



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---

**Jéssica Pereira Duarte**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HÍDRICO DEVIDO A  
SAZONALIDADE EM UMA PILHA DE ESTÉRIL DE MINÉRIO  
DE FERRO EM SOLO NÃO SATURADO**

Ouro Preto

2019

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HÍDRICO DEVIDO A SAZONALIDADE EM  
UMA PILHA DE ESTÉRIL DE MINÉRIO DE FERRO EM SOLO NÃO  
SATURADO

Jéssica Pereira Duarte

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 12 de julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil. Banca examinadora:

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Lucas Deleon Ferreira - UFOP

Ouro Preto

2019

D812a Duarte, Jéssica Pereira.  
Análise do comportamento hídrico devido a sazonalidade em uma pilha de estéril de minério de ferro em solo não saturado [manuscrito] / Jéssica Pereira Duarte. - 2019.

100f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Minério de ferro - Pilha de Estéril. 2. Solo não saturado. 3. Sazonalidade. 4. Solo - uso - Grau de saturação. I. Ferreira, Lucas Deleon. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

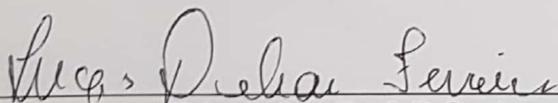
CDU: 624

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)

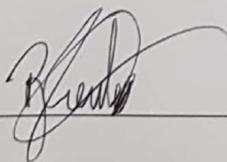
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HÍDRICO DEVIDO A SAZONALIDADE EM UMA  
PILHA DE ESTÉRIL DE MINÉRIO DE FERRO EM SOLO NÃO SATURADO

Jéssica Pereira Duarte

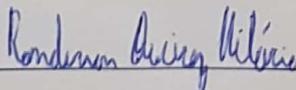
Monografia de conclusão de curso para  
obtenção do grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto  
defendida e aprovada em 12 de julho de  
2019 como parte dos requisitos para a  
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.  
Banca examinadora:



Orientador: Prof. D.Sc. Lucas Deleon Ferreira - UFOP



Membro:



Membro:

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, por me fortalecer e me apoiar sempre. Em especial a meus pais, Myrtes e Walter, e a minha irmã Tamires, a quem admiro tanto: vocês são minha inspiração.

Agradeço à UFOP e a todos os meus ilustres professores os quais nutro tanta admiração e respeito pelo trabalho. Por ensinar com maestria não só a teoria, mas a responsabilidade social do Ser Engenheiro. Em especial, ao orientador Lucas, por toda paciência e disposição em me receber nessa empreitada.

Ao PET Civil e à Fundação Gorceix, por me abrirem tantas oportunidades e me possibilitarem aprender e crescer como pessoa e como profissional junto com vocês.

À toda equipe GeoFast, em especial ao professor Saulo Ribeiro, onde tive a oportunidade de aprender tanto com profissionais ilustres da área geotécnica.

Aos meus colegas de sala e amigos, por serem a minha fonte de energia e estarem ao meu lado em todos os momentos bons e os difíceis também, a quem devo todo meu apreço e admiração.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma visão geral da influência das sazonalidades e condições climáticas no comportamento hídrico de uma pilha de estéril de minério de ferro em condição não saturada ao longo de um ano. O estudo apresenta, com o uso de um programa computacional de análise numérica, como se dá a interação solo-planta-atmosfera a partir da equação do balanço hídrico e como cada parcela do balanço sofre influência em sua magnitude de acordo com as variações das condições climáticas de acordo com a determinação dos métodos de cálculo da evapotranspiração no solo e a presença da vegetação na superfície.

Os estudos desenvolvidos reforçam a heterogeneidade do material que compõem uma pilha de estéril, o que torna complexa a determinação de seus parâmetros de definição das propriedades dos materiais, além da dificuldade da obtenção de dados para determinação das condições de contorno do problema.

Os métodos de determinação da taxa de evapotranspiração refletem em diferenças na magnitude das parcelas do balanço de massas no ciclo hídrico – principalmente na taxa de infiltração, evaporação e transpiração. Os métodos utilizados para este trabalho – Thornthwaite (1948) e Penman (1948) – alcançaram ao fim do estudo do protótipo erros acumulados do balanço hídrico de 7,45 m<sup>3</sup> e 9,86 m<sup>3</sup> respectivamente, de forma que, para este modelo, o método de Thornthwaite (1948) se mostrou mais adequado. Além disso, a presença da vegetação resultou em um erro do balanço ainda menor, de 7,39 m<sup>3</sup>.

Além dos diferentes métodos de determinação da taxa de evapotranspiração, o estudo apresenta a variação do volume acumulado de água na região de solo não saturado (no material que compõem a pilha de estéril), além de acompanhar a variação do grau de saturação ao longo do ano no interior do solo. As camadas mais próximas da superfície se mostraram mais susceptíveis a oscilações no grau de saturação, sendo diretamente impactadas na relação solo-atmosfera e solo-planta-atmosfera.

**Palavras-chave:** Pilha de Estéril, solo não saturado, sazonalidade, grau de saturação.

## ABSTRACT

This work presents an overview over the influence of climatic and seasonal conditions of a sterile waste pile composed by iron waste in an unsaturated condition over a year. The study presents, from a computational program of numerical analysis, how the soil-plant-atmosphere interaction occurs from the water balance equation and how each portion of the balance sheet suffers influence and oscillation in its magnitude according to the variations of the climatic conditions and also according to the different the methods of calculation of evapotranspiration in the soil and the presence of vegetation on the surface.

The studies developed reinforce the heterogeneity of the material that compose a sterile waste pile, which makes complex the determination of its parameters of definition of the properties of the materials, besides the difficulty of obtaining data to determine the boundary conditions of the problem.

The methods adopted for determining the evapotranspiration rate reflected in differences on the magnitude of the mass balance portions in the hydric balance – mainly in the rate of infiltration, evaporation and transpiration. The methods used for this work - Thornthwaite (1948) and Penman (1948) – reached by the end of the study of the prototype accumulated errors in water balance of 7.45 m<sup>3</sup> and 9.86 m<sup>3</sup> respectively, which, for this model, the method of Thornthwaite (1948) proved more accurate results. In addition, the presence of vegetation resulted in an even smaller error in the balance, of 7.39 m<sup>3</sup>.

In addition to the different methods of determination of the evapotranspiration rate, the study presents the variation of the rate of water volume stored in the region of unsaturated soil (in the material that compose the waste pile), besides accompanying the variation of the degree of saturation inside the soil throughout the year. The layers closer to the surface were more susceptible to oscillations in the degree of saturation, being directly impacted by the relationship between soil-atmosphere and soil-plant-atmosphere.

**Keywords:** Sterile waste pile, Unsaturated soil, Seasonal conditions, Degree of saturation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho esquemático do método de execução Descendente de ilha de estéril.....	16
Figura 2: Desenho esquemático representando o depósito de material pelo caminhão basculante em pequenas pilhas .....	17
Figura 3: Desenho esquemático representando a passagem dos tratores que quebram o material depositado .....	17
Figura 4: Representação esquemática do solo saturado e não-saturado. No solo saturado têm-se a água preenchendo todos os vazios do solo, enquanto na região não-saturada encontra-se a zona de capilaridade, uma região trifásica (solo, ar e água) e acima, uma região seca, com ar preenchendo a maioria dos vazios do solo. ....	20
Figura 5: Representação das quatro fases de um solo não-saturado.....	21
Figura 6: Modos de ruptura em pilhas de estéril, onde a água é o principal .....	23
Figura 7: Curva característica típica de solos siltosos .....	30
Figura 8: Representação gráfica da diferença entre as curvas características de um processo de secagem e de um processo de umedecimento de um solo .....	31
Figura 9: Comparação entre as curvas características típicas para os diferentes tipos de solo (Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994). ....	33
Figura 10: Esquema representativo que compara o fluxo de água na condição saturada, em zona não saturada e por fim, quando o solo atinge o teor de umidade residual, onde o fluxo é impedido (Fone: Adaptada do manual SEEP/W, GeoSlope, 2009). ....	34
Figura 11: Componentes e representação do ciclo hidrológico. ....	37
Figura 12: Fluxos que ocorrem entre as interfaces solo-atmosfera. (Fonte: Adaptada de BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015). ....	40
Figura 13: A relação entre a taxa de infiltração com o passar do tempo durante uma precipitação constante.....	41
Figura 14: Geometria da pilha de Estéril protótipo adotada para o estudo. ....	55

Figura 15: Malha de Elementos Finitos do protótipo de Pilha de Estéril de minério de ferro.....	56
Figura 16: Condições de contorno aplicadas ao protótipo da Pilha de Estéril. ...	58
Figura 17: Aplicação da condição de contorno Interação Terra-Clima com taxa de evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) ao modelo protótipo da Pilha. ....	60
Figura 18: Aplicação da condição de contorno Interação Terra-Clima com taxa de evapotranspiração pelo método de Penman (1948) ao modelo protótipo da Pilha. ..	61
Figura 19: Modelo da função do limite de umidade ( $\alpha_w$ ) da vegetação.....	63
Figura 20: Aplicação da condição de contorno Interação Terra-Clima com taxa de evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) com a presença de vegetação ao modelo protótipo da Pilha.....	63
Figura 21: Resultado da análise permanente para determinação da linha freática. ....	64
Figura 22: Resultados acumulados das parcelas do Balanço Hídrico obtidos a partir da análise hídrica de interação solo-atmosfera com evapotranspiração obtida a partir do método de Thornthwaite (1948). ....	66
Figura 23: Gráfico do volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise pelo método de Thornthwaite. ....	67
Figura 24: Grau de saturação na condição inicial do modelo, decorrido 1 dia – Modelo de Thornthwaite.....	68
Figura 25: Grau de saturação no modelo decorridos 100 dias, durante o período de chuvas – Modelo de Thornthwaite.....	68
Figura 26: Grau de saturação pelo Estéril decorridos 275 dias, durante o período de baixa precipitação – Modelo de Thornthwaite. ....	69
Figura 27: Grau de Saturação do Estéril durante o período de chuvas – Modelo de Thornthwaite.....	69
Figura 28: Gráfico do grau de saturação com o tempo considerando pontos a diferentes profundidades – Método de Thornthwaite. ....	70

Figura 29: Resultados acumulados das parcelas do Balanço Hídrico obtidos a partir da análise hídrica de interação solo-atmosfera com evapotranspiração obtida a partir do método de Penman (1948).....	71
Figura 30: Gráfico do volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise pelo método de Penman-Wilson. ....	72
Figura 31: Gráfico comparativo entre volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise pelo método de Thornthwaite e de Penman-Wilson. ....	72
Figura 32: Grau de saturação na condição inicial do modelo, decorrido 1 dia – Modelo de Penman. ....	73
Figura 33: Grau de saturação no modelo decorridos 100 dias, durante o período de chuvas – Modelo de Penman. ....	73
Figura 34: Grau de saturação no modelo decorridos 275 dias, durante o período de baixa precipitação – Modelo de Penman.....	74
Figura 35: Grau de saturação no modelo decorridos 348 dias, durante o período de chuvas – Modelo de Penman. ....	74
Figura 36: Gráfico do grau de saturação com o tempo considerando pontos a diferentes profundidades – Método de Penman-Wilson.....	75
Figura 37: Resultados acumulados das parcelas do Balanço Hídrico obtidos a partir da análise hídrica de interação solo-atmosfera com evapotranspiração obtida a partir do método de Thornthwaite (1948) considerando a presença de vegetação...	76
Figura 38: Gráfico do volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise no modelo considerando presença de vegetação. ....	77
Figura 39: Grau de saturação na condição inicial do modelo, decorrido 1 dia – Modelo com a presença da vegetação.....	77
Figura 40: Grau de saturação no modelo decorridos 100 dias, durante o período de chuvas – Modelo com a presença da vegetação. ....	78
Figura 41: Grau de saturação no modelo decorridos 275 dias, durante o período de baixa precipitação – Modelo com a presença da vegetação. ....	78

Figura 42: Grau de saturação no modelo decorridos 348 dias, durante o período de chuvas – Modelo com a presença da vegetação. ....79

Figura 43: Gráfico do grau de saturação com o tempo considerando pontos a diferentes profundidades – Modelo com a presença da vegetação. ....80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos para determinação da sucção. ....	29
Tabela 2: Métodos permanentes e transientes para determinação da condutividade hidráulica em laboratório. (Fonte: BICALHO, MACHADO, & GERSCOVICH, 2015– Adaptado de Masouri et al., 2008). ....	35
Tabela 3: Valores típicos de albedo para superfícies terrestres. ....	39
Tabela 4: Alguns valores típicos de condutividade térmica. ....	48
Tabela 5: Alguns valores típicos de capacidade de aquecimento volumétrico. ..	50
Tabela 6: Parâmetros de entrada dos materiais para análise no SEEP/W. ....	57
Tabela 7: Valores de taxa mensal de evapotranspiração (ET) pelo método de Thornthwaite.....	59
Tabela 8: Dados Meteorológicos utilizados para o estudo (Fonte: Adaptado de PEDRA, 2010).....	87

# SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	4
Lista de Tabelas.....	8
Sumário .....	9
1 Introdução .....	11
1.1 Objetivo .....	13
1.1.1 Objetivos Específicos.....	13
2 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1 Métodos construtivos de pilhas de estéril .....	15
2.2 Parâmetros relacionados à análise de zonas não saturadas .....	18
2.2.1 Regime permanente e transiente .....	19
2.2.2 Saturação do solo e Zona Vadosa .....	19
2.2.3 Fluxo de água no solo.....	23
2.2.4 Sucção – Potencial Matricial e Osmótico do solo.....	26
2.3 Curva Característica .....	29
2.4 Condutividade Hidráulica.....	33
2.5 Sazonalidade, interação solo-planta-atmosfera e sua influência nos solos não-saturados .....	36
2.5.1 Ciclo hidrológico, balanço de água e balanço de energia .....	37
2.5.2 Precipitação, Escoamento Superficial e Infiltração .....	40
2.5.3 Evaporação e Evapotranspiração .....	42
2.5.4 Temperatura.....	45
2.5.5 Vegetação .....	50
3 Metodologia.....	53

3.1	Análise Numérica.....	54
3.1.1	O Modelo – Protótipo da Pilha de Estéril .....	54
3.1.2	Parâmetros de Entrada dos materiais .....	56
3.1.3	Linha Freática .....	57
3.1.4	Interação Solo-Atmosfera.....	58
3.1.5	– Vegetação .....	61
4	RESULTADOS .....	64
4.1	– Linha Freática .....	64
4.2	– Interação Solo-Atmosfera .....	65
4.3	Vegetação .....	75
5	CONCLUSÃO .....	81
	Referências.....	85

# 1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora tem grande impacto na economia brasileira, sendo um processo importante para o desenvolvimento do país. De acordo com o IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração (2018), atualmente a mineração representa 16,7% do PIB industrial do país, faturando 32 bilhões de dólares no ano de 2017.

Entretanto, como todo processo produtivo, a mineração gera uma grande quantidade de resíduos durante a extração e beneficiamento do minério. Com o aumento da demanda por insumos minerais nos últimos anos e a intensificação das atividades das empresas mineradoras, houve conseqüentemente um crescimento na geração de resíduos de mineração, aumentando também a busca por regiões adequadas para a construção de depósitos e barragens para direcionar esses resíduos.

O processo de mineração passa pela etapa de lavra, onde é feita a extração do minério para que então possa ser feito o beneficiamento e posteriormente sua comercialização. Durante a etapa de extração e beneficiamento são gerados resíduos de baixo ou nenhum valor comercial, caracterizados como estéril (resíduo sólido da extração) e os rejeitos.

De maneira geral, os estéreis constituem comumente os materiais de decapeamento da jazida, escavados e removidos de forma a permitir o acesso aos corpos de minério. Os materiais constituintes são representados por solos e rochas de naturezas diversas, com diferentes granulometrias, que são transportados por caminhões e estocados sob a forma de pilhas em sucessivos alteamentos. Uma vez que o lançamento e a disposição final dos materiais escavados ocorrem segundo a sequência errática da liberação das novas frentes de lavra, uma pilha de estéril constitui, por princípio, uma estrutura extremamente heterogênea e naturalmente complexa (GOMES, 2004).

O descarte do material caracterizado como estéril ocorre continuamente durante toda a exploração da jazida, o que demanda grandes áreas para deposição desse material sem valor comercial agregado, refletindo em custos à mineradora.

De acordo com Franco (1991, *apud* Saliba, 2007), os principais custos da disposição de estéril estão concentrados na drenagem, proteção vegetal, retenção de finos gerados por carreamento dos sólidos, manutenção da estrutura e o transporte do resíduo do processo de lavra – sendo este o custo mais expressivo para as mineradoras.

Devido à complexidade na composição heterogênea dos depósitos de estéril, o extinto DNPM (Departamento Nacional de Pesquisa Mineral), transformado em ANM (Agência Nacional de Mineração) em 2017, estabelece por meio da Norma Regulamentadora de Mineração, NRM 19 (DNPM, 2001) a necessidade de manter estudos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos após a construção da pilha.

Sendo o material composto por solos e rochas diversos, depositados nas pilhas em sua forma natural, sem passar por nenhum tipo de processamento, a análise dos parâmetros de segurança e estabilidade nos depósitos do estéril deve ser criteriosa.

Apesar de não passar por nenhum tipo de tratamento ou beneficiamento, os resíduos são retirados de sua localização e forma originais, transportados e depositados em pilhas. Todo esse procedimento altera suas condições de confinamento iniciais, podendo influenciar em características do material – fluxo, estabilidade, confinamento das partículas, oxidação etc. Isso aumenta consideravelmente a possibilidade de ocorrência de erosão devido ao vento ou à água, o que impacta e polui o ambiente ao seu entorno pelo carreamento das partículas do solo (Robertson & Kirsten, 1985).

Quanto a estabilidade, é importante considerar análises a longo prazo, levando em conta o risco de dano à estabilidade da pilha e as mudanças na linha freática. O aumento da zona saturada causado pelo acúmulo de água subterrânea e mudanças na permeabilidade do solo gerados pela sazonalidade e a diminuição da resistência do material devido ao intemperismo são alguns fatores que podem levar ao comprometimento da estrutura como um todo (Robertson & Kirsten, 1985).

A mecânica dos solos clássica usualmente considera as condições do solo como meio totalmente saturado ou seco. Porém, quando exposto à influência do clima, regime de chuvas, variação da temperatura, entre outras condições sazonais, é

necessário considerar que haverá uma variação no grau de saturação do solo, podendo o solo estar parcialmente saturado ou não saturado.

A empresa desenvolvedora de programas GEOSLOPE (2007) pontua que atualmente não se é mais aceitável simplesmente ignorar a movimentação da água em solos não saturados, uma vez que se limita assim as variáveis e o tipo de problema em questão, resultando em uma análise superficial.

Todavia, a consideração de um fluxo transiente torna o problema mais complexo, sendo necessário considerar parâmetros não-lineares, como a sucção no solo, a curva característica e a condutividade hidráulica do meio, a influência e variação da temperatura, evaporação, entre outros. O uso de métodos numéricos computacionais se torna, então, uma poderosa ferramenta na análise desse tipo de problema, possibilitando resultados mais refinados e confiáveis.

A escolha por estudar pilhas de estéril deu-se principalmente devido ao atual contexto na mineração. Com o rompimento da barragem de rejeitos Fundão em Mariana, viu-se um impacto enorme no setor da mineração, refletindo não só em uma queda no rendimento econômico do setor no ano de 2015 (IBRAM, 2018), mas também na forma das próprias empresas do ramo em ver e gerir com mais cautela a destinação dos resíduos.

Dessa forma, este trabalho visa por meio de análises numéricas realizadas a partir do software GeoStudio 2019 – módulos Seep e Slope, apresentar a maneira como o regime hídrico é influenciado pelos fatores climáticos e hidrológicos ao longo do tempo.

## **1.1 Objetivo**

Analisar o comportamento hídrico de pilhas estéril de minério de ferro em condição não-saturada expostas a intempéries ao longo do tempo.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

Estudo dos parâmetros relacionados às zonas não saturadas: sucção, curva característica, condutividade hidráulica, temperatura, evaporação, vegetação;

Elaboração e estudo de um modelo protótipo para análise numérica;

Análise numérica das condições hídricas e do balanço hídrico do protótipo da pilha estéril.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Métodos construtivos de pilhas de estéril**

Dentre o desenvolvimento e planejamento de longo prazo do processo de lavra da mineradora, é feita a elaboração dos projetos que detalham a disposição de estéril nas pilhas de depósito. Para isso, é necessário estudar diversos fatores que influenciam na disposição da pilha, como: características e volume dos materiais depositados, o empolamento (aumento de volume do solo ao ser retirado de seu estado de confinamento natural), a distância de transporte, condições de drenagem, acesso à pilha, entre outros.

Além disso, deve-se considerar na escolha do local a topografia, o não comprometimento de cursos d'água ou vegetações, a capacidade do local em armazenar volume compatível com o volume de resíduo gerado e a implantação de cobertura vegetal adequada ou a aplicação de uma camada externa de argila na face do talude.

O primeiro procedimento antes da construção da pilha consiste na terraplanagem do local, retirando a vegetação e possíveis camadas de solo mole ou com significativa presença de material orgânico.

A Norma NBR 13029 – Pilhas de Estéril e Rejeito (ABNT, 2017) estabelece dois métodos de execução de pilhas: método descendente e método ascendente.

O método descendente, também conhecido como método de ponta de aterro, é caracterizado pelo lançamento desordenado, sem planejamento ou controle do material. Apesar de ser um método econômico, o estéril depositado não sofre nenhum tipo de compactação ou drenagem adequada, o que pode resultar em erosão e falha na estabilidade da pilha. Além disso, como o material da superfície se encontra em um estado fofo, uma vez que o confinamento do material dependerá apenas da sobreposição de camadas de depósito de estéril, a ocorrência de vento ou chuva podem deslocar partículas sólidas, agravando a poluição local. A Figura 1 representa o método citado acima.

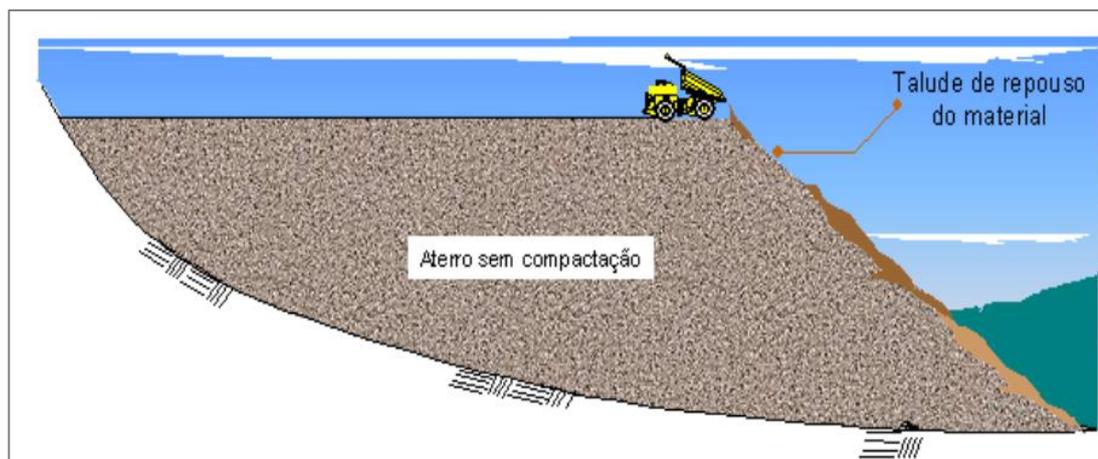


Figura 1: Desenho esquemático do método de execução Descendente de ilha de estéril

(Fonte: Nunes, D. R., 2014 - Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia).

Já no método ascendente, o material transportado e lançado pelos caminhões basculantes é regularizado por tratores, sendo a construção da pilha controlada e mais segura.

Nesse método o estéril é depositado pelos caminhões formando pilhas menores de 2 a 3 metros de altura, como indicado na Figura 2, que são posteriormente compactadas pela passagem de máquinas tratores que quebram o material, formando camadas com aproximadamente 1 a 1,5 metro de espessura, como visto na Figura 3. Esse processo é repetido até que se forme bancadas de 10 a 15 metros de altura, onde é feita uma berma, para então repetir o processo.



Figura 2: Desenho esquemático representando o depósito de material pelo caminhão basculante em pequenas pilhas

(Fonte: Nunes, D. R., 2014 - Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia).

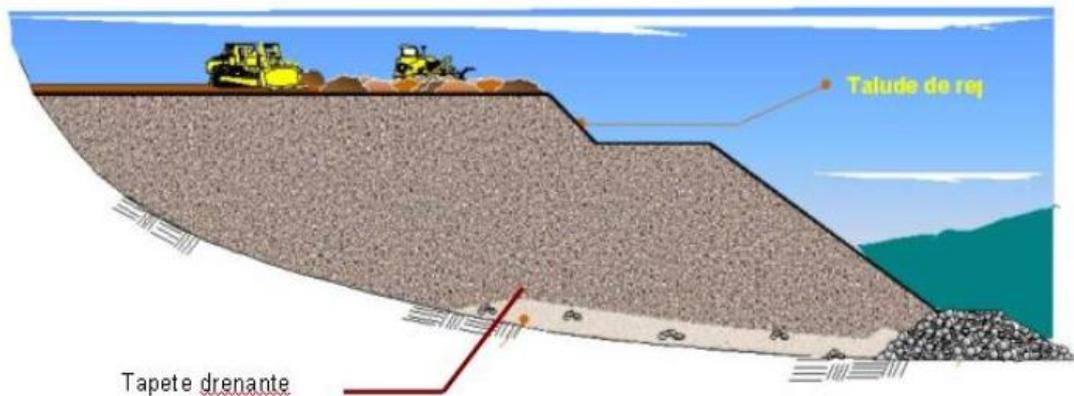


Figura 3: Desenho esquemático representando a passagem dos tratores que quebram o material depositado

(Fonte: Nunes, D. R., 2014 - Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia).

Uma das maneiras de garantir a estabilidade das bancadas, e da pilha como um todo, é através do processo denominado retaludamento, que é uma estratégia com objetivo de suavizar o ângulo de inclinação do talude (ângulo da face) a partir de cortes, aumentando a estabilidade da pilha através da compactação da superfície.

## 2.2 Parâmetros relacionados à análise de zonas não saturadas

O uso de métodos numéricos computacionais é uma poderosa ferramenta quando se trata da análise do regime hídrico e estabilidade em estruturas geotécnicas, uma vez que possibilita resultados muito mais refinados e confiáveis.

Com o objetivo de se aproximar o máximo possível das condições reais da obra, é necessário a entrada de alguns parâmetros e variáveis no *software*. É uma prática comum a realização de ensaios de laboratório com amostras do solo ou o uso de correlações para se obter os parâmetros de entrada necessários.

A estimativa dos parâmetros físicos do solo através de ensaios e correlações é importante especialmente no que se trata da estrutura de pilhas estéril, uma vez que se tem ali um complexo sistema de interação entre diferentes tipos de solo, água, ar e, em alguns casos, vegetação, dispostos constantemente a variáveis climáticas e hidrológicas que oscilam em intensidade ao longo do tempo.

