizadas técnicas que minimizam o potencial dano à geomembrana. Os assentamentos característicos assim como a própria operação podem ocasionar danos, como rasgaduras ou furos, à geomembrana, que pode fazer com que infiltre mais precipitação do que o previsto, além de outras fontes de percolação. Ressalta-se que execução e manutenção das coberturas finais, ao longo do tempo, é essencial para que haja de fato a redução da infiltração. Mesmo assim são necessárias medições mais confiáveis da geração de percolato nos aterros para calibração dos modelos e para uma avaliação mais assertiva da geração de percolato futura.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho avaliaram-se dois aterros de resíduos, em escala real e em operação, de características diferentes e submetidos à mesma precipitação. Foram utilizados dois softwares de análise hidrológica de aterros, o HELP 3.07 e o MODUELO 4.0. A variação de alguns parâmetros de cálculo permitiu analisar as influências da cobertura, do resíduo e da precipitação na simulação da geração de líquidos percolados.

Os resultados mostraram que, mesmo com a média e baixa correlação entre os dados mensais simulados e os de campo aproximados, a ordem de grandeza deles foi a mesma e os valores acumulados no período analisado ficaram próximos. Mesmo assim, as simulações apresentam variações de volume gerado mais realistas que as encontradas em métodos empíricos, que apresentam gerações constantes.

As simulações apresentaram o evidente benefício de uma cobertura temporária e cobertura final impermeável aplicada conforme forem sendo finalizadas as camadas do aterro.

As simulações do aterro industrial, indicaram que possivelmente ocorre infiltração em áreas além da frente de serviço, possivelmente por falhas no material de cobertura. Para melhores resultados recomenda-se uma medição confiável da geração de percolado, um melhor controle dos bombeamentos e melhor caracterização dos resíduos (com uma média de cada tipo de resíduos que entra no aterro, e uma melhor especificação do item “outros”) e ensaios nesses resíduos, principalmente de infiltração em cada maciço (classe I e classe II)

No aterro sanitário seria importante fazer a medição da geração de percolado dos dois maciços separadamente, já que a área encerrada tem partes mais antigas onde a obtenção de dados para as simulações foi mais limitada, além de os dados meteorológicos antigos serem mais escassos, também recomenda-se fazer mais ensaios no material utilizado na cobertura, principalmente para determinação da condutividade hidráulica, capacidade de campo e umidade inicial.

Mesmo assim, caso seja obtida uma série de dados de geração de percolado confiáveis, pode-se inicialmente utilizar modelos mais simples e gratuitos como as redes neurais e o próprio HELP para calibração e simulação da geração futura.

Nesse trabalho não foi considerada a fração do percolado gerada pela degradação dos resíduos, nem os parâmetros de qualidade do líquido percolado

gerado, que em trabalhos futuros poderiam ser considerados. No MODUELO 4.0 é possível simular também essa parcela, já no HELP não.

Medir o tempo de trânsito do percolado desde a precipitação até sua coleta para o tratamento, auxiliaria na avaliação das simulações, e possibilitaria novas avaliações para prever qual aumento da geração e em quanto tempo ocorreria. Esse tempo poderia ser medido com a utilização de traçadores colocados sobre a superfície dos aterros no momento de uma precipitação, e posterior medição da concentração desse mesmo traçador no percolado coletado.

Considerando as etapas desenvolvidas nessa dissertação e a complexidade dos fenômenos que ocorrem em aterros de resíduos do ponto de vista quantitativo, conclui-se que os modelos computacionais são ferramentas valiosas para a gestão dos resíduos, principalmente na busca de técnicas economicamente viáveis e sustentáveis a longo prazo, que atuem no tratamento e redução de um dos principais passivos ambientais dos aterros de resíduos que são os líquidos percolados.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Abr. 1992.

\_\_\_\_\_. NBR 10.004: Resíduos sólidos. Classificação. Apresentação. 31 de maio de 2004.

\_\_\_\_\_. NBR **10.157**: Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação - Procedimento. 30 de dezembro de 1987.

\_\_\_\_\_. NBR **13.896**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto implantação e operação. 30 de setembro de 1997.

