



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Kesia Yuli da Silva Pereira

ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE LIXIVIADO NO INTERIOR DO ATERRO SANITÁRIO DE ITABIRITO-MG

Ouro Preto

2021

Estimativa da quantidade de lixiviado no interior do Aterro Sanitário de Itabirito-MG

Kesia Yuli da Silva Pereira

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Ambiental na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 25/08/2021

Área de concentração: Resíduos Sólidos

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme José Cunha Gomes – UFOP

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436e Pereira, Kesia Yuli da Silva.

Estimativa da quantidade de lixo no interior do Aterro Sanitário de Itabirito-MG. [manuscrito] / Kesia Yuli da Silva Pereira. - 2021.
66 f.: il.: color., gráf., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Gestão integrada de resíduos sólidos. 2. Aterro sanitário - Lixiviação. 3. Meio ambiente - Contaminação. I. Gomes, Guilherme José Cunha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 628.4(815.1)

Estimativa da quantidade de lixiviado no interior do Aterro Sanitário de Itabirito-MG

Kesia Yuli da Silva Pereira

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Ambiental na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 25/08/2021

Banca examinadora:

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme José Cunha Gomes - UFOP

Membro: Prof. D.Sc. Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP

Membro: D.Sc. Marina de Medeiros Machado - UFOP

*Dedico este trabalho a toda minha família,
Principalmente aos meus pais que sonharam
esse sonho comigo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade e suporte durante a elaboração desse trabalho.

A toda minha família, amo cada um de vocês. Especialmente meus pais, Ceres e Enoque, por todo apoio e amor. Minhas irmãs, Karla e Kamilla, pelo incentivo e companheirismo. Às orações da minha vovó Maria José e amor do meu vovô Francisco (in memoriam). Tios avós, padrinho, tios e primos.

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto, que me ofereceu todo suporte com um ensino de qualidade. Ao DEAMB e a todos meus professores pela excelência, vocês são os melhores. Agradeço ao professor Guilherme pela orientação nesse trabalho e por todo auxílio que me deu, eu o admiro muito.

Às minhas amigas, Ana, Carine e Júlia, por todos os bons momentos, amor e amparo. Aos amigos, em especial Lívia, Gustavo, Lucas e Juliano.

Ao PET Ambiental por tanto aprendizado. Ao Chico, Aníbal, Letícia, Camilla e todo o grupo maravilhoso.

A todos que se fizeram presentes contribuindo para momentos inesquecíveis e muita amizade, em especial ao Didi (in memoriam), Maria Júlia, Bruna, Amanda, Renata e as meninas da República Bombocado.

A Tamiris, Marina e Renê por me ajudarem na elaboração desse trabalho.

Por fim, a todos que contribuíram nessa trajetória acadêmica.

RESUMO

O crescimento populacional associado ao aumento do consumo implica na expansão da geração de resíduos sólidos, causando preocupações ao meio ambiente. Além disso, problemas relacionados à falta de investimento público na área do saneamento faz com que o Brasil tenha dificuldades de inserir em suas políticas uma destinação final ambientalmente correta dos resíduos sólidos para todo país. Uma das maiores preocupações ao que diz respeito à contaminação ambiental de um sistema de disposição final de resíduos sólidos urbanos é a geração de lixiviado. O lixiviado é um líquido de origem orgânica e inorgânica formado durante a decomposição dos resíduos pelos microrganismos com alta carga poluidora. Seu gerenciamento incorreto pode causar grandes problemas ambientais. O presente trabalho buscou determinar a evolução das cotas ao longo dos anos e analisar a geração de lixiviado do Aterro Sanitário de Itabirito - MG, buscando entender a geração nula durante 15 anos de operação. Para isso, foram utilizados três métodos empíricos: Método Suíço, Método Racional e Método do Balanço Hídrico. Observou-se que o aterro atingirá sua vida útil na cota 1019, na metade de 2030, e se conclui que o volume de lixiviado gerado pode estar ainda contido na camada de resíduos do aterro. Assim, sugere-se a coleta de dados para análises geotécnicas para que a solução proposta seja ainda mais fundamentada.

Palavras-chaves: Minas Gerais, Resíduos Sólidos Urbanos, Aterro Sanitário, Lixiviado, Itabirito.

ABSTRACT

Population growth associated with increased consumption competes in the expansion of solid waste generation, causing environmental concerns. In addition, problems related to the lack of public investment in the area of sanitation make Brazil have difficulties in inserting in its policies an environmentally correct final destination of solid waste for the whole country. One of the biggest concerns regarding the environmental contamination of a final urban solid waste disposal system is the generation of leachate. Leachate is a liquid of organic and inorganic origin formed during the decomposition of waste by microorganisms with a high polluting charge. Its incorrect management can cause major environmental problems. The present work sought to determine the evolution of the quotas over the years and analyze the generation of leachate from the Sanitary Landfill of Itabirito - MG, seeking to understand the zero generation during 15 years of operation. For this, three empirical methods were used: Swiss Method, Rational Method and Water Balance Method. It was observed that the landfill will reach its useful life at 1019, in the middle of 2030, and it is concluded that the volume of leachate generated may still be contained in the landfill's waste layer. Thus, it is suggested to collect data for geotechnical analysis so that the proposed solution is even more grounded.

Keywords: Minas Gerais, Solid Waste, Landfill, Leachate, Itabirito.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais partes integrantes de um aterro sanitário.....	8
Figura 2 - Disposição das células diárias.....	9
Figura 3 - Composição gravimétrica dos RSU do Brasil em 2013.	10
Figura 4 - Disposição dos RSU gerados no Brasil.	11
Figura 5 - Esquema da formação de lixiviado.....	12
Figura 6 - Reprodução do modelo de Alslaibi et al (2013).	21
Figura 7 – Vista lateral do aterro sanitário grego.	23
Figura 8 - Estrutura dos solos.....	26
Figura 9 - Localização da UTE Itabirito.....	28
Figura 10 - Localização do Aterro de Itabirito.	31
Figura 11 - Esquema da célula diário do Aterro de Itabirito.	33
Figura 12 – Imagens a instalação do sistema de drenagem.....	34
Figura 13 - Crescimento populacional do município de Itabirito.....	38
Figura 14 - Evolução das cotas do aterro sanitário de Itabirito ao longo dos anos.	41
Figura 15 - Estimativa da vazão de lixiviado do RCA.	42
Figura 16 - Vazão média de lixiviado utilizando o Método Suíço.....	44
Figura 17 - Vazão média de lixiviado utilizando o Método Racional.	44
Figura 18 - Vazão média de lixiviado utilizando o Método do Balanço Hídrico. ...	45
Figura 19 - Estimativa de lixiviado pelo método de Alslaibi et al (2013).	45
Figura 20 - Comparação dos métodos de estimativa de lixiviado.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Práticas de gerenciamento por renda.	5
Tabela 2 - Íons encontrados no lixiviado e sua origem.	15
Tabela 3 - Valores do Coeficiente C para o cálculo do ES.	18
Tabela 4 - Água disponível (mmH ₂ O/m de solo).	19
Tabela 5 - População, PIB e IDHM dos municípios da UTE do Rio Itabirito.	29
Tabela 6 - Dados de precipitação (mm) e evapotranspiração (mm).	30
Tabela 7 - Procedimento do método do Balanço Hídrico.	36
Tabela 8 - Dados de evolução das cotas do aterro para a 1ª etapa.	39
Tabela 9 - Dados de evolução das cotas do aterro para a 2ª, 3ª e 4ª etapas.	40
Tabela 10 - Evolução do aterro ao longo dos anos.	40
Tabela 11- Tabela para estimar o coeficiente de compactação (K) para aterros sanitários.	43
Tabela 12 - Relação das cotas com o volume de vazios.	47
Tabela 13 - Volume de vazios disponível para cada etapa.	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

A – Área

EP – Evapotranspiração

ES – Escoamento Superficial

F – Fluxo

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NBR – Norma Brasileira

P – Precipitação

PGRS – Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

PIB – Produto Interno Bruto

PNRS – Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Q – Vazão

RCA – Relatório de Controle Ambiental

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

S – Armazenamento

SNIS – Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento

UTE – Unidade Territorial Estratégica

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo Geral.....	2
1.1.1	Objetivos Específicos.....	2
2	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	3
2.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	3
2.2	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUA CLASSIFICAÇÃO.....	4
2.2.1	Formas de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos.....	6
2.3	RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL	10
2.4	LIXIVIADOS.....	12
2.4.1	Composição do lixiviado de Aterro Sanitário.....	14
2.5	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE GERAÇÃO DE LIXIVIADO	15
2.5.1	Método Suíço	16
2.5.2	Método Racional	17
2.5.3	Método do Balanço Hídrico.....	17
2.5.4	Outros Métodos.....	21
2.6	PRINCIPAIS PROPRIEDADES E ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO PARA APLICAÇÃO DE ESTIMATIVA DE VOLUME DE VAZIOS EM ATERROS SANITÁRIOS	25
3	Metodologia.....	28
3.1	ÁREA DE ESTUDO	28

3.1.1	Estudo de caso: Aterro Sanitário de Itabirito	31
3.2	EVOLUÇÃO DO ATERRO.....	35
3.3	ESTIMATIVA DO LIXIVIADO.....	36
3.4	RELAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO ATERRO COM A AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA GERAÇÃO DE LIXIVIADO	37
4	Resultados	38
4.1	EVOLUÇÃO DO ATERRO.....	38
4.2	ESTIMATIVA DE LIXIVIADO NO ATERRO SANITÁRIO DE ITABIRITO.....	42
4.2.1	Método Suíço	43
4.2.2	Método Racional	44
4.2.3	Método do Balanço Hídrico	45
4.2.4	Comparação dos métodos	46
4.3	RELACIONANDO A AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA GERAÇÃO DE LIXIVIADO COM A EVOLUÇÃO DA COTA DO ATERRO	47
5	Conclusões.....	49
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos se apresenta como uma das principais preocupações ao meio ambiente. O consumo acelerado nos tempos atuais coopera para que os bens materiais tenham vida útil cada vez menores, transformando-se em resíduos com mais facilidade (BARBOSA; IBRAHIN, 2014). Tudo isso junto ao crescimento da população, e à falta de investimento público na área do saneamento, resulta em uma complicação do Brasil de inserir em suas políticas uma destinação final ambientalmente correta dos resíduos sólidos para todo país (TRAJANO, 2016).

A disposição inadequada dos resíduos sólidos causa diversos impactos ambientais negativos, como a contaminação dos solos, das águas e do ar. Além disso, implica na diversidade dos ecossistemas locais e gera problemas sanitários que compromete a saúde pública (TOZETTO, 2008).

Embora os investimentos em saneamento básico tenham aumentado nos últimos anos no Brasil, os lixões ainda são comuns e são caracterizados por áreas a céu aberto onde são depositados os resíduos sem nenhum tipo de tratamento ou planejamento (BARBOSA; IBRAHIN, 2014). No Brasil, cerca de 60% dos municípios brasileiros ainda utilizam os lixões como principal meio de disposição final de resíduos (ABRELPE, 2015).

Os aterros sanitários são obras da engenharia contidas de uma série de sistemas para o confinamento ao longo prazo dos resíduos sólidos e representam a melhor alternativa para a disposição dos resíduos sólidos (MIHELICIC et al., 2017).

A decomposição, sobretudo biológica, dos resíduos sólidos formam líquidos lixiviados caracterizados pela mistura de compostos orgânicos e inorgânicos, (BARBOSA; IBRAHIN, 2014), e é considerado um potencial agente de contaminação para o solo, águas superficiais e águas subterrâneas.

De acordo com Trajano (2016) e Mihelcic et al. (2017), os aterros sanitários tem um sistema de drenagem para a coleta, armazenamento e o tratamento desse lixiviado, buscando minimizar os impactos negativos causados por ele.

A vazão de lixiviado depende de condições locais, como as condições climáticas, a disponibilidade hídrica, tipo de aterro e características geotécnicas do solo (EL-FADEL et al., 1997) e pode ser estimada por métodos empíricos e/ou computacionais (KOERNER & DANIEL, 1997).

A geração nula de lixiviado em aterros sanitários, ou seja, a não geração de lixiviado na lagoa de armazenamento, implica em vários problemas para o aterro sanitário. Uma das características de um aterro sanitário é a coleta e armazenamento desse líquido. Sua ausência pode sinalizar para um sistema de drenagem falho e contaminação do solo, águas superficiais e água subterrânea.

O Aterro Sanitário de Itabirito, localizado no município de Minas Gerais, já opera há 15 anos e a sua geração de lixiviado é nula até a data presente. Essa constatação abre diversos questionamentos quanto à eficiência do aterro, principalmente quanto às as condições ambientais do entorno dessa área.

Diante da problemática apresentada, este trabalho se propõe, portanto, a retroanalisar a evolução do aterro ao longo dos anos para estimar a geração de lixiviado. Essa estimativa será útil para uma análise do motivo de nenhuma vazão ter surgido no tanque de armazenamento de lixiviado.

1.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem por objetivo a analisar e explicar a geração nula de lixiviado com a evolução do Aterro Sanitário de Itabirito.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Determinar a evolução das cotas do aterro ao longo dos anos.
- ✓ Estimar as vazões (m^3 /ano) de lixiviado do aterro por diferentes métodos.
- ✓ Analisar a geração nula de lixiviado do aterro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a norma brasileira NBR 10004, de 2004, os resíduos sólidos são definidos como (ABNT, 2004):

“aqueles resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade 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 técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Para Mihelcic et al. (2017), são considerados resíduos sólidos qualquer item físico que não é mais considerado, seja pela comunidade ou pelo proprietário, útil ou com valor. A sua gestão requer seis princípios básicos, são eles a geração, o armazenamento, a coleta, o transporte, o processamento, e o descarte.