Visando a modelagem numérica através do *software* GeoStudio 2019 – módulos SEEP e SLOPE, este capítulo irá discorrer sobre os parâmetros de entrada e sua obtenção, associados ao comportamento de pilhas de estéril de minério de ferro, possibilitando assim a compreensão do modelo proposto e a análise dos resultados obtidos.

### **2.2.1 Regime permanente e transiente**

O modelo de análise do regime hídrico em uma obra geotécnica pode ser tomado em duas abordagens diferentes: Regime Permanente e Regime Transiente.

A condição de regime permanente, como o próprio nome diz, descreve uma situação em que o estado do modelo é estável e não sofre alterações com o passar do tempo. Em uma análise de fluxo, por exemplo, o estado se refere às pressões e ao fluxo da água no solo, ou seja, as condições hidráulicas definidas inicialmente se manterão fixas ao longo de toda a análise, o que resulta em uma simplificação do modelo (GEOSLOPE, 2007).

Já em regime transiente considera-se as variações e mudanças no estado do modelo com o passar do tempo. Esse tipo de análise leva em consideração o tempo necessário para que o solo responda a uma condição limite imposta pelo usuário. Em uma análise transiente, há duas considerações principais: o quão rápido a água está fluindo (função da condutividade hidráulica do solo) e a quantidade de água que está fluindo (função da quantidade de água que fica armazenada nos poros do solo e a quantidade de água no sistema) (GEOSLOPE, 2007).

A condição de regime permanente dificilmente será obtida em uma situação real em que a obra geotécnica se encontra exposta às intempéries e sazonalidades. Dessa forma, para obter um resultado fiel às condições de campo, é necessário considerar o modelo da pilha de estéril como uma situação de regime transiente.

### **2.2.2 Saturação do solo e Zona Vadosa**

A mecânica dos solos clássica usualmente considera as condições do solo como meio totalmente saturado ou seco. Porém, quando exposto à influência do clima, regime de chuvas, variação da temperatura, entre outras condições sazonais, é necessário considerar que haverá uma variação no grau de saturação do solo, podendo o solo estar parcialmente saturado ou não-saturado.

Existem inúmeros tipos de solo cujo comportamento não é consistente com os princípios e conceitos da mecânica dos solos clássica de solos saturados. A presença de mais de um tipo de fluido (água e ar, como visto na Figura 4) nos vazios do solo resulta em um comportamento material que é desafiador para engenharia prática, sendo os solos não saturados a maior categoria de solos presente no ambiente (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

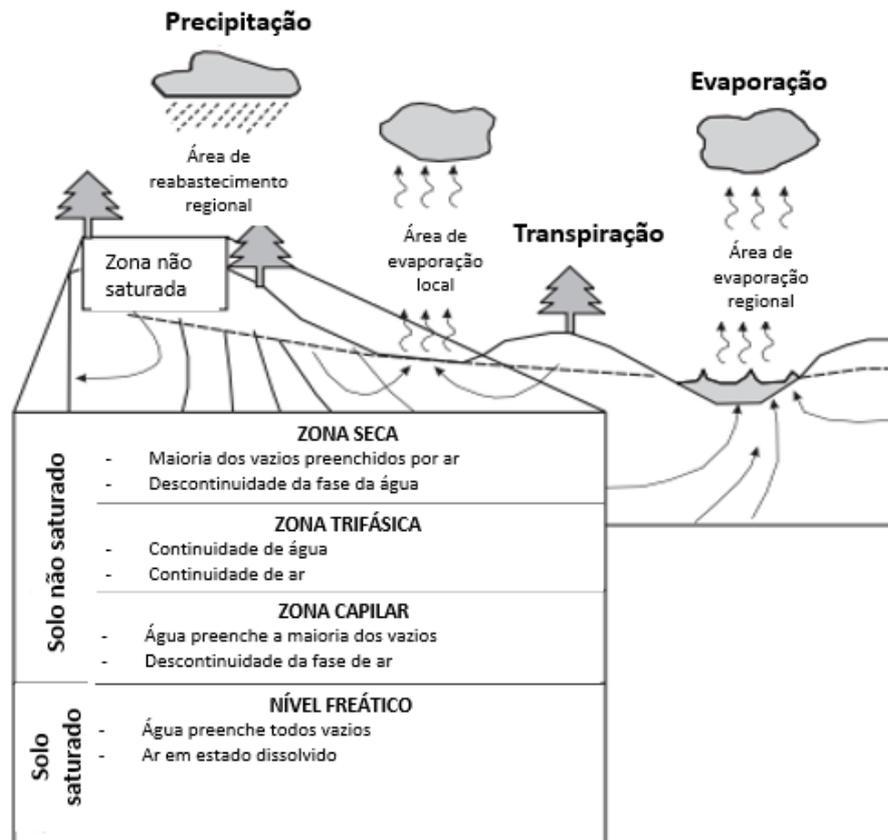


Figura 4: Representação esquemática do solo saturado e não-saturado. No solo saturado têm-se a água preenchendo todos os vazios do solo, enquanto na região não-saturada encontra-se a zona de capilaridade, uma região trifásica (solo, ar e água) e acima, uma região seca, com ar preenchendo a maioria dos vazios do solo.

(Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

Lambe & Whitman (1969, *apud* Leme, 2009) propuseram que a estrutura do solo não saturado é constituída por um sistema trifásico, formado por uma fase sólida (partículas e minerais), por uma fase líquida (em geral, água) e por uma fase gasosa (ar). Além disso, Fredlund e Morgenstern (1977) ainda propõem uma quarta fase

independente, dada pela interface água-ar, denominada como membrana contrátil. Essa membrana contrátil possui uma propriedade específica de tensão superficial, capaz de exercer uma tensão de tração devido a forças intermoleculares atuantes dentro dessa membrana. Tal composição pode ser identificada na Figura 5.

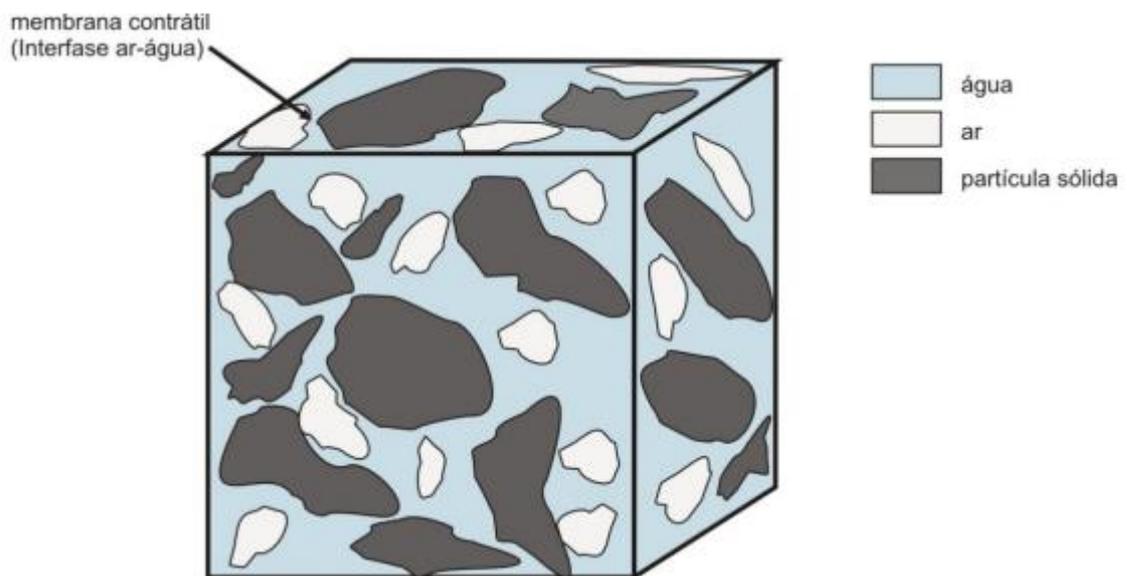


Figura 5: Representação das quatro fases de um solo não-saturado.

(Fonte: Imagem adaptada de Fredlund e Morgenstern, 1977).

Dessa forma, a zona vadosa ou zona não-saturada é caracterizada por apresentar grau de saturação inferior à 100%, de forma que os fenômenos de condutividade hidráulica e curva característica (ou curva de retenção de água) do solo são predominantes e de suma importância para caracterizar a situação do campo.

A consideração de que em campo o solo pode se encontrar em condição não saturada se torna importante uma vez que os fenômenos envolvendo o movimento de massa em solos como erosão, problemas de estabilidade e colapso de estruturas são majoritariamente danos associados à variação do grau de saturação do solo, ou seja, são situações em que se torna necessário o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo e condições de contorno do problema para um estudo apurado.

Franco (1991, *apud* Saliba, 2007) aponta que, apesar do maior custo agregado à uma pilha de estéril ser o do transporte do material, a manutenção também pode resultar em gastos significativos ao longo da vida útil da pilha, devido à saturação gerada pela ausência de sistemas de drenagem interna e superficial adequados, associado à alta compressibilidade do material lançado e depositado em grandes espessuras, resultando em deformações excessivas e instabilidade na estrutura.

Além disso, a estabilidade a longo prazo dos depósitos de estéril pode ser comprometida pelas condições climáticas e pelo intemperismo ao qual a pilha é exposta, impactando diretamente na posição do nível freático interno da pilha.

A possível elevação do lençol freático, causado pelo acúmulo de água no interior da pilha, e as variações da permeabilidade dos materiais que a constituem devido à exposição ao intemperismo podem resultar em uma redução nos valores dos parâmetros de resistência do estéril, comprometendo a estabilidade da estrutura e levando-as à ruptura (Robertson & Kirsten, 1985).

Caldwell e Moss (1984, *apud* Robertson & Kirsten, 1985) descreveram alguns modos de ruptura de pilhas de estéril. Dentre as causas, a influência da água e da saturação do solo nessas estruturas se mostra relevante, como ilustrado na Figura 6.

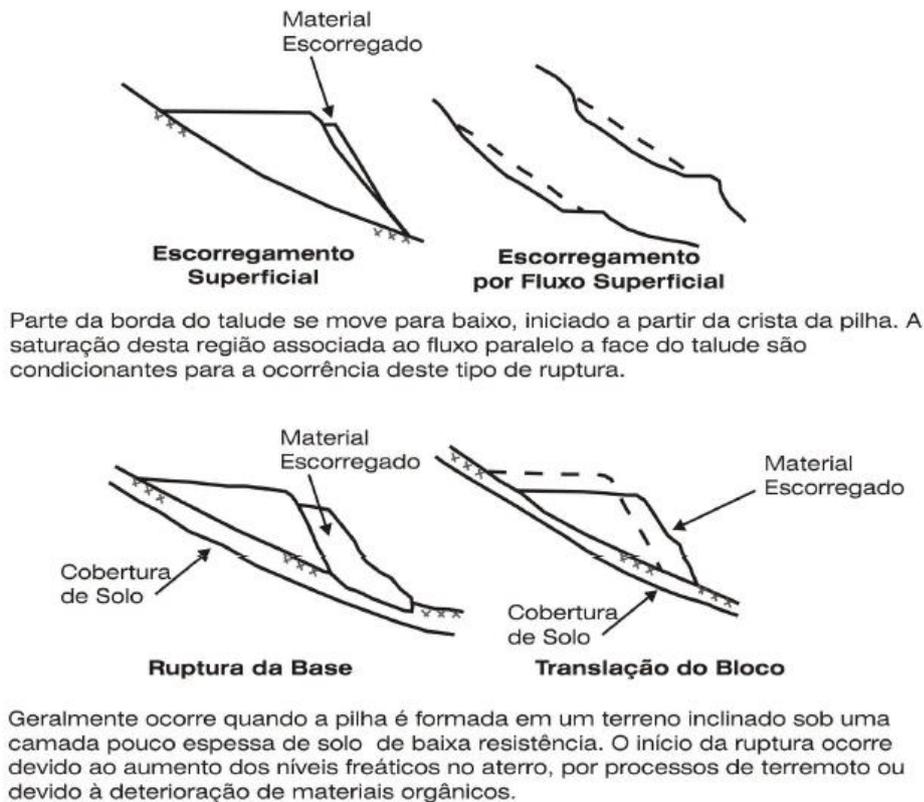


Figura 6: Modos de ruptura em pilhas de estéril, onde a água é o principal condicionante

(Fonte: Adaptado de Caldwell e Moss, 1981).

### 2.2.3 Fluxo de água no solo

A presença de um fluxo de água através do solo é um fator que influencia diretamente a estabilidade da estrutura. Para a análise hídrica do solo, é preciso determinar uma rede de fluxo. A determinação do fluxo em um meio não-saturado se torna complexa, uma vez que os fatores de influência não são lineares e variam com o tempo, sendo necessário o auxílio de métodos de análise computacionais para resultados mais confiáveis e precisos.

As condições climáticas têm um papel importante na determinação da saturação do solo, uma vez que a evaporação, a presença de vegetação e o regime de chuvas local refletem em alterações na rede de fluxo do meio.

Analisando a partir do conceito de energia, o fluxo de um fluido em um meio qualquer se dá quando há um gradiente de energia interna entre as moléculas do fluido localizadas em diferentes pontos do meio, que nesse caso é o meio poroso do solo. Dessa forma, o fluxo de água no solo pode ser descrito a partir da clássica equação de energia de Bernoulli, apresentada a seguir na Equação (1), acrescida de alguns parâmetros: potencial osmótico, pneumático, térmico e matricial (MACHADO & VILAR., 2015).

$$\psi_{\text{total}} = \psi_{\text{temp}} + \psi_z + \psi_{\text{cin}} + \psi_p + \psi_{\text{pn}} + \psi_m + \psi_{\text{osm}} \quad (1)$$

Sendo:

$\psi_{\text{total}}$  = Potencial total da água no solo;

$\psi_{\text{temp}}$  = Potencial térmico da água no solo;

$\psi_z$  = Potencial de posição ou gravitacional;

$\psi_{\text{cin}}$  = Potencial cinético da água no solo;

$\psi_p$  = Potencial de pressão da água no solo;

$\psi_{\text{pn}}$  = Potencial pneumático da água no solo;

$\psi_m$  = Potencial matricial da água no solo;

$\psi_{\text{osm}}$  = Potencial osmótico da água no solo.

Na Equação (1), como as velocidades de fluxo no interior do solo geralmente são baixas, a carga cinética é desprezível, podendo ser desconsiderada. Já o potencial térmico será significativo toda vez que houver um gradiente de temperatura relevante no solo estudado, de forma que a propagação de energia térmica no solo se dá através da condução de calor, que tem como consequência também o fluxo de água no meio, uma vez que a água ao ser aquecida sofre um aumento de energia interna, se deslocando para regiões mais frias.

Já com relação a componente de carga de pressão, consequência da interação da água e os solutos nela dissolvidos com a matriz do solo, processo denominado de sucção, a Equação (1) pode ser aplicada a solos não-saturados desde que sejam considerados valores negativos. Difere-se dos solos saturados em que a carga de pressão usualmente assume valores positivos gerados a partir de sobrepressão ou submersão, por exemplo.

Tendo em vista que a pressão é uma representação da densidade de energia por volume, a Equação (1) pode ser reescrita em forma de cargas hidráulicas, como indicado na Equação (2).

$$\text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \tag{2}$$

Sendo:

$C$  = calor específico da água (J/K);

$T$  = temperatura (K);

$u$  = pressão na água intersticial (N/m<sup>2</sup>);

$u_{ar}$  = pressão no ar intersticial (N/m<sup>2</sup>);

$u_m$  = pressão na água intersticial devido a sucção matricial (N/m<sup>2</sup>);

$u_{osm}$  = pressão na água intersticial devido a sucção osmótica (N/m<sup>2</sup>);

$\gamma_w$  = peso específico da água (N/m<sup>3</sup>).

A Equação (2) indica que as pressões matricial, osmótica, pneumática e carga de pressão tem a mesma influência na mudança da pressão intersticial. Por exemplo, no caso de uma região totalmente saturada, situada abaixo no lençol freático, a pressão na água vai variar de acordo com distância do ponto analisando em relação à superfície do nível d'água, enquanto que o potencial matricial será nulo já que não ocorrerá fenômeno de capilaridade ou adsorção onde todos os vazios se encontram preenchidos por água. Já em uma região não-saturada, situada entre o nível do lençol freático e a superfície do solo (zona vadosa), os valores de pressão na água intersticial serão menores que a pressão atmosférica, sendo dependente da quantidade de água remanescente no solo.

#### 2.2.4 Sucção Potencial Matricial e Osmótico do solo

Quando a água não está presente em todos os vazios do solo, havendo também a presença de ar, o solo se encontra em situação não-saturada. De acordo com Marinho (1997), os fenômenos envolvidos na não saturação do solo fazem com que surja uma pressão inferior à pressão atmosférica na água do solo, denominada sucção.

Marinho (1997) define a sucção como “pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação”. Logo, a sucção é uma tensão que avalia a capacidade do solo em reter ou não a água.

A sucção do solo origina-se devido ao potencial matricial e potencial osmótico do solo. O potencial matricial do solo é definido pelos fenômenos de capilaridade e adsorção, enquanto o potencial osmótico se dá a partir da presença de solutos, que ao entrarem em contato com a água intersticial do solo, estimulam uma aproximação entre as moléculas de água

A sucção total do solo ( $S_t$ ) pode ser determinada a partir da soma das duas parcelas, a sucção mátrica ou matricial ( $S_m$ ) e a sucção osmótica ( $S_o$ ), como indicado na Equação (3).

(3)

Em fluidos como a água, as moléculas apresentam uma interação de curto alcance, denominada força de Van der Waals. Essa interação pode ser de diferentes tipos, de forma que, quando se origina da interação entre as moléculas de água, é chamada de forças de coesão, diferente quando ocorre entre as moléculas de água e uma superfície sólida (partículas de solo), chamada de forças de adesão.

Há também uma terceira variável denominada de membrana contrátil, caracterizada na interface trifásica entre a água, o ar e a superfície sólida do solo. É gerado nessa interface um desequilíbrio entre as forças de adesão e as forças de

coesão, resultando em uma contração na superfície do líquido, que diminui de volume e conseqüentemente aumenta a sua energia potencial acumulada.

De modo geral, as forças de coesão entre as moléculas de água superam as forças de adesão. Entretanto, em uma situação em que as forças de adesão entre a água e a partícula sólida são predominantes, a membrana contrátil – membrana de interação entre água, ar e sólido – se curva, caracterizando o fenômeno da ascensão capilar.

A capilaridade ou tensão capilar no solo se dá a partir dessas forças de atração entre as moléculas líquidas e sólidas, o que faz com que a água suba além do nível freático, contra a ação da gravidade. Os fenômenos de ascensão capilar são mais evidentes quanto menor o diâmetro tubo capilar, ou diâmetro dos vazios do solo. Em solos arenosos, em que os vazios apresentam um diâmetro maior, a altura da ascensão capilar é da ordem de centímetros, enquanto que em solos mais argilosos, que apresenta vazios menores, a zona capilar pode atingir dezenas de metros.

É importante ressaltar que para manter o equilíbrio de forças do sistema água-ar-sólido, a pressão da água na membrana contrátil será obrigatoriamente menor que a pressão atmosférica, motivo o qual a capilaridade reduz a energia interna da água e conseqüentemente a pressão intersticial da água (MACHADO & VILAR., 2015).

Enquanto a capilaridade está relacionada as forças de interação de coesão e adesão, a adsorção ocorre devido à existência de cargas superficiais não balanceadas na superfície do solo. A adsorção é uma consequência do caráter polar das moléculas de água, que se orientam por seus polos positivos e são atraídas pela superfície negativa de partículas de argila por exemplo.

Processos como a substituição isomórfica, a dissolução iônica e cargas derivadas de complexos são os principais responsáveis pela presença de cargas superficiais nas partículas do solo. A presença dessas cargas superficiais é o que atraem as moléculas de água para o entorno das moléculas de argila, mantendo a água presa ao entorno da partícula do solo.

Dessa forma, a pressão ou potencial matricial do solo pode ser descrito a partir da Equação (4).

(4)

Sendo:

$S_m$  = Potencial matricial da água no solo;

$S_{cap}$  = Potencial capilar da água no solo;

$S_{ads}$  = Potencial de adsorção da água no solo.

Já o potencial osmótico relaciona-se com a concentração química da água no interior do solo, sendo a diferença entre a pressão de vapor em equilíbrio com a água pura e a pressão de vapor em equilíbrio com uma solução cuja composição é idêntica à da água do solo (RIOS, 2006, *apud* LEME, 2009).

O solo pode apresentar solutos em seu meio que, ao entrarem em contato com a água, originam forças coesivas entre suas moléculas, tornando-as mais próximas do que na situação em que se tem apenas água pura, por exemplo. Isso implica na diminuição da energia interna do fluido com a presença de solutos, fazendo com que a água migre de regiões que tem uma menor concentração de solutos para regiões com maior concentração de solutos.

Marinho (1997) ressalta que variações na sucção mátrica são geralmente mais significativas que variações na sucção osmótica para os solos não-saturados. Além disso, através da realização de ensaios triaxiais com sucção controlada efetuados no trabalho Edil *et al.* (1981, *apud* Leme 2009) comprovou que apenas a sucção mátrica afeta o comportamento do solo não-saturado.

Existem diversos métodos para obtenção da sucção nos solos como o método do Papel Filtro, método do Tensiômetro entre outros. A tabela 1 apresenta quais são os métodos mais usados.

Tabela 1: Métodos para determinação da sucção.

Técnica	sucção matricial	sucção osmótica	sucção total	intervalo (kPa)
Psicrômetro		X	X	100- 8000
Papel filtro	X		X	0-29000
Tensiômetro	X		X	0-90 0->1000
Translação de eixos	X			0-1500
Condutividade térmica	X			0-400
Condutividade elétrica	X	X		20-1500 <sup>f</sup>

(Fonte: MARINHO F. A., 1997).

A descrição mais detalhada de cada método de obtenção da sucção do solo pode ser encontrada no trabalho de Pedra (2010).

### 2.3 Curva Característica

A curva característica, também denominada curva de sucção ou curva de retenção, faz uma relação entre a quantidade de água presente no solo e a sucção no interior do solo. Fornecendo um entendimento conceitual entre a massa e/ou volume de água presente nos poros do solo e o estado de energia da fase da água, esta relação teve um importante papel no desenvolvimento dos estudos de solos não saturados, auxiliando na definição de suas propriedades (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

A sucção foi definida anteriormente como sendo uma tensão que avalia a capacidade do solo em reter ou não a água, comumente representada por poropressões negativas.

Já a quantidade de água presente no solo pode ser definida a partir de diferentes perspectivas, como em termos do teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ), teor de umidade

gravimétrico ou teor de umidade do solo ( $w$ ) ou mesmo em termos do grau de saturação ( $S$ ).

O teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) é dado por uma relação entre o volume total de água ( $V_w$ ), volume de vazios ( $V_v$ ) e volume de sólidos ( $V_s$ ), de acordo com a equação (5).

$$\theta = \frac{V_w}{V_v + V_s} \quad (5)$$

Uma curva característica típica de solos siltosos é apresentada na Figura 7. A curva genérica ressalta não só a relação inversamente proporcional entre o teor de umidade volumétrico e a sucção mátrica, como também dois pontos importantes para definição das propriedades do solo: a pressão de entrada de ar ( $\Psi_b$ ) e o teor de umidade residual ( $\theta_r$ ).

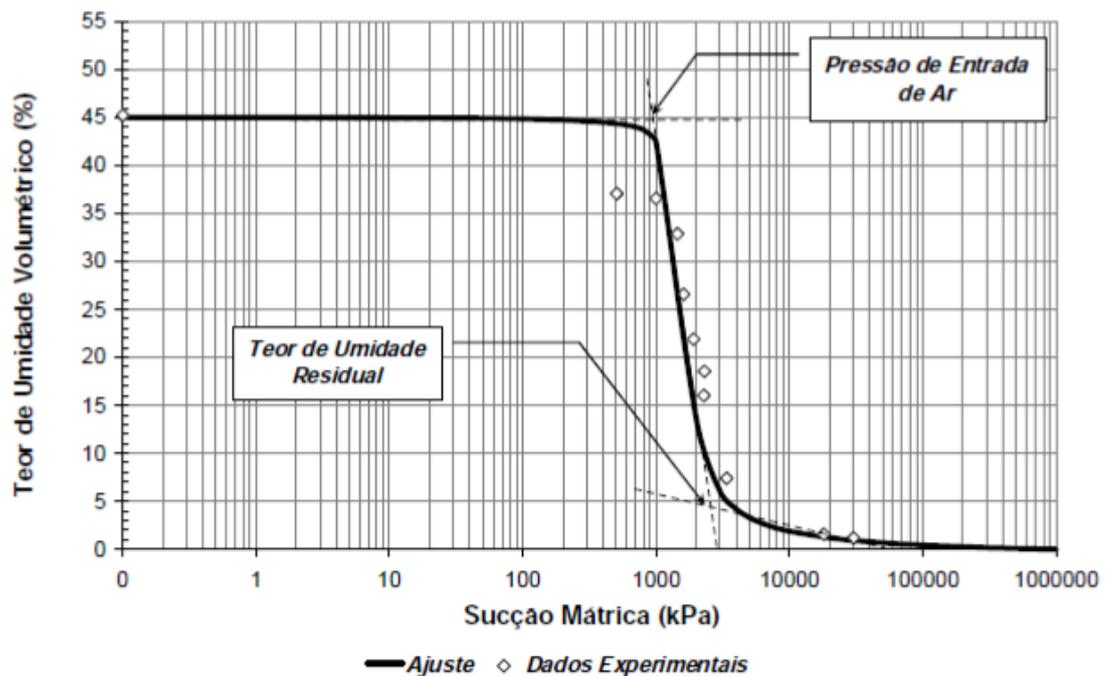


Figura 7: Curva característica típica de solos siltosos

(Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

Gercovich (2001) define que a Pressão de Entrada de ar ( $\Psi_b$ ) como a sucção crítica capaz de fazer com que a água presente no maior vazio de um solo saturado comece a sair. Após esse ponto ser atingido, com o aumento da sucção do solo,

bolhas de ar vão preenchendo os vazios do solo, que perdem água gradativamente, até que para altos valores de sucção mátrica resta apenas um teor de umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ), em que apenas vazios de diâmetros muito pequenos entre as partículas de solo permanecerão retendo água.

Uma característica particular da curva de retenção apontada por Fredlund & Rahardjo (1993) é a diferença dos processos de umedecimento e de perda de água dos solos, resultado de um fenômeno denominado de histerese. A partir de ensaios de laboratório, percebeu-se que a curva característica de um mesmo tipo de solo submetido a situações de umedecimento e de secagem eram significativamente diferentes. Dessa forma, uma curva característica obtida por um processo de secagem tende a apresentar valores de sucção mais elevados do que de um processo de umedecimento, para um mesmo valor de teor de umidade, conforme ilustra a Figura 8.

