

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO VERTICAL DA ÁGUA EM ÁREA DE RECARGA
DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU UTILIZANDO O SOFTWARE HYDRUS-1D, EM
ARARAQUARA - SP**

Marcelo Donadelli Sacchi

Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro (SP)

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

MARCELO DONADELLI SACCHI

SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO VERTICAL DA ÁGUA EM ÁREA
DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU UTILIZANDO
O SOFTWARE HYDRUS-1D, EM ARARAQUARA - SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Geólogo.

Rio Claro - SP

2021

S119s Sacchi, Marcelo Donadelli

Simulação do movimento vertical da água em área de recarga do Sistema Aquífero Bauru utilizando o software Hydrus-1D, em Araraquara - SP / Marcelo Donadelli Sacchi. -- Rio Claro, 2021

68 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Didier Gastmans

1. Geociências. 2. Hidrogeologia. 3. Sistema Aquífero Bauru. 4. Águas Subterrâneas. 5. Recarga. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARCELO DONADELLI SACCHI

SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO VERTICAL DA ÁGUA EM ÁREA
DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU UTILIZANDO
O SOFTWARE HYDRUS-1D, EM ARARAQUARA - SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Didier Gastmans

Msc. José Claudio Viegas Campos

Msc. Roger Dias Gonçalves

Rio Claro, 19 de março de 2021.



Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de conclusão de curso não seria possível sem o apoio tanto emocional, quanto financeiro de outras partes, as quais faço questão de dedicar um momento e agradecer da devida forma:

Agradeço às instituições de fomento à pesquisa, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq responsável pelo financiamento do trabalho, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP- pelo suporte financeiro a projetos vinculados ao grupo de pesquisa no Processo de 2018/06666-4, viabilizando a realização da pesquisa.

Agradeço também ao pessoal do laboratório LARHIA pelo companheirismo, paciência e conhecimento, principalmente ao meu orientador, Didier Gastmans, por me ajudar e apoiar durante a pesquisa.

Agradeço à minha família, em especial, aos meus pais, Marcelino e Cristina, por cuidarem de mim, me aturarem, e me darem suporte necessário durante toda a minha caminhada. Também agradeço aos meus irmãos. Lorenzo e Marina por existirem na minha vida, deixando tudo mais divertido.

Agradeço ao meu amor, Fernanda, pelas boas risadas, por aguentar minhas chatices e sempre me motivar a fazer as coisas da melhor forma.

Agradeço aos meus amigos que sempre me acompanharam, os que conheci na faculdade, e em especial àqueles que moraram comigo na Republica Toca, por tornarem meus dias mais alegres e compartilharem comigo momentos especiais.

Por fim, agradeço também a todos os professores e alunos do curso de geologia, que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente com quem eu sou hoje.

SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO VERTICAL DA ÁGUA EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU UTILIZANDO O SOFTWARE *HYDRUS-1D*, EM ARARAQUARA-SP

Resumo

Devido à crescente demanda por recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento público, estudos sobre os mecanismos de recarga de aquíferos são fundamentais no detalhamento da capacidade de exploração dessas reservas. Nesse contexto, o Sistema Aquífero Bauru (SAB) representa uma das principais fontes de água subterrâneas do estado de São Paulo, com ocorrência também nos estados de Goiás, Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul, perfazendo uma área total de aproximadamente 370.000 km². Essa unidade hidrogeológica é constituída por rochas sedimentares do Grupo Bauru, que ocorre de forma extensiva e contínua por todo o Planalto Ocidental Paulista. Dados de precipitação, umidade e parâmetros físicos do solo foram utilizados para a construção de um modelo numérico de fluxo vertical da água em meio poroso em área de recarga do SAB. A aquisição desses dados ocorreu na cidade de Araraquara por um período de 366 dias, de 24 de março de 2019 até 24 de março de 2020, com o intuito de monitorar as condições atmosféricas do local e as propriedades físicas do solo na zona não-saturada do perfil estudado. Os dados relativos ao solo foram obtidos a partir das curvas de retenção e das curvas granulométricas, sendo utilizadas amostras deformadas e indeformadas, coletadas durante a escavação de um poço de monitoramento, no qual foram instalados sensores de umidade em diferentes profundidades. Como resultado da pesquisa, são apresentados os dados do monitoramento da variação temporal da umidade relativa do solo, além da distribuição granulométrica ao longo de um perfil de 6 metros, do potencial mátrico e da condutividade hidráulica vertical, utilizados na elaboração de um modelo numérico no software Hydrus-1D. O modelo permitiu simular, de maneira condizente, o volume de água que infiltrou pelo perfil de solo durante o período do monitoramento, confirmando a eficiência dos parâmetros do solo na determinação do movimento vertical da água.

PALAVRAS-CHAVE: Água subterrânea; SAB; Hydrus; Zona vadosa.