2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), segundo a NBR 15849 (ABNT, 2010) são

“resíduos que, em conformidade com o estabelecido na Resolução CONAMA no 404/2008, sejam provenientes de domicílios, serviços de limpeza urbana, pequenos estabelecimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços, que estejam incluídos no serviço de coleta regular de resíduos e, que tenham características similares aos resíduos sólidos domiciliares.”

A disposição final de resíduos sólidos é conhecida como um dos maiores problemas ambientais devido às grandes quantidades que são gerados, suas características físico-químicas incentivam a sua disposição em locais adequados, no caso dos RSU, em aterros sob responsabilidade do poder municipal (NETO; MOREIRA, 2010). A deposição direta destes sobre o solo pode provocar a sua contaminação, bem como a do lençol freático, além de favorecer a proliferação de vetores transmissores de doenças e emissão de gases.

Com a intensa urbanização entre 1940 a 1970, percebeu-se um aumento no número de geração de RSU, conseqüentemente, também, no valor do PIB. A partir da década de 80 foram iniciadas medidas de disposição destes resíduos, surgindo os primeiros programas de coleta seletiva no Brasil (SANTIAGO, 2021). No entanto, ainda não existiam leis próprias para a questão dos resíduos, sendo dispostas algumas diretrizes apenas no Art. 23 da Constituição Federal Brasileira de 1988 e na Lei de Crimes Ambientais de 1998.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) surgiu em 2010 a partir da Lei nº 12.305/10, que prevê um sistema de gestão e transparência dos resíduos sólidos de setores públicos e privados. A PNRS é considerada um marco, uma vez que contém instrumentos para o avanço do país nas questões ambientais e socioeconômicas, e reúne as principais diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos (NETO; MOREIRA, 2010).

Assim, a gestão dos resíduos sólidos urbanos visa analisar os objetivos da prevenção da poluição, reduzindo a geração de resíduos e poluentes que prejudiquem o meio ambiente e também a saúde pública.

2.2 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUA CLASSIFICAÇÃO

O Gerenciamento de Resíduos Sólidos é caracterizado por um conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, onde são envolvidas as etapas de coleta, transporte, tratamento e destinação final correta que devem estar de acordo com o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) (BARBOSA; IBRAHIN, 2014). As práticas de gerenciamento são influenciadas de acordo com as rendas, ou seja, quanto maior a renda, melhor o gerenciamento (Tabela 1).

Segundo Barbosa e Ibrahin (2014), os resíduos são classificados em dois grandes grupos, sendo eles quanto sua origem e periculosidade. Essa classificação é de extrema importância para salientar quais os impactos ambientais podem estar determinando o aumento da poluição e as suas conseqüências.

Tabela 1- Práticas de gerenciamento por renda.

Atividade	Renda Baixa	Renda Média	Renda Alta
Coleta	É ineficiente. O serviço se limita às áreas de grande visibilidade. Coleta geral abaixo de 50%.	Maior frota de veículos, serviço melhor. Taxa de coleta geral de 50 a 80%.	Serviço eficiente. Taxa de coleta geral superior a 90%.
Reciclagem	Embora haja maior pontos de reciclagem pelo setor informal, taxas não são elevadas. Mercado não regularizado e grandes variações de preços.	Aumento da tecnologia, processos de triagem e de instalações. Preços variam.	Alta coleta de materiais recicláveis e alta tecnologia de triagem e de processamento de instalações. Grande taxa de regulamentação.

Fonte: Santiago (2021).

É necessário que haja um estudo dos tipos de resíduos para que sejam encontradas medidas mitigadoras para a sua disposição final, buscando conhecer quais etapas operacionais devem ser escolhidas (separação, armazenamento, transporte e disposição) de acordo com o PGRS. A seguir, de forma ilustrativa, são apresentadas as principais classificações de resíduos sólidos.

- Quanto à origem:

1. Resíduos domiciliares: são os resíduos de origem das atividades domésticas de um município, sendo divididos entre úmidos e secos.
2. Resíduos de limpeza pública: derivados das atividades do saneamento básico do município.
3. Resíduos da construção civil.
4. Resíduos dos serviços de saúde: resíduos biológicos.

5. Resíduos industriais: de origem das atividades industriais e processos produtivos.
6. Resíduos agropecuários: resíduos provenientes das atividades de agricultura e pecuária, sendo divididos em orgânicos e inorgânicos.
7. Resíduos dos serviços terrestres: provenientes de atividades como ferrovia e pavimentação.
8. Resíduos de mineração: resíduos de origem do beneficiamento e demais processos extração de minérios

- Quanto à periculosidade

A norma NBR 10004, de 2004, trata sobre a classificação de resíduos sólidos quanto a sua periculosidade, a característica apresentada pelo resíduo devido as suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem representar potencial de risco à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos são enquadrados como:

1. Resíduos Classe I – Perigosos: são aqueles resíduos que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade
2. Resíduos Classe II – não perigosos, que são divididos em:
 - a) Resíduos Classe II – A: Não inertes: são aqueles resíduos que podem ter as seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
 - b) Resíduos Classe III – B: Inertes: São resíduos que não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente.

2.2.1 Formas de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos

A Lei n. 12.305 dispõe sobre a disposição final ambientalmente adequada de acordo com o Art 7º da PNRS, estabelecendo que os rejeitos sejam depositados em aterros sanitários, atentando-se às normas operacionais a fim de se evitar riscos de contaminação ao meio ambiente e problemas de segurança e saúde pública

(BARBOSA; IBRAHIN, 2014). Infelizmente não é o que se vê na prática, uma vez que não são todos os municípios que contemplam desse tipo de disposição final.

2.2.1.1 Lixão

O lixão consiste na disposição dos resíduos diretamente no solo sem que haja uma camada de proteção de base, colaborando então, para a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Dessa forma, o lixão facilita a proliferação de vetores vinculados ao ambiente. Nesse tipo de disposição dos RSU não há um controle da origem e da quantidade dos resíduos gerados, também não existe um controle de compactação e das condições do solo. O lixão é uma alternativa de disposição dos RSU inadequada do ponto de vista ambiental/sanitário (BARBOSA; IBRAHIN, 2014).

2.2.1.2 Aterro Controlado

O aterro controlado já demonstra mais preocupação ambiental e sanitária, uma vez que possui camada de cobertura diária e final. Existe maior controle da composição dos resíduos a serem lançados e da compactação. Porém, não são todos que possuem impermeabilização da base e também não há a coleta e tratamento do chorume gerado (TRAJANO, 2016).

2.2.1.3 Aterro Sanitário

Pela definição da NBR 15849 (ABNT, 2010), aterro sanitário é

“uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume

permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário”.

Para Mihelcic et al. (2017), os aterros são instalações artificiais projetadas e operadas para o confinamento de longo prazo dos resíduos sólidos (Figura 1). Primeiramente, o aterro deve conter uma camada com material de baixa permeabilidade, como a argila compactada ou um revestimento de geomembrana, para que os produtos da decomposição dos resíduos não afetem o solo. Um sistema de drenagem é de extrema importância para que a água superficial e o lixiviado gerado sejam armazenados. Os poços de coleta atuam na captura dos gases gerados durante a decomposição da camada de resíduos sólidos.

Figura 1 - Principais partes integrantes de um aterro sanitário.

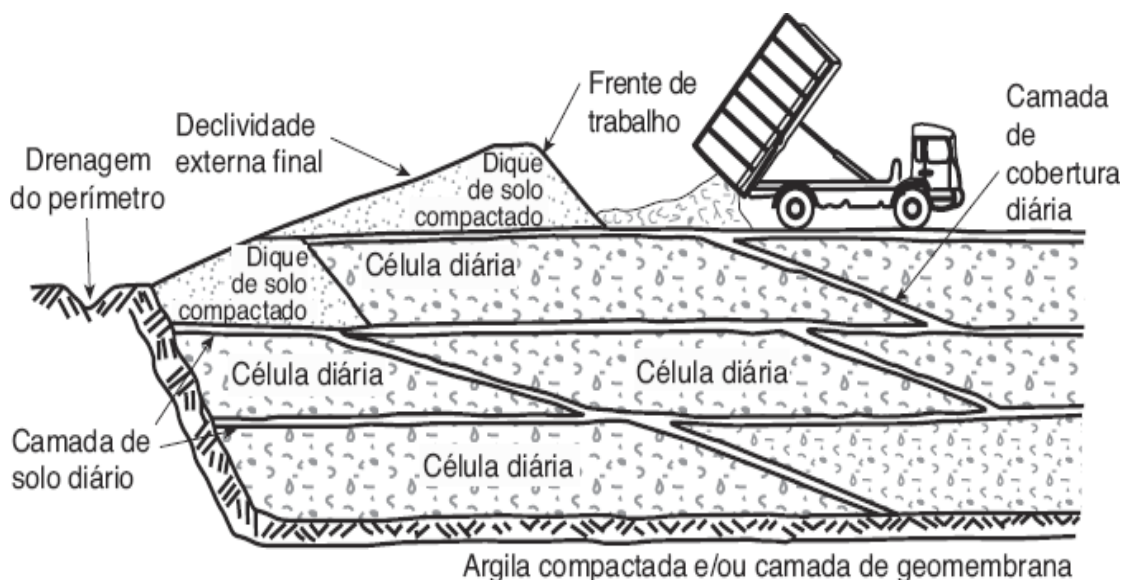


Fonte: Mihelcic et al. (2017).

O resíduo é descarregado no aterro sanitário sobre o terreno, sendo depositado de forma ordenada, e em seguida é coberto por camadas do próprio solo local, isolando-se, assim, do ambiente, (Figura 2). A camada de solo compactado diária é importante para que o contato do resíduo com o meio externo seja o mínimo possível, além de minimizar o odor. A drenagem de perímetro auxilia para que a água superficial não chegue na estrutura do aterro, podendo comprometer o empreendimento.

Em seguida são formadas as células, de onde se é produzido o gás e liberado o lixiviado, substância líquida formada pela decomposição dos resíduos orgânicos em contato com a água da chuva que infiltra o aterro (BARBOSA; IBRAHIN, 2014).

Figura 2 - Disposição das células diárias.



Fonte: Mihelcic et al. (2017).

O lixiviado é acumulado ao fundo dessas células e tende a infiltrar o solo, o que é um risco para a contaminação do solo e do lençol freático, por isso é fundamental que o solo esteja selado antes da deposição do resíduo.

As normas exigem então a captação e tratamento dos gases (NBR 8419 e NBR 8849), e do lixiviado (NBR 8419) gerado no aterro, como ações mitigadoras para o impacto (MIHELICIC et al., 2017).

A proteção ambiental nos aterros ocorre pela combinação de quatro barreiras: (1) localização apropriada; (2) projeto totalmente específico e implementado cuidadosamente durante a construção e operação; (3) exclusão dos resíduos inadequados; (4) coleta e uso de gás de aterro como fonte de energia; (5) monitoramento de curto e longo prazo”, (MIHELICIC et al., 2017, p 576).

O local da implantação do aterro sanitário deve ser escolhido da maneira certa, abrangendo grandes dimensões, e, devido aos seus inconvenientes operacionais

(como o mau cheiro originário da decomposição dos resíduos sólidos), ser mais afastado das zonas urbanas.

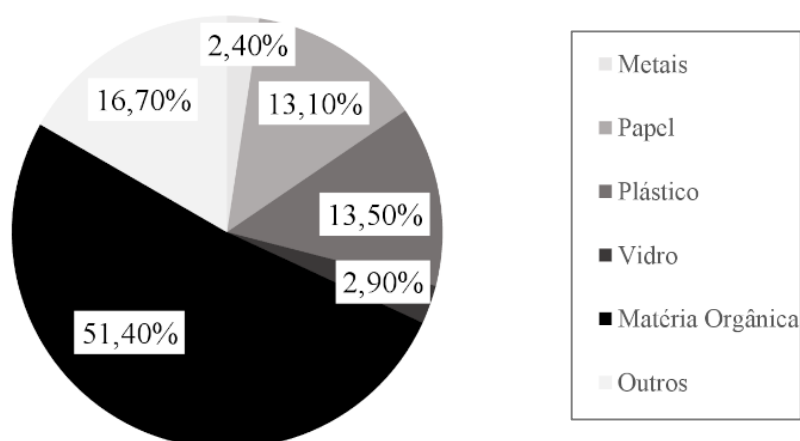
2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

De acordo com os dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, em 2013 foram geradas 76,4 milhões de toneladas de RSU, dos quais 69,1 milhões de toneladas foram coletadas. Do volume coletado, cerca de 40 milhões de toneladas foram destinados para aterro sanitário (ABRELPE, 2015). O número ainda é pouco, considerando a importância de uma boa destinação para os resíduos sólidos.

A média de geração de resíduos per capita no Brasil é de 0,99 kg/hab.dia (SNIS, 2019), e com o aumento do consumo, esse número ainda tende a crescer.

A composição dos RSU no Brasil é bem variada, sendo de maior porcentagem os resíduos de matéria orgânica (Figura 3). Em muitos lugares, existe um tratamento para esse tipo de resíduo, evitando que seja misturado aos demais tipos de resíduos.

Figura 3 - Composição gravimétrica dos RSU do Brasil em 2013.



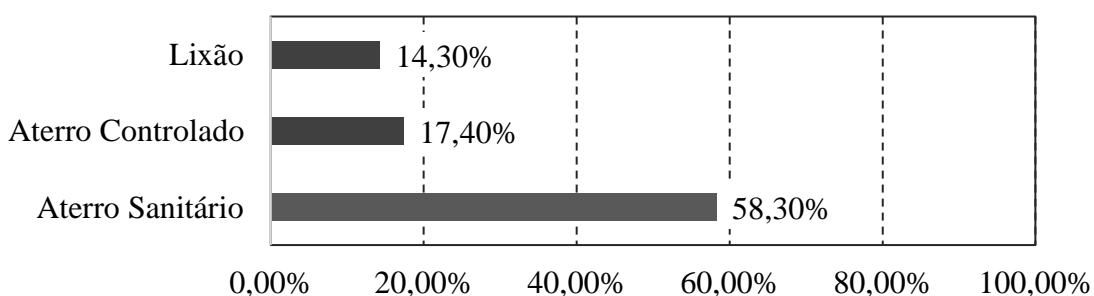
Fonte: Adaptado de ABRELPE (2015).