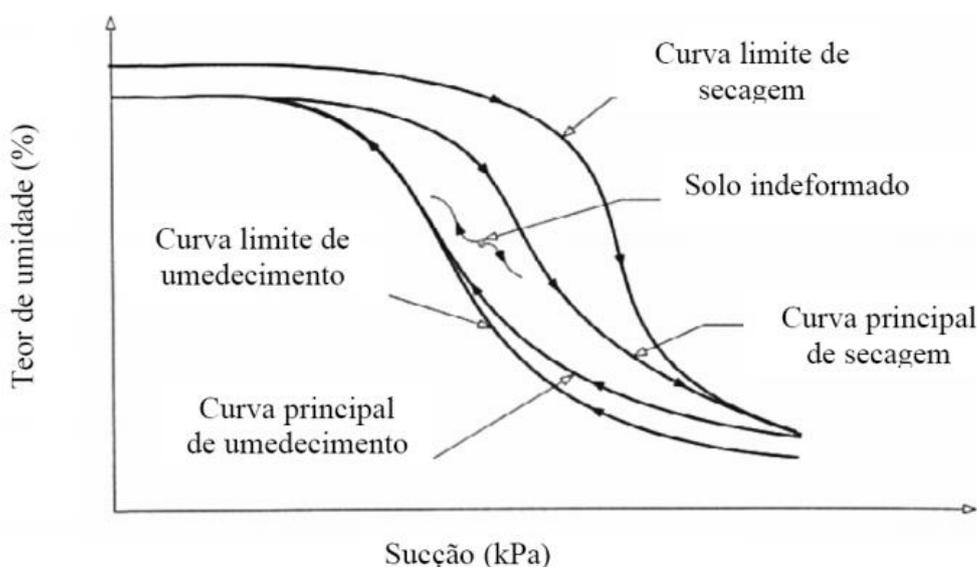


Figura 8: Representação gráfica da diferença entre as curvas características de um processo de secagem e de um processo de umedecimento de um solo

(Fonte: MELGAREJO, 2002).

Dentre as causas que levam a ocorrência desse fenômeno, têm-se a não uniformidade da geometria dos poros do solo, a variação do ângulo de contato líquido-sólido no menisco e a presença de ar dentro dos poros, que reduz o teor de umidade no processo de ganho de umidade (MARINHO, SOTO, & GITIRANA JR, 2015).

Não só o fenômeno da histerese na forma da curva de sucção, mas também fatores como a granulometria e tipo de solo, composição mineralógica e temperatura, podem ser responsáveis por alterar as propriedades da curva característica de solo.

Tendo em vista a dependência do teor de umidade volumétrico do solo ( $\theta$ ) do volume de vazios ( $V_v$ ) e volume de sólidos ( $V_s$ ) apontada na equação (5), naturalmente a composição granulométrica do solo é um fator que influencia a curva de retenção.

Os solos arenosos, que são compostos por grãos maiores de solo, apresentam poros mais conectados e maiores, resultando em uma perda mais rápida da umidade e conseqüentemente curvas características mais bruscas.

Em contrapartida, os solos argilosos com seus grãos de diâmetro menores, apresentam um melhor encaixe entre as partículas sólidas que resultam em vazios menores, levando aos fenômenos de capilaridade e adsorção, elevando o potencial de retenção de água desse tipo de solo. Dessa forma, a curva característica de solos argilosos tem um aspecto mais suave, uma vez que a presença mais significativa de material argiloso no solo reflete em um maior teor de umidade a um mesmo valor de sucção.

A influência da granulometria do solo pode ser percebida na comparação entre as curvas de retenção típicas de cada tipo de solo na Figura 9.

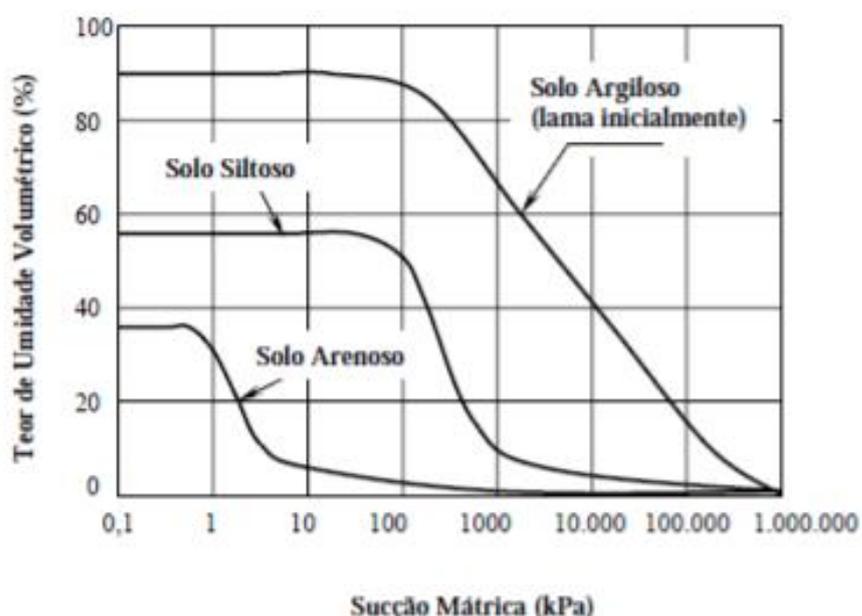


Figura 9: Comparação entre as curvas características típicas para os diferentes tipos de solo (Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

Como indicado anteriormente, a sucção mátrica é calculada a partir do somatório das forças de capilaridade e das forças de adsorção do solo. Uma vez que a adsorção depende das interações polares entre as partículas do solo e as moléculas de água, a composição mineralógica do solo também se torna um fator de influência da curva de retenção. De modo geral, argilominerais apresentam forças de adsorção maiores devido à natureza polar da superfície das partículas e a presença de cátions, impactando na sucção do solo.

Outro fator que está relacionado à sucção é a variação da temperatura, uma vez que o aumento de temperatura no interior do solo pode provocar uma redução na interface solo-água e da tensão superficial entre eles, alterando a curvatura do menisco, resultando na redução da sucção.

Uma descrição mais detalhada de cada método de obtenção da curva característica dos solos e seus procedimentos pode ser encontrada no trabalho de Pedra (2010).

## **2.4 Condutividade Hidráulica**

A condutividade hidráulica ou permeabilidade mensura a capacidade do solo em conduzir água através de seus poros, podendo se encontrar na condição saturada ou não saturada.

Como visto anteriormente, quando saturado, o solo apresenta todos os poros entre as partículas sólidas totalmente preenchidos por água, mas, uma vez excedido a pressão de entrada de ar, inicia-se o processo de preenchimento de ar dos vazios de maior dimensão, reduzindo o grau de saturação do solo. Estas bolhas de ar no interior dos poros impedem o fluxo de água naquela região, como indicado na Figura 10, aumentando assim a tortuosidade do fluxo, dificultando a passagem do fluido e refletindo em uma queda brusca no valor da condutividade hidráulica, até que o teor

de umidade residual ( $\theta_r$ ) é atingido e o fluxo cessa (BICALHO, MACHADO, & GERSCOVICH, 2015).

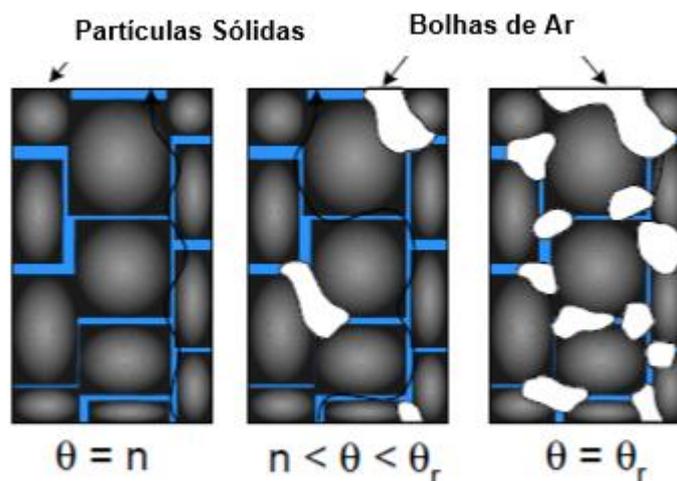


Figura 10: Esquema representativo que compara o fluxo de água na condição saturada, em zona não saturada e por fim, quando o solo atinge o teor de umidade residual, onde o fluxo é impedido (Fone: Adaptada do manual SEEP/W, GeoSlope, 2009).

Sendo assim, a condutividade hidráulica depende não só da estrutura e dimensão dos poros, mas também da quantidade de água presente nesse meio e do histórico de saturação (MASROURI; *et al.*, 2011, *apud*, BICALHO; *et al.*, 2015).

A condutividade hidráulica pode ser apresentada em termos de sucção matricial, grau de saturação ou umidade volumétrica (LU e LIKOS, 2004, BICALHO; *et al.*, 2015). Solos mais granulares apresentam poros maiores, tornando o fluxo de água mais rápido e favorável neste meio. Isso faz com que, em geral, apresentem valores de condutividade maiores do que os solos mais finos. Entretanto, a aplicação de sucção no solo com vazios de maior dimensão pode refletir em uma redução de umidade acentuada e conseqüentemente, uma queda mais abrupta na condutividade.

Em contrapartida, mesmo que apresentem valores médios de condutividade inferiores aos solos granulares, os solos mais finos apresentam a capacidade de reter água quando sujeitos à sucção mátrica, tornando as variações da condutividade hidráulica mais suaves. Essa capacidade de retenção ameniza a perda de água do material e, conseqüentemente, a diminuição da condutividade hidráulica do meio. Tal fenômeno pode fazer com que, a valores mais altos de sucção, solos argilosos apresentem uma condutividade hidráulica superior a um solo arenoso, por exemplo.

A condutividade hidráulica saturada e não saturada pode ser determinada tanto de forma direta, obtida experimentalmente em ensaios de campo ou de laboratório, quanto de forma indireta, através de equações e correlações. Dentre os métodos experimentais, têm-se os métodos permanentes e os métodos transientes, sendo que nos permanentes a quantidade de fluxo é constante durante todo o tempo e no ensaio é aferida a sucção para posteriormente determinar a condutividade através da Lei de Darcy, já no método transiente o fluxo sofre variação com o tempo. As vantagens e desvantagens de cada método são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Métodos permanentes e transientes para determinação da condutividade hidráulica em laboratório. (Fonte: BICALHO, MACHADO, & GERSCOVICH, 2015– Adaptado de Masouri et al., 2008).

	Métodos	Vantagens	Desvantagens	Custo Relativo
Permanentes	Convencionais de carga constante	Simplicidade Controle do estado de tensões	Muito demorado em solos finos	Baixo
	Fluxo constante (bomba de fluxo)	Simplicidade Controle do estado de tensões Rápido	Requer a bomba de fluxo	Custo moderado Inicial (equipamento)
	Centrífuga	Rápido para medição em solos finos	Requer a centrífuga e técnico especializado	Custo alto Inicial (equipamento)
Transientes	Fluxo de entrada/saída	Rápido Simplicidade Controle da massa da amostra	Falta comparação de resultados com outros métodos	Baixo
	Perfil instantâneo	Simplicidade Determina a curva de retenção SWRC	Falta controle do estado de tensões e da massa da amostra	Custo moderado a alto Inicial (equipamento)
	Térmico	Simplicidade Mede baixos valores de S	Demorado Não tem controle do estado de tensões Requer a SWRC	Custo moderado (instrumentação)

Para detalhamento mais completo da determinação da condutividade hidráulica por métodos diretos e indiretos, consultar o livro ABMS – Solos Não-Saturados no contexto Geotécnico (2015), capítulo 12 (BICALHO, MACHADO, & GERSCOVICH, 2015).

## 2.5 Sazonalidade, interação solo-planta-atmosfera e sua influência nos solos não-saturados

Por se encontrar naturalmente expostos ao clima, variação de temperatura e à presença de plantas e raízes, é imprescindível a análise do impacto destes agentes no estudo do solo. Além disso, é importante considerar que tais agentes não trabalham como uma variável isolada, mas sim como um sistema de interação entre o solo, a atmosfera e a vegetação.

O sistema solo-planta-atmosfera envolve uma gama de processos complexos relacionados com aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, da água, da vegetação e da atmosfera (BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015).

O estudo da interação das trocas entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorrem a partir de ciclos que vem sendo amplamente estudados pelas Ciências do Solo em busca de soluções aplicáveis à problemas do dia-a-dia. Por exemplo, para a Mecânica dos Solos, o entendimento do sistema solo-planta-atmosfera tem reflexo direto na solução de problemas de engenharia, como na estabilidade de taludes e encostas naturais, no desempenho de coberturas evapotranspirativas, para cobertura de aterros de resíduos sólidos e de barreiras capilares para depósitos de resíduos da mineração (Wilson, 1990; Wilson et al., 1994; Gitirana Jr., 2005; Sestren et al., 2015, apud, BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015).

Wilson (1990) propõe uma divisão dos componentes de influência do sistema solo-planta-atmosfera da seguinte forma:

**1ª Fase Interface solo-atmosfera:** O suprimento e a demanda de água entre a superfície e a atmosfera através da precipitação, infiltração e a evapotranspiração;

**2ª Fase Zona não saturada e saturada:** Interação no sistema solo-ar-água na região vadosa próxima à superfície, incluindo a capacidade do solo em transmitir água a partir de suas propriedades, além da influência do nível freático como fonte secundária de suprimento de água no solo;

**3ª fase Influência da vegetação:** Influência do tipo e da densidade da vegetação no local, principalmente na taxa de escoamento superficial, na evapotranspiração e na infiltração e retenção de água pelas raízes.

## 2.5.1 Ciclo hidrológico, balanço de água e balanço de energia

A água presente entre a superfície terrestre e a atmosfera se encontra em uma mudança cíclica e constante de estado físico (gasoso, líquido e sólido), denominado Ciclo Hidrológico, como indicado na Figura 11.

O ciclo hidrológico, como todo ciclo, não tem um ponto de início ou de fim, porém o impulso inicial se dá a parte da emissão de energia do Sol, que chega a superfície do terreno e provoca uma mudança da água em estado líquido para estado gasoso, de forma que esta água deixa a superfície caracterizando a evapotranspiração (composição entre a evaporação de rios, lagos, solos e oceanos e a transpiração das plantas). Esse vapor de água condensa e solidifica na atmosfera com a mudança de temperatura, levando então à precipitação, em que a água da chuva, neve ou orvalho retorna para a superfície terrestre. Parte da precipitação é retida em corpos hídricos superficiais (lagos, rios e oceanos) ou subterrâneos (aquíferos subterrâneos) e outra parte retorna ao ciclo de evapotranspiração, mantendo o ciclo.

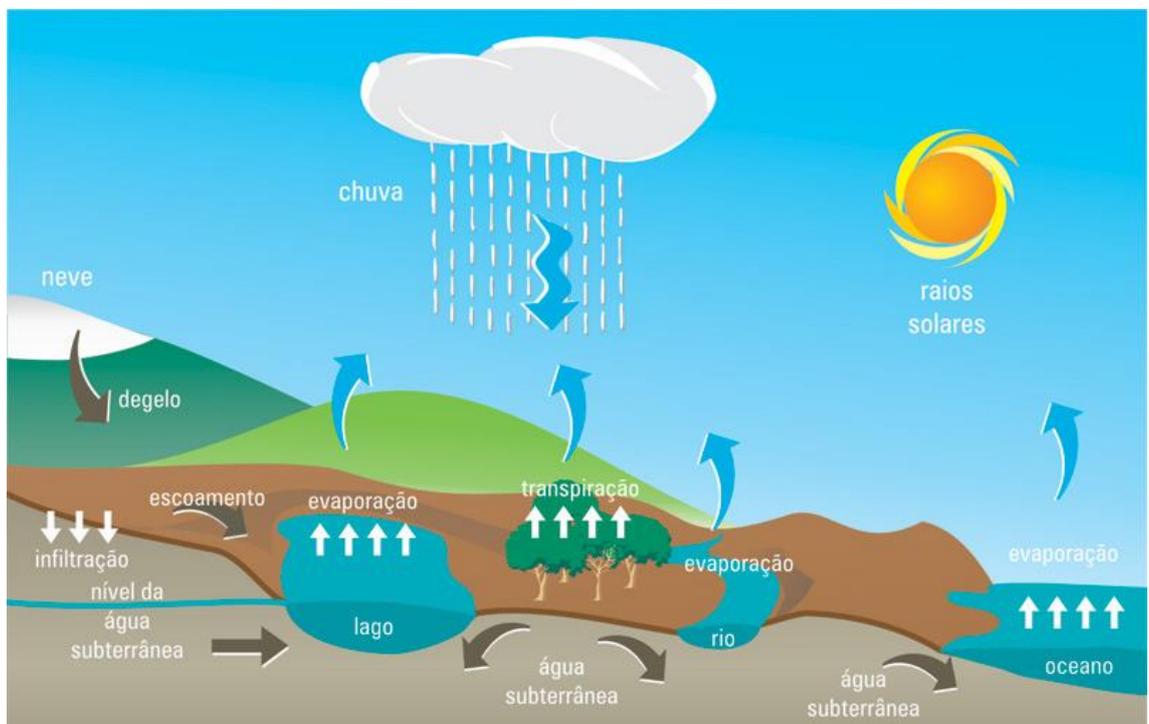


Figura 11: Componentes e representação do ciclo hidrológico.

(Fonte: Mendonça, A. S. F., Apostila de Hidrologia, UFES, 2009).

O balanço hídrico pode ser representado em forma de um balanço de massas, permitindo quantificar o volume de água armazenado em cada parcela da superfície terrestre, como indicado na Equação (6):

(6)

Sendo:

P = Precipitação;

ET = Evapotranspiração;

R = Escoamento Superficial;

R<sub>g</sub> = Escoamento subsuperficial;

ΔS = Água armazenada no solo.

Ainda de acordo com Borma, Gitirana Jr., & Luiz (2015), é possível relacionar o ciclo hidrológico com um balanço de energia. Além de ter como motor que impulsiona o início do ciclo a energia emitida pelo Sol, os processos de mudança de estado físico da água são processos que consomem, ou liberam energia, como na evaporação, em que a água alterna do estado líquido para o estado gasoso, sendo necessário o consumo de calor (Calor Latente), enquanto que no processo da condensação da água, que passa do estado de vapor para estado líquido, o processo libera energia. Na maioria destes processos, a energia é trocada a partir da radiação.

O Sol irradia energia para o espaço, que atinge a superfície da terra sendo parcialmente absorvida, uma vez que parte dessa radiação interage com a atmosfera (nuvens, gases, vapor d'água e compostos químicos), sendo absorvida ou refletida de volta ao espaço por estes componentes. A capacidade de reflexão da radiação solar de uma determinada superfície é medida pelo albedo, função da superfície e do ângulo de incidência da radiação (BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015). Alguns valores típicos de albedo para superfícies terrestres se encontram na Tabela 3.

A superfície responde ao ciclo energético devolvendo ao espaço parte da energia irradiada pelo sol, denominada radiação terrestre ou radiação infravermelha, que também interage com agentes da atmosfera, sendo absorvida ou refletida por eles

sob forma de Calor Sensível (energia responsável por aquecer a superfície terrestre) e Calor Latente (energia presente na mudança de estado líquido para gasoso da água).

Dessa forma, tomando ao todo a energia emitida pelo Sol e descontando a parcela refletida de volta à atmosfera, tem-se então a Radiação Líquida ( $R_n$ ), que é a radiação retida ou absorvida pela superfície. O processo de fluxo de energia, água e calor se encontra representado no esquema da Figura 12.

Tabela 3: Valores típicos de albedo para superfícies terrestres.

Superfície	Albedo (%)
Neve, fresca	75-95
Neve, velha	35-70
Gelo, cinzento	60
Água, profunda	5-20
Solo, escuro molhado	6-8
Solo, claro seco	16-18
Solo, vermelho	17
Argila, molhada	16
Argila, seca	23
Solo, arenoso	20-25
Solo, turfa	5-15
Lava	10
Tundra	15-20
Areia, dunas	20-45
Nuvem, espessa	70-95
Nuvem, fina	20-65
Estrada, asfalto	5-20

(Fonte: Roland B. Stull, *Meteorology for Scientists and Engineers*, 2000)

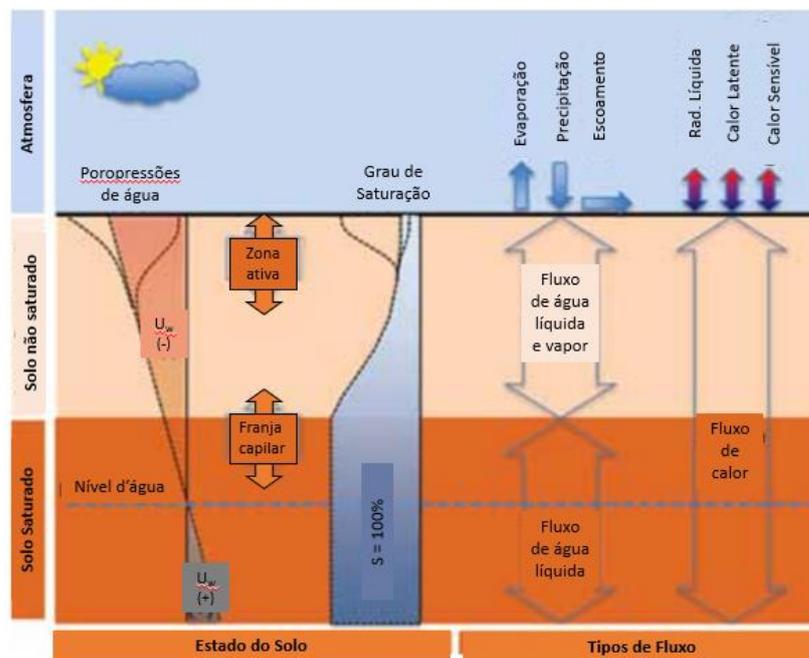


Figura 12: Fluxos que ocorrem entre as interfaces solo-atmosfera. (Fonte: Adaptada de BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015).

A Radiação Líquida incidida na superfície transforma-se então em calor sensível, calor latente (que é proporcional à Evapotranspiração), calor armazenado no solo e radiação utilizada no processo de fotossíntese pelas plantas, processo representado pelo balanço de energia e calos na superfície terrestre na Equação (7):

(7)

Sendo:

$R_n$  = Radiação Líquida;

$G$  = Calor armazenado no solo;

$H$  = Fluxo de calor sensível para a atmosfera;

$\lambda E$  = Fluxo de calor latente;

$F$  = Energia utilizada na fotossíntese.

## 2.5.2 Precipitação, Escoamento Superficial e Infiltração

Como visto anteriormente, a precipitação é a fase do ciclo hidrológico responsável por suprir a superfície terrestre com água, sendo que parcela desta água é interceptada pela vegetação e a outra parcela, denominada precipitação efetiva, pode escoar superficialmente, infiltrar e ser retida pelo solo, ou também ser armazenada pelos reservatórios subterrâneos (aquíferos).

O Escoamento Superficial depende da presença ou não de vegetação na superfície, da inclinação do terreno, e da condição de umidade e grau de saturação do solo. Já a parcela da precipitação efetiva que consegue infiltrar no solo tem uma relação inversamente proporcional com o grau de saturação do solo.

Horton (1933, *apud*, BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) mostrou a relação decrescente entre a taxa de infiltração com o tempo em uma situação de precipitação constante, indicado na Figura 13. A medida em que a água infiltra e o solo se torna cada vez mais saturado, há uma diminuição do gradiente hidráulico próximo à superfície, onde se concentra a frente de umedecimento. Dessa forma, a taxa de infiltração tende ao valor mínimo o qual atinge sua capacidade de infiltração, equivalente ao coeficiente de condutividade hidráulica do solo saturado, abordada no item 2.4.

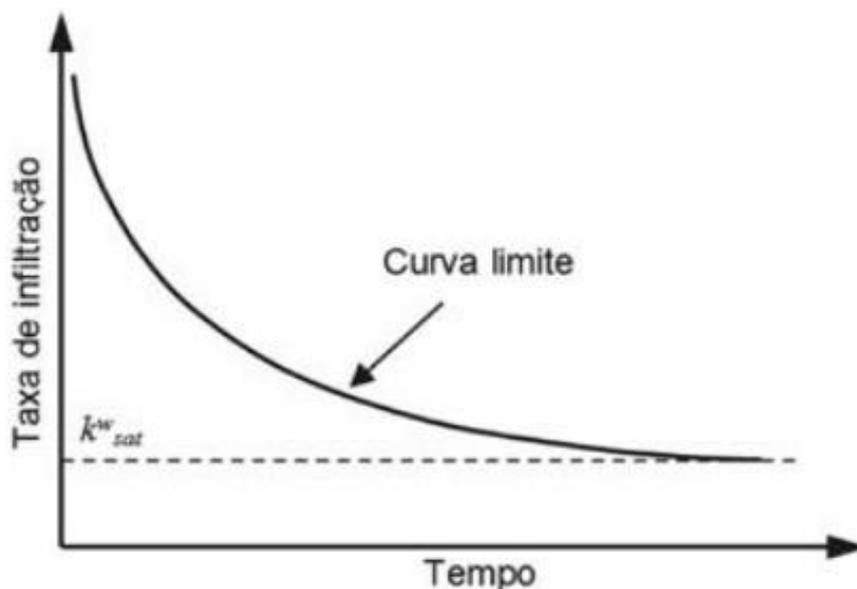


Figura 13: A relação entre a taxa de infiltração com o passar do tempo durante uma precipitação constante

(Fonte: ABMS, 2015).

É importante observar a influência da intensidade da precipitação na capacidade de infiltração do solo, uma vez que, chuvas com maior intensidade em um curto período de tempo podem resultar na situação em que o solo, mesmo não saturado, não consegue absorver toda a água, já que a capacidade de infiltração é inferior à intensidade da chuva ou também quando o solo se encontra totalmente saturado, situações que favorecem o escoamento superficial.

A taxa de infiltração pode ser calculada a partir de diversas formulações. Green e Ampt (1911, *apud*, BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) propuseram uma equação baseada na Lei de Darcy, considerando a infiltração em um reservatório profundo e homogêneo com distribuição inicial e homogênea de umidade, solução analítica indicada na Equação (8):

$$\text{—————} \tag{8}$$

Onde  $I$  é a taxa de infiltração (mm/h);  $K_s$  é a permeabilidade do solo saturado ao fluxo de água;  $n$  é a porosidade;  $\theta_i$  é o teor de umidade volumétrico inicial;  $S_f$  sucção do solo na frente de umedecimento; e  $D$  é a superfície infiltrada acumulada.

Além dos métodos empíricos, a taxa de infiltração pode também ser determinada de métodos de medida direta, com o uso de infiltrômetros instalados em campo ou a partir da Teoria de Fluxo de Solos Não Saturados proposta por Freeze & Cherry (1979, *apud*, Pedra, 2015), que considera a combinação do fluxo interno de água com a taxa de precipitação aplicada na superfície do solo, por meio da equação de fluxo interno desenvolvida por Richards (1931).