\_\_\_\_\_. NBR6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 08 Março 2016.

\_\_\_\_\_. NBR6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Out. 1984

\_\_\_\_\_. NBR14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos. Julho 2000.

\_\_\_\_\_. NBR 7181 : Solo – Análise Granulométrica. Dez. 1984.

ABUNAMA, T., OTHMAN, F., ANSARI, M. et al. Leachate generation rate modeling using artificial intelligence algorithms aided by input optimization method for an MSW landfill. **Environmental Science and Pollution Research** v.26, p.3368-3381, 2019.

ALBRIGHT, W.H.; BENSON, C. H.; APIWANTRAGOON P. Field Hydrology of Landfill Final Covers with Composite Barrier Layers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v.139, p.1-12. 2013.

ARRUDA, A. M. **Aterro sanitário – estudo de caso: ampliação do aterro sanitário do Município de Joinville/SC**. Monografia. (Departamento de Engenharia Civil – UDESC), 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS-ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2016**. São Paulo, SP. 2016. Disponível em: < [http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_apresentacao.cfm](http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm) >. Acesso em: 06 jun. 2018.

BACELAR, H.A.M. Tratamento de lixiviados produzidos em aterro de resíduos sólidos urbanos por meio de evaporação forçada. 2010. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <[http://www.getres.ufrj.br/pdf/BARCELAR\\_HAM\\_10\\_t\\_M\\_.pdf](http://www.getres.ufrj.br/pdf/BARCELAR_HAM_10_t_M_.pdf)>. Acesso em: 25 fev. 2017.

BAGCHI, A. Design of Landfills and Integrated Solid Waste Management. **John Wiley& Sons**. v.3 . New Jersey, 2004.

BASTIANI, F. **Avaliação da influência de elementos meteorológicos na vazão de lixiviado gerado no aterro sanitário do município de Lajeado/RS**. 2011.86p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Centro de Ciências exatas e Tecnológicas UNIVATES. Lajeado, RS, 2011. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/browse?type=author&order=ASC&rpp=90&value=Bastiani%2C+Fernanda>>. Acesso em: 7 abr. 2017.

BENGTSSON, L., BENDS, D., HOGLAND, W., ROSQVIST, H., AKESSON, M. Water Balance for Landfills of different Age. **Journal of Hidrology**, n. 158, p. 203-217, 1994.

BENNETT, A. The hidden problem of landfill leachate. **Filtration+Separation Magazine**. v. Março/abril 2016. p.30-35, 2016.

BERGER, K. Validation of the hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model for simulating the water balance of cover systems. **Environmental Geology**. v.39. 2000.

BERGUER, K. On the current state of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model. **Waste Management**. v.38, p.201–209. Janeiro, 2015.

BORTOLAZZO, W. M., **Estimativa da produção de percolados no aterro sanitário de Nova Iguaçu com a aplicação de modelos computacionais**. Rio de Janeiro, 2010. 211p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2015**. Brasília, 2017.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

CALABRÒ, P.S., GENILI, E., MEONI, E., ORSI, S., KOMILIS, D. Effect of the recirculation of a reverse osmosis concentrate on leachate generation: A case study in an Italian landfill. **Waste Management**. v. 76, p. 643-651, 2018.

CUARTAS, M.; LÓPEZ, A.; PÉREZ, F.; LOBO, A. Analysis of landfill design variables based on scientific computing. **Waste Management**. V.71, p.387-300. 2018.

DIXON, N.; JONES, D.R.V. Engineering properties of municipal solid waste. DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. **Manual de Drenagem de Rodovias**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 304p.

EL-FADEL, M., BOU ZEID, E., CHAHINE, W & ALAYLI, B. Temporal Variation Leachate quality from Pre-sorted and baled Municipal solid Waste with High Organic and Moisture content. **Waste management**, p. 269-282. 2001.

EPA – Environmental Protection Agency. **Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-help-model>> Acesso em: 05 nov. 2017.

FELLNER, J., BRUNNER, P.H. Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach. **Waste Management**. v.30, p.2084-2095, 2010.