Dentre os princípios básicos da PNRS, a obediência a ordem de prioridades de ações é fundamental, sendo ela a não geração de resíduos, a sua redução, a reutilização, a reciclagem e o seu tratamento, incluindo a sua disposição ambientalmente adequada (SANTIAGO, 2021).

No Brasil, não são todos os municípios que utilizam aterros sanitários. A consequência é a utilização de outras soluções de descarte, causando problemas ambientais e, conseqüentemente, à saúde da população (Figura 4).

De acordo com Marques (2005), a situação se agrava nos municípios com população inferior a 20.000 habitantes, o equivalente a 73,1% dos municípios brasileiros, onde 68,5% dos resíduos gerados são dispostos em locais inadequados. O problema gerado pelos resíduos sólidos urbanos apresenta impactos não apenas no ambiente, como também socioambientais.

Figura 4 - Disposição dos RSU gerados no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2015).

Segundo a ABRELPE (2015), a disposição final ambientalmente adequada teve aumento em ritmo lento durante os últimos anos. Em 2008, mais de 55% do total de resíduos gerados no Brasil país eram destinados para aterros sanitários, em 2013 o número chegou a quase 60%.

É importante frisar que, com a PNRS em vigor, os lixões tem prazo para o fechamento, esperando-se um aumento do número de aterros sanitários.

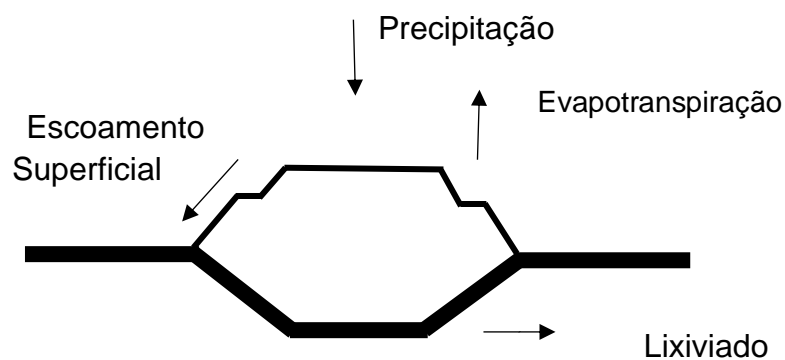
2.4 LIXIVIADOS

Os resíduos sólidos se decompõem e dão origem a um líquido que, associado à água da chuva, é chamado de lixiviado, ou ainda por outras denominações, como chorume e percolado (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000), e é definido como água que entra em contato com os resíduos e se transforma em água residual contaminada (MIHELCIC et al.,2017).

O lixiviado constitui um problema sério relativo à degradação ambiental. Em aterro sanitário é formado em decorrência da percolação intermitente e não uniforme de água que infiltra a massa compactada de resíduos, lixiviando os compostos solúveis ali encontrados (Figura 5).

O volume de lixiviado a ser gerado pelo aterro sanitário depende de vários fatores, como a precipitação, a temperatura, os processos físicos, químicos e biológicos, entre outros.

Figura 5 - Esquema da formação de lixiviado.



Fonte: Autora (2021).

A gestão do lixiviado necessita de um sistema para que seja contido e não gere problemas ambientais: (1) barreiras hidráulicas que limitam a capacidade de infiltração e/ou escoamento, (2) sistemas de coleta que se baseiam na gravidade para leva-lo até um reservatório externo e (3) um sistema para seu tratamento (MIHELCIC et al., 2017).

Ainda, de acordo com Mihelcic (2017), uma vez que o líquido lixiviado do aterro é muito semelhante à água residual industrial, deve-se considerar etapas parecidas para o seu tratamento. Depois de recolhido, o lixiviado pode ser transportado para uma estação de tratamento de águas residuais municipais. Outra solução é o tratamento *in loco* e, posteriormente, descartado na terra ou água. A escolha vai depender da natureza do lixiviado, dos efeitos ambientais do seu descarte e dos custos de transporte e tratamento do lixiviado.

O volume de lixiviado tem a sua origem em maior quantidade da precipitação atmosférica e, em menor, da decomposição biológica dos resíduos aterrados (SILVA, 2009).

A vazão de lixiviado depende bastante das condições locais, como as condições climáticas, a disponibilidade hídrica, tipo de aterro e características geotécnicas do solo. Em cenários de aterros com grande disposição de resíduos orgânicos e úmidos, também se espera uma maior quantidade dessa vazão, pois se associa ao produto das atividades de decomposição pelos microrganismos (EL-FADEL et al., 1997).

Nos projetos de aterros sanitários há a construção de uma camada de baixa impermeabilização no fundo da base do aterro e um sistema de drenagem para que o lixiviado possa ser transportado a um reservatório para a sua coleta e posterior tratamento.

Outro fator importante é a construção de um sistema de drenagem para as águas pluviais, visando evitar que a água precipitada se acumule e infiltre no aterro e a maior formação de lixiviado (TOZETTO, 2008). Ainda, a falta de um sistema de coleta de lixiviado eficiente (SIMÕES, 2013) e o grau de compactação do solo (NAVES, 2013) podem reduzir o volume do lixiviado. Naves (2013) observou que a compactação do solo influencia na redução da permeabilidade, analiticamente constatou a redução do volume de lixiviado quando o grau de compactação foi igual a 100%.

De acordo com Silva (2009), mesmo quando o aterro encerra suas atividades, a geração do lixiviado continua. Além disso, quanto mais antigo é o empreendimento, menos biodegradável é o lixiviado, necessitando de tratamentos mais complexos.

2.4.1 Composição do lixiviado de Aterro Sanitário

A composição do lixiviado varia consideravelmente dependendo de fatores climáticos, umidade, fatores geotécnicos do solo do aterro e do resíduo que o aterro recebe (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). A decomposição dos resíduos ocorre devido diversos processos físicos, químicos e biológicos, sendo dominantes os processos biológicos.

Para entender sobre a composição do lixiviado, é necessário entender as fases da sua formação. Souto (2009) descreve a decomposição dos resíduos sólidos em quatro fases, sendo elas a fase aeróbia, a fase anaeróbia ácida, a fase metanogênica instável e a fase metanogênica estável. O termo "instável" diz respeito à inibição da produção de metano temporária, devido a alterações climáticas locais.

As quatro fases são descritas abaixo:

- Fase aeróbica: Os resíduos recém aterrados contêm uma parcela de ar, assim como a água da chuva, que é utilizado pelos microrganismos aeróbios para a degradação da matéria orgânica. Essa degradação gera produtos parcialmente degradados, como ácidos orgânicos e também gás carbônico. (SILVA, 2009). Com o fim do oxigênio disponível, o aterro entra em condições anaeróbias de decomposição.
- Fase anaeróbica ácida: Na fase ácida a degradação é feita predominantemente por microrganismos acidogênicos, na qual a matéria orgânica é convertida em gás carbônico, amônia, água e ácido acético, (SILVA, 2009). Em países tropicais essa fase é mais rápida, devido à temperatura.
- Fase metanogênica instável: diz respeito à transição entre as fases ácida e fase metanogênica, em que há um equilíbrio entre as populações que degradam e produzem os ácidos orgânicos.
- Fase metanogênica estável: É a fase em que a população de microrganismos metanogênicos e acetogênicos crescem o suficiente para degradar compostos orgânicos voláteis das fases anteriores. O lixiviado proveniente dessa fase apresenta coloração mais escura e forte odor (SOUTO, 2009), chamado de maturação final.

No que diz respeito à composição do lixiviado (Tabela 2), este pode conter matéria orgânica solubilizada e dissolvida, produtos da digestão anaeróbia, microrganismos, nutrientes e produtos como inseticidas (SILVA, 2009), tais como:

- Matéria orgânica dissolvida (MOD).
- Macropoluentes inorgânicos.
- Elementos traços: Cobre (Cu), Zinco (Zn), Níquel (Ni), Chumbo (Pb).
- Compostos orgânicos xenobióticos (COXs).
- Metais que são encontrados em baixa concentração.

Tabela 2 - Íons encontrados no lixiviado e sua origem.

Íons	Origem
Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Material orgânico, entulhos de construção, cascas de ovos
PO_4^{3-} , NO_3^- , CO_3^{2-}	Material orgânico
Cu^{2+} , Fe^{2+} , Sn^{2+}	Resíduo eletrônico, latas.
Hg^{2+} , Mn^{2+}	Pilhas e lâmpadas
Ni^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+}	Baterias
Al^{3+}	Latas, cosméticos, embalagens laminadas
Cl^- , Br^- , Ag^+	Tubos de PVC, raios X
As^{3+} , Sb^{3+} , Cr^{3+}	Solventes orgânicos e tintas

Fonte: Adaptado Silva (2009).

2.5 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE GERAÇÃO DE LIXIVIADO

O volume do líquido lixiviado pode ser estimado através de cálculos que utilizam procedimentos empíricos e também métodos computacionais (KOERNER & DANIEL,

1997). A avaliação quantitativa da geração de lixiviado em aterros sanitários pode ser feita através de observações hidrológicas históricas, e são utilizados para projeto dos sistemas de drenagem em aterros sanitários (GOMES, 2005).

Para a utilização desses métodos, é importante que se conheça a precipitação e a evapotranspiração mensal médias da região do aterro, uma vez que estas serão os dados de entrada para a obtenção do volume de lixiviado. Exemplos de modelos empíricos para a estimativa do lixiviado são os métodos Suíço e Racional.

2.5.1 Método Suíço

O Método Suíço é um método empírico, estudado pelo Dr. Ing. Hans Jurgen Elieng, na Suíça, citado diversas vezes na literatura. Sobrinho (2000) constatou que existe uma relação direta entre o volume de lixiviado gerado e a precipitação. Por outro lado, o modelo apresenta sensibilidade, uma vez que tem definições cheias de incertezas, como a compactação dos resíduos (LINS, 2003).

O Método Suíço estima que uma quantidade de precipitação infiltra a camada de impermeabilização da base (Equação 1).

$$Q = \frac{K \times P \times A}{t} \quad (1)$$

Q: Vazão média do lixiviado, (l/s);

P: Precipitação média mensal (mm);

A: Área total do aterro (m²);

t: Tempo (s);

K: Coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos sólidos (adimensional).

O coeficiente K diz respeito ao grau de compactação e pode variar entre aterros fracamente compactados a fortemente compactados. No primeiro caso, o peso específico do RSU varia de 0,4 a 0,7 por m³, variando o coeficiente de 0,25 a 0,50.

Para os aterros fortemente compactados, o peso específico é maior que 0,7 m³, com K entre 0,15 e 0,25.

2.5.2 Método Racional

Segundo Lins (2003), o cálculo da vazão superficial pelo Método Racional se baseia em três parâmetros: a área da bacia de contribuição, a intensidade e duração das chuvas, e o coeficiente de escoamento. Este método é usado em larga escala ao redor do mundo para a obtenção de vazões de projeto em hidrologia, especialmente em pequenas bacias hidrográficas. A vazão Q (unidade) de lixiviado para um aterro sanitário pelo Método Racional é estimada através da equação 2:

$$Q = \frac{(P-ES-EP) * A}{t} \quad (2)$$

P = precipitação média mensal (mm);

ES= Escoamento Superficial ($P \times C$) (mm);

EP = Evapotranspiração (mm);

A = Área (m²) ;

t = 2592000, número de segundos em um mês

2.5.3 Método do Balanço Hídrico

Além dos métodos Suíço e Racional, o Método do Balanço Hídrico foi proposto por Fenn et al. (1975), depois de uma adaptação que foi apresentada por Thorthwaite (1948), e é um dos métodos mais populares para a estimativa de lixiviados em aterros

sanitários. De forma geral, é um estudo com a premissa de conservação de massa, em que se relacionam precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e o armazenamento da água no solo.

A recarga de água no sistema do aterro é representada pela precipitação, a evapotranspiração diz respeito a evaporação da superfície do solo e das plantas, em que a água volta para a atmosfera. O escoamento superficial é a representação do fluxo superficial da água na área do aterro. E, por último, a capacidade de armazenamento é a representação de água que fica retida no solo e nos resíduos compactados (FENN et al., 1975).

Os parâmetros utilizados para o Método do Balanço Hídrico devem ser as médias históricas mensais. Capelo Neto et al. (1999) apresentam as condições básicas para a aplicação do método:

- Cobertura do solo de 60 cm de espessura;
- Infiltração proveniente da precipitação;
- Características hidráulicas uniforme do material de cobertura;
- Movimento vertical de água no aterro.

A Tabela 3 apresenta valores típicos do coeficiente de escoamento C, que relaciona o volume que escoar sobre a superfície do terreno e o volume precipitado.

Tabela 3 - Valores do Coeficiente C para o cálculo do ES.

Tipos de Solo	Declividade	Coeficiente C	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso	0-2%	0,05	0,1
	2-7%	0,1	0,15
Argiloso	0-2%	0,1	0,17
	2-7%	0,18	0,22

Fonte: Adaptado Fenn et al. (1975).

Já a Tabela 4 define a água disponível para a utilização de dados de umidade de solo. Esses valores são importantes para que o procedimento do método do balanço hídrico possa ser estimado. Também é importante que seja conhecido o tipo de solo do terreno.

Tabela 4 - Água disponível (mmH₂O/m de solo).