### 2.5.3 Evaporação e Evapotranspiração

Enquanto a fase da infiltração é um processo de suprimento de água para a superfície terrestre, a evaporação, quando ocorre a transformação da água líquida em vapor de água a temperaturas abaixo da temperatura de ebulição, é um processo de demanda da atmosfera pela água acumulada na superfície.

A Evaporação é o processo natural pelo qual a água passa do estado líquido para o estado de vapor a partir da evaporação da água de superfícies hídricas (oceanos, lagos, rios). O processo de Transpiração é caracterizado pela perda de água em forma de vapor da vegetação, sendo esta parcela mais representativa na atmosfera em relação à Evaporação. Considerando a dificuldade em separar ambos processos, toma-se a ação conjunta entre a evaporação e a transpiração, denominada Evapotranspiração.

BORMA, Gitirana Jr., & Luiz (2015) pontua que o processo de evaporação depende da quantidade e da área de água livre disposta na superfície que, quando exposta às condições atmosféricas como temperatura, radiação, vento, variação na pressão de vapor do ar, entre outros, leva a mudança de estado físico do fluido.

Penman (1948, *apud*, BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) e Hillel (1998, *apud*, BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) definiram as condições mínimas para ocorrência da evaporação, como:

O fornecimento contínuo de energia, principalmente através da energia emitida pelo Sol, e em menor escala, a energia proveniente da superfície em seu processo de aumento de temperatura;

Existência de um gradiente de umidade entre a superfície terrestre e a atmosfera, aferido a partir das pressões parciais de vapor, que mede a concentração de vapor d'água na atmosfera. Esse fator tem grande influência de variáveis climáticas supracitadas: temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar, etc.;

O suprimento de água na superfície do solo (superfície evaporativa). Nos solos não saturados, o suprimento de água pode vir tanto a partir da água infiltrada durante a precipitação quanto pelo lençol freático e zona saturada. Assim, a evaporação dependerá das características do tipo de solo, do seu teor de umidade volumétrico ou grau de saturação e das condições e presença da água subterrânea.

Semelhante às variáveis anteriores, a evapotranspiração pode ser determinada a partir de medida direta (através dos evaporímetros como atmômetros e tanques de evaporação) ou por modelos matemáticos, através de equações empíricas ou semiempíricas. Todavia, a grande maioria dos métodos disponíveis são focados em superfícies de água livre, se diferindo bastante da superfície de um solo.

Dentre os métodos de determinação da taxa de Evaporação e Evapotranspiração de uma superfície, têm-se métodos baseados exclusivamente na

temperatura do ar (Método de Thornthwaite), métodos baseados no balanço de energia (Método de Penman-Bavel e Método de Priestly-Taylor) e o mais comum, Método de Penman, que parte da consideração de uma superfície totalmente saturada.

Devido à dificuldade de obtenção de dados, os métodos mais comumente utilizados são os métodos Thornthwaite (1948) e de Penman (1948), uma vez que dependem apenas de dados climáticos de fácil obtenção, como temperatura do ar e umidade relativa.

O método de Thornthwaite (1948, *apud*, Pereira, Villa Nova, & Sediya, 1997, p. 44) se dá a partir da temperatura do ar, considerando também a radiação solar, a umidade relativa e a velocidade do vento como principais fatores de influência no controle da evapotranspiração. É um método simples, entretanto para que dê resultados mais confiáveis demanda séries de dados climatológicos de pelo menos um mês. O método resulta na determinação mensal da taxa de evapotranspiração potencial do local, dada pela equação (10).

$$\text{---}, T_i > 0^\circ\text{c} \tag{10}$$

Sendo:

ET = Taxa de Evapotranspiração mensal (mm/mês);

T<sub>i</sub> = Temperatura média mensal do ar (°C);

I = Índice de calor na região;

a = Índice de correção da região.

Os índices I (índice de calor da região) e a (índice de correção da região) são obtidos como indicado nas equações (11) e (12), respectivamente.

$$\text{---} \tag{11}$$

$$E, \tag{12}$$

É importante ressaltar que a equação (10) estima a evapotranspiração potencial de uma condição padrão que considera radiação solar durante 12 horas diárias durante um mês de 30 dias.

A equação de Penman (1948) é comumente usada para determinar a evaporação potencial (evaporação que ocorre a partir de uma superfície de água livre). Sua formulação, indicada pela Equação 9, considera uma combinação entre o método de transferência de massa (transporte de vapor da superfície para atmosfera) com o método de balanço de energia (radiação), a partir de dados facilmente obtidos em estações meteorológicas.

$$\text{—————} \tag{9}$$

Sendo:

$E_0$  = Taxa de evaporação Potencial (mm/d);

$\Delta$  = Declividade da curva de pressão de saturação de vapor à temperatura média de bulbo úmido (kPa/°C);

$R_n$  = Radiação Solar Líquida (MJ m<sup>-2</sup>/d);

$\gamma$  = Constante Psicrométrica (kPa/°C);

$E_a$  = Função empírica da velocidade do vento, que depende do déficit de pressão de vapor entre a da superfície do solo e o ar.

Por ser baseada no estudo de evaporação na superfície de água livre e não na superfície do solo, a Equação de Penman mostra limitações para sua aplicabilidade aos estudos de solos, tendendo a superestimar a taxa de evaporação a ventos de baixa velocidade, principalmente em condições mais úmidas. (Lindsley *et al.*, 1958, *apud*, BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015).

#### 2.5.4 Temperatura

Como visto anteriormente, na relação solo-vegetação-atmosfera têm-se um fenômeno de fluxo de energia e, conseqüentemente, de fluxo de calor na interface do solo. De acordo com Duarte (2004, p. 21), a variação de temperatura é um fator que

pode influenciar as características do solo, principalmente aos parâmetros de permeabilidade, compressibilidade do solo, sucção e parâmetros de resistência.

De Campos (1979, *apud* Duarte, 2004) relaciona o aumento no coeficiente de permeabilidade do solo com o aumento da temperatura. Hopmans e Dane (1986, *apud* Duarte, 2004) apontaram a mudança nas curvas características de sucção com a temperatura, de forma que o efeito combinado da variação de volume de ar ocluso e da tensão superficial tendem a minimizar a variação com a temperatura.

Duarte (2004) também cita o estudo Romero *et al.* (2001) sobre os efeitos da variação da temperatura no comportamento hidráulico de uma argila não-saturada. O estudo indicou que a sucção total sofreu uma redução com o aumento da temperatura a valores constantes de umidade. Além disso, apontou que para amostras com grau de saturação superior a 75%, a temperatura apresentou influência significativa na permeabilidade devido a variação da viscosidade da água, à distribuição de poropressão e aos efeitos termoquímicos do meio.

Borma (2015) acrescenta que o aumento da temperatura atmosférica leva a um aumento dos processos evapotranspirativos, o que potencialmente pode desencadear um aumento das chuvas. Entretanto, no caso em que a superfície do solo se encontra seca, a maior parte da energia incidente irá refletir em um aumento da temperatura do meio.

Os gradientes térmicos promovem dois fenômenos relevantes no solo não saturado: condução térmica e o fluxo de água no meio poroso, uma vez que a energia térmica se propaga entre as partículas sólidas por meio do processo de condução térmica, levando a um aumento na temperatura da água no local, aumentando sua energia interna e fazendo com que o líquido se desloque para regiões de temperatura mais baixa em busca de equilíbrio do meio. Além disso, a mudança da temperatura do solo reflete em uma variação do volume de água e ar presentes nos vazios do meio, além de influenciar na fase (sólida, líquida ou gasosa) e nas propriedades física da água intersticial quando em estado líquido.

Como visto anteriormente, no ciclo de fluxo de radiação e energia uma fração da radiação emitida pelo sol é absorvida pela superfície do solo, aumentando sua temperatura nesta região. A partir disso, surge no solo uma diferença de temperatura

entre a camada superior e as camadas mais inferiores, o que induz o processo de condução térmica, quando se tem a transferência de energia de molécula em molécula sem que estas se desloquem de sua posição original (PEDRA, 2010). Sendo o ar um mau condutor térmico, quanto maior a presença de ar nos vazios, mais difícil é o processo de condução térmica no interior do solo, diferente da água que é um material que conduz melhor a energia.

Para analisar o fluxo de calor em um meio, é necessário avaliar dois parâmetros importantes: a condutividade térmica e o calor específico. Ambos são dependentes do teor de água no solo e dos minerais presentes em sua composição (PEDRA, 2010).

A condutividade térmica mede a capacidade do meio em transmitir calor pelo processo de condução térmica, responsável pelo fluxo de energia térmica entre as partículas sólidas (GEOSLOPE, 2007).

De acordo com Duarte (2004), o parâmetro da condutividade térmica ( $\lambda$ ) é dado pela quantidade de calor que passa por uma seção transversal numa determinada unidade de tempo, devido a um gradiente de temperatura aplicado na direção do fluxo.

Há diversos métodos empíricos e semi-empíricos para estimar a condutividade térmica dos solos. A GeoSlope (2007) indica, dentre os métodos, a abordagem proposta por Johansen (1975, *apud* GeoSlope, 2007) como a mais generalizada. O método em questão se baseia na condutividade térmica de um solo seco, sendo sua porosidade e o grau de saturação obtidos a partir da curva característica do solo, dada pela equação (13).

$$\text{-----} \tag{13}$$

Sendo,

$\lambda_{\text{seco}}$  = Condutividade térmica do solo seco ( $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\gamma_d$  = Peso específico seco do solo ( $\text{N/m}^3$ ).

Encontram-se na Tabela (4) alguns valores típicos de condutividade térmica de diversos materiais, apresentados pela GeoSlope (2007) a partir dos modelos propostos por Johnston, Ladanyi, Morgenstern e Penner (1981).

Tabela 4: Alguns valores típicos de condutividade térmica.

Materiais	Condutividade Térmica		
	Btu(hr·ft·°F)	J/(sec·m·°C)	kJ/(dia·m·°C)
Água	0,35	0,605	52,27
Gelo	1,29	2,230	192,7
Ar (seco)	0,014	0,024	2,07
Neve			
Nova, solta	0,05	0,086	7,43
Sobre o terreno	0,07	0,121	10,45
Compactada, densa	0,20	0,340	29,37
Solos e Rochas			
Argila xistosa	0,90	1,50	129,6
Evaporito	3,10	5,40	466,6
Calcário	0,75 - 2,90	1,30 - 5,00	112 - 432
Dolomito	2,90	5,00	432
Arenito	1,10 - 2,40	1,80 - 4,20	155 - 86,4
Xisto	0,90	1,60	138,24
Gnaisse	1,40	2,50	216
Greenstone	1,90	3,30	285,12
Ardósia	2,20	3,80	328,4
Quartzito	2,60 - 4,10	4,50 - 7,10	388,8 - 613
Granito	1,00 - 2,30	1,70 - 4,00	146,9 - 345,6

(Fonte: Adaptado de GeoSlope, 2007).

Já o outro parâmetro relevante, calor específico volumétrico, também denominado como capacidade de aquecimento volumétrico (C), é definido como a energia térmica necessária para variar em 1°C uma unidade de volume unitária de dado material (DUARTE, 2004).

Vries (1963, apud GeoSlope, 2007) apresenta na equação (14) a determinação do calor específico volumétrico de um solo a partir do calor específico volumétrico do ar, água e das partículas do solo.

(14)

Sendo,

$C$  = Capacidade de aquecimento volumétrico ( $J/m^3/^\circ C$ );

$C_s$  = Calor específico volumétrico do solo ( $J/m^3/^\circ C$ );

$\theta_l$  = teor volumétrico de sólidos ( $m^3/m^3$ );

$C_w$  = Calor específico volumétrico da água ( $J/m^3/^\circ C$ );

$\theta_w$  = teor volumétrico da água ( $m^3/m^3$ );

$C_a$  = Calor específico volumétrico do ar ( $J/m^3/^\circ C$ );

$\theta_l$  = teor volumétrico do ar ( $m^3/m^3$ ).

Pedra (2008) aponta que, de acordo com Vries (1963), o calor específico volumétrico do ar pode ser desprezado, por apresentar uma magnitude muito menor que o calor específico volumétrico da água e das partículas de solo. Já os teores volumétrico são dependentes do grau de saturação e da porosidade do solo, podendo ser obtidos por meio da curva característica do solo.

Alguns valores típicos da capacidade de aquecimento volumétrico se encontram apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Alguns valores típicos de capacidade de aquecimento volumétrico.

Materiais	Capacidade de Aquecimento Específico em Massa		Capacidade de Aquecimento Volumétrico	
	Btu/(lb·°F)	kJ/(kg·°C)	Btu/(ft³·°F)	kJ/(m³·°C)
Água	1,00	4,187	62,4	4187
Gelo	0,50	2,094	28,1	1880
Ar	0,24	1,00	0,0187	1,25
Minerais do solo	0,17	0,71	28,0	1875
Minerais orgânicos do solo	0,40	1,674	37,5	2520
Isolamento extrudado de poliestireno	0,24	1,00	0,65	43,5
Concreto	0,21	0,895	30,0	2010
Asfalto	0,40	1,674	37,5	2520
Neve (fresca)	-	-	3,11	209
Neve (amontoada e compactada)	-	-	7,80	523,5
Granito	-	-	37,1	2490
Calcário	0,29	1,20	48,9	3285
Dolomito	0,21	0,88	37,4	2510
Arenito	-	-	37,4	2510
Xisto	-	-	27,4	1840
Vidro	-	-	26,2	1760
Aço	0,11	0,46	56,0	3890
Madeira	0,19	0,80	7,79	523

(Fonte: Adaptado de GeoSlope, 2007).

### 2.5.5 Vegetação

O último fator abordado neste trabalho quanto a influência sazonal nos solos não saturados e o sistema de interação solo-planta-atmosfera é a presença da vegetação. Sua relevância se dá uma vez que a sua presença no meio pode ser responsável pela transferência de grandes quantidades de água do solo para a atmosfera a partir do processo de transpiração.

De acordo com BORMA, Gitirana Jr., & Luiz (2015), o processo de transpiração é caracterizado pela captação que a planta faz da água líquida no interior do solo, transformando-o em vapor d'água e liberando esse vapor para atmosfera. Dirmeyer et al. (2006, *apud* BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) aponta que a transpiração é, em

geral, o principal componente no processo de evapotranspiração, uma vez que as raízes apresentam uma elevada capacidade de absorção de água do solo.

Entretanto, assim como na evaporação, a taxa de transpiração é dependente das forças atmosféricas e da disponibilidade de água no solo. Uma vez que a taxa de extração de água do solo se torna menor que a taxa de transpiração (por exemplo, em um período de seca ou escassez de água), a planta perde água e, em resposta, desenvolve estratégias para diminuir ou parar essa perda, evitando seu murchamento – como o fechamento dos estômatos, estrutura vegetal presente nas folhas e responsável pela liberação do vapor para atmosfera, ou a perda parcial ou total das folhas.

Hillel e Talpaz (1976, apud BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) estudaram a relação entre a idade da planta e a profundidade de suas raízes. De modo geral, as plantas mais jovens tendem a estender suas raízes à profundidades maiores em busca de água, enquanto que as plantas com idades maiores apresentam raízes de volume constante, localizadas próximo da superfície do solo (Hillel, 1998 *apud* BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015) ou então desenvolvem raízes que buscam o nível do lençol freático e captam água na zona de capilaridade do solo, chamadas plantas freatofíticas.

A presença desse tipo de planta freatofítica pode impactar na elevação da água do nível freático até a zona de raízes, de forma que, em vez de as raízes se aprofundarem vários metros abaixo no solo em busca de água, o solo é quem leva a água até a região das raízes através da capilaridade.

O modelo utilizado para definir os limites de umidade do solo para o qual a transpiração ocorre a uma taxa guiada pelas forças atmosféricas ou pela disponibilidade de água no solo é determinado pelo SMI – *Soil Moisture Index* ou “Índice de umidade do solo”.

O SMI, dado pela equação (15), baseia-se em dois conceitos, o de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A capacidade de campo é dada pelo teor de umidade no qual tem-se a transição das forças atuantes no movimento da água do solo, de forças gravitacionais (solo saturado) para forças de sucção (solo não saturado). Por sua vez, o ponto de murcha permanente se dá pelo teor de umidade o

qual a planta não consegue mais absorver a água do solo, mesmo utilizando as estratégias supracitadas para evitar a perda de água da planta.

\_\_\_\_\_ (15)

Sendo,

SMI = Índice de umidade do solo, varia entre 0 e 1, sendo uma medida do teor de umidade disponível para as plantas;

$\theta$  = Umidade do solo;

$\theta_{PMP}$  = Ponto de murcha permanente;

$\theta_{CP}$  = Capacidade de campo.

Tanto a capacidade de campo quanto o ponto de murcha são parâmetros dependentes das propriedades do solo e da vegetação local. Quanto mais alto o grau de saturação do solo, mais próximo de 1 é o valor do SMI. À medida que teor de umidade ( $\theta$ ) do solo tende a zero, mais próximo do ponto de murcha permanente. Há uma convenção de que, para que a raiz consiga extrair a água do solo na capacidade de campo, é necessária uma sucção da ordem de 10 a 30 kPa e, no ponto de murcha, da ordem de 1500 kPa (BORMA, Gitirana Jr., & Luiz, 2015).

### 3 METODOLOGIA

A realização da análise do regime hídrico em uma pilha estéril de minério de ferro através do programa computacional GeoStudio 2019 será feita a partir dos seguintes passos:

Elaboração de um modelo protótipo de pilha de estéril utilizando o próprio GeoStudio 2019. Neste modelo serão aplicados parâmetros de materiais e condições de contorno baseados no modelo feito por Pedra (2010) e em exemplos de modelagem desenvolvidos pela GeoSlope (2019);

Determinação da linha freática inicial, a partir de uma análise SEEP/W em regime permanente e condições de contorno de carga total de água;

Análise SEEP/W em regime transiente para diferentes cenários, considerando metodologias distintas de cálculo da Evapotranspiração e a Presença de vegetação na superfície da pilha.

### **3.1 Análise Numérica**

#### **3.1.1 O Modelo Protótipo da Pilha de Estéril**

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada na análise numérica de um protótipo de pilha de estéril de minério de ferro, desenvolvido com objetivo de analisar o impacto das condições sazonais e a interação solo-planta-atmosfera.

É importante ressaltar que existe uma grande dificuldade na determinação dos parâmetros dos diversos materiais que compõem o estéril e também de encontrar bancos de dados meteorológicos, térmicos e de dados referentes a cobertura vegetal neste tipo de obra. Sendo assim, a análise adotou algumas simplificações e tomou como base os dados apresentados em outros trabalhos similares e exemplos numéricos desenvolvidos pela GeoSlope para exemplificação de uso do GeoStudio 2019, programa utilizado neste trabalho. Por ausência de dados referentes as propriedades térmicas do material, a análise térmica não será apresentada neste trabalho.

Para realizar a análise numérica proposta, foi desenvolvido um protótipo genérico de uma pilha de estéril, de método construtivo Ascendente. A geometria adotada para este protótipo não foi tomada a partir de nenhuma obra específica já existente. Considerou-se um modelo construtivo geral, visando o que foi apresentado no capítulo 2.1 deste trabalho.

A geometria da pilha de estéril adotada para a análise, mostrada na Figura 14, considera uma pilha com quatro bancadas de 10 metros de altura e bermas de 20 metros de largura entre bancadas, com uma altura total de 40 metros, assentada sobre uma fundação de Solo Residual de 30 metros de profundidade.

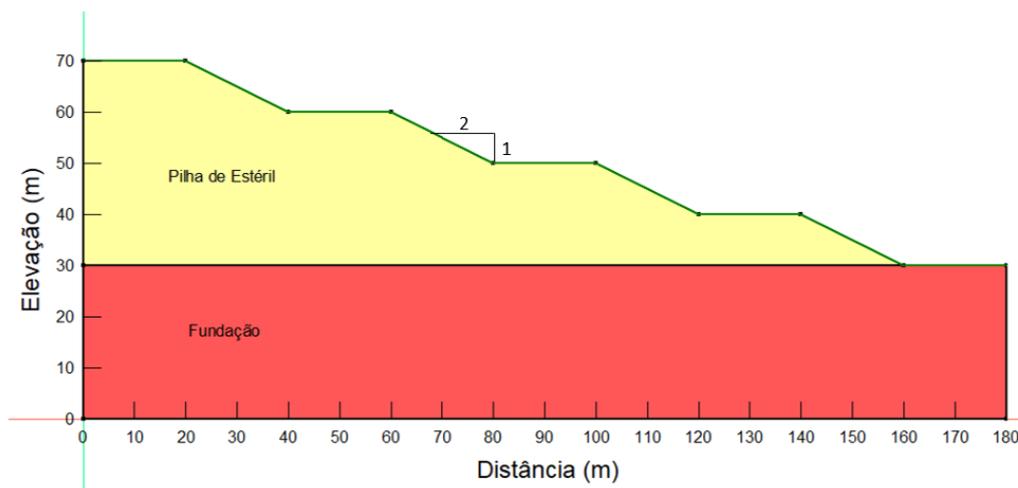


Figura 14: Geometria da pilha de Estéril protótipo adotada para o estudo.

Todas as análises foram realizadas utilizando o módulo SEEP/W do programa GeoStudio 2019. O procedimento foi desenvolvido em três etapas:

1. **Determinação da Linha Freática:** análise em Regime Permanente; Condições de contorno de carga total de água e de vazão nula para determinar uma linha freática na altura da interseção entre os materiais Fundação e Estéril (cota 30 m);
2. **Consideração dos dados meteorológicos:** análise em Regime Transiente; Condições de contorno do tipo Interação Terra-Clima definidas a partir dos dados pluviométricos e climáticos; comparativo entre diferentes abordagens de cálculo da Evapotranspiração;
3. **Consideração da Vegetação:** análise em Regime Transiente; acrescenta-se dados de vegetação e a presença de raízes no solo às condições de contorno climáticas do item 2.

O programa GeoStudio 2019 utiliza a metodologia de análise por elementos finitos. Para isso, foi necessário definir nas análises do módulo SEEP/W uma malha de elementos finitos que deliberassem resultados razoáveis. A malha de elementos finitos definida para este modelo, apresentada na Figura 15, é constituída por um de 2358 nós, com 2246 elementos.

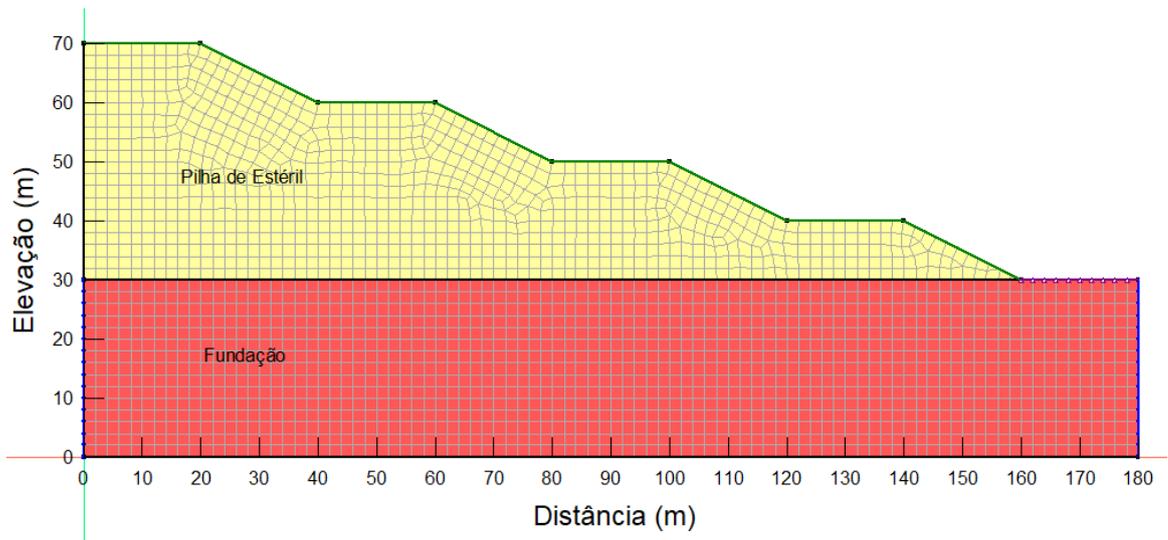


Figura 15: Malha de Elementos Finitos do protótipo de Pilha de Estéril de minério de ferro.

### 3.1.2 Parâmetros de Entrada dos materiais

Para realizar a análise, é necessário inicialmente definir os parâmetros hidráulicos que caracterizam cada material. Os dados de *input* do programa (dados meteorológicos e parâmetros hidráulicos dos materiais) foram baseados em valores médios calculados experimentalmente para a Pilha do Correia, mina de Gongo Soco, de propriedade da mineradora Vale, citados no trabalho de Pereira (2009, *apud* Pedra, 2010, p. 71-72), apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros de entrada dos materiais para análise no SEEP/W.

Material	Modelo	Condutividade Hidráulica $K_x$ (cm/s)	Teor de Umidade Vol Saturado ( )	Teor de Umidade Residual ( $res$ )
Pilha de Estéril (Silte)	Sat / Não sat	4,32 m/d  ( $5 \times 10^{-5}$ m/s)	0,50	0,20
Fundação (Solo Residual)	Saturado	0,23 m/d  ( $2,67 \times 10^{-6}$ m/s)	0,42	-

### 3.1.3 Linha Freática

A ideia inicial era determinar uma linha freática na interface entre a fundação e o material da pilha de estéril, de forma que a fundação se mantivesse sempre saturada e o material estéril, foco da análise, na condição não saturada, sofrendo a influência tanto da atmosfera (interação solo-atmosfera) quanto no nível freático da fundação.

Para fazer isso, foi realizada uma análise em regime permanente, utilizando condições de contorno de dois tipos distintos: carga total de água e vazão, indicadas na Figura 16.

A condição de contorno de carga total de água (em amarelo) foi definida por um valor constante de 30 metros e foi aplicada nas extremidades laterais do modelo para que o programa traçasse então a linha freática. A condição de contorno de vazão nula, denominada *Drainage* (em roxo), é uma condição de contorno proposta pelo próprio GeoStudio, utilizada apenas como artifício que garante que não ocorra surgência de água na superfície do solo, além de forçar a passagem da linha freática no local em que é aplicada.