GIA – Grupo de Ingeniería Ambiental. MODUELO 4.0 **Manual de Usuario**. Departamento de ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria – España. 2009a.

GIA – Grupo de Ingeniería Ambiental. MODUELO 4.0 **Manual Técnico**. Departamento de ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria – España. 2009b.

GIA – Grupo de Ingeniería Ambiental. **Software MODUELO 4.0**. Departamento de ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Disponível em: <[https://www.gia.unican.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=131&Itemid=668&lang=ES](https://www.gia.unican.es/index.php?option=com_content&view=article&id=131&Itemid=668&lang=ES)> Acesso em: 05 ago. 2017.

KARGAS, G., KERKIDES, P., SOTIRAKOGLU K., POULOVASSILIS, A. Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems. **Soil and Tillage Research**. v.158, p. 22-31, 2016.

KONIG, D. JESSBERGER, H. L. Waste Mechanics. Proc., 14th International conference on Soil Mechanics na Foundation Engineering, Special Report of the TC5 Technical Committee on Waste Mechanics, Hamburg, Germany, p.35-76, 1997.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. & IMGOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.26, o. 885-893, 2002.

GOMES, L. P. (coordenadora) **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras/Luciana Paulo Gomes (coordenadora)**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: <[https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5\\_tema\\_3.pdf](https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_3.pdf)> Acesso em: julho 2017.

GOOGLE EARTH. 2018. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/>> Acesso em: 20 ago. 2018.

GUYONNET, D.; DIDIER-GUELORGET, B.; PROVOST G. e FEUILLET C. Accounting for water storage effects in landfill leachate modeling. **Waste Management & Research**, 16, 3: 285-295, 1998.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal, **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, IBAM, 2001.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal, **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro, IBAM, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística..Cidades@. Disponível em:<<http://www.cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 de jun. de 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=agrometeorologia/boletimAgroclimatologico>> Acesso em: 10 nov. 2017.

ISSA, R. A. A. M. **DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESAGREGAÇÃO DAS CHUVAS DA CIDADE DE JOINVILLE/SC.2017.** 78p. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Civil. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

JOINVILLE. Prefeitura Municipal de Joinville – PMJ; Fundação do Meio Ambiente – FUNDEMA; **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Joinville.** Joinville, 2013.

JOINVILLE. Prefeitura Municipal de Joinville- PMJ; Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Urbano Sustentável de Joinville. **Joinville cidade em dados 2017.** Joinville, 2017. 76p.

LEDRA, L. **Métodos de preenchimento de falhas de dados pluviométricos: comparações para dados de 24 horas na cidade de Joinville,SC.** Joinville, 2017. 166p. Dissertação mestrado em engenharia civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

LINS, E.A.M., **A Utilização da Capacidade de Campo na Estimativa do Percolado Gerado no Aterro de Muribeca,** Recife, 2003. 142p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

LOBO A. **Desarrollo de MODUELO2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos.** Tese Doutorado- Universidade da Cantabria. Santander, 2003.

LÓPEZ, A., CALERO T., LOBO, A. Mathematical simulation to improve municipal solid waste leachate management: a closed landfill case. **Environmetal science and pollution research.** v. 25, p. 28169-28184. 2018.

LÓPEZ, A. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <carolini\_rodrigues@hotmail.com> em 8 ago. 2018.

LOUREIRO, S. M. **Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – IQS.** 2005. 489 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <[www.getres.ufrj.br](http://www.getres.ufrj.br)>. Acesso em: 07 mar. 2017.

MELLO, Y. R. de; KOEHNTOPP, P. I; OLIVEIRA T. M.; VAZ, C. **Distribuição de precipitação pluviométrica na região de Joinville**. Joinville, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia). Universidade da Região de Joinville – Univille.

MELLO, Y. **Distribuição de precipitação no município de Joinville(SC) e sua relação com a incidência de leptospirose**. Joinville, 2015. 92p. Dissertação (mestrado em saúde e meio ambiente) – Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE

MELO M. C., MONTEIRO, V. E. D., NEVES, M. L., ARAÚJO, J. M., JUCÁ, J. F. T., Estudos de Toxicidade em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. **Revista Biotecnologia**. ANO V, Setembro/Outubro, p. 48-52. 2002.