Tipo de Solo	Capacidade de campo	Ponto de murcha	Água Disponível
Arenoso	200	50	150
Siltoso	300	100	200
Argiloso	385	125	250

Fonte: Adaptado Fenn et al. (1975).

2.5.3.1 Método do Balanço Hídrico adaptado por Alslaibi et. al. (2003)

Nessa adaptação, considerou-se que o aterro consistia em uma cobertura superficial, um compartimento de resíduos compactado e um sistema de revestimento. Fez-se então, o uso de suposições em casos onde é aplicável que a infiltração pelo topo da pilha de resíduos é calculada usando a equação 4:

$$I = P + J + E + R - ES - ET \pm U \quad (3)$$

I: Infiltração (mm / ano)

P: Precipitação (mm / ano)

J: Recirculação de chorume (mm / ano)

ES: Escoamento superficial (mm / ano)

R: Água de fora (mm / ano)

ET: Evapotranspiração real (mm / ano)

U: Conteúdo de água na cobertura do solo (mm / ano)

Considerando que o aterro fora projetado para que a água de fora não entrasse (R=0), e ainda, que o conteúdo de água seria insignificante (U=0), tem-se:

$$I = P + J - ES - E \quad (4)$$

Sendo o volume de águas residuais dado por:

$$P_l = I - I_g \quad (5)$$

Onde I_g é a água do aquífero que entra no aterro, podendo-se considerar igual zero, temos que:

$$P_l = I \quad (6)$$

Podemos assumir então, que a quantidade de lixiviado formado é dada por:

$$L = P_l \pm U_w \quad (7)$$

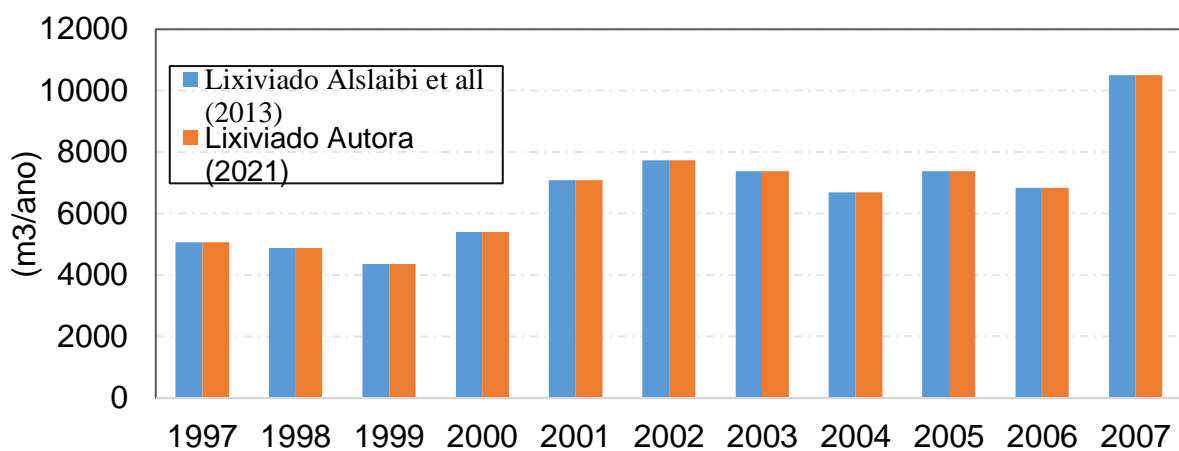
Onde U_w é a quantidade de água na capacidade de campo (m^3/ano).

Alslaibi et al (2013) adaptaram o método do balanço hídrico para o aterro sanitário Deir Al Balah, na Faixa de Gaza, que é composto por um sistema de revestimento e

um sistema de recirculação de lixiviado. O objetivo dos autores foi de avaliar a quantidade de lixiviado que o aterro gerou e encontraram valores satisfatórios.

Buscando uma visão mais atual, reproduziu-se o trabalho de Alslaibi et al (2013), onde o principal objetivo dos autores foi de avaliar a quantidade de lixiviado gerado para o aterro de Deir Al Balah (Figura 6). O resultado encontrado do volume médio de lixiviado, durante o período de 1997 a 2007, foi de 6.670m³/ano

Figura 6 - Reprodução do modelo de Alslaibi et al (2013).



Fonte: Autora (2021).

É importante notar que a água que infiltra da superfície de um aterro tende a ser absorvida pelos resíduos até que a capacidade de campo seja atingida. É só quando a infiltração de água ultrapassa este valorizar que ocorre o movimento da água através dos resíduos.

2.5.4 Outros Métodos

Ainda, é possível encontrar, na literatura, modelos numéricos que tentam simular a quantidade de lixiviado gerado em aterros sanitários considerando demais fatores, como por exemplo, a umidade encontrada dentro da camada de resíduos.

- *Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (Modelo HELP)

O modelo HELP, desenvolvido pela US EPA (United States Environmental Protection Agency), em 1982, simula o movimento de lixiviado através de dois sistemas unidimensionais acoplados em série. O aterro sanitário estudado é modelado em camadas, sendo elas a cobertura final, a camada de RSU, a cobertura diária e sistema de drenagem. Além disso, são inseridos dados meteorológicos reais.

O HELP utiliza a premissa de capacidade de campo para a modelagem do armazenamento do resíduo. Ou seja, é pressuposto que não haverá geração de lixiviado até que a camada não tenha atingido sua capacidade de campo.

Considera-se para esse modelo que a água precipitada é dividida entre o armazenamento superficial, o escoamento superficial, a evapotranspiração, a infiltração, e o armazenamento no solo e drenagem lateral. O escoamento superficial deve ser calculado pelo método empírico da Curva Número do SCS - Soil Conservation Service, já para o cálculo da evapotranspiração, utiliza-se o método de Penman modificado por Ritchie (TOZETTO, 2008). Ainda, de acordo com Tozetto (2008), o fluxo vertical da umidade é uma adaptação da Lei de Darcy para meios porosos não saturados.

O HELP é considerado um dos melhores simuladores para a estimativa de lixiviado em aterros sanitários. Porém, Marques e Manzano (citado por Tozetto, 2008), aplicaram o modelo em 5 diferentes regiões no Brasil, não obtendo sucesso. Concluíram então que a escolha do modelo deve ser feita de acordo com as características locais, funcionando melhor em regiões semiáridas.

Para o presente trabalho, o software apresentou problemas logo nos dados de entrada para as coordenadas. Não sendo possível prosseguir com as demais simulações.

- Modelo de Estimativa de Lixiviado Grego

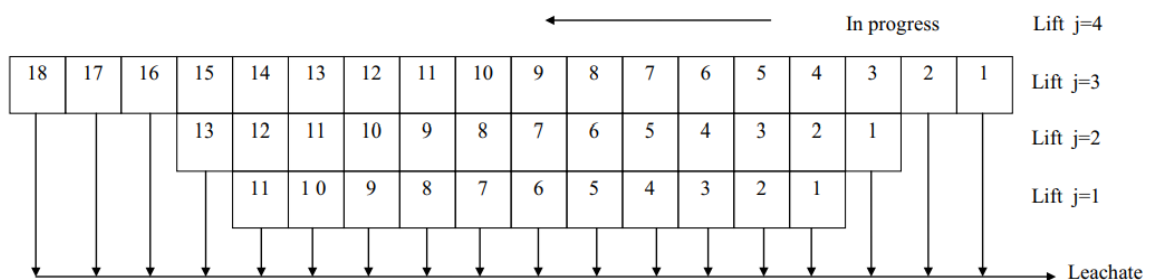
Komilis e Athiniotou (2014) modelaram uma aplicação para qualquer tipo de aterro sanitário em operação. A abordagem leva em consideração uma célula mensal, progressiva no tempo, onde o equilíbrio é aplicado para cada célula do aterro.

Os dados de entrada é o peso da célula, o teor de umidade (%), o peso da cobertura no topo de cada célula, a área da célula (m²) e a precipitação e evapotranspiração mensal (mm). Com isso, é possível estimar o lixiviado gerado, desconsiderando-se demais premissas, como a infiltração de água subterrânea ou vazamentos de fundo.

O modelo também considera a biodegradabilidade dos RSU através de um decaimento de primeira ordem, assumindo uma degradação combinada (aeróbica e anaeróbica).

A Figura 7 evidencia a vista lateral do aterro sanitário de Lesvos, na Grécia, as setas mostram o movimento do lixiviado em direção ao sistema de coleta.

Figura 7 – Vista lateral do aterro sanitário grego.



Fonte: Komilis e Athiniotou (2014)

Todos os cálculos são realizados por cada célula individualmente no final de cada mês e o lixiviado gerado é a soma da quantidade de lixiviado que drena para o fundo de todas as células.

A Equação 8 calcula a quantidade de água presente em uma célula por um mês:

$$water_{ij} = (moist_{ij} \times mass_{ij}) + (P \times A_{ij}) \times \left(\frac{A_B}{A_{ij}}\right) - [EP \times A_{ij} \left(\frac{h_c}{h_l}\right)] \quad (8)$$

Onde:

$water_{ij}$ = é a quantidade em peso de água na célula i de elevação j(t);

$moist_{ij}$ = é o teor de umidade na célula i de elevação j;

$mass_{ij}$ = peso dos resíduos na célula (t)

P = é a precipitação (m);

A_{ij} = é a área da célula i de elevação j (m²);

A_B = é a área da bacia de drenagem (m²);

EP = é a evapotranspiração (m);

h_c = profundidade crítica de evaporação, considerada 0,2 m pelos autores;

h_l = profundidade da célula i de elevação j (m);

Quando a precipitação subtraída da evapotranspiração for negativa, aplica-se lixiviado igual a zero.

A Massa seca (DRY), em t, é calculada pela equação a seguir:

$$DRY = mass_{ij} \times (1 - moist_{ij})e^{-kt} \quad (9)$$

Onde k é o decaimento de primeira ordem adotado -0.05 yr^{-1} e t o tempo.

O peso de sobrecarga no centro da célula (OW), em t, é dado pela Equação 10, onde $cover_{ij}$ é o peso da cobertura.

$$OW_{ij} = 0,5 (water_{ij} + DRY_{ij}) + cover_{ij} + mass_{ij+1} + mass_{ij+2} + \dots + mass_{ij+n} \quad (10)$$

A capacidade de retenção WHC, é calculada da seguinte forma:

$$WHC_{IJ} = 0,6 - 0,55 \times \left(\frac{\frac{OW_{IJ}}{A_{IJ}}}{5,425 + \frac{OW_{ij}}{A_{ij}}} \right) \quad (11)$$

A quantidade de peso máximo de água retido por uma célula mensal é dado por:

$$mostH_{ij} = WHC_{ij} \times DRY_{ij} \quad (12)$$

E então, o lixiviado (Leach) é a quantidade de lixiviado gerado na parte inferior da célula i de elevação j (t) é dado pela equação 13:

$$Leach_{ij} = water_{ij} - mostH_{ij} \quad (13)$$

Se o valor de lixiviado for negativo, então nenhum lixiviado é formado durante esse mês (um valor de 0 é atribuído).

Devido ao período de isolamento, impossibilitando trabalho de campo e coletas de informações, esse modelo não pôde ser utilizado. Sobretudo, se mostra ainda mais eficiente se o sistema de coleta de lixiviado do aterro sanitário de Itabirito quantificasse o líquido gerado para comparações, bem como no trabalho de Komilis e Athiniotou (2014).

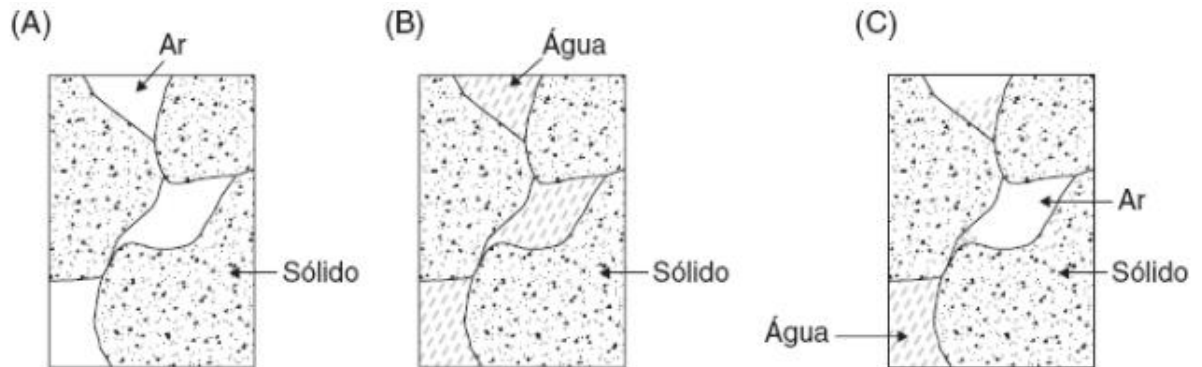
Segundo Gomes (2005), a estimativa da quantidade de lixiviado é de extrema importância tanto para projeto, como também para estimativa do potencial poluidor. Além disso, a porosidade do solo influencia diretamente no armazenamento de líquido, uma vez que pode conter espaços vazios.

2.6 PRINCIPAIS PROPRIEDADES E ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO PARA APLICAÇÃO DE ESTIMATIVA DE VOLUME DE VAZIOS EM ATERROS SANITÁRIOS

O solo é um material natural que possui em sua estrutura três fases básicas (Figura 7): a fase sólida, a fase ar e a fase água (Lopes, 2019). Quando a estrutura não tem água, a amostra comumente foi secada em estufa (Figura 8. A), quando está

totalmente preenchida por água, falamos que o solo está saturado (Figura 8. B). Quando há ar, sólido e água, o solo está parcialmente saturado (Figura 8. C) (BODÓ e JONES, 2017).