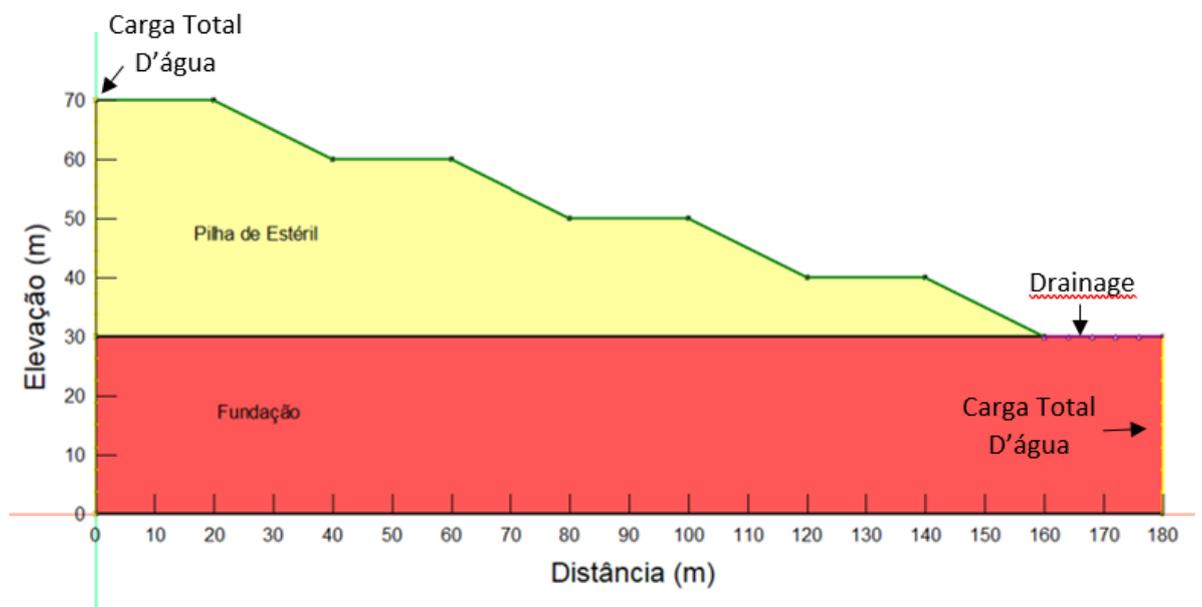


Figura 16: Condições de contorno aplicadas ao protótipo da Pilha de Estéril.

### 3.1.4 Interação Solo-Atmosfera

A consideração da influência da atmosfera (precipitação, temperatura, umidade relativa e vento) é feita a partir da inserção de um banco de dados meteorológicos como condição de contorno ao problema.

As análises foram feitas a partir do banco dados do ano de 2008, retirados da estação meteorológica localizada na mina do Pico, próxima a mina do Tamanduá, apresentados no trabalho de Pedra (2010). O banco de dados apresenta medidas aferidas para 348 dias, contados a partir do dia 01 de janeiro de 2008, apresentados no Anexo A.

Em seu trabalho, Pedra (2010) aborda a Pilha de Estéril Capão da Serra, que faz parte do Complexo Minerador de Vargem Grande, de propriedade da mineradora Vale. Esta mina se localizada no município de Nova Lima, Minas Gerais na Latitude 20,08°.

As análises foram feitas de forma a comparar dois cenários distintos, o primeiro utilizando a metodologia de cálculo de evapotranspiração determinada por

Thornthwaite (1948), método baseado exclusivamente na temperatura do ar, e o segundo cenário utilizou a metodologia de determinação da evapotranspiração proposta por Penman (1948), método que leva em consideração a radiação solar líquida do local.

O objetivo das análises é mostrar como cada modelo respondeu ao Balanço Hídrico Simplificado devido as sazonalidades, a variação do volume de água acumulada no modelo e variação com o tempo do grau de saturação na pilha de estéril.

### Thornthwaite

O cálculo de evapotranspiração a partir da metodologia de Thornthwaite, apresentado no item 2.5.3 deste trabalho, calcula a taxa mensal de evapotranspiração baseado principalmente na temperatura média do ar no local. A Tabela 7 apresenta os valores da taxa mensal de evapotranspiração calculados pela metodologia de Thornthwaite (1948) a partir do banco de dados do Anexo A.

Tabela 7: Valores de taxa mensal de evapotranspiração (ET) pelo método de Thornthwaite.

Mês	Temperatura média mens	$(T_i/5)^{5.14}$	ET (cm)	PET (m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> )
1	18,86	7,46	7,120	8,24E-08
2	19,80	8,04	7,801	9,03E-08
3	19,24	7,69	7,387	8,55E-08
4	19,41	7,79	7,512	8,69E-08
5	16,89	6,31	5,791	6,70E-08
6	16,45	6,07	5,512	6,38E-08
7	15,69	5,65	5,045	5,84E-08
8	17,52	6,68	6,202	7,18E-08
9	17,40	6,61	6,124	7,09E-08
10	19,91	8,10	7,879	9,12E-08
11	18,34	7,16	6,758	7,82E-08
12	18,75	7,40	7,040	8,15E-08
I =	84,95	a =	1,872	

A partir dos dados obtidos, chegou-se nos valores de taxa de evapotranspiração apresentados na Tabela 7, que junto ao banco de dados de temperatura média diária, taxa de precipitação diária e umidade relativa média diária,

apresentados no Anexo A, caracterizaram a condição de contorno do tipo Interação Terra-Clima indicada pelas setas rosas na Figura 17.

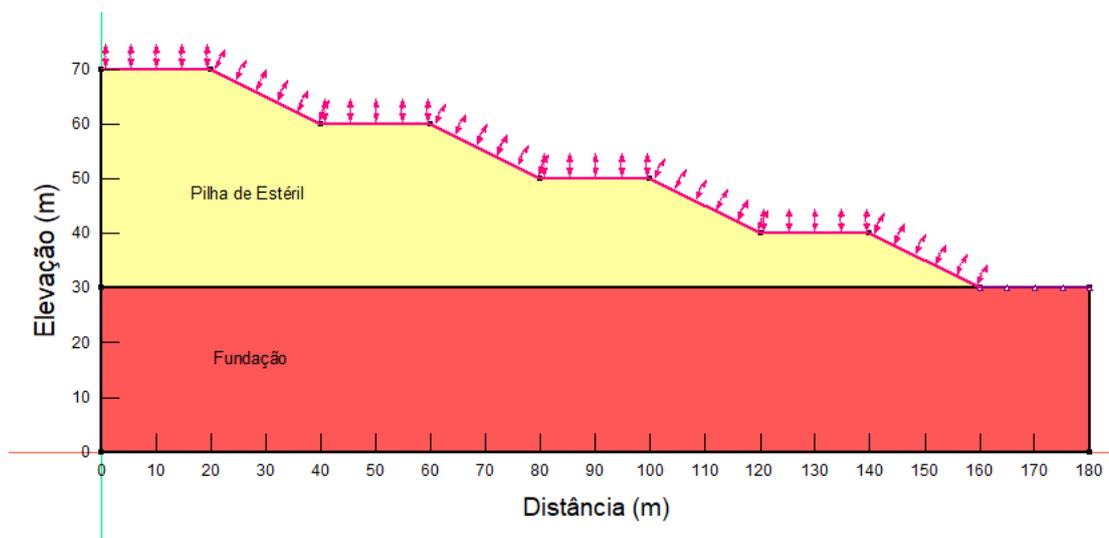


Figura 17: Aplicação da condição de contorno Interação Terra-Clima com taxa de evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) ao modelo protótipo da Pilha.

### Método de Penman

O método de Penman (1948) denominado método empírico que combina os efeitos do balanço de energético com os efeitos do poder evaporante do ar. Existem diversos métodos que aprimoraram o método de Penman, como Penman-Wilson e Penman-Monteith, ambos disponíveis no SEEP/W, entretanto, por terem base conceitual no mesmo método, apresentaram resultados similares, sendo assim, será apresentado nesse trabalho apenas a modelagem a partir do método de Penman-Wilson.

Semelhante à condição de contorno de Thornthwaite, a condição de contorno para este cenário é do tipo Interação Terra-Clima, indicada pelas setas azul claras na Figura 18, determinada a partir dos de temperatura média diária, taxa de precipitação diária e umidade relativa média diária e também de velocidade média do vento e radiação solar líquida.

A radiação solar líquida foi estimada pelo próprio software a partir de dois parâmetros: função de radiação solar estimada e albedo. A função da radiação solar foi estimada a partir da Latitude do local e da data de início dos dados

climatológicos. Já o albedo, que mede a capacidade de reflexão da radiação solar de uma determinada superfície, foi estimado como constante com um valor igual a 0,15, valor aproximado tomado de acordo com a Tabela 3.

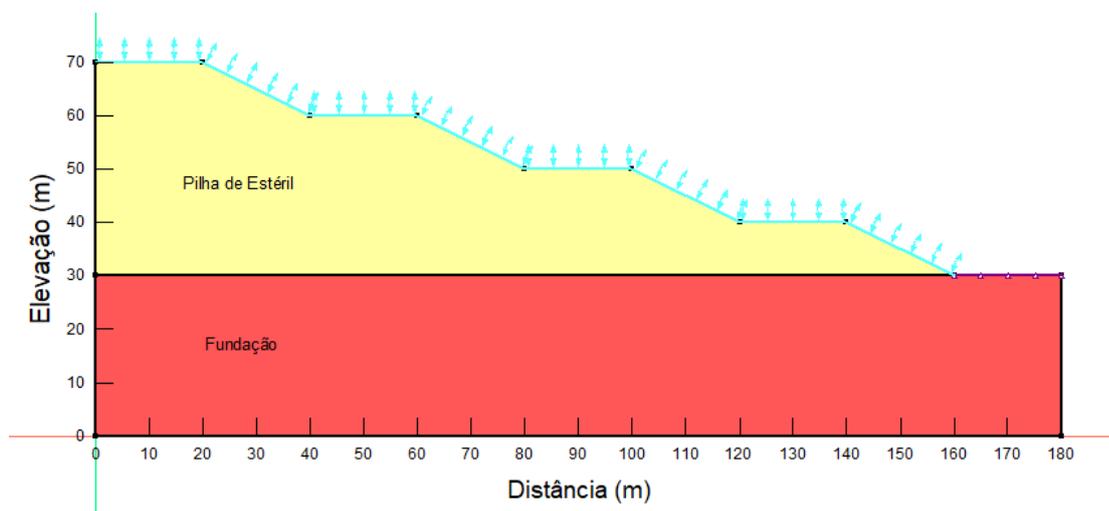


Figura 18: Aplicação da condição de contorno Interação Terra-Clima com taxa de evapotranspiração pelo método de Penman (1948) ao modelo protótipo da Pilha.

### 3.1.5 Vegetação

A consideração da presença de vegetação e raízes no solo é extremamente complexa, uma vez que dificilmente os dados de entrada para a definição das condições de contorno são encontrados. Entretanto, é um parâmetro de grande importância quando se aborda o balanço hídrico na interação solo-planta-atmosfera, uma vez que grande parte da parcela de referente à evapotranspiração advém da transpiração realizada pelas plantas.

Para simular a presença de raízes e de plantas na modelagem, foi adotado o a condição de contorno já definida anteriormente no método de Thornthwaite (1948) e implementada a presença da vegetação. Uma vez que o trabalho em questão trata de um protótipo, tomou-se como base para os dados de entrada da definição das condições de contorno não só os dados meteorológicos do Anexo A, como também

os dados da vegetação apresentados pela GeoSlope (2019), no exemplo “*Transpiration by Root Water Uptake*”.

A condição de concordo de dados de vegetação no SEEP/W calcula a taxa da perda de água da superfície através do processo de transpiração. Logo, a condição Interação Terra-Clima nessa situação se dá a partir de dois componentes, sendo um para cálculo da taxa de infiltração no solo e outro para taxa de perda de água por transpiração das plantas.

Para definir essa condição, são necessários cinco parâmetros de entrada: índice de área foliar, limite de umidade da planta, profundidade da raiz, profundidade da raiz normalizada e fração de cobertura do solo.

O índice de área foliar é um valor adimensional, determinado pela razão entre a área foliar do dossel e a unidade de área da superfície solo, podendo ser uma grandeza definida em função do tempo. No modelo numérico foi considerado um valor constante e igual a 5.

A fração de cobertura do solo é um fator que varia de 0 (solo sem nenhuma cobertura vegetal) a 1 (solo totalmente coberto por vegetação), geralmente calculada como função do índice de área foliar. Considerou-se para análise uma situação de cobertura total de vegetação na superfície.

O limite de umidade ( $\alpha_w$ ) da planta é um fator de redução utilizado para ponderar os efeitos gerados no solo devido a presença da água e a salinidade do meio. Definido em função da sucção mátrica, a função é dada por uma fase em que a taxa de extração da água é limitada pela fase anaeróbica da planta (entre S1 e S2), seguida por uma fase de redução da quantidade disponível de água (entre S3 e S4), indicada na Figura 19.



Figura 19: Modelo da função do limite de umidade ( $\alpha_w$ ) da vegetação.

A profundidade das raízes dependerá do tipo de vegetação, mas foram definidas no modelo com profundidade constante de 2 metros.

Enquanto que a profundidade da raiz normalizada pode ser obtida empiricamente por a partir da função da densidade do comprimento da raiz, ou seja, comprimento da raiz por volume de solo. A formulação empírica utilizada para este estudo será a de Hoffman and van Genuchten (1983), apresentada no exemplo “*Transpiration by Root Water Uptake*” (GeoSlope, 2019, p. 3).

O modelo final se encontra representado na Figura 20, onde as setas verdes indicam a condição de contorno Terra-Clima onde estão definidos os dados meteorológicos e as características da vegetação.

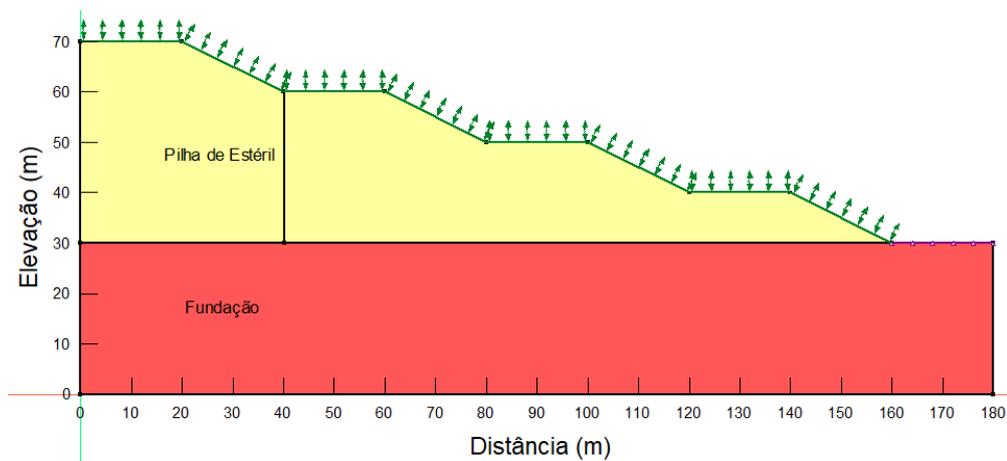


Figura 20: Aplicação da condição de contorno Interação Terra-Clima com taxa de evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) com a presença de vegetação ao modelo protótipo da Pilha.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados obtidos a partir das análises supracitadas ao longo do capítulo 3.

### 4.1 Linha Freática

A partir da aplicação das condições de contorno de carga total de água e de vazão nula (*Drainage*), em uma análise em regime transiente, foi possível determinar a localização da linha freática inicial do modelo.

Na Figura 21 é apresentado a linha freática, representada pela linha tracejada azul, determinada pelo programa a partir das condições de contorno supracitadas. Esta linha freática será usada como condição inicial de todas as análises ao longo deste estudo.

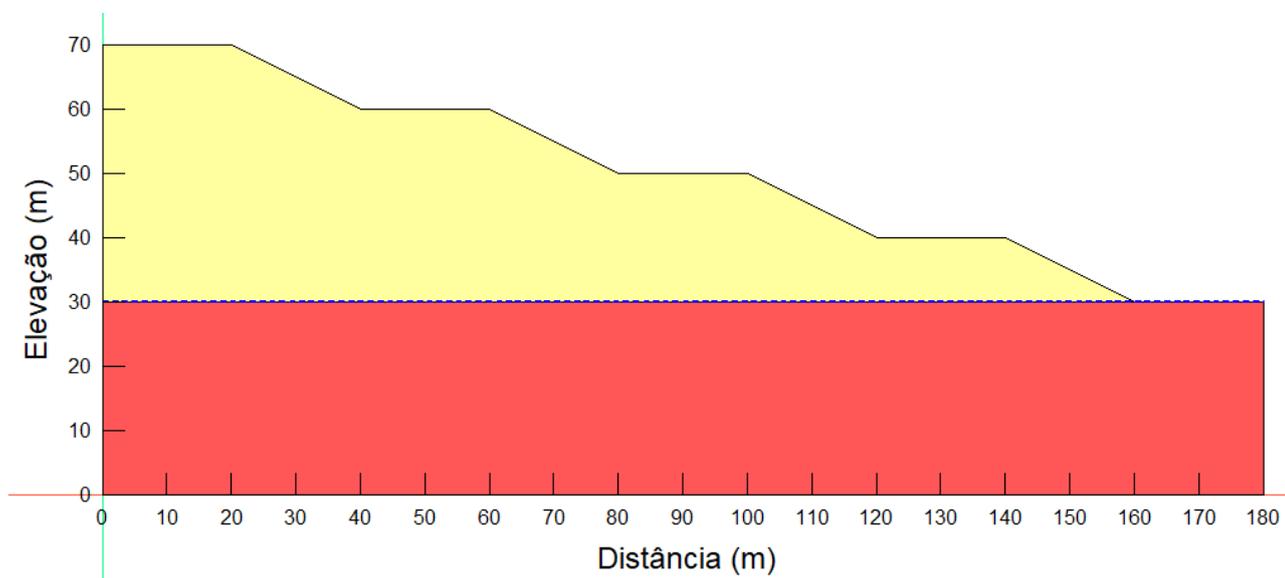


Figura 21: Resultado da análise permanente para determinação da linha freática.

## 4.2 Interação Solo-Atmosfera

Este tópico será dividido em duas abordagens: a determinação da evaporação e evapotranspiração a partir da metodologia de Thornthwaite (1948) e a partir da metodologia de Penman (1948).

### Método de Thornthwaite

Como visto anteriormente, no item 2.5.1 deste trabalho, o balanço hídrico simplificado pode ser representado em forma de um balanço de massas, permitindo quantificar o volume de água armazenado em cada parcela da superfície terrestre, de forma que a combinação entre a taxa de Evaporação (como não há a determinação de vegetação na superfície, na determinação da evapotranspiração considera-se apenas o processo de evaporação da água no solo), Escoamento Superficial (*Runoff*) e a Precipitação devem equilibrar a Infiltração no solo.

Após a análise ao longo de 348 dias do comportamento da pilha, os valores acumulados da taxa de Evaporação, Escoamento Superficial, Precipitação e Infiltração no solo estão indicados na Figura 22.

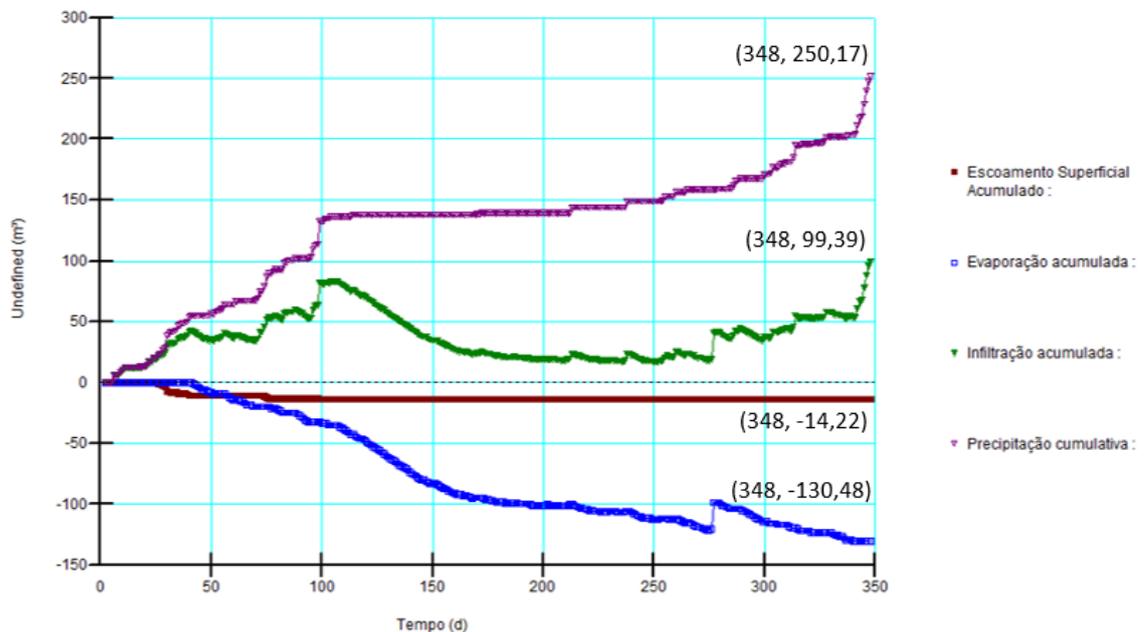


Figura 22: Resultados acumulados das parcelas do Balanço Hídrico obtidos a partir da análise hídrica de interação solo-atmosfera com evapotranspiração obtida a partir do método de Thornthwaite (1948).

A Equação (16) calcula o balanço hídrico simplificado final a partir dos valores acumulados encontrados na análise. De acordo com a GeoSlope (2019), o erro na determinação do balanço hídrico pode ser causado uma vez que, neste tipo de análise, o SEEP/W ajusta as poropressões mínimas no modelo, tentando evitar o ressecamento excessivo do solo durante os períodos de evaporação e transpiração. Infelizmente este processo pode gerar incompatibilidades no cálculo das parcelas do balanço hídrico.

(16)

Outra análise importante envolve o volume de água acumulada no material que compõe a pilha de estéril e o grau de saturação na pilha. Tais dados tem influência na determinação da sucção do solo e conseqüentemente na condutividade hidráulica e no fluxo de água entre os poros do solo, como visto nos capítulos anteriores.

O volume de água acumulado com o passar do tempo se encontra na Figura 23. De acordo com o gráfico, é possível perceber um acúmulo crescente da

quantidade de água retida no solo do Estéril até aproximadamente o dia 100, ou seja, até a metade do mês de abril. Após essa data, o volume de água acumulada passa a diminuir gradativamente até o dia 275, em meados de outubro. Este período é o período coincidem com o período de seca na região de Minas Gerais, onde foram retirados os dados. Após esse período, o volume de água acumulado volta a aumentar até atingir seu valor máximo no dia 347, em dezembro.

Um ponto importante a se ressaltar, de acordo com a GeoSlope (2019), é que em períodos de precipitação ou de neve, o SEEP/W considera que evapotranspiração nula, fazendo com que o processo de infiltração da água no solo seja ressaltado durante esses períodos. Já nos períodos de seca, onde têm-se muitos dias seguidos sem chuva, a evapotranspiração se torna o processo de atuação mais relevante no modelo.

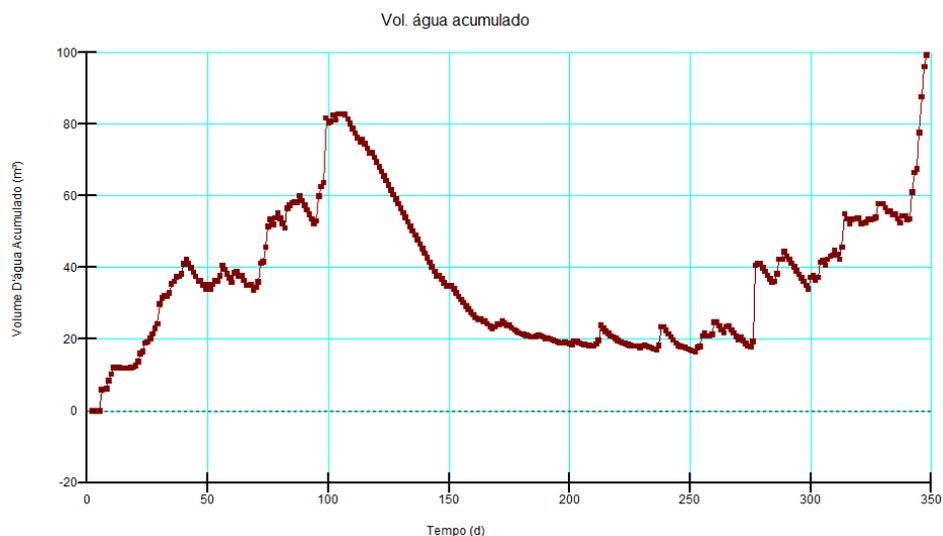


Figura 23: Gráfico do volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise pelo método de Thornthwaite.

Semelhante ao volume acumulado de água, o Grau de saturação, sofre oscilações pelo material da pilha estéril de acordo com as precipitações. Além disso, o solo que se encontra mais próximo a superfície sofre alterações mais bruscas no grau de saturação se comparado com camadas mais profundas do solo. As Figuras 25, 26, 27 e 28 mostram a evolução da variação do grau de saturação no meio com o passar do tempo.

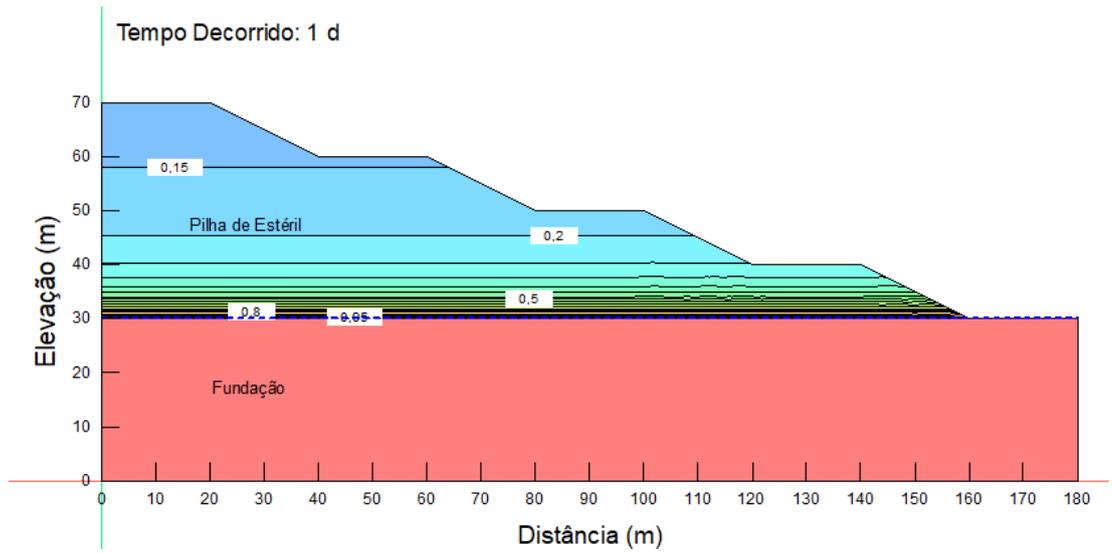


Figura 24: Grau de saturação na condição inicial do modelo, decorrido 1 dia – Modelo de Thornthwaite.