WATER VERTICAL FLOW SIMULATION IN BAURU AQUIFER SYSTEM'S RECHARGE AREA USING HYDRUS-1D, ARARAQUARA- SP

Abstract

An increase in exploitation of groundwater sources for public supply in São Paulo State in the past years, has brought the necessity of better understanding aquifers local recharge rate and exploitation capacity. The choice for Bauru Aquifer System (BAS) in this study is justified by its importance, being one of the main sources of groundwater in São Paulo, especially on the Western Plateau, where more than 70% of the municipalities depends partially or entirely on groundwater. BAS is an unconfined and sedimentary aquifer system, subdivided in smaller aquifers, which together sum up an extent of 370 000 km² and is present in five Brazilian states. In this scenario, the study took place in the city of Araraquara - SP, in BAS recharge area, where atmospheric conditions and soil relative humidity were monitored for a period of 366 days, from March-24-2019 to March-24-2020, with few gaps. Also, a set of undeformed and deformed samples were gathered during the excavation of a monitoring well, which allowed the determination of the soil's profile grain size distribution and retention curves for each sampled depth, which were used to set some of the model's inputs. The well was installed in a plain recharge area, needed to setup soil moisture sensors in different depths of the soil profile. As a result, all data concerning soil physical properties, such as: the grain-size distribution over a 6-meter soil profile, its matric potential, hydraulic conductivity and soil's humidity temporal variation is presented. In addition, the soil moisture temporal variation data allowed the calculation of the wetting front velocity, of 6cm/day, and shows the response of soil water for raining and drier periods in different depths. Consequently, these data were used to elaborate and calibrate a transient flow numerical model in Hydrus-1D, with the purpose of replicating infiltration rates and volumetric water content in the vadose zone of a porous soil profile, and although the model needed calibration, it's first results already came up with a similar representation of the monitored conditions, which shows the efficiency of soil's parameters for determining vertical water flow and estimating recharge rates. Also, a significant amount of data concerning water flow in the vadose zone for the study area is shown, which is useful for the acknowledgment of groundwater recharge processes in the Bauru Aquifer System.

KEYWORDS: Groundwater recharge; SAB; Hydrus; Unsaturated zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da água na Terra. Modificado de Shiklomanov (1993).....	5
Figura 2: Ciclo da água. Modificado do site Britannica (26/11/2020).....	6
Figura 3: Comportamento da água na interface solo-planta-atmosfera. Modificado de Weil & Brady (2017).....	7
Figura 4: Zonas hidrogeológica e os tipos de água em subsuperfície. Modificado de Kresic (2006).....	8
Figura 5: Mapa de localização da área de estudo, com destaque a área de ocorrência das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru em superfície.....	12
Figura 6: Relações estratigráficas entre as formações cretáceas suprabasálticas nos diferentes compartimentos do Grupo Bauru no Estado de São Paulo (modificado de Paula e Silva, 2009).....	14
Figura 7: (A) Local de instalação do poço, ao lado da estação de monitoramento; (B) Escavação do poço de monitoramento.....	16
Figura 8: (A) Exemplo de anel de alumínio utilizado para coleta de amostra indeformada de solo; (B) Exemplo de amostra de solo indeformada.....	17
Figura 9: (A) Ensaio de sedimentação; (B) Ensaio de peneiramento; (C) desagregação e secagem das amostras deformadas.....	19
Figura 10: Comparação entre a média da precipitação mensal da série histórica e do período de estudo.....	23
Figura 11: Dados do nível da água obtidos durante o período de monitoramento.....	24
Figura 12: Registro diário do volume de chuva (em milímetros) e da umidade, θ (em volume de água pelo volume de solo), medida em cada profundidade durante os meses de monitoramento.....	25
Figura 13: Esquema representativo do perfil construtivo do poço de monitoramento, e das curvas de retenção e granulométricas para cada profundidade amostrada.....	29
Figura 14: Comparação entre os dados diários de umidade (θ) medidos pelos sensores e os dados calculados no Hydrus 1-D.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicação do abastecimento d'água dos municípios que compõem a área do SAB	15
Tabela 2: Dados das curvas de retenção.....	22
Tabela 3: Dados das curvas granulométricas.....	22
Tabela 4: Parâmetros do solo utilizados na calibração do modelo.....	28
Tabela 5: Erros apresentados para cada sensor.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1 Importância dos Aquíferos.....	4
3.2 Recarga de Aquíferos e o Ciclo Hidrológico.....	5
3.3 Infiltração na Zona Não-Saturada	6
3.4 Fluxo da Água no Solo.....	8
3.5 Equações de Fluxo.....	9
3.6 Modelagem Numérica.....	10
4. ÁREA DE ESTUDO	11
4.1 Contexto Geológico	12
4.2 Hidroestratigrafia	14
4.3 Potencial Hidrogeológico.....	15
5. MATERIAIS