Figura 8 - Estrutura dos solos.



Fonte: Bodó e Jones (2017).

- Índice de vazios (e)

O índice de vazios é a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos em determinada profundidade de solo. É uma propriedade muito importantes para os estudos de colapsibilidade e compressibilidade (MARQUES, 2001)

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (14)$$

Onde V_v é o volume de vazios (m^3) e o V_s é o volume de sólidos (m^3).

Para aterros sanitários, o índice de vazios é muito difícil de estimar, sendo necessários estudos que considerem os ensaios laboratoriais de compreensão (LOPES, 2019).

- Porosidade (n)

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total (Equação 15).

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (15)$$

Onde n é a porosidade (adimensional), V_v é o volume de vazios (m^3) e V é o volume total (m^3). Marques (2001) e Feldhaus (2019) consideram a porosidade para os resíduos sólidos em aterros sanitários entre 0,5 e 0,7. Com isso, é possível se determinar qualquer parâmetro da equação 4 quando se conhece os demais.

- Peso específico (γ)

O peso específico é a relação entre o peso total de solo (P) e seu o volume total (V), considerando-se todas as três fases.

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (16)$$

O peso específico para aterros sanitários depende de vários fatores, como a compactação, o adensamento por camadas, entre outros (MARQUES, 2001).

- Capacidade de campo

A capacidade de campo é a propriedade física do solo que determina a sua umidade depois que a drenagem interna cessa. Para Reichardt e Timm (2012), é definida como o armazenamento de água no solo ao fim da drenagem, não sendo uma propriedade estática e determinada pela dinâmica do movimento da água. Ainda, é característica para cada tipo de solo.

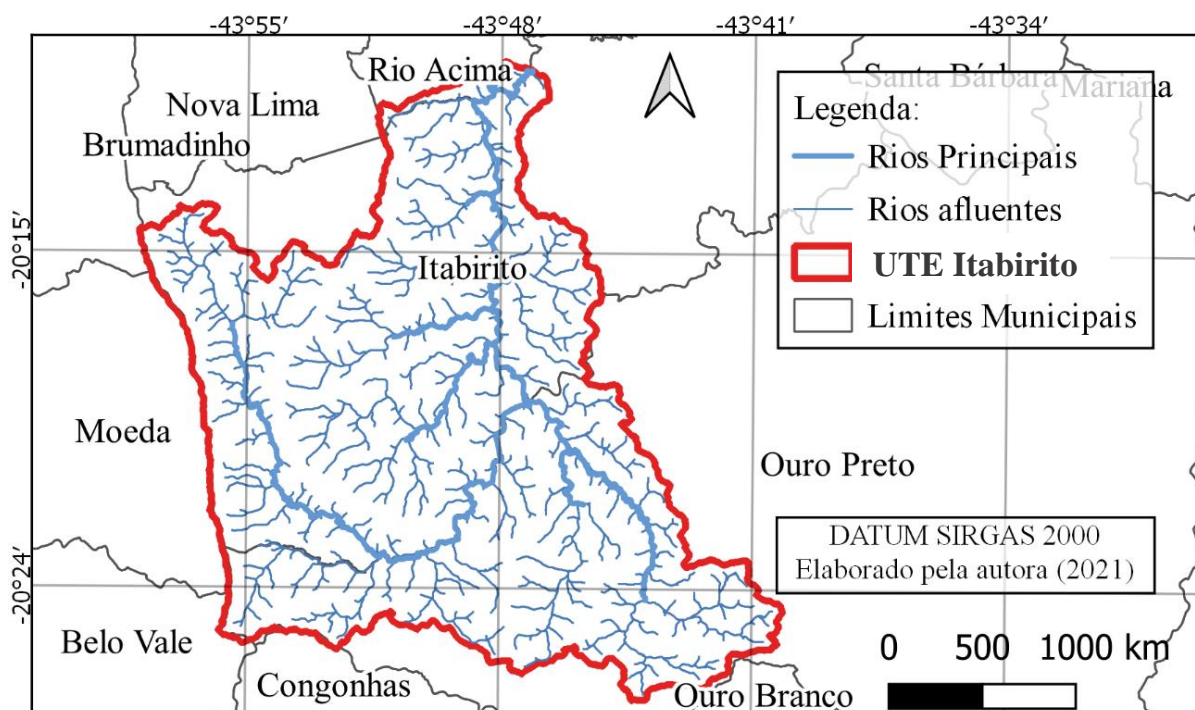
3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O empreendimento estudado está contido na Unidade Territorial Estratégica (UTE) Rio Itabirito, localizada no Alto Rio das Velhas, com uma área de 541,58 km², e é composta pelos municípios de Itabirito, Ouro Preto e Rio Acima, (Figura 9). Dentre os principais rios dessa região estão o rio Itabirito e o ribeirão Mata Porcos.

A UTE Rio Itabirito possui quatro Unidades de Conservação inseridas parcialmente em seu território, somando aproximadamente 9.586,49 ha de áreas protegidas, o que representa 17,47% da área total. A totalidade da área está inserida no Quadrilátero Ferrífero, o que a qualifica como área prioritária para conservação.

Figura 9 - Localização da UTE Itabirito.



Fonte: Autora (2021).

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é utilizado para contrapor o grau de desenvolvimento que se baseia em três parâmetros: saúde, educação e renda per

capita. Os valores variam de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1 melhores são as condições em determinada região. O valor médio do IDH dos municípios da bacia do Rio Itabirito é de 0,71. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é um valor menor comparado a todo estado de Minas Gerais (0,731) mas, de forma geral, satisfatório.

Segundo o IBGE, o Produto Interno Bruto (PIB) consiste na “soma de todos os bens e serviços finais produzidos por um país, estado ou cidade, geralmente em um ano”. Na Tabela 5 estão apresentados os dados referentes às populações totais, os valores do PIB e do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) para cada município da UTE, referentes ao ano de 2018 e 2010, respectivamente.

Tabela 5 - População, PIB e IDHM dos municípios da UTE do Rio Itabirito.

Município	População	PIB per capita (R\$)	IDHM
Itabirito	52997	97911,77	0,73
Ouro Preto	74558	92319,75	0,741
Rio Acima	10420	18719,75	0,673
TOTAL	137975	208951,27	

Fonte: IBGE (2018).

Sobre as atividades da região, ainda de acordo com o IBGE, a bacia do Rio Itabirito é marcada pela atividade industrial e minerária, além de atividades de infraestrutura. A atividade agrícola também tem crescente ocupação.

- Clima e vegetação

Utilizando dados disponibilizados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação meteorológica de Ibitaré - MG, sob coordenadas -20,01° e -44,05°, foram recolhidos dados históricos (30 anos) de precipitação (P) e evapotranspiração (EP) (Tabela 6).

No Aterro Sanitário de Itabirito há um sistema de monitoramento de chuvas diárias ,porém, os dados não são confiáveis pois não existem medições sistemáticas.

As questões climáticas influenciam diretamente na formação do lixiviado, vale frisar, que a estação é a mais próxima encontrada pelo INMET, mas se refere a uma cidade com clima mais seco e, conseqüentemente, menos chuvas do que a região em que se encontra o aterro sanitário.

Tabela 6 - Dados de precipitação (mm) e evapotranspiração (mm).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P	345,4	165,3	202,3	72,1	33,0	10,6	7,3	16,9	58,9	96,0	244,4	356,2
EP	66,8	68,5	70,1	65,5	66,3	66,0	76,4	103,7	110,6	97,4	81,7	65,9

Fonte: INMET.

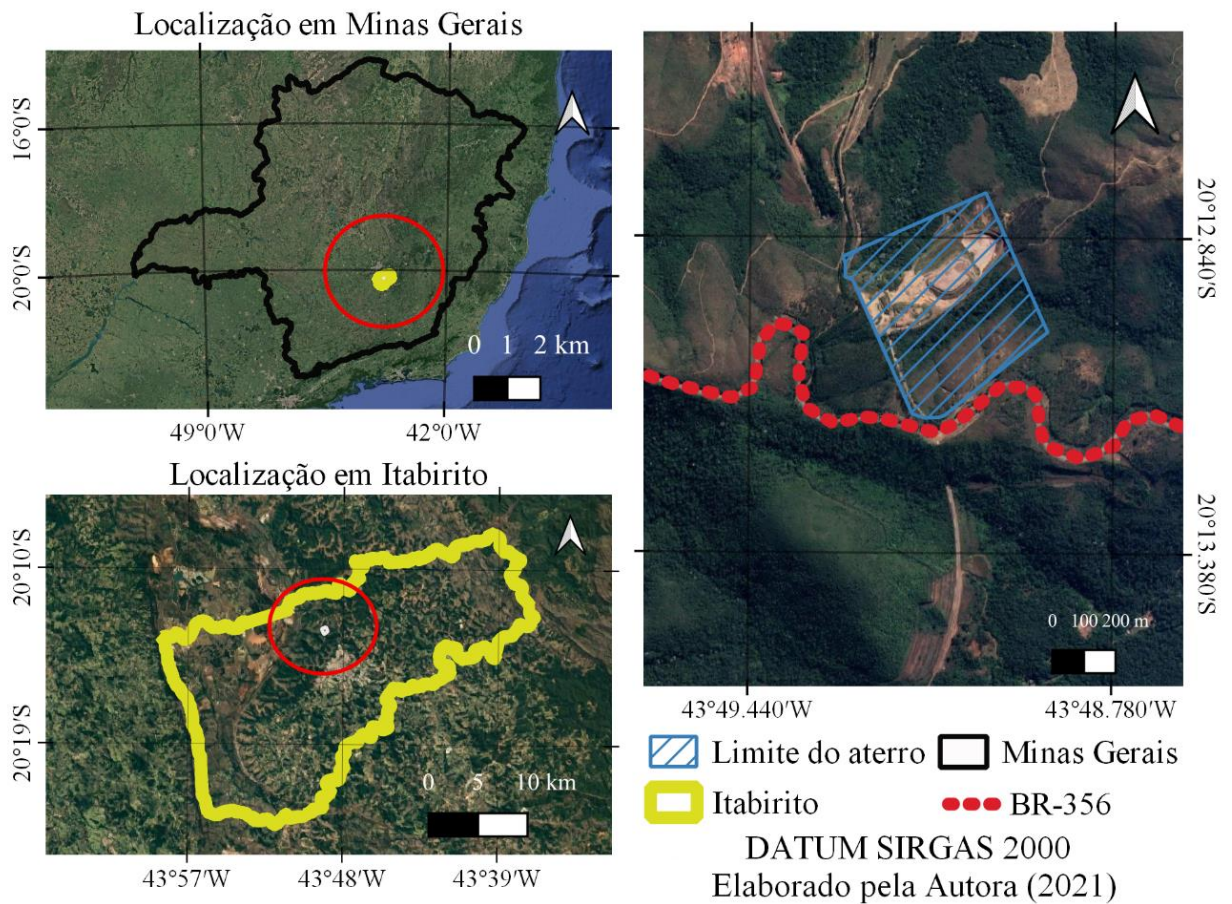
Nota-se que o clima da área de estudo é tipicamente semelhante ao clima do hemisfério Sul (Tropical), em que nos meses de menores temperaturas (período seco) há menor ocorrência de chuvas e nos meses de maiores temperaturas (período chuvoso), a ocorrência de chuvas é maior.

A UTE Itabirito apresenta cobertura vegetal natural de cerca de 79,2%, sendo 54,7% de cerrado e 22,8% formações florestais.

3.1.1 Estudo de caso: Aterro Sanitário de Itabirito

O Aterro Sanitário de Itabirito está localizado entre as latitudes $20^{\circ} 12.500' S$ e $20^{\circ} 12.380' S$ e longitude $43^{\circ}49.440' O$ e $43^{\circ}48.780' O$, no município de Itabirito, no estado de Minas Gerais. O empreendimento abrange uma gleba superficial total de 28,9 ha e a sua porção sul é limitada pela BR 356, à altura do quilometro 47 (GESTÃO AMBIENTAL DRZ, 2013). A Figura 10 ilustra a área de estudo.

Figura 10 - Localização do Aterro de Itabirito.



Fonte: Autora (2021).

3.1.1.1 Aspectos físicos do aterro

A topografia do aterro se apresenta como uma crista achatada de um “divisor de águas” local e limitado pelos dois lados por superfícies alternadamente convexas e côncavas, onde a declividade varia de 12% a 75%.

A cobertura vegetal se caracteriza de três tipos na gleba e no seu entorno:

- Campo ralo: apresenta gramíneas e espécies arbustivas mais dispersas nas encostas de jusante e na crista.
- Mata secundária: apresenta espécies arbóreo arbustiva de pequena densidade, com porte maioria medida do fundo do talvegue.
- Mata-galeria: alto porte e maior densidade a região da gleba do aterro, que foi retirado para a sua implantação. Existem também pequenas nascentes e/ou córregos, afluentes do rio Itabirito.

Sondagens feitas para a elaboração do RCA mostraram existir regularidade na constituição do subsolo, sendo composto por uma camada subsuperficial de coluvião argilo-siltoso, seguida, de um solo residual de filito silto-argiloso com alteração de filito silte-argiloso, que consiste entre muito rijo e impenetrável à percussão.