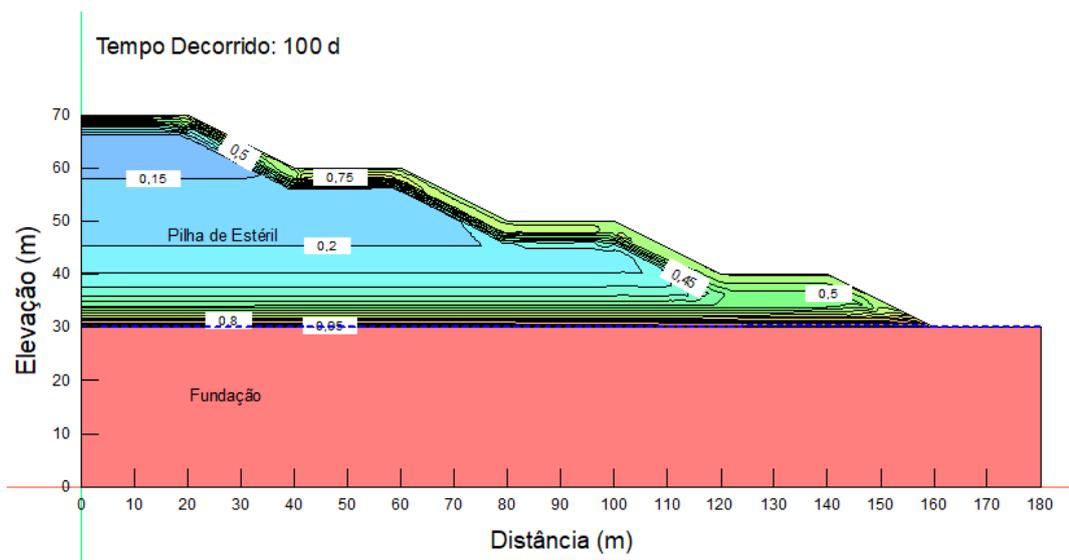


Figura 25: Grau de saturação no modelo decorridos 100 dias, durante o período de chuvas – Modelo de Thornthwaite.

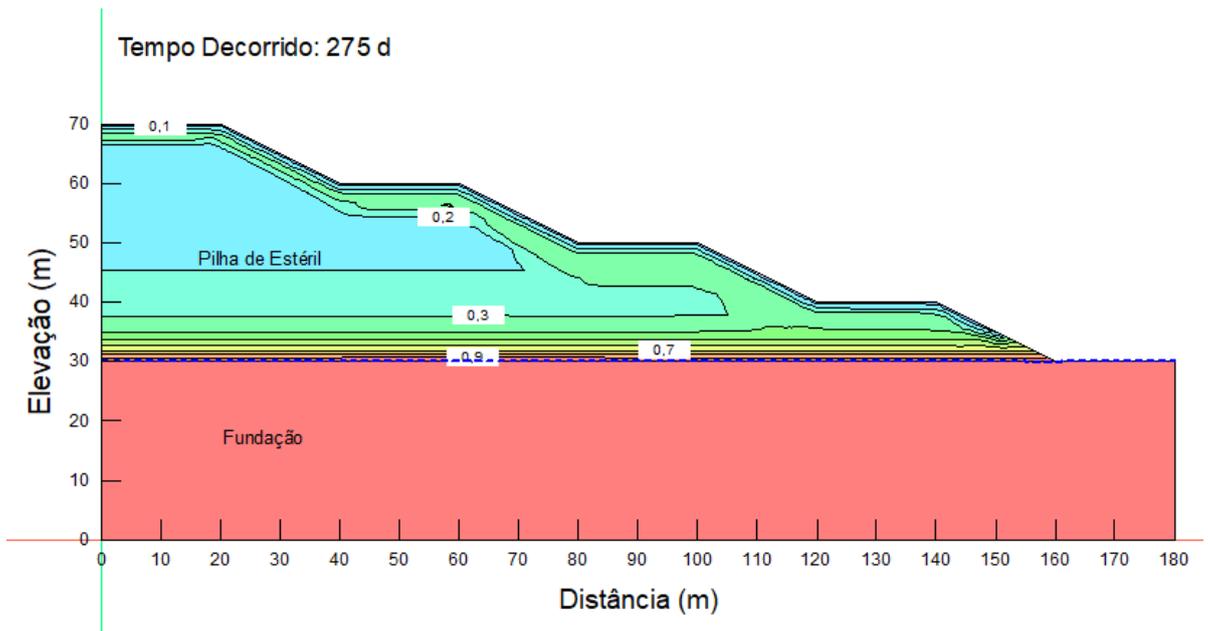


Figura 26: Grau de saturação pelo Estéril decorridos 275 dias, durante o período de baixa precipitação – Modelo de Thornthwaite.

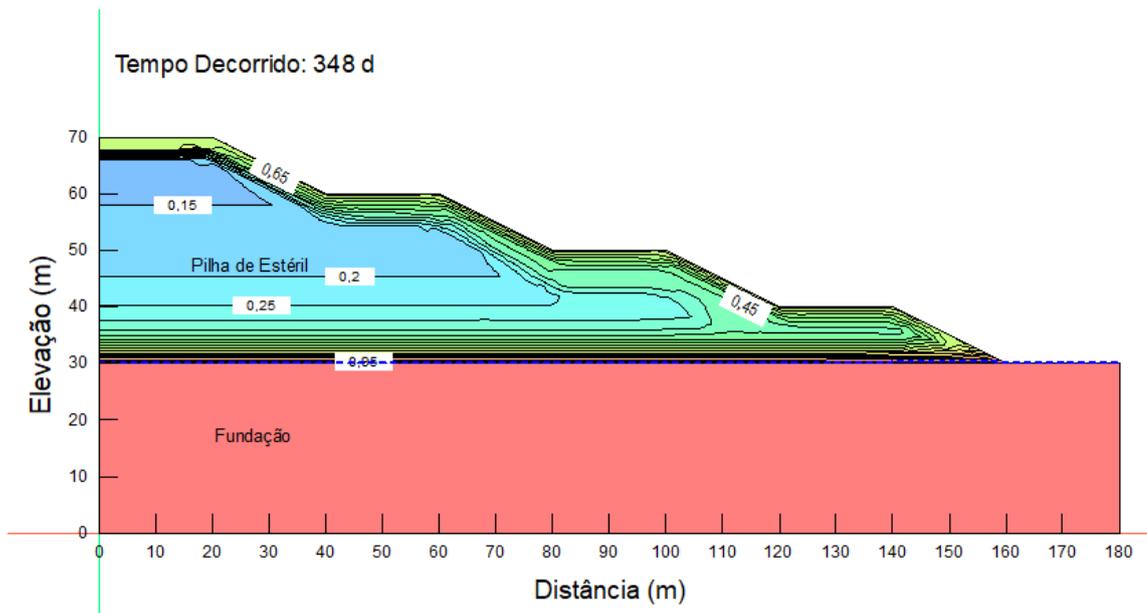


Figura 27: Grau de Saturação do Estéril durante o período de chuvas – Modelo de Thornthwaite.

Por fim, o gráfico apresentado na Figura 28 foi obtido a partir das variações do grau de saturação aferidos pelo programa com o passar de tempo, tomando pontos a diferentes profundidades.

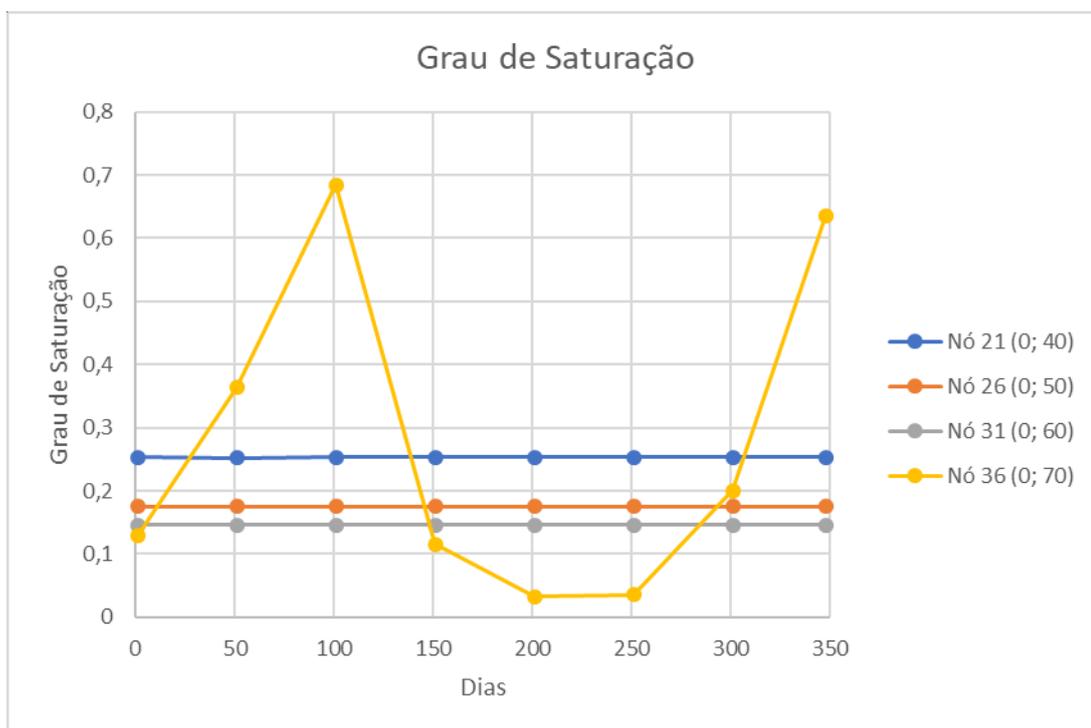


Figura 28: Gráfico do grau de saturação com o tempo considerando pontos a diferentes profundidades – Método de Thornthwaite.

### **Método de Penman**

Após a análise ao longo de 348 dias do comportamento da pilha, os valores acumulados da taxa de Evaporação, Escoamento Superficial, Precipitação e Infiltração no solo estão indicados na Figura 29.

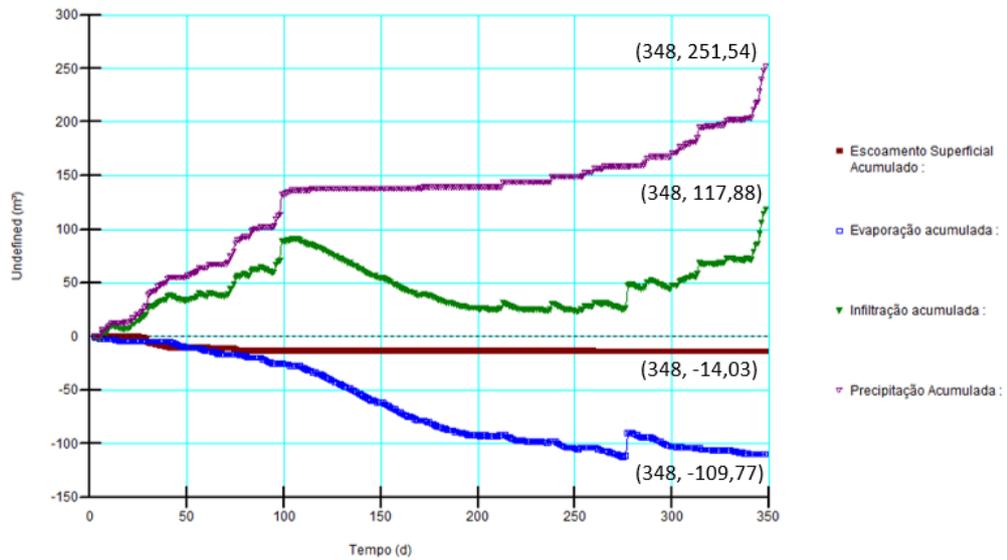


Figura 29: Resultados acumulados das parcelas do Balanço Hídrico obtidos a partir da análise hídrica de interação solo-atmosfera com evapotranspiração obtida a partir do método de Penman (1948).

Calculando então o balanço hídrico a partir de cada parcela, indicado na Equação (17), têm-se que o erro final do balanço hídrico simplificado pelo método de Penman-Wilson foi maior do que o determinado pelo método de Thornthwaite.

$$(17)$$

Ao verificar o gráfico de volume de água acumulada retida na região do material de Estéril, percebeu-se uma ligeira diferença, de forma que os volumes acumulados apresentaram valores maiores em comparação com a análise por Thornthwaite, como indicado na Figura 30.

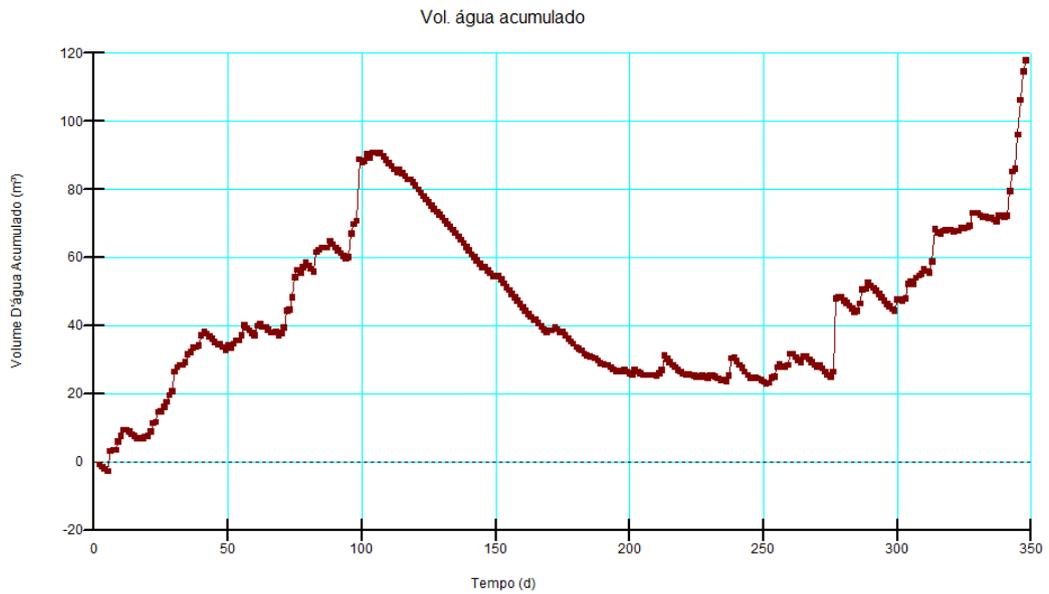


Figura 30: Gráfico do volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise pelo método de Penman-Wilson.

Na Figura 31 encontra-se um gráfico comparativo entre os dois métodos supracitados.

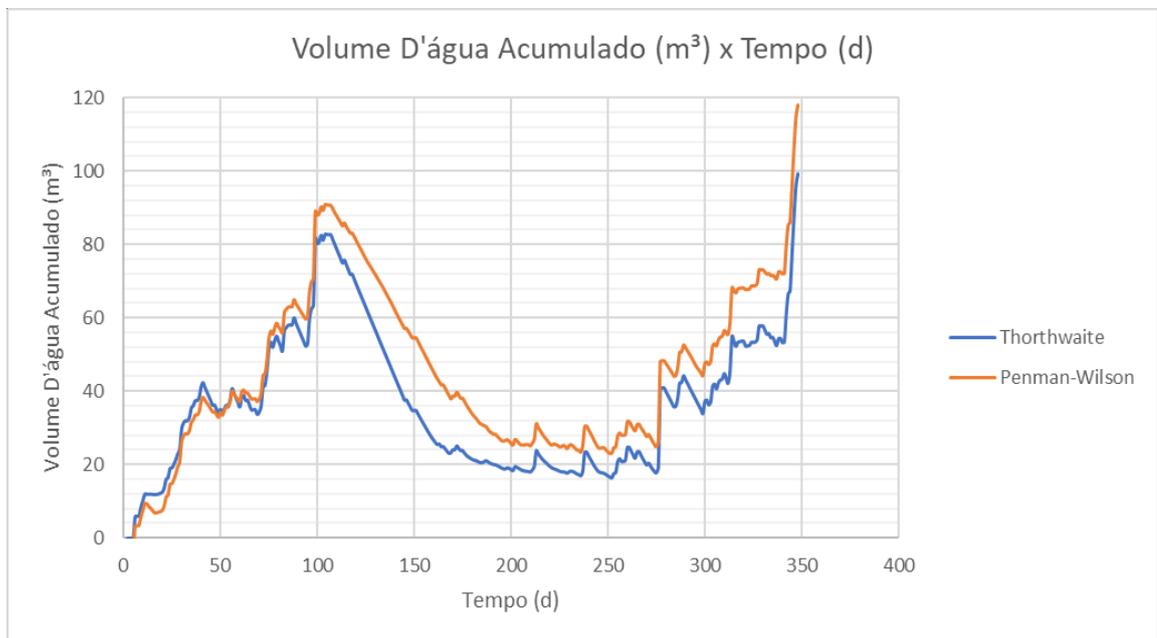


Figura 31: Gráfico comparativo entre volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise pelo método de Thornthwaite e de Penman-Wilson.

Apesar da diferença entre as taxas de infiltração e evaporação dentre os diferentes métodos considerados para cálculo de evapotranspiração, as diferenças

não foram relevantes suficiente para causar grande variação no cenário de saturação da pilha, como visto nas Figuras 33, 34, 35 e 36.

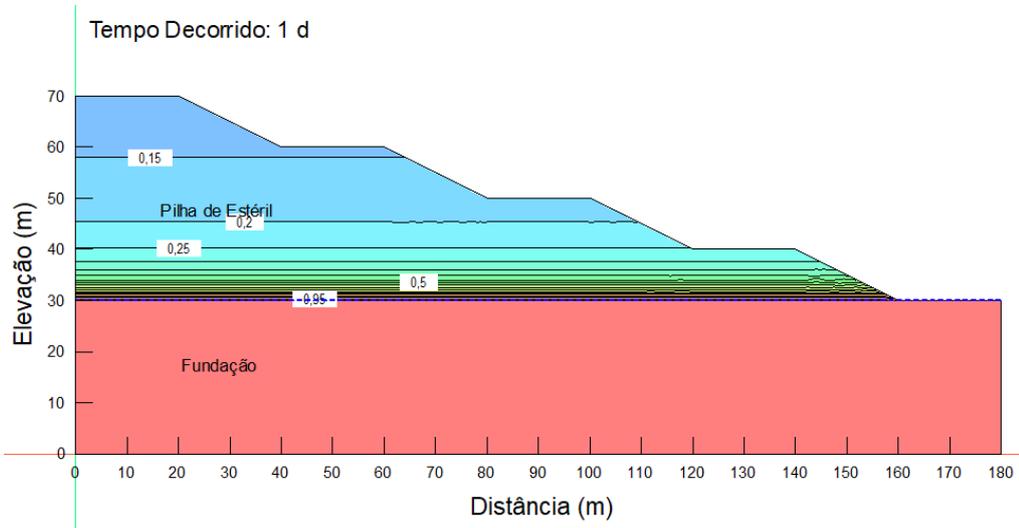


Figura 32: Grau de saturação na condição inicial do modelo, decorrido 1 dia – Modelo de Penman.

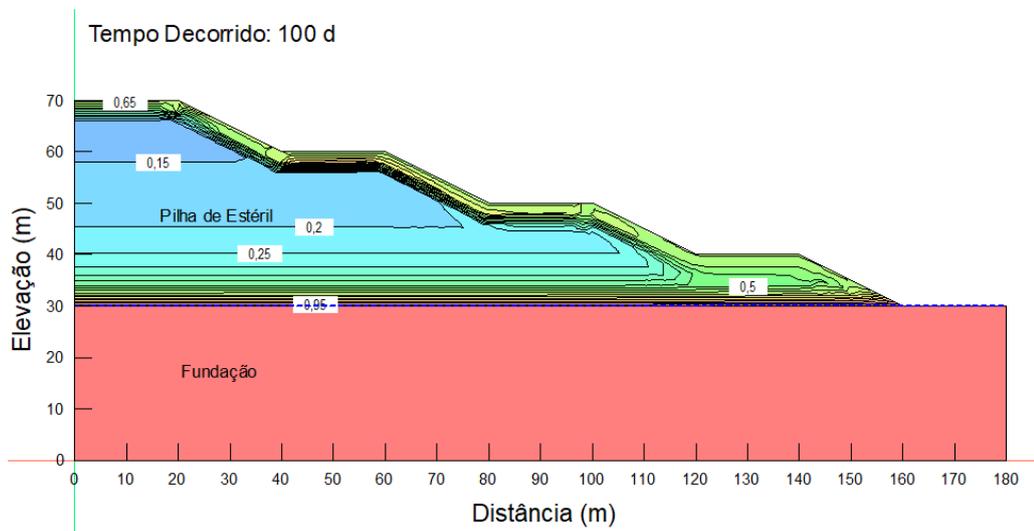


Figura 33: Grau de saturação no modelo decorridos 100 dias, durante o período de chuvas – Modelo de Penman.

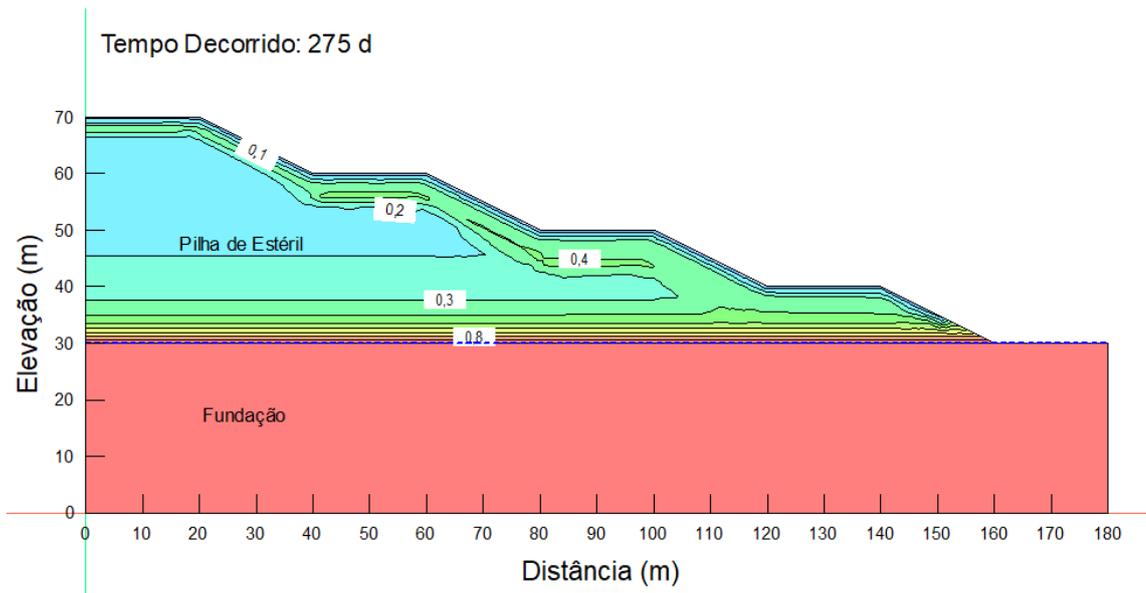


Figura 34: Grau de saturação no modelo decorridos 275 dias, durante o período de baixa precipitação – Modelo de Penman.

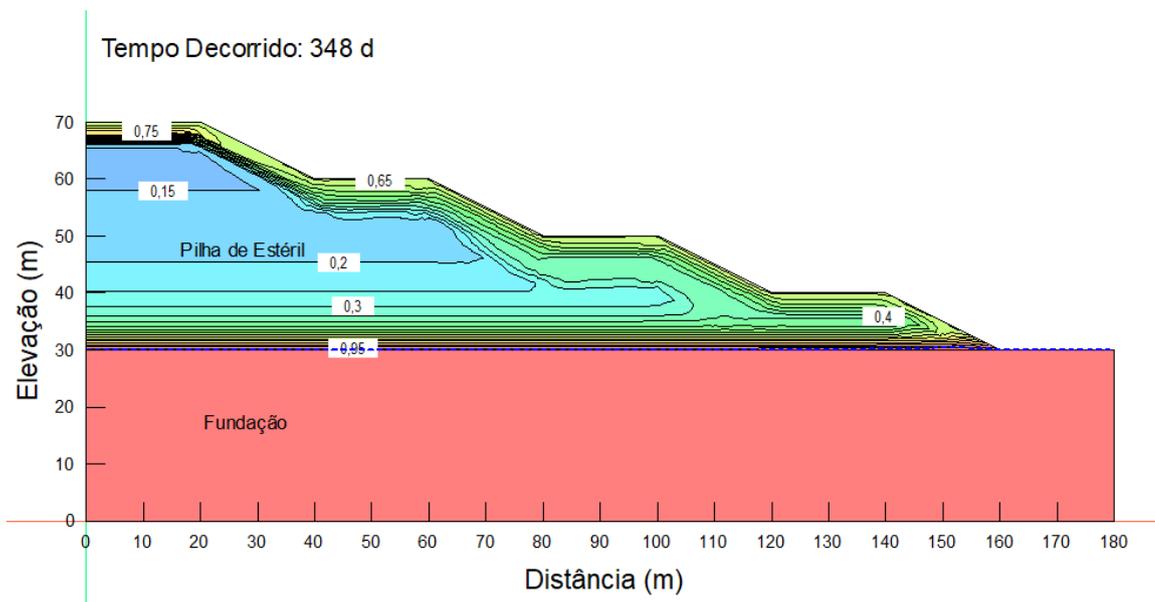


Figura 35: Grau de saturação no modelo decorridos 348 dias, durante o período de chuvas – Modelo de Penman.

Por fim, tem-se o gráfico apresentado na Figura 36, obtido a partir das variações do grau de saturação aferidos pelo programa com o passar de tempo, tomando pontos a diferentes profundidades.

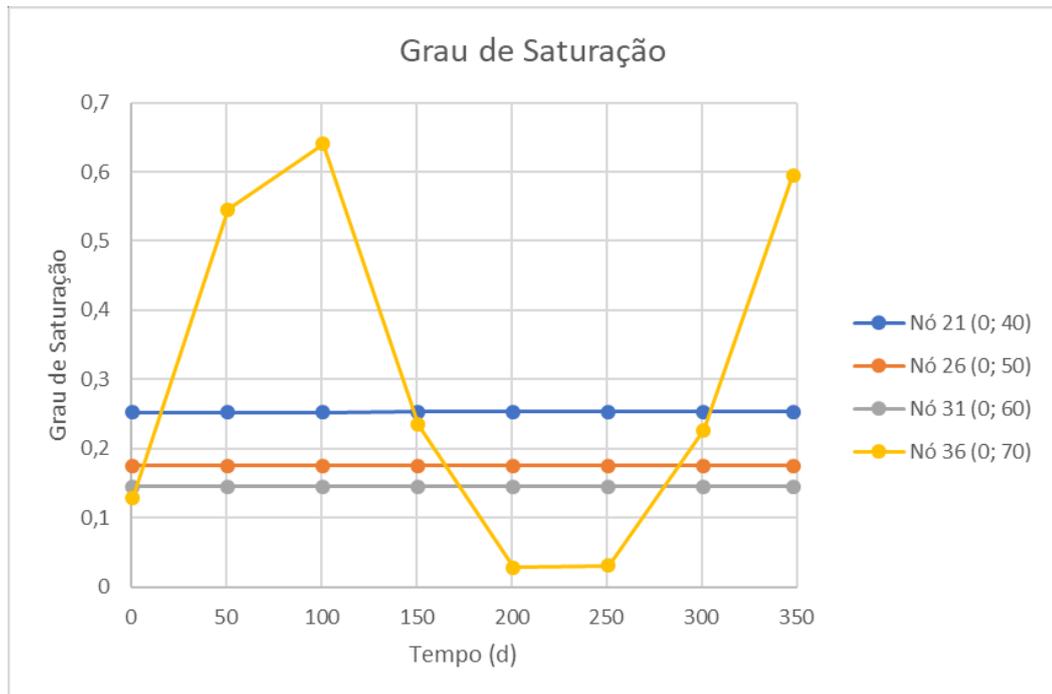


Figura 36: Gráfico do grau de saturação com o tempo considerando pontos a diferentes profundidades – Método de Penman-Wilson.