YOUNES, M. K., NOPIAH, Z.M., BASRI, N.E.A., BASRI, M.H., ABUSHAMMALA, M.F.M., YOUNES, M.Y., Landfill area estimation based on integrated waste disposal options and solid waste forecasting using modified ANFIS model, **Waste Management**, v.55, p. 3-11, 2016.

OLIVEIRA, L. & PASQUAL, A. **Monitoramento de Lixiviados de Aterro Sanitário**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27. Porto Alegre, 2000. Anais Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. 521p.

PADILLA, R. S. **Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários**. Belo Horizonte, 2007. 107 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

PAIXÃO, Joana Fidelis da. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília: IPEA, Relatório de Pesquisa, 2012.

PANTINI, S., VERGINELLI, I., LOMBARDI, F., Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests. *Waste Manage.* v.38, p.22–32. 2015.

PANTINI, S., VERGINELLI, I., LOMBARDI, F., SCHEUTZ, C., KJELDSEN, P., Assessment of biogas production from MBT waste under different operating conditions. *Waste Manage.* v. 43, p. 37–49. 2015b

PINTO, D.P.S. **Contribuição à avaliação de aterros de resíduos industriais**. 2011. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ROCCA, A. C. C., Drenagem sub-superficial em aterros sanitários. Revista de Limpeza Pública. São Paulo, 1981. v.8, n.19, pp.16-27. 1981.

ROCHA, E. F., **Determinação da condutividade hidráulica e da capacidade de campo de resíduos sólidos urbanos**. Viçosa, 2008. 90p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Viçosa.

SÃO MATEUS, M.D.S.C., MACHADO, S.L., BARBOSA, M.C., 2012. An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. Waste Manage. v.32, p.471–481, 2012.

SCHROEDER, P. R.; AZIZ, N. M.; LLOYD, C. M.; ZAPPI, P. A. (1994). **The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3**, EPA/600/R-94/168a, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, D. C.

SCHROEDER, P.R.; GIBSON, A.C.; SMOLEN, M.D. **The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model**. Vol II, Doc. for Version I, EPA /530-SW-84-101, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1984.

SILVA, C. E., GOMES, T. L., GRÄBIN, T. F. Aplicação de Modelos empíricos na estimativa da geração de percolado em aterro sanitário controlado In: **XII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006**, Figueira da Foz. Anais do XII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. v.1, p.1 – 10, 2006.

**SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (2016)** Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos -2016. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2016>> Acesso em: 06 jun. 2018.

SOUZA, G. **Monitoramento de parâmetros qualitativos e quantitativos de líquidos percolados de aterros sanitários: estudo em piloto experimental**. 2005. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TOZETTO, C. M., **Modelagem Matemática de Aterros Sanitários com a Simulação hidrológica da geração de lixiviado: estudo de caso do aterro sanitário de**



**Curitiba. Curitiba, 2008.** 156p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

TIBA, C., FRAIDENRAICH, N., MOSZKOWICZ, M., CAVALCANT, E.S.C., LYRA, F.J.M., NOGUEIRA, A.M.B., CALLEGOS, H.G. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife, Editora Universitária da UFPE. 111p., 200.

TUCCI, C E. M.; SILVEIRA, A L. L. da; BENETTI, A; LANNA, A E.L.; BIDONE, F; SEMMELMAN, F; LOUZADA, J. A.; BERTONI, J. C.; FILHO, K. Z.; BELTRAME, L. F. S.; BORDAS, M. P.; PESSOA, M. L.; CAICEDO, N. L.; CHAVALLIER, P.; PORTO, R. L.; CLARKE, R. T. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**.4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014.

WANG, J.; WANG, P.; QIN, Q.; WANG, H. The effects of land subsidence and rehabilitation on soil hydraulic properties in a mining area in the Loess Plateau of China. **Catena**. v.159, p.51-59. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.08.001>>.

XU, Q., KIM, H., JAIN, P., TOWNSEND, T.G. Hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) modelling in bioreactor landfill design and permitting. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v.14, p. 38–46. 2011.