3.1.1.2 Descrição da operação do aterro sanitário

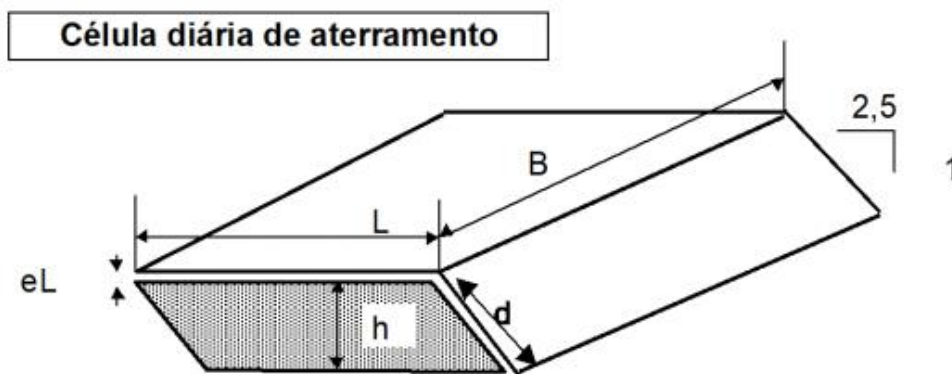
O aterro sanitário de Itabirito iniciou suas atividades no ano de 2007, porém uma outra área do empreendimento atuava como lixão e, no primeiro ano de operação do aterro, foram depositados no aterro os resíduos que representavam cerca de 12 anos do lixão, além dos resíduos que foram gerados pela população naquele mesmo ano.

No dia-a-dia, as atividades do aterro se iniciam com a coleta de resíduo em vias públicas do município de Itabirito. Na entrada do aterro, o veículo de coleta passa pela pesagem em balança eletrônica. Em seguida, o resíduo é descartado na área de operação do aterro.

O sistema de aterramento e recobrimento dos resíduos é executado em rampa, com inclinação 1:2,5, como na Figura 11. A inclinação é representada pela letra d, B

é o comprimento da célula, L é a sua largura, eL é o limite entre as camadas de resíduo e solo e h é a altura da célula diária. Após serem descarregados, os resíduos são espalhados em camadas com espessura em torno de 30 cm e compactados. O caminhão prensa, segundo o operador do aterro, passa seis vezes ou mais, para garantir a compactação dos resíduos. A forma da célula diária não deve ultrapassar 1,5 m e se caracteriza em um prisma regular e base retangular.

Figura 11 - Esquema da célula diária do Aterro de Itabirito.



Fonte: Geomil, (1998).

No final do dia, o topo da célula é recoberto por 60 cm de terra, visando a não proliferação de vetores, como moscas, e também diminuindo o odor.

Quanto ao sistema de drenagem do aterro, na cota de 970 m fora construído, em 2007, no início da operação do aterro, um sistema de drenagem do tipo espinha de peixe, visando a captação do lixiviado e também um teste com caminhão pipa para verificar a eficiência dos drenos. Porém, com o passar do tempo, foram aterrando os resíduos e o sistema de drenagem não foi sendo complementado entre as camadas. A Figura 12 evidencia essa construção.

Figura 12 – Imagens a instalação do sistema de drenagem.



Fonte: Prefeitura de Itabirito (2005)

3.2 EVOLUÇÃO DO ATERRO

Para a evolução do aterro, fez-se, primeiramente a estimativa de crescimento populacional para se conhecer o volume de resíduos sólidos urbanos gerado através da progressão linear até o ano de 2030, para uma operação de 25 anos, como escrito no RCA.

Segundo o Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019, desenvolvido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a geração de resíduos sólidos domiciliares e de limpeza pública é de, 0,99 kg/hab/dia. Ainda, de acordo com o IBGE, o senso de população para o município de Itabirito fora de 37.901 para o ano de 2000 e 45.449 para o ano de 2010, sendo possível estimar a população e a geração de resíduos sólidos ao longo dos anos.

O estudo da evolução do aterro foi feito mediante informações coletadas sobre os dados dispostos abaixo:

- Área de uma célula: 32m²
- Aterramento diário: 0,6m
- Volume de uma célula: 81,6m³
- Área inicial de operação do aterro: 30.000 m²

A partir desses dados, para cada nova camada de resíduo e de aterramento, foi estimado o número de células de acordo com a área de operação.

É importante frisar que, para cada cota que sobe, a área de operação do aterro perde cerca de 144m² da área da cota anterior.

A partir disso, foi possível determinar a evolução das cotas do aterro ao longo dos anos e a sua previsão para os próximos anos.

3.3 ESTIMATIVA DO LIXIVIADO

Para a estimativa da vazão do lixiviado, o presente trabalho utilizou o Método Suíço, o Método Racional e o Método do Balanço Hídrico. O procedimento de cálculo do Método do Balanço Hídrico foi demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Procedimento do método do Balanço Hídrico.

Parâmetros	Modo de obtenção
Precipitação (P)	Dados pluviométricos (IMET)
Evapotranspiração (EP)	Dados hidrometeorológicos (IMET)
Escoamento superficial (ES)	$ES = C \times P$ (17)
Infiltração (I)	$I = P - ES$ (18)
Armazenamento de água no solo de cobertura (AS)	Se $(I-EP)>0$, multiplica-se o valor de água disponível para cada tipo de solo pela sua espessura. Se $((I-EP)<0)$, então solo está abaixo da capacidade de campo.
Variação no armazenamento de água no solo (ΔAS)	É a diferença entre a água armazenada no solo, de um mês para o outro
Evapotranspiração real em mm (ER)	Se $(I - EP)<0$, $ER = [EP + (I - EP) \Delta AS]$ (19)
Percolação em mm (PER)	$PER = P - ES - AS - ER$ (20)
Vazão mensal em $m^3/mês$ (QM)	$QM = \frac{(PER/1000) \times \text{ÁREA}}{2592000} \times 86,4 \times 30$ (21)

Fonte: Adaptado Fenn et al. (1975).

3.4 RELAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO ATERRO COM A AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA GERAÇÃO DE LIXIVIADO

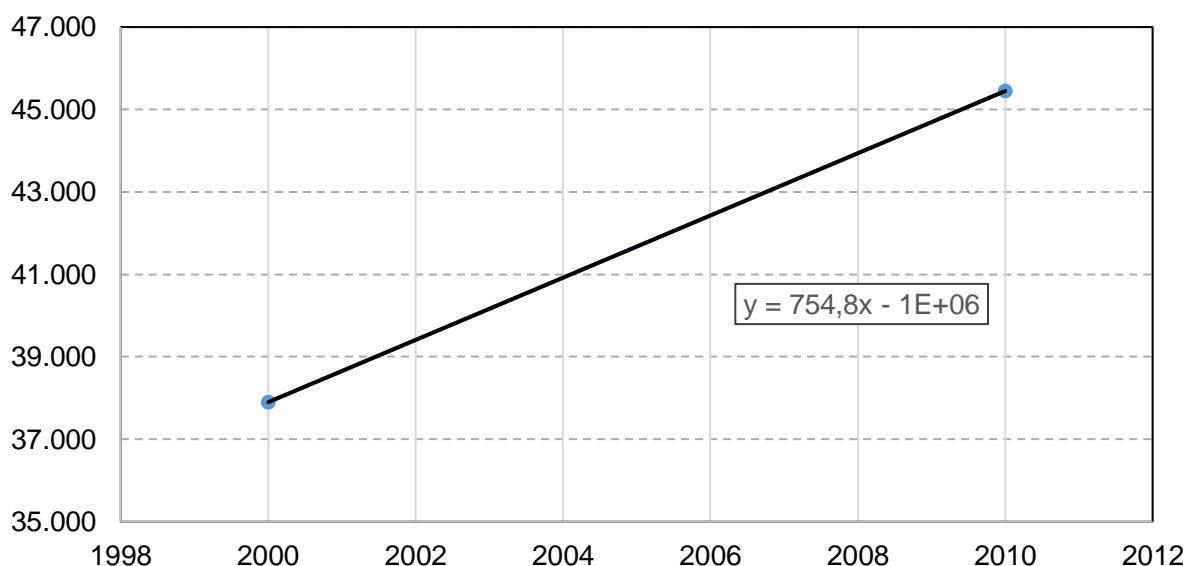
Na tentativa de explicar a geração nula de lixiviado do aterro, o presente trabalho utilizou dados da literatura sobre a porosidade de resíduos sólidos de aterro para o cálculo do volume de vazios disposto no sistema, evidenciando que o lixiviado ainda se encontra retido no interior da camada de resíduos. Em seguida, com o resultado da estimativa de vazão do lixiviado para cada método utilizado, fez-se uma média, a qual foi subtraída do volume total de vazios para cada cota do aterro.

4 RESULTADOS

4.1 EVOLUÇÃO DO ATERRO

Considerando o método de projeção linear (Figura 13), foi estimada a população para cada ano até 2030.

Figura 13 - Crescimento populacional do município de Itabirito.



Fonte: Autora (2021).

Com base no gráfico, a estimativa da população total até o ano de 2030 é de 48.420 pessoas. Com a estimativa populacional até o ano de 2030, considerando a geração de resíduos per capita de 0,99 kg/hab.dia e desconsiderando fatores como compostagem e compressibilidade, o volume de resíduos até 2030 é de 1.282.661,51 m³.

Com isso foi proposta uma caracterização da evolução do aterro ao longo dos anos, buscando determinar um histórico de crescimento e o relacionar com a quantidade de lixiviado gerado.

O Relatório de Controle Ambiental (RCA) do aterro sanitário de Itabirito, desenvolvido pela empresa Geomil, propõe um projeto básico de um aterro sanitário, do tipo “de superfície” e que seria implantado ao longo de quatro etapas (Figura 12). Essas etapas determinam as cotas ao longo da vida útil do aterro sanitário de Itabirito. Entretanto, analisando a topografia do aterro pelo Google Earth e em contato com um dos funcionários do aterro, foi verificado que as cotas descritas pelo RCA não são condizentes. Atualmente, o aterro se encontra na cota 1012 m, onde fora iniciado na cota 972 m.

Para a evolução do aterro, tem-se então que a cota inicial do empreendimento foi iniciada em 970 m, com o depósito dos resíduos de aproximadamente 12 anos descartados no antigo lixão.

Dessa forma, propõem-se, assim como no documento do RCA, 4 etapas de evolução das etapas do aterro.

Para a 1ª etapa foram consideradas as cotas 970m até a 986 m. Para cada nova célula que crescia na vertical do aterro, descontou-se 144 m² da área, pois o aterro cresce em formato de “pirâmide”. Sendo assim, os dados foram descritos na Tabela 8. A tabela também apresenta os valores de volume acumulado, que é a soma do volume da cota atual com o volume da anterior.

Tabela 8 - Dados de evolução das cotas do aterro para a 1ª etapa.

Cotas	Área útil	Quantidade de células	Volume de resíduo em cada cota (m³)	Volume acumulado (m³)
970	30.000	938	75.000	75.000
974	29.856	933	74.640	149.640
977	29.712	929	74.280	223.920
980	29.568	924	73.920	297.840
983	29.424	920	73.560	371.400
986	29.280	915	73.200	444.600

Fonte: Autora (2021).

Seguindo o procedimento de estudo da 1ª etapa, tem-se que, para a 2ª etapa, as cotas foram de 986m para 1001m. Para as 3ª e 4ª etapas foram consideradas as cotas 1001 a 1013 e 1013 a 1019, respectivamente. A Tabela 9 ilustra os dados da evolução da 2ª, 3ª e 4ª etapas.

Tabela 9 - Dados de evolução das cotas do aterro para a 2ª, 3ª e 4ª etapas.

Cotas (m)	Área útil (unidade)	Quantidade de células	Volume de resíduo em cada cota (m³)	Volume acumulado (m³)
989	29.136	911	72.840	517.440
992	28.992	906	72.480	589.920
995	28.848	902	72.120	662.040
998	28.704	897	71.760	733.800
1001	28.560	893	71.400	805.200
1004	28.416	888	71.040	876.240
1007	28.272	884	70.680	946.920
1010	28.128	879	70.320	1.017.240
1013	27.984	875	69.960	1.087.200
1016	27.840	870	69.600	1.156.800
1019	27.696	866	69.240	1.226.040

Fonte: Autora (2021).

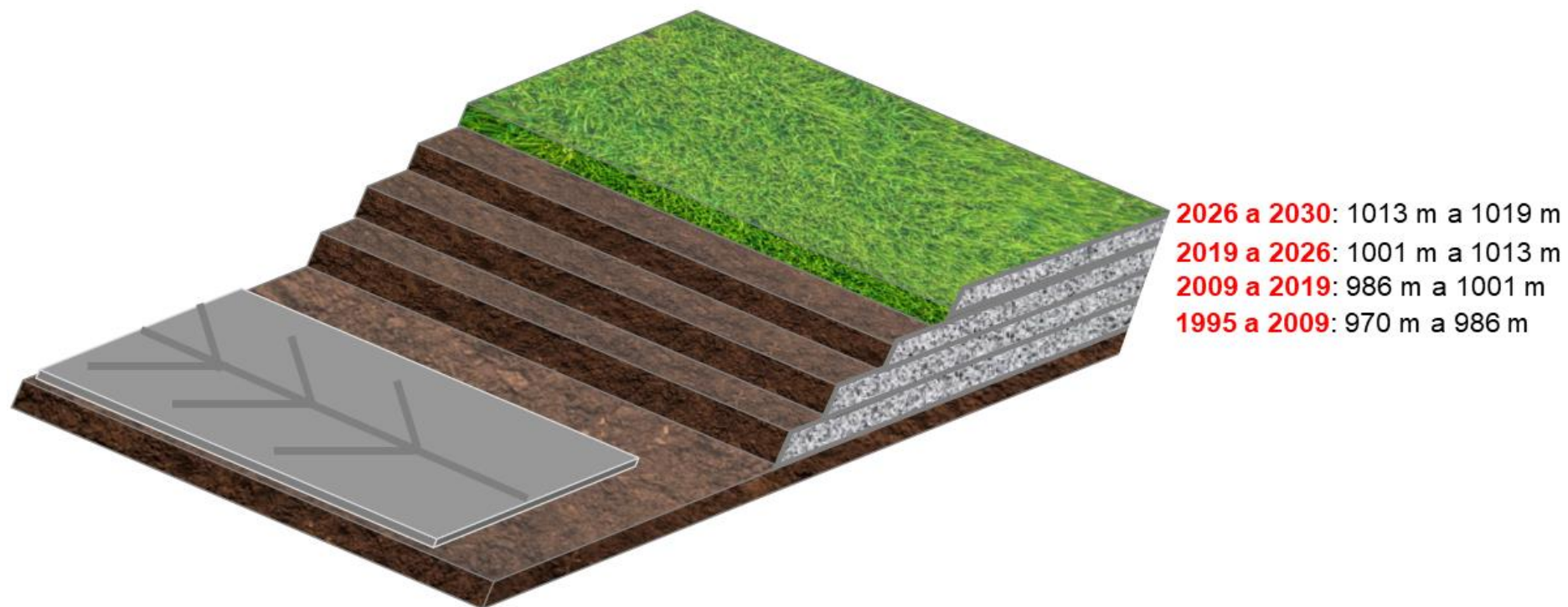
De acordo com a estimativa populacional e, ainda, a estimativa de resíduos sólidos, foi possível inferir uma evolução ao longo dos anos, apresentado na Tabela 10 (Figura 14).