### 4.3 Vegetação

Após a análise ao longo de 348 dias do comportamento da pilha, os valores acumulados da taxa de Evaporação, Transpiração, Escoamento Superficial, Precipitação e Infiltração no solo estão indicados na Figura 37.

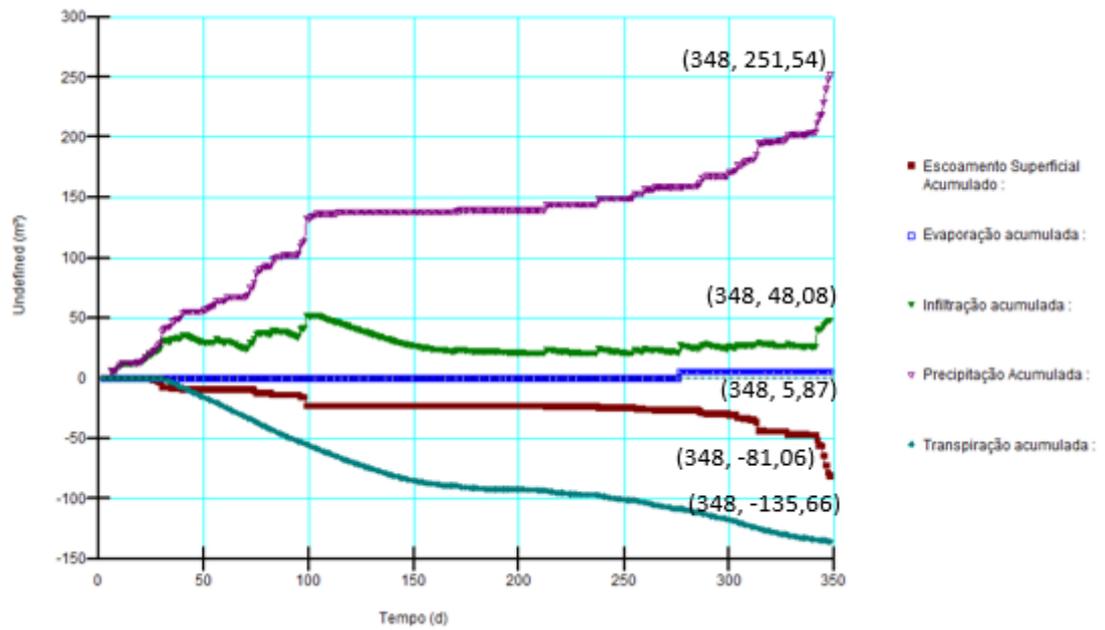


Figura 37: Resultados acumulados das parcelas do Balanço Hídrico obtidos a partir da análise hídrica de interação solo-atmosfera com evapotranspiração obtida a partir do método de Thornthwaite (1948) considerando a presença de vegetação.

Calculando então o balanço hídrico a partir de cada parcela, indicado na Equação (18), têm-se que o erro final do balanço hídrico pelo método de Thornthwaite considerando a presença de vegetação.

$$(18)$$

Quanto ao volume de água acumulado no solo que compõe a pilha de estéril, teve-se ao final um balanço negativo, como indicado na Figura 38.

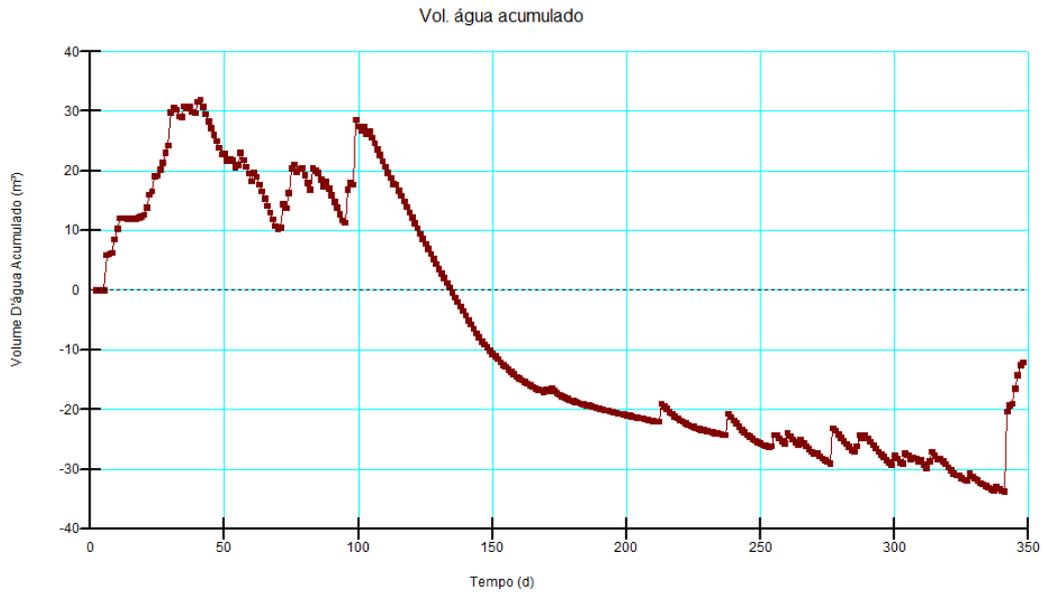


Figura 38: Gráfico do volume de água acumulada no material da Pilha de Estéril com tempo da análise no modelo considerando presença de vegetação.

Além disso, a evolução do grau de saturação ao longo do tempo apresentou um comportamento diferenciado, como visto nas Figuras 39, 40, 41 e 42.

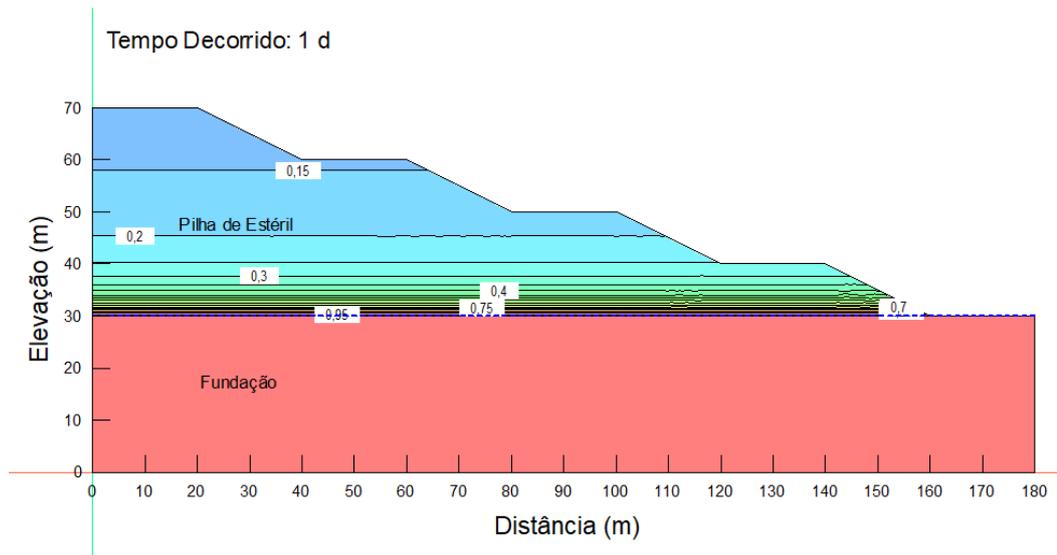


Figura 39: Grau de saturação na condição inicial do modelo, decorrido 1 dia – Modelo com a presença da vegetação.

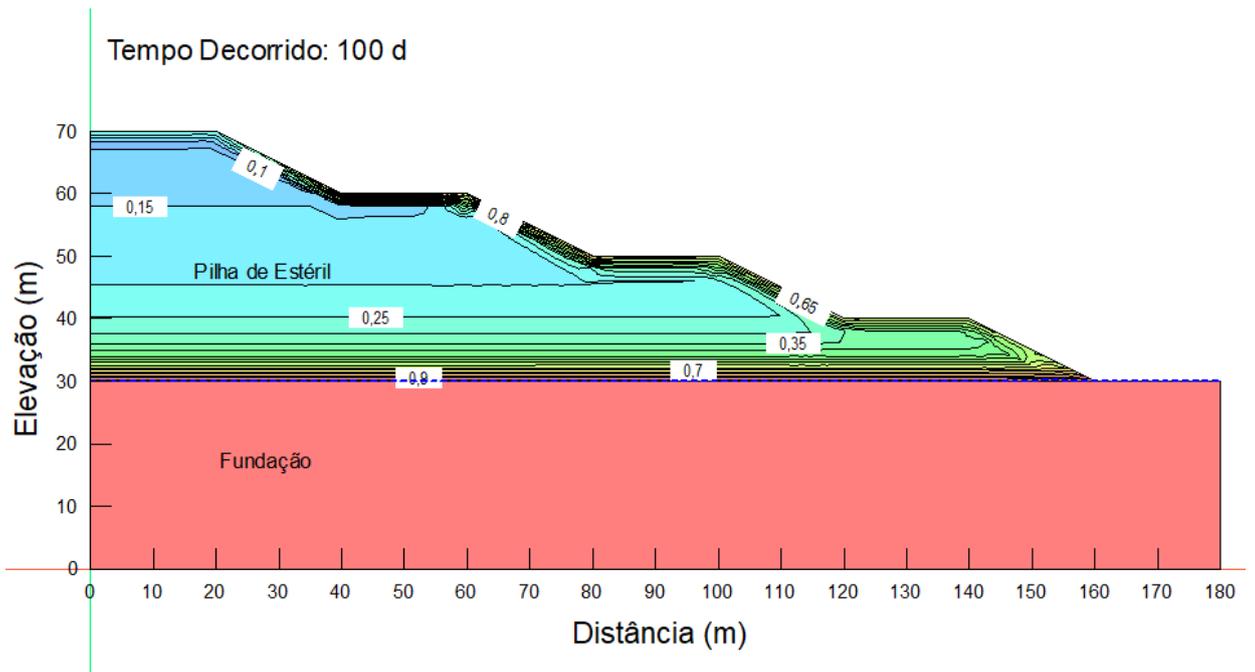


Figura 40: Grau de saturação no modelo decorridos 100 dias, durante o período de chuvas – Modelo com a presença da vegetação.

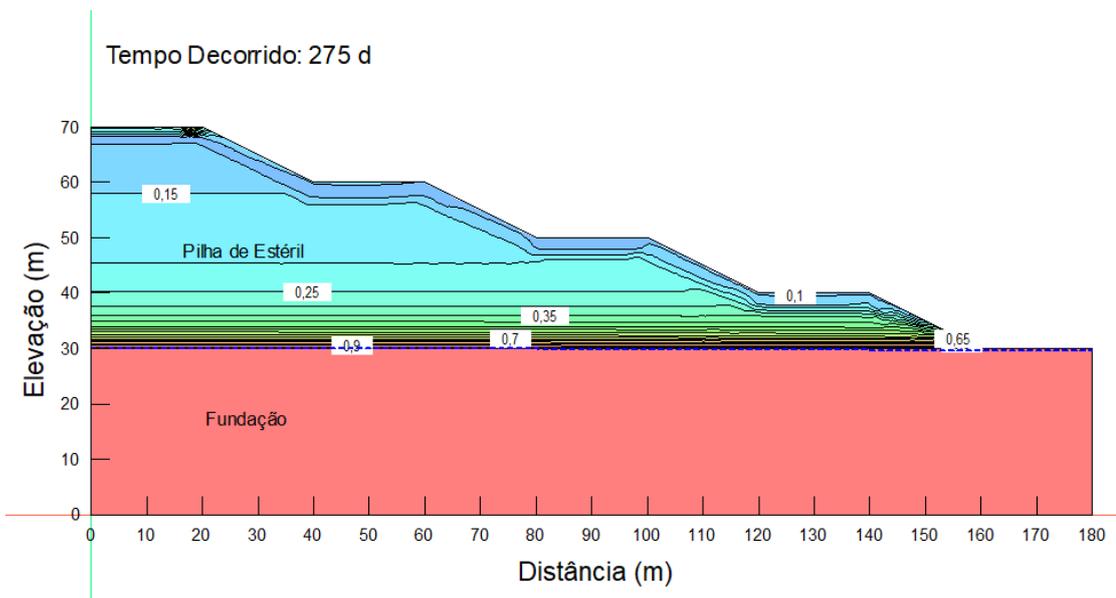


Figura 41: Grau de saturação no modelo decorridos 275 dias, durante o período de baixa precipitação – Modelo com a presença da vegetação.

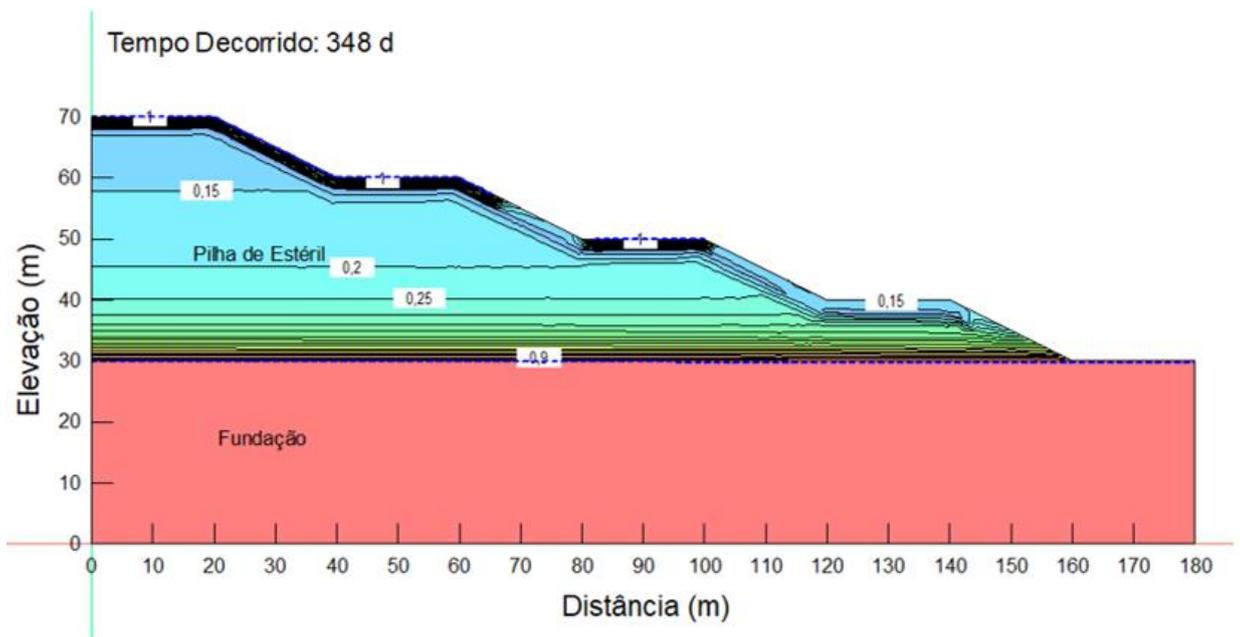


Figura 42: Grau de saturação no modelo decorridos 348 dias, durante o período de chuvas – Modelo com a presença da vegetação.

Enfim, o gráfico apresentado na Figura 43, obtido a partir das variações do grau de saturação aferidos pelo programa com o passar de tempo, tomando pontos a diferentes profundidades, mostra como as camadas mais próximas da superfície sofreram uma maior influência devido as condições sazonais enquanto as camadas mais profundas foram pouco afetadas, além de ser apontar a saturação da camada superior após decorridos 300 dias.

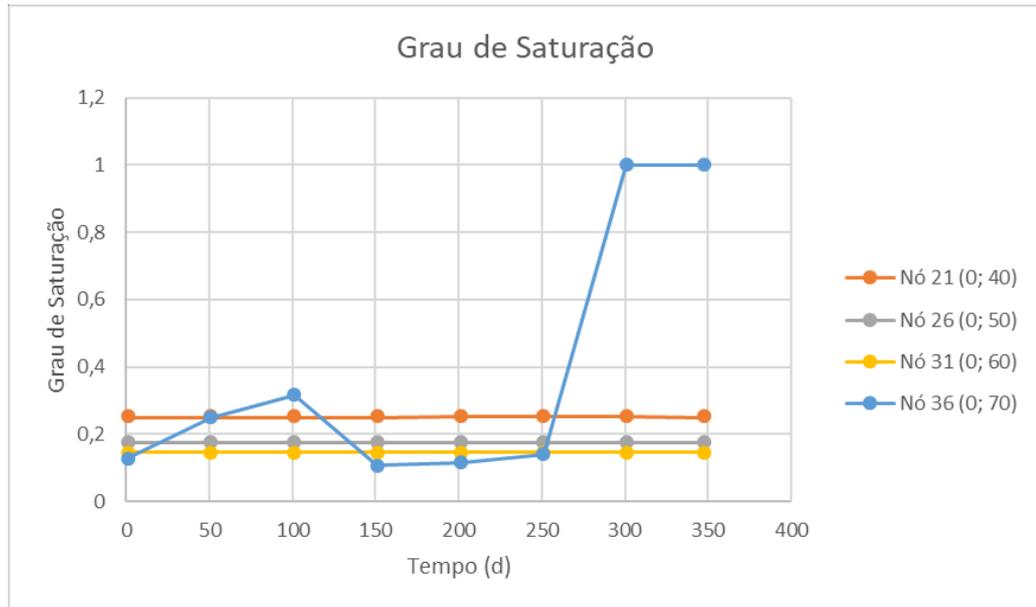


Figura 43: Gráfico do grau de saturação com o tempo considerando pontos a diferentes profundidades – Modelo com a presença da vegetação.

## 5 CONCLUSÃO

As estruturas como as pilhas de estéril, além de apresentarem uma heterogeneidade forte em sua composição, se encontram expostas diariamente à condições sazonais (precipitação, variação da temperatura e umidade relativa do ar, da radiação solar), que em condição não saturada, levam a uma oscilação de seus parâmetros hídricos (grau de saturação, volume de água retido nos vazios do solo, condutividade hidráulica, sucção) com o passar do tempo. Uma forma de mensurar a influência da sazonalidade num meio tão heterogêneo é a partir da determinação do balanço hídrico, obtido a partir de um balanço de massas entre as taxas de cada parcela do ciclo hídrico recorrente na interação solo-planta-atmosfera – Precipitação, Evapotranspiração, Evaporação e ou Transpiração, Escoamento Superficial e Infiltração.

As análises apresentadas no capítulo 4 visaram, de forma simplificada, criar cenários para exemplificar a dimensão de cada parcela nas condições hídricas de uma pilha de estéril de minério de ferro. Foi possível assim entender como o método de determinação da evapotranspiração e a presença de vegetação influenciam na interação solo-planta-atmosfera, além de mostrar o impacto de cada cenário nas parcelas que compõem o balanço hídrico.

O cenário de cálculo da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) se mostra uma boa alternativa quando há uma escassez de dados, uma vez que necessita apenas dados de temperatura do ar para determinar a condição de contorno do problema. Já os cenários de cálculo de evapotranspiração por Penman-Wilson (1948) e o cenário com a presença da vegetação se mostram mais complexos, uma vez que dependem de dados complexos de serem obtidos para determinar as condições de contorno do problema – como a radiação solar líquida e a característica da vegetação no local, respectivamente.

Após definir cada parcela acumulada (Precipitação, Evaporação, Escoamento Superficial e Infiltração), o erro do balanço hídrico ao final da primeira análise foi de 7,45 m<sup>3</sup>. Na segunda análise, pelo método de Penman (1948), obteve-se um erro do balanço hídrico de 9,86 m<sup>3</sup>. Sendo assim, dentre estes dois métodos de determinação

da evapotranspiração, o modelo de Thornthwaite (1948) apresentou para este protótipo um resultado mais satisfatório, alcançando um erro final no balanço hídrico menor.

Em contrapartida, a última abordagem, que adotou o cálculo da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) mais a presença de vegetação no solo resultou em um erro final acumulado do balanço hídrico de 7,39 m<sup>3</sup>. Comparativamente aos outros cenários abordados, este foi o que apresentou o menor erro acumulado no balanço hídrico simplificado ao final da análise. Como esperado, taxa de transpiração se mostrou muito mais presente que a parcela de evaporação, reafirmando que no processo de evapotranspiração, a maior parcela responsável pelo processo se dá pela perda de água através das plantas. Além disso, a taxa de infiltração se mostrou inferior aos casos anteriores, uma tendência coerente, uma vez que a presença de vegetação cobrindo totalmente a superfície do solo intercepta a água da chuva que antes de atingir a superfície.

Na Figura 31 há a comparação entre o volume d'água acumulado ao final dos dois primeiros cenários. Se comparado ao modelo de Thornthwaite, a metodologia de Penman-Wilson apresentou uma influência ligeiramente maior da taxa de infiltração, enquanto que a evaporação teve menos impacto na análise, resultando em uma diferença do volume d'água acumulado maior ao final da segunda análise.

As Figuras 23 e 30 indicam como o volume de água acumulado na região da pilha de estéril varia ao longo do ano com a oscilação dos períodos de chuva e de seca. Em todos os três cenários houve uma tendência de acúmulo de água no solo até por volta do dia 100, sofrendo uma queda próximo ao dia 275 e apresentando novamente a tendência crescente do acúmulo de água até o fim da análise, dia 348. Os períodos dos dias 100 (Abril) e 348 (Dezembro) coincidem com o período das estações de primavera e verão, tipicamente períodos de chuva em Minas Gerais (local onde foram retirados os dados meteorológicos), onde a infiltração no solo se sobressai. Em contraponto, o período próximo ao dia 275 (Outubro) ocorre logo após as estações de outono e inverno, quando tipicamente se tem o período de seca em Minas Gerais, favorecendo a evaporação.

Na Figura 38, vê-se também a influência das estações e os períodos de chuva e estiagem no gráfico de volume de água acumulado, porém a perda de água do solo

para a superfície através do processo de evapotranspiração teve mais impacto ao longo da análise do que a infiltração de água no solo, levando a valores negativos de volume de água acumulado, ou seja, a perda de água do solo para a atmosfera foi maior do que a retenção de água.

Quanto ao grau de saturação do solo, houve uma semelhança nos resultados dos três cenários, havendo uma tendência maior de influência da nas camadas mais próximas da superfície (interface solo-atmosfera), enquanto que para as camadas mais profundas a oscilação do parâmetro foi bem mais discreta, sendo pouco afetadas. As Figuras 28, 36 e 43 exibem graficamente a variação do grau de saturação em pontos tomados na mesma distância horizontal no modelo, porém em profundidades diferentes. Enquanto as camadas superiores sofrem alta variação na saturação ao longo das análises, as camadas mais profundas mantêm-se praticamente constantes, sofrendo pouca ou nenhuma alteração a partir das condições sazonais.

Apesar do comportamento semelhante, no cenário em que há a presença da vegetação percebe-se uma tendência maior nas camadas superiores, a profundidade de até 2 metros (onde se encontram localizadas as raízes das plantas) à retenção de água. Ao final da análise, nas camadas mais altas o solo chega a atingir a condição saturada ou com alto grau de saturação, único cenário que apresentou tal situação – com exceção da berma mais inferior, a qual o grau de saturação se manteve baixo.

As análises apresentadas neste trabalho reforçam o impacto das condições sazonais nas condições hídricas do solo (balanço hídrico, volume de água acumulado e grau de saturação), que sofrem variações ao longo do ano e podem influenciar diretamente as condições de fluxo e estabilidade de uma estrutura como as pilhas de estéril. Além disso, é importante ressaltar a dificuldade da determinação dos parâmetros de entrada e principalmente das condições de contorno para o problema, elevando o grau de dificuldade de análises detalhadas e resultados precisos neste tipo de cenário. Outro ponto importante de ser ressaltado condiz quanto a influência do tipo de vegetação escolhida para o local, uma vez que vegetações de espécies diferentes apresentam características diferentes quanto a retenção de água, profundidade das raízes, absorção de água do solo e taxa de transpiração.

## **Sugestão para trabalhos futuros**

Uma proposta para trabalhos futuros seria realizar o estudo proposto na metodologia deste trabalho para um estudo de caso de uma pilha já existente, considerando ainda a determinação de parâmetros térmicos, como a condutividade térmica e o calor específico volumétrico, e análise de estabilidade, considerando parâmetros de resistência da estrutura.

Além disto, uma abordagem relevante seria a consideração das mudanças climáticas que vem ocorrendo na atmosfera nas últimas décadas (aquecimento global, alteração no regime de chuvas, entre outros), fazendo um estudo de como elas refletem em obras desse tipo.

## REFERÊNCIAS

- al., C. e. (2015). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- BICALHO, K. V., MACHADO, S. L., & GERSCOVICH, D. M. (2015). Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. Em I. J. Carvalho, G. d. Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. (Org.), *Solos não saturados no contexto geotécnico*. (pp. p. 297-326). São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- BORMA, L., Gitirana Jr., G., & Luiz, G. (2015). Interação solo-planta-atmosfera e o papel dos solos não saturados. Em I. J. Carvalho, G. d. Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. (Org.), *Solos não saturados no contexto geotécnico*. (pp. 327-360.). São Paulo: ABMS.
- DNPM, D. N. (2001). *Normas Regulamentadoras de Mineração - NRM 19*. Rio de Janeiro.
- FREDLUND, D. G., & RAHARDJO, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- GEOSLOPE, I. L. (2007). *Seepage Modeling with SEEP/W - An Engineering Methodology*. Calgary, Alberta, Canada.
- GOMES, R. C. (2004). *Anotações de Aula. Núcleo de Geotecnia Aplicada, Escola de Minas, UFOP*. Ouro Preto, MG.
- IBRAM, I. B. (2018). *Economia Mineral do Brasil*.
- LEME, F. R. (2009). *Influência da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de taludes da barragem de Pesqueiro*. Fortaleza, CE: Dissertação, Universidade Federal do Ceará.
- MACHADO, S. L., & VILAR., O. M. (2015). Potenciais da água no solo. Em I. J. Carvalho, G. d. Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. (Org.), *Solos não saturados no contexto geotécnico*. (pp. p. 79-96.). São Paulo: ABMS.