Tabela 10 - Evolução do aterro ao longo dos anos.

	Cotas (m)	Anos
1º etapa	970 - 986	1995 - 2009
2ª etapa	986 - 1001	2009 - 2019
3ª etapa	1001 - 1013	2019 - 2026
4ª etapa	1013 - 1019	2026 - 2030

Fonte: Autora (2021).

Figura 14 - Evolução das cotas do aterro sanitário de Itabirito ao longo dos anos.



Fonte: Autora (2021).

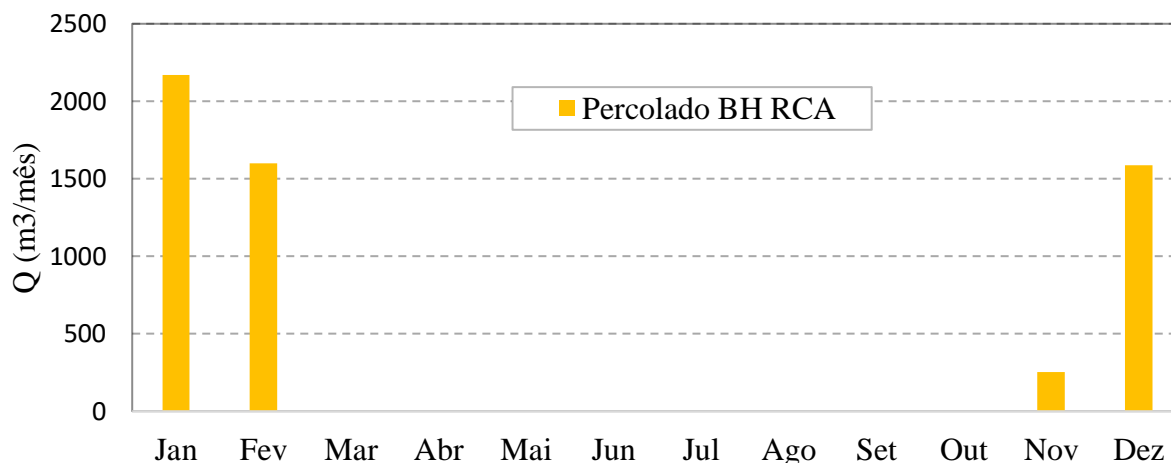
Assim, a cota 1019 m é a última cota pois é até onde o aterro tem licenciamento de operação, além de ser o limite da cota de vizinhança.

4.2 ESTIMATIVA DE LIXIVIADO NO ATERRO SANITÁRIO DE ITABIRITO

O documento de RCA (GEOMIL Ltda, 1998) do Aterro Sanitário de Itabirito propõe o cálculo da estimativa da vazão dos líquidos lixiviados utilizando as seguintes informações: o balanço hídrico da unidade de aterramento correspondente a um mês de operação; área de operação inicial do aterro de 30.000m²; os dados de precipitação e evaporação de Ouro Preto, obtidos junto ao INMET; e as dimensões nominais aproximadas da célula diária de aterramento, equivalente a um prisma em forma de cunha, com 5,00 m de frente, 6,40 m de profundidade e 2,55 m de altura.

De acordo com o balanço hídrico apresentado no RCA (Geomil, 1998), o aterro originaria uma vazão média de 5.612,1 m³/ano (Figura 15). Porém, o aterro sanitário até a data atual, não gerou lixiviado, e a estimativa do RCA pode ser considerada muito alta.

Figura 15 - Estimativa da vazão de lixiviado do RCA.



Fonte: Adaptado RCA (1998).

Sendo assim, os resultados quantitativos do lixiviado foram obtidos por intermédio da estimativa de geração da vazão de efluentes no aterro de Itabirito baseados nos seguintes métodos empíricos: o Método Suíço, o Método Racional e o Método do Balanço Hídrico. Todos esses três, utilizando-se metodologias para a previsão de suas vazões, conforme apresentado no capítulo 3.

4.2.1 Método Suíço

Para o Método Suíço, considerou-se precipitação anual média da estação meteorológica de Ibirité igual a 1.608,4 mm, a área total de operação do aterro igual a 30.000 km² e, ainda o peso específico dos resíduos igual a 0,7 ton/m³ (RCA, 1996), encontrando-se K=0,5, como ilustra a Tabela 11.

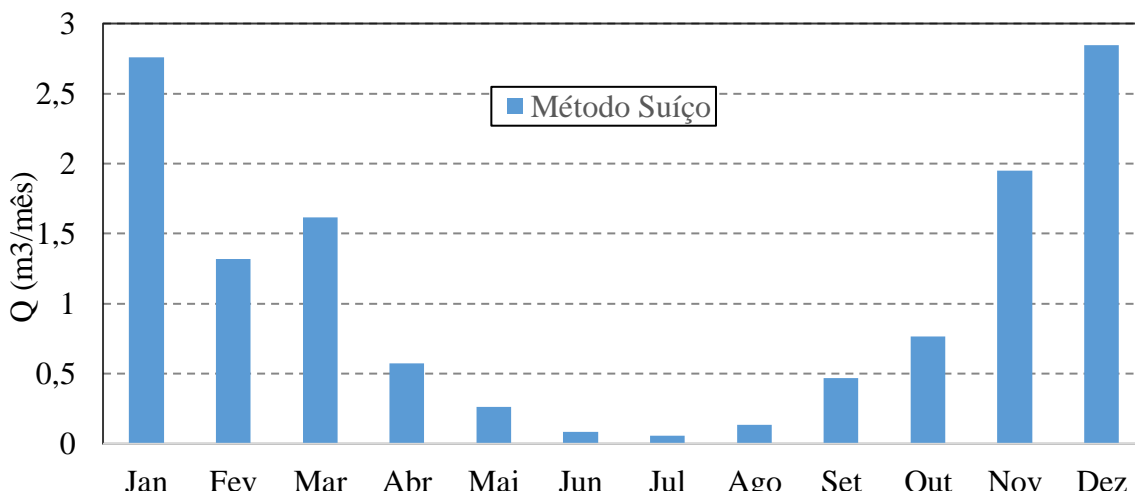
Tabela 11- Tabela para estimar o coeficiente de compactação (K) para aterros sanitários.

Peso específico dos resíduos	Valores de K
0,4 a 0,7 ton/m ³	0,25 a 0,50
> 0,7 ton/m ³	0,15 a 0,25

Fonte: Adaptado Orth (1981).

A estimativa de lixiviado pelo Método Suíço é apresentado graficamente na Figura 16. Observa-se que, mesmo em períodos secos, ainda há a geração de lixiviado no aterro.

Figura 16 - Vazão média de lixiviado utilizando o Método Suíço.



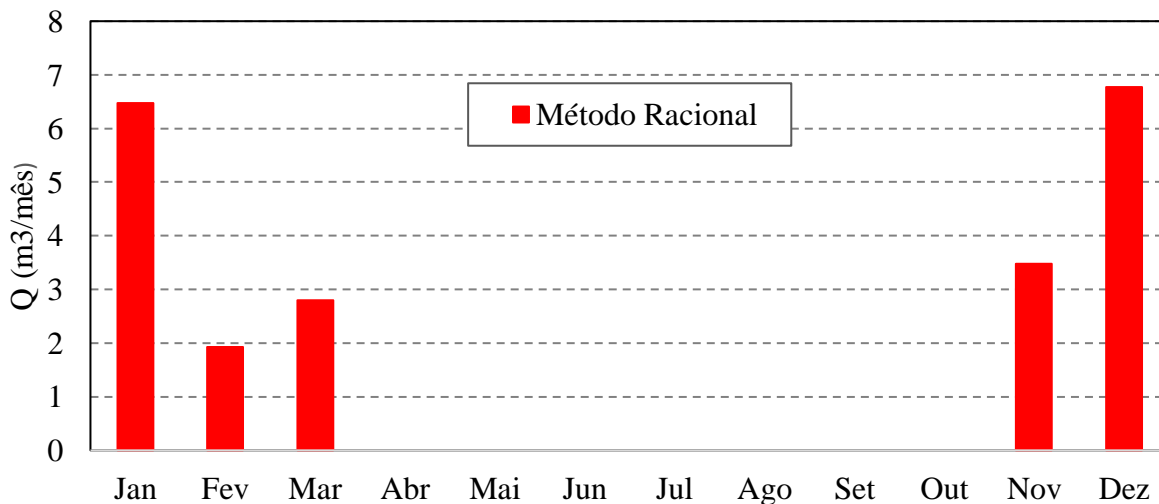
Fonte: Autora (2021).

Dessa forma, o volume de lixiviado anual médio no o aterro de Itabirito é de 12,8 m³/ano, muito diferente do valor projetado pelo RCA.

4.2.2 Método Racional

Utilizando o Método Racional, foi possível encontrar a vazão de lixiviado anual médio de 21,45 m³/ano, (Figura 17).

Figura 17 - Vazão média de lixiviado utilizando o Método Racional.

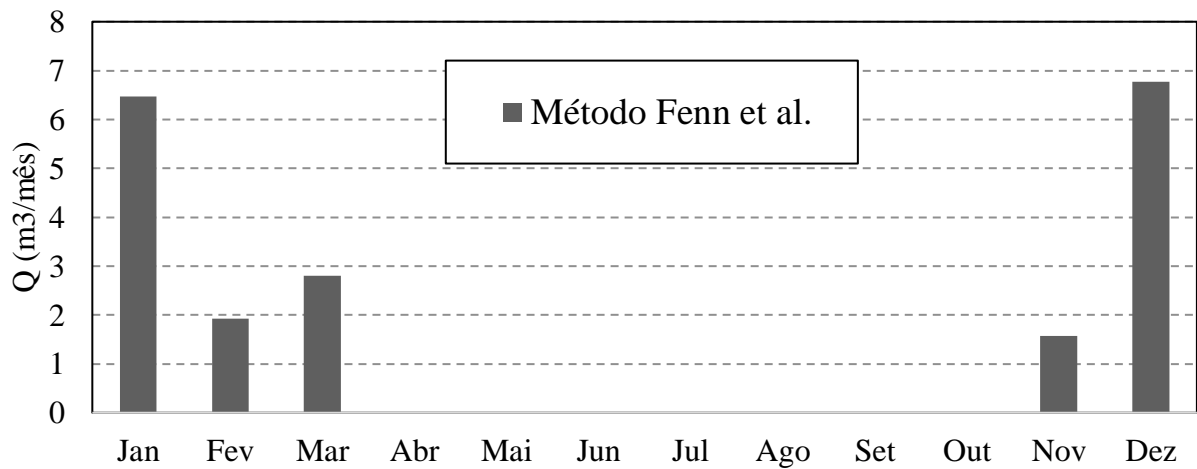


Fonte: Autora (2021)

4.2.3 Método do Balanço Hídrico

Utilizando o procedimento do Método do Balanço Hídrico, encontrou-se valores médios mensais de produção de lixiviado, sendo de 19,5 m³/ano, (Figura 18).

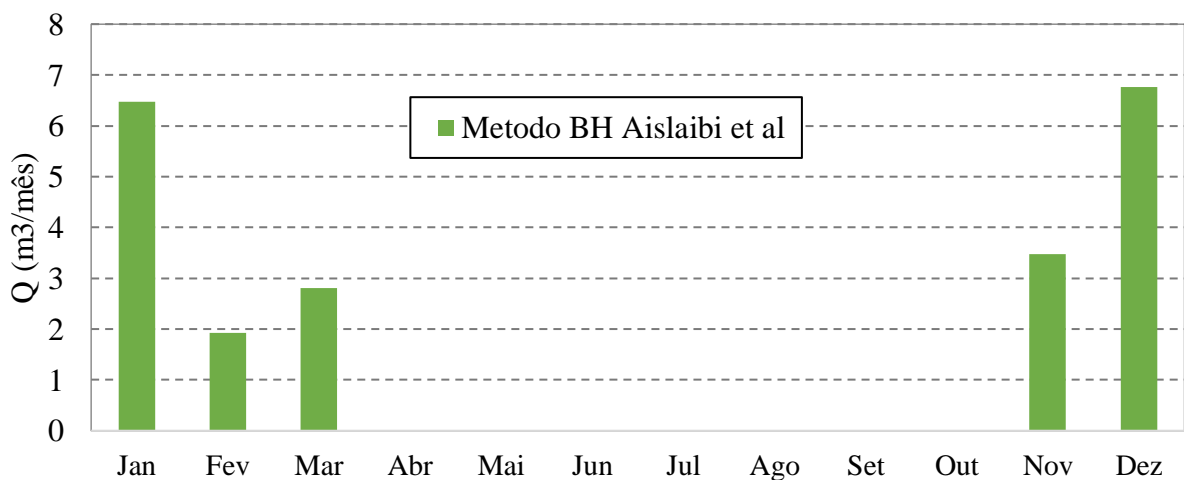
Figura 18 - Vazão média de lixiviado utilizando o Método do Balanço Hídrico.



Fonte: Autora (2021).

Para o método de Aislaibi et al (2013) (Figura 19):

Figura 19 - Estimativa de lixiviado pelo método de Aislaibi et al (2013).



Fonte: Autora (2021).

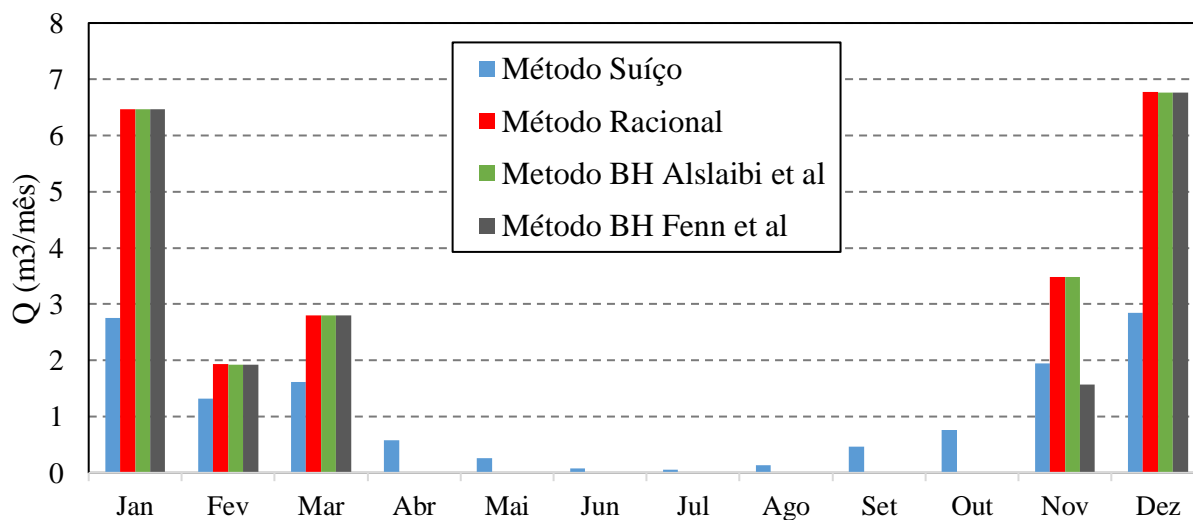
Seguindo a metodologia do Método do Balanço Hídrico proposto em Alslaibi et al (2013), que é uma adaptação do Método do Balanço Hídrico, foi possível encontrar os valores de estimativa de lixiviado para o aterro sanitário de Itabirito de 21,4 m³/ano, (Figura 19).

É importante observar que, devido ao baixo valor de precipitação em períodos secos, não houve estimativa de lixiviados para os meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro.

4.2.4 Comparação dos métodos

Com todos os métodos apresentados, é possível compará-los afim de se observar os valores de vazões de lixiviados para o aterro sanitário de Itabirito, (Figura 20).

Figura 20 - Comparação dos métodos de estimativa de lixiviado.



Fonte: Autora (2021).

Nota-se que somente o Método Suíço gerou lixiviado em todos os meses, enquanto os demais métodos não houve geração para as épocas secas do ano (de abril a outubro), também verificado no trabalho de Komilis e Athiniotou (2014), onde a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração foi negativa. Isso é explicado

pois o Método Suíço é o único método que considera a compressibilidade do aterro, ou seja, considera a camada de resíduos. Diante disso, esse método é o que melhor se aplica para estimativa de lixiviados em aterros sanitários.

Também é possível observar que os métodos Racional e de Balanço Hídrico de Alslaibi et al (2013) foram semelhantes quanto às estimativas mensais.

Obtendo-se uma média dos valores encontrados, tem-se uma vazão de 18,8 m³/ano de lixiviado no Aterro Sanitário de Itabirito.

4.3 RELACIONANDO A AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA GERAÇÃO DE LIXIVIADO COM A EVOLUÇÃO DA COTA DO ATERRO

No presente trabalho, tentou-se explicar o motivo do aterro sanitário de Itabirito não ter gerado lixiviado durante todo seu tempo de operação. Considerando propriedades e índices geotécnicos através das cotas de operação do aterro é possível observar que o aterro concentra um alto volume de vazios (Tabela 12).

Tabela 12 - Relação das cotas com o volume de vazios.

Cotas (m)	Área útil (m ²)	Volume de resíduo em cada cota (m ³)	Volume de vazios (m ³)
974	29.856	74.640	72.000,0
977	29.712	74.280	53.740,8
980	29.568	73.920	53.481,6
983	29.424	73.560	53.222,4
986	29.280	73.200	52.963,2
989	29.136	72.840	52.704,0
992	28.992	72.480	52.444,8
995	28.848	72.120	52.185,6
998	28.704	71.760	51.926,4
1001	28.560	71.400	51.667,2
1004	28.416	71.040	51.408,0
1007	28.272	70.680	51.148,8
1010	28.128	70.320	50889,6
1013	27.984	69.960	50630,4
1016	27.840	69.600	50371,2
1019	27.696	69.240	50112,0

Fonte: Autora (2021).

O volume de vazios foi calculado considerando a área e a profundidade da camada do aterro em m^3 multiplicado pela porosidade, considerada $n = 0.6$, o valor típico para resíduos em aterro sanitário, como descrito no item 2.6.

A Tabela 13 indica os valores de volume de vazios já com a geração de lixiviado subtraída do total.

Assim, é possível observar que muito provavelmente o líquido lixiviado do aterro, segundo os métodos estudados, esteja contido no aterro. Ainda, é importante considerar outros fatores, como a compressibilidade, que de fato foi relatada pelo operador do aterro, e a falta de um sistema de coleta eficiente, como discutido por Naves (2013) e Simões (2013).

Tabela 13 - Volume de vazios disponível para cada etapa.

	Cotas (m)	Anos	Volume de vazios (m^3)	Volume lixiviado (m^3)	Volume vazio disponível (m^3)
1º etapa	970 - 986	1995 - 2009	232.444,8	263,2	232.181,6
2ª etapa	986 - 1001	2009 - 2019	262.224,0	188,0	262.036,0
3ª etapa	1001 -1013	2019 - 2026	205.113,6	131,6	204.982,0
4ª etapa	1013 - 1019	2026 - 2030	151.113,6	75,2	151.038,4

Fonte: Autora (2021).

Os RSU também costumam ter muita umidade, independentemente das chuvas. Isto não foi considerado no presente trabalho. Além disso, o único método que leva em consideração a compactação dos RSU é o Método Suíço, em que se observou geração de lixiviado para todos os meses.

Outra discussão é sobre a área do empreendimento passar a ser de risco, pois mesmo a sua instalação sendo inserida nos critérios de um aterro, não há drenagem do lixiviado produzido desde a sua construção e, ainda, possui uma antiga área de lixão sem impermeabilização, sendo configurada como um passivo ambiental.

Portanto, é possível enquadrar o empreendimento como um aterro controlado, uma vez que não há a coleta de lixiviados.

5 Conclusões

No presente trabalho foi possível aplicar conceitos da Engenharia Ambiental para a análise de um estudo de caso, aprimorando habilidades e visando a preparação para o mercado de trabalho. Dessa forma, foi observada a importância da avaliação quantitativa da geração de lixiviado e a determinação das cotas ao longo do tempo para a operação e gerenciamento de um aterro sanitário.

Sabendo que a cota atual do Aterro Sanitário de Itabirito é de 1012 m, e, ainda, que o aterro se encerra na cota de 1019, foi possível determinar a vida útil do empreendimento até a metade do ano de 2030, com mais de 1.200.000m³ de RSU aterrados, cumprindo-se exigências da gestão de resíduos sólidos e contribuindo para uma disposição ambientalmente adequada.

Quanto a estimativa de lixiviado para o aterro, onde se buscou uma explicação para a geração nula durante toda a sua operação, foi encontrada uma média de 18,8m³/ano através de três métodos empíricos: Método Suíço, Método Racional e Método do Balanço Hídrico.

Assim, relacionando todos os dados encontrados com propriedades físicas do solo aplicadas ao aterro sanitário, conclui-se que o volume de lixiviado gerado pode estar contido na camada de resíduos do aterro. Também é importante considerar outros fatores, como a compressibilidade e a falta de um sistema de coleta eficiente, como discutido na Revisão Bibliográfica desse trabalho. A compressibilidade, por sua vez, ganha mais visibilidade, pois em conversa com o operador do aterro, o caminhão compressor passa, por vezes, mais de seis vezes na célula diária, o que possibilita a redução da geração de lixiviado.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação da eletrorresistividade, uma tecnologia de investigação geofísica baseada na injeção de corrente no solo, sendo possível se determinar, através de propriedades elétricas, a localização do lixiviado, monitorando-o para a mitigação de possíveis impactos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992. NBR8419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos – Procedimentos.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004. NBR10004: Resíduos Sólidos – Classificação.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010. NBR15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.
- ABRELPE. Estimativas Dos Custos Para Viabilizar a Universalização Da Destinação. p. 91, 2015.
- ALSLAIBI, Tamer M.; ABUSTAN, Ismail; MOGHEIR, Yunes; AFIFI, Samir. Quantification of leachate discharged to groundwater using the water balance method and the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model. **Waste Management & Research**, 31, 1, p. (50-59), 2013.
- BARBOSA, R.P.; IBRAHIN, F.I.D. **Resíduos Sólidos - Impactos, Manejo e Gestão Ambiental**. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536521749/>. Acesso em: 28 Mai 2021.
- BODÓ, Béla.; JONES, Colin. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. 9788521633129. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633129/>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- CAPELO NETO, J. C.; MOTA, S.; SILVA, F. J. A. **Geração de percolado em aterro sanitário no semiárido nordestino: uma abordagem quantitativa**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 4, n. 3, jul./set. 1999; n. 4, out./dez. 1999.
- D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2000.

- DZR GESTÃO AMBIENTAL Ltda. Plano Municipal de Saneamento Básico - Itabirito MG. Itabirito, 2013.
- 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 & Pergamon, p. 269-282. 2001.
- FENN, D.G.; HANLEY, K.J.; DEGEARE, T. V. Use of water balance method for predicting leachate generation at waste disposal sites. Cincinnati: Environmental Protection Agency, . p. 168. 1975
- GEOMIL Ltda. Relatório de Controle Ambiental do Aterro Sanitário de Itabirito. p. 52, 1998.
- GOMES, Tiago Luís. **Avaliação quali-quantitativa do percolado gerado no aterro controlado de Santa Maria - RS**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil. Santa Maria - RS.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 1992.
- JÚNIOR, R. T.; SAIANI, C.C. S.; DOURADO, J. **Resíduos Sólidos no Brasil: Oportunidades e Desafios da Lei Federal n. 12.305 (Lei de Resíduos Sólidos)**. São Paulo: Editora Manole, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520449240/>. Acesso em: 28 Mai 2021.
- KOERNER, R.M., DANIEL, D. E. **Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps**. 1ª ed. New York, ASCE PRESS. 256p. 1997.
- KOMILIS, Dimitrius; ATHINJOTOU, Angeliki. A water budget model for operating landfills: An application in Greece. **Waste Management & Research**, 32, 8, p. (717-725), 2014.
- LINS, Eduardo Antônio Maia. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. 2003. Dissertação de Mestrado.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Recife - PE.

LOPES, Waldyr. Geotecnia. 11 mar. 2019, 20 jul. 2019. Notas de Aula.

MARQUES, Afonso Celso Moruzzi. **Compactação e compreensibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 81 p. Dissertação (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MIHELIC J. R., et al. **Engenharia ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projeto**. Tradução Luiz Claudio de Queiroz Faria, Marco Aurélio dos Santos, 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634881/cfi/6/2!/4/2/2@0:0> . Acesso em: 29 Jul 2021.

NAVES, Leandro Coelho. **Influência da compactação do solo na produção e no potencial poluidor de lixiviados de Resíduos Sólidos Urbanos**. 312 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

NETO, P. N.; MOREIRA, T. A. Política nacional de resíduos sólidos: reflexões acerca do novo marco regulatório nacional. p. 10–19, 2010.

REIS, Flávio. Método Suíço. Hidromundo. 2018. Disponível em: <https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 20 Jun 2018.

Reichardt, K.; Timm, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri: Manole, 2012. 9788520451786. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520451786/>. Acesso em: 16 ago. 2021.

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

SANTIAGO, Aníbal da Fonseca. Resíduos sólidos. 01 jun. 2021, 30 jun. 2021. Notas de Aula.

SILVA, Fernanda. B. **Tratamento Combinado de Lixiviados de Aterros Sanitários**. 2009. 117 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2009.

- SIMÕES, Gustavo F.; CATAPRETA, Cícero A. A., Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. **Waste Management - Elsevier**, 33, p. (400-420), 2013
- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Do SNIS ao SNISA: Informação para planejar o Manejo de Resíduos Sólidos**, Brasília, p.62, dez, 2020.
- SOBRINHO, N. L. C. **Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente**. Dissertação de Mestrado. 128 P. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2000.
- SOUTO, Gabriel D'Arrigo de Brito. **Lixiviado de Aterros Sanitários Brasileiros – estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”)**. 371 p. – Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- THORNTHWAITE, W.C. **Na approach toward a rational classification of climate**. *Geographical Review*, 1948.
- TOZETTO, Carolina M. **Modelagem Matemática de Aterros Sanitários com a Simulação Hidrológica da geração de lixiviados: ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO DE CURITIBA**. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2008.
- TRAJANO, Karina. **Projeto de um Aterro Sanitário de Pequeno Porte**. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.