- MARINHO, F. A. (1997). *Medição de Sucção em Solos*. Rio de Janeiro: Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Vol 2, p. 373-398.
- MARINHO, F. A., SOTO, M. A., & GITIRANA JR, G. F. (2015). Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. Em J. In: Carvalho, G. F. Gitirana Junior, S. L. Macgado, M. Mascarenhas, & F. C. Silva Filho, *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico*. (pp. p. 231-256.). São Paulo: ABMS.
- NUNES, D. R. (2014). *Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia*. Ouro Preto, MG.
- PEDRA, J. A. (2010). *Influência do processo sazonal de fluxo na zona vadosa na estabilidade de uma pilha de estéril de minério de ferro*. Ouro Preto, MG: Tese de Doutorado. NUGEO, UFOP.
- PEREIRA, A., VILLA NOVA, N., & SEDIYAMA, G. (1997). *Evapotranspiração*. Piracicaba: FEALQ.
- Robertson, & Kirsten, A. M. (1985). *Mine waste disposal: An update on geotechnical and geohydrological aspects*. Vancouver, Canada.
- SALIBA, F. P. (2007). *Avaliação Hidrogeotécnica da Fundação da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade Bela Vista de Minas (Minas Gerais)*. Dissertação em Engenharia Civil - PUC Rio, Rio de Janeiro, RJ.

## ANEXO A DADOS METEOROLÓGICOS

Tabela 8: Dados Meteorológicos utilizados para o estudo (Fonte: Adaptado de PEDRA, 2010).

Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
0	01/01/2008	0	28,48	16,57	85,2	25,1	3,74
1	02/01/2008	0	26,96	16,1	75,8	36,58	4,26
2	03/01/2008	0	25,29	15,3	78	40,93	3,73
3	04/01/2008	0	27,69	15,44	79,7	35,45	3,07
4	05/01/2008	0	27,89	16,77	81	34,11	3,3
5	06/01/2008	37,5	20,1	14,83	98,4	62,1	4,79
6	07/01/2008	1,2	22,83	14,37	98,9	62,16	3,97
7	08/01/2008	1,3	24,23	15,23	99,1	60,36	3,3
8	09/01/2008	14,3	20,24	14,3	98,6	77,4	3,11
9	10/01/2008	11,7	23,56	15,1	99,5	63,16	3,97
10	11/01/2008	11,4	24,63	15,57	99,6	54,35	3,3
11	12/01/2008	0,2	24,96	16,17	99	62,09	3,41
12	13/01/2008	0	22,36	16,3	98,8	69,9	3,58
13	14/01/2008	0	22,89	14,11	97,3	52,88	5,5
14	15/01/2008	0	22,96	13,84	98,4	52,21	4,6
15	16/01/2008	0	23,56	14,17	98,5	55,75	3,83
16	17/01/2008	0,1	26,03	14,91	94,3	45,53	3,85
17	18/01/2008	0,7	24,76	14,9	98,8	49,21	3,51
18	19/01/2008	1,5	25,57	16,37	97,6	57,15	5,13
19	20/01/2008	1,9	26,43	15,7	99	54,08	4,52
20	21/01/2008	7,5	18,37	14,9	99	76,7	4,24
21	22/01/2008	15,5	20,96	14,48	99,2	80,1	3,46
22	23/01/2008	4,1	19,3	14,83	99,4	83,5	3,68
23	24/01/2008	18,4	20,69	14,7	99,6	76,6	5,03
24	25/01/2008	1,6	20,96	15,17	99,4	77,9	3,71
25	26/01/2008	8,4	20,56	14,04	99,7	83,6	4,45
26	27/01/2008	11,1	16,7	13,64	100	97,1	4,85
27	28/01/2008	15,7	15,43	13,11	100	99,5	5,13
28	29/01/2008	12,2	17,24	14,23	100	94,4	3,62
29	30/01/2008	61,7	21,76	15,03	99,9	73,4	4,19
30	31/01/2008	16,4	22,56	13,23	99,8	75,7	4,22
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento

			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
31	01/02/2008	5,4	27,3	17,44	99,9	50,34	3,11
32	02/02/2008	0,1	24,5	17,31	99,8	68,57	3,67
33	03/02/2008	7	24,16	15,97	100	68,04	7,12
34	04/02/2008	21,7	18,17	15,37	100	93,3	4,45
35	05/02/2008	6	20,63	15,1	100	77,5	3,43
36	06/02/2008	10,9	22,49	15,43	99,8	73,6	2,95
37	07/02/2008	0,9	24,56	15,03	100	57,95	3,04
38	08/02/2008	6	24,9	14,9	100	59,56	3,21
39	09/02/2008	22,9	26,57	15,5	98,3	47,81	3,41
40	10/02/2008	10,7	26,9	17,31	91,2	51,74	2,24
41	11/02/2008	0	26,17	17,57	95,7	52,88	2,67
42	12/02/2008	0	27,03	17,37	96,7	46,2	2,82
43	13/02/2008	0	26,37	16,18	91,7	49,14	3,64
44	14/02/2008	0	26,03	16,7	93,4	52,35	4,01
45	15/02/2008	0	27,1	15,97	92	40,33	4,52
46	16/02/2008	0,4	23,7	15,64	99	52,21	4,52
47	17/02/2008	0	26,03	14,71	95,6	38,26	3,93
48	18/02/2008	0	26,1	15,1	93,5	50,74	4,11
49	19/02/2008	8,1	18,77	14,5	99,2	61,38	4,33
50	20/02/2008	0	24,83	15,64	93,1	52,28	3
51	21/02/2008	8,2	23,36	14,9	99,3	58,89	3,99
52	22/02/2008	6,5	22,9	16,17	98,9	67,5	4,1
53	23/02/2008	0,1	23,36	16,5	96,8	66,37	4,43
54	24/02/2008	9,2	22,16	14,75	99,6	74,7	2,87
55	25/02/2008	19,8	21,89	14,83	99,8	75,4	4,34
56	26/02/2008	0	24,36	14,38	99,6	58,69	5,65
57	27/02/2008	0	21,76	14,17	99,7	68,7	6,11
58	28/02/2008	0	22,96	12,51	99,9	58,89	5,43
59	29/02/2008	0	22,29	14,32	97	68,1	3,33
60	01/03/2008	16,8	18,17	15,9	100	96,7	4,86
61	02/03/2008	3,1	23,09	15,97	100	61,02	4,8
62	03/03/2008	0	25,3	16,44	100	50,74	3,67
63	04/03/2008	0,4	25,23	16,04	100	49,81	4,07
64	05/03/2008	0	27,1	15,57	96,6	37,19	2,86
65	06/03/2008	0	25,43	15,7	95,3	54,68	3,59
66	07/03/2008	0,2	26,5	15,9	97,6	51,94	4,53
67	08/03/2008	0,4	25,03	14,51	96,2	51,81	3,48
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média

68	09/03/2008	0	23,16	16,64	99,8	60,36	2,83
69	10/03/2008	3,9	24,5	15,64	97,8	58,69	3,17
70	11/03/2008	10,1	23,63	15,77	99,8	65,03	2,92
71	12/03/2008	33,7	23,76	15,7	100	68,57	3,36
72	13/03/2008	3,1	23,1	15,64	100	70,8	4,27
73	14/03/2008	27,7	18,91	14,71	100	91,3	4,78
74	15/03/2008	45,3	22,96	14,23	100	74,1	4,49
75	16/03/2008	15,5	22,56	14,31	100	71,5	3,18
76	17/03/2008	0	24,3	16,04	99,7	56,02	4,99
77	18/03/2008	11,3	22,89	15,64	100	55,88	4,7
78	19/03/2008	9,4	22,63	14,84	100	56,62	4,41
79	20/03/2008	0	23,63	14,51	98,5	51,01	4,85
80	21/03/2008	0	23,96	15,18	98,2	47,74	4,3
81	22/03/2008	0	24,16	14,78	93	55,82	2,62
82	23/03/2008	35,5	24,56	15,84	99,2	56,28	3,2
83	24/03/2008	5,8	22,96	16,37	96,8	66,77	3,01
84	25/03/2008	4,4	23,36	15,24	99,7	60,49	3,98
85	26/03/2008	0,9	19,31	14,78	100	80,3	3,17
86	27/03/2008	0,6	22,5	14,24	100	68,37	3,15
87	28/03/2008	12,3	22,96	13,85	99,6	63,23	2,6
88	29/03/2008	0	24,43	15,57	99,8	58,57	2,84
89	30/03/2008	0	21,63	13,65	99,7	61,76	8,32
90	31/03/2008	0	19,51	12,18	100	66,78	6,53
91	01/04/2008	0	21,76	13,25	93,1	55,02	3,52
92	02/04/2008	0	22,76	13,38	94	45,53	2,61
93	03/04/2008	0	23,23	15,31	84,4	58,82	1,97
94	04/04/2008	3,9	22,03	15,37	100	68,37	2,78
95	05/04/2008	43,7	20,16	14,91	100	83,5	4,11
96	06/04/2008	17,9	17,84	15,31	100	100	4
97	07/04/2008	6,6	23,76	16,1	100	66,83	3,41
98	08/04/2008	116,4	24,43	16,17	100	62,29	2,64
99	09/04/2008	0	24,43	16,37	100	63,09	2,96
100	10/04/2008	3,1	25,36	16,7	100	61,89	2,06
101	11/04/2008	12,2	25,16	15,51	100	55,28	3,92
102	12/04/2008	0	25,16	17,78	84,8	45,67	2,18
103	13/04/2008	10,6	25,03	17,44	95,2	56,89	2,46
104	14/04/2008	0,3	24,9	16,37	97,8	65,5	4,1
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura de ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
105	15/04/2008	0,2	23,36	15,44	100	56,82	4,3
106	16/04/2008	0,1	22,69	14,78	100	65,63	5,99

107	17/04/2008	0	24,3	14,51	100	60,29	2,71
108	18/04/2008	0	22,96	15,91	100	60,12	3,91
109	19/04/2008	0	23,03	14,12	97,6	56,48	5,59
110	20/04/2008	0	22,29	14,84	100	69,57	4,01
111	21/04/2008	0	23,63	15,71	99,1	58,09	2,79
112	22/04/2008	0	23,29	15,58	97,8	65,7	2,47
113	23/04/2008	5,4	23,43	16,11	100	59,23	3,27
114	29/04/2008	0	25,5	16,65	81,6	40,99	2,99
115	30/04/2008	0	22,29	14,04	100	58,11	4,9
116	01/05/2008	0	16,5	12,31	100	84	7,54
117	02/05/2008	0,1	19,51	12,58	100	70,7	3,22
118	03/05/2008	0	22,76	13,91	100	53,28	3,82
119	04/05/2008	0	23,7	15,05	98,8	57,09	2,88
120	05/05/2008	0	22,23	16,3	96,8	58,89	3,87
121	06/05/2008	0	20,91	11,65	98,9	49,49	5,65
122	07/05/2008	0	20,23	11,51	87,1	44,48	2,94
123	08/05/2008	0	21,24	11,31	85,9	33,85	3,03
124	09/05/2008	0	22,36	12,78	82	39,59	3,98
125	10/05/2008	0	18,77	11,31	98,1	64,32	5,6
126	11/05/2008	0	17,57	11,11	98,8	70,1	6,19
127	12/05/2008	0	15,57	9,97	100	70,6	5,5
128	13/05/2008	0	17,24	9,57	98,5	61,98	4,07
129	14/05/2008	0	18,84	10,58	89,5	56,7	2,66
130	15/05/2008	0	19,76	12,05	92,8	63,12	1,74
131	16/05/2008	0	21,43	13,78	88,8	46,41	2,32
132	17/05/2008	0	18,57	13,65	100	69,06	2,91
133	18/05/2008	0	20,69	12,78	100	59,22	3,11
134	19/05/2008	0	22,69	13,98	90,6	45,15	1,56
135	20/05/2008	0	22,31	14,58	96,1	45,8	4,24
136	21/05/2008	0	22,96	13,65	87,5	43,53	2,51
137	22/05/2008	0	22,43	14,52	84,5	44,67	2,01
138	23/05/2008	0	22,49	13,65	86,2	39,53	2,12
139	24/05/2008	0	22,16	14,58	76	43	3,02
140	25/05/2008	0	21,76	13,32	78,2	44,87	3,3
141	26/05/2008	0	23,09	14,71	68,74	39,86	3,28
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
142	27/05/2008	0	22,83	14,91	88,8	42,46	3,42
143	28/05/2008	0	21,63	13,58	94,9	50,54	2,78
144	29/05/2008	0	22,49	12,98	83,6	42,06	2,8
145	30/05/2008	0,3	22,83	15,11	94	52,81	2,93

146	31/05/2008	0	16,3	11,51	100	82,6	6,63
147	01/06/2008	0	19,31	11,38	100	65,45	3,45
148	02/06/2008	0	18,84	11,31	100	62,18	3,87
149	03/06/2008	0,1	19,49	11,24	100	58,09	3,22
150	04/06/2008	0,1	21,36	11,38	100	46	3,12
151	05/06/2008	0	21,63	13,38	99,9	48,41	3,16
152	06/06/2008	0	22,49	13,91	90,5	38,32	2,54
153	07/06/2008	0	22,49	14,25	74	40,46	3
154	08/06/2008	0	22,29	13,38	80,8	40,99	3,38
155	09/06/2008	0	22,36	13,38	89,7	50,41	3,18
156	10/06/2008	0	22,83	13,85	91,7	33,58	3,71
157	11/06/2008	0	23,56	15,11	81,2	40,66	2,73
158	12/06/2008	0	21,83	13,92	80,7	46,47	3,23
159	13/06/2008	0	22,96	13,05	82,5	29,91	2,67
160	14/06/2008	0	22,09	12,58	89,8	48,87	3,16
161	15/06/2008	0	21,76	13,98	76	41,53	3,99
162	16/06/2008	0	21,17	12,04	100	56,69	3,38
163	17/06/2008	0	15,5	10,84	100	80,5	3,02
164	18/06/2008	0,2	21,49	10,84	100	40,53	2,09
165	19/06/2008	0	20,76	12,58	98,8	51,94	2,17
166	20/06/2008	0	20,89	12,71	92,3	46,34	2,75
167	21/06/2008	0	22,76	15,04	67	39,59	2,89
168	22/06/2008	0	23,56	15,51	79,6	40,73	2,35
169	23/06/2008	5	20,09	12,97	100	65,77	3,19
170	24/06/2008	0,1	16,9	12,58	100	77,5	2,83
171	25/06/2008	6,5	19,11	10,58	100	65,05	3,77
172	26/06/2008	0	15,9	8,71	100	66,32	6,05
173	27/06/2008	0	17,17	9,37	100	56,04	3,1
174	28/06/2008	0,1	16,5	9,11	99,6	64,38	2,97
175	29/06/2008	0	19,36	10,31	98,8	56,56	2,53
176	30/06/2008	0	20,02	11,24	90,2	27,44	2,25
177	01/07/2008	0	21,02	12,98	82,4	27,91	2,88
178	02/07/2008	0	21,09	11,51	98,3	37,12	3,48
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
179	03/07/2008	0	18,77	12,85	93,4	45,28	2,52
180	04/07/2008	0	20,84	11,65	98,9	34,59	4,02
181	05/07/2008	0	19,49	10,24	98,4	44,21	4,16
182	06/07/2008	0	18,76	10,64	96,4	48,81	3,48
183	07/07/2008	0	19,02	10,05	90,7	38,54	3,55
184	08/07/2008	0	18,42	8,78	90,9	37,99	2,32

185	09/07/2008	0	17,7	7,92	95,1	46,48	4,26
186	10/07/2008	0	17,7	10,38	99,3	52,7	4,86
187	11/07/2008	0	17,04	9,91	100	61,38	7,02
188	12/07/2008	0	16,84	9,24	100	44,82	7,07
189	13/07/2008	0	17,84	8,04	94,4	33,19	5,24
190	14/07/2008	0	18,57	8,25	92,6	41,4	4,16
191	15/07/2008	0	18,23	9,17	86,7	43,48	4,67
192	16/07/2008	0	17,97	8,58	94,5	48,15	4,09
193	17/07/2008	0	19,62	9,38	81	38,07	3,45
194	18/07/2008	0	20,96	10,78	75,1	32,05	3
195	19/07/2008	0	23,63	14,18	60,58	23,84	2,52
196	20/07/2008	0	22,96	13,85	69,61	26,64	3,02
197	21/07/2008	0	20,89	12,38	73,3	39,46	3,77
198	22/07/2008	0	20,63	10,44	84,2	44,47	3,43
199	23/07/2008	0	23,03	13,12	73,5	38,27	2,48
200	24/07/2008	0	24,3	15,18	57,92	22,5	2,3
201	25/07/2008	0	24,16	15,51	53,78	25,77	3,28
202	26/07/2008	0	21,96	11,85	100	44,35	5,86
203	27/07/2008	0	21,02	10,78	100	33,32	3,21
204	28/07/2008	0	21,83	11,38	85,1	21,3	3,83
205	29/07/2008	0	21,49	10,98	70,2	16,89	3,48
206	30/07/2008	0	22,16	10,51	74,1	25,57	2,75
207	31/07/2008	0	21,69	12,65	70,4	34,59	2,99
208	01/08/2008	0	21,63	13,45	73,8	39,13	3,17
209	02/08/2008	0	23,03	12,31	76	35,85	4,78
210	03/08/2008	0	23,03	15,77	68,19	35,79	6,8
211	04/08/2008	0	21,43	14,44	78,1	56,28	2,35
212	05/08/2008	26,9	22,43	12,35	100	59,91	3,44
213	06/08/2008	0	22,63	14,63	93,4	56,02	3,31
214	07/08/2008	0	22,96	13,24	97,9	50,61	2,82
215	08/08/2008	0	23,23	15,44	83,4	48,27	3,01
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
216	09/08/2008	0	22,56	13,84	92,1	56,62	3,64
217	10/08/2008	0	21,83	13,77	92,6	53,28	4,32
218	11/08/2008	0	21,76	12,24	100	57,22	3,73
219	12/08/2008	0	22,49	12,25	94,6	36,99	3
220	13/08/2008	0	23,36	13,12	79,8	33,72	3,19
221	14/08/2008	0	21,83	11,91	80,9	43,33	3,66
222	15/08/2008	0	20,69	11,44	96,4	40,13	3,9
223	16/08/2008	0	22,49	11,38	92,5	40,59	3,24

224	17/08/2008	0	21,56	11,58	89,9	38,26	3,26
225	18/08/2008	0	22,23	11,78	76	39,53	3,65
226	19/08/2008	0	21,69	11,51	78	42,73	3,57
227	20/08/2008	0	21,69	11,58	89,4	44,2	3,83
228	21/08/2008	0	22,09	11,65	80,4	42,6	3,08
229	22/08/2008	0	22,63	12,51	71	30,45	3,57
230	23/08/2008	0	19,49	11,85	93,9	46,02	5,95
231	24/08/2008	0	21,16	11,78	99,7	46,87	4,95
232	25/08/2008	0	22,29	10,98	99,3	38,66	3,57
233	26/08/2008	0	24,3	14,05	78	28,31	2,11
234	27/08/2008	0	25,16	15,78	59,98	25,44	3,07
235	28/08/2008	0	25,63	13,24	76,2	26,51	2,75
236	29/08/2008	0	27,1	15,44	68,86	16,69	2,85
237	30/08/2008	32,7	21,29	10,18	100	52,43	7,7
238	31/08/2008	0,6	15,9	9,17	100	70,9	5,95
239	01/09/2008	0	20,63	9,04	100	42,8	4,42
240	02/09/2008	0	23,63	12,18	78,1	23,97	2,91
241	03/09/2008	0	24,3	11,71	69,48	18,09	2,64
242	04/09/2008	0	25,9	15,58	50,7	24,77	2,01
243	05/09/2008	0	26,5	16,44	53,24	20,1	3,7
244	06/09/2008	0	28,5	16,3	56,04	21,23	3,28
245	07/09/2008	0	29,76	15,5	68,53	19,76	3,29
246	08/09/2008	0	26,03	15,64	96	41,33	5,16
247	09/09/2008	0	24,03	14,37	99,2	44,4	5,39
248	10/09/2008	0	25,63	13,31	99,5	44,13	3,66
249	11/09/2008	0	26,23	14,71	84,6	30,25	3,52
250	12/09/2008	0	27,23	14,71	81,2	18,29	3,41
251	13/09/2008	0	28,24	16,37	72,1	20,83	4,61
252	14/09/2008	0	27,23	16,17	76,9	29,38	4,97
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
253	15/09/2008	1,8	24,5	13,63	99,2	53,88	4,41
254	16/09/2008	18,8	18,24	13,04	100	71,6	3,7
255	17/09/2008	4,9	16,5	10,84	100	94,2	4,57
256	18/09/2008	0	11,51	9,17	100	94,1	8,13
257	19/09/2008	0,1	14,57	7,97	100	78	6,4
258	20/09/2008	0	16,7	9,77	100	77,7	2,94
259	21/09/2008	21,9	15,17	11,51	100	94,5	5,4
260	22/09/2008	0,1	20,16	10,7	100	40,53	4,84
261	23/09/2008	0	22,56	10,31	79,9	23,3	3,66
262	24/09/2008	0	21,36	9,04	96,7	44,33	6,99

263	25/09/2008	0	21,02	10,11	99,5	51,48	5,53
264	26/09/2008	10,5	18,44	10,09	100	71,6	4,2
265	27/09/2008	0,8	18,24	10,91	100	76,4	3,74
266	28/09/2008	0	22,36	11,44	100	33,52	5,22
267	29/09/2008	0	22,23	9,97	98,3	47	6,61
268	30/09/2008	0	23,7	12,45	95,5	54,28	3,09
269	01/10/2008	0	27,57	15,9	87,4	37,79	3,88
270	02/10/2008	3,1	19,71	14,7	98,6	61,98	4,68
271	03/10/2008	0	24,23	16,44	89	58,69	2,88
272	04/10/2008	0	27,43	17,77	84,8	41,8	3,35
273	05/10/2008	0	29,69	17,24	88,2	14,69	4,44
274	06/10/2008	0	28,89	16,17	99,7	31,71	6,01
275	07/10/2008	0	23,56	15,17	100	52,55	4,95
276	08/10/2008	0	17,57	11,11	100	85,6	7,93
277	09/10/2008	1,2	12,05	10,18	100	100	7,88
278	10/10/2008	0,1	20,49	9,64	100	57,42	5,23
279	11/10/2008	0	20,22	11,31	100	57,42	4,71
280	12/10/2008	0	22,29	12,65	95,5	54,75	5,35
281	13/10/2008	0	26,43	13,91	99,1	39,59	3,87
282	14/10/2008	0	26,43	14,51	91,8	40,33	2,77
283	15/10/2008	0	29,35	16,64	83,3	27,9	2,46
284	16/10/2008	1,4	30,56	17,51	84,6	25,03	3,47
285	17/10/2008	14,1	26,23	16,04	99,9	55,75	4,49
286	18/10/2008	25,5	24,36	14,57	100	62,76	4,86
287	19/10/2008	0,9	18,84	14,5	100	67,39	5,58
288	20/10/2008	11,9	19,1	14,3	100	79,1	5,37
289	21/10/2008	0	21,89	13,97	100	60,69	5,2
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
290	22/10/2008	0	22,96	14,11	100	55,82	3,86
291	23/10/2008	0	24,5	14,91	82,3	45,13	3,97
292	24/10/2008	0	26,9	15,31	76,8	33,32	3,47
293	25/10/2008	0	28,1	16,91	64,05	29,11	2,88
294	26/10/2008	0	29,03	18,17	59,84	27,3	2,88
295	27/10/2008	0	29,57	19,51	54,95	23,97	3,18
296	28/10/2008	0	29,29	17,24	99,4	38,06	4,42
297	29/10/2008	0	25,9	16,57	100	56,82	3,99
298	30/10/2008	0	27,1	15,97	100	48,41	4,35
299	31/10/2008	20,9	24,83	16,44	100	62,03	4,23
300	01/11/2008	2,2	21,83	15,77	100	69,77	3,9
301	02/11/2008	0	23,56	14,97	100	65,3	3,08

302	03/11/2008	5	26,63	16,9	98,2	44,4	3,49
303	04/11/2008	27,4	28,5	14,28	99,8	41,46	4,13
304	05/11/2008	3,7	24,7	15,03	100	65,03	3,18
305	06/11/2008	0	27,43	17,44	94,1	46,34	4,48
306	07/11/2008	10,6	20,91	15,43	100	81,4	2,64
307	08/11/2008	4,9	24,3	15,57	100	64,7	3,46
308	09/11/2008	1,9	26,17	17,77	96,6	47,87	2,89
309	10/11/2008	9,4	20,76	15,43	100	71,5	3,64
310	11/11/2008	0	21,69	15,1	100	72,4	6,27
311	12/11/2008	0	21,83	14,31	100	69,84	3,28
312	13/11/2008	21,4	18,17	15,64	100	90,9	3,7
313	14/11/2008	59,7	16,9	13,84	100	90,6	3,6
314	15/11/2008	0	26,3	13,91	100	42,46	3,26
315	16/11/2008	0	27,43	18,04	85,4	40,93	3,54
316	17/11/2008	7	24,7	16,04	100	59,29	4
317	18/11/2008	1,4	19,7	14,57	100	80,9	3,12
318	19/11/2008	0,9	19,91	13,18	100	79,7	6,46
319	20/11/2008	0,1	18,91	11,78	100	75,1	5,94
320	21/11/2008	0	18,04	10,78	100	70,7	6,02
321	22/11/2008	0,6	16,7	12,38	100	83,8	5,16
322	23/11/2008	0,7	20,96	12,51	100	69,5	5,07
323	24/11/2008	5,3	20,36	13,05	100	69,17	5,26
324	25/11/2008	0,1	21,36	13,37	100	61,89	5,29
325	26/11/2008	0,7	20,43	14,18	100	72,6	5,01
326	27/11/2008	4	20,04	13,71	100	76,5	4,2
Dia	Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do ar (°C)		Umidade Relativa do ar (UR)		Vento
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Velocidade Média
327	28/11/2008	23,8	22,43	13,44	100	64,3	5,04
328	29/11/2008	0,2	21,36	13,97	100	64,43	3,98
329	30/11/2008	0,2	21,63	14,51	100	66,9	3,66
330	01/12/2008	0	25,57	14,31	92,5	47	2,89
331	02/12/2008	0	28,76	16,97	100	34,51	3,16
332	03/12/2008	1,5	21,69	15,84	100	69,71	5,89
333	04/12/2008	0	25,23	14,32	99,2	35,19	3,7
334	05/12/2008	0,6	23,83	14,18	100	58,15	4,37
335	06/12/2008	0	20,83	14,18	100	72,7	3,45
336	07/12/2008	0	23,03	14,24	100	60,56	3,76
337	08/12/2008	11,8	24,3	14,38	100	56,62	3,1
338	09/12/2008	0,6	25,43	14,58	100	44,33	2,32
339	10/12/2008	0	26,83	14,91	100	34,18	2,47
340	11/12/2008	1,3	23,9	16,5	96,5	58,89	2,95

341	12/12/2008	47,4	23,56	15,7	100	64,9	3,22
342	13/12/2008	36	21,5	14,64	100	77,4	2,95
343	14/12/2008	6,6	19,91	14,64	100	88,1	3,5
344	15/12/2008	64,2	17,64	15,97	100	100	5,57
345	16/12/2008	64,8	16,97	14,83	100	100	7,39
346	17/12/2008	54,2	17,84	14,37	100	100	5,59
347	18/12/2008	22,1	19,11	14,44	100	98,9	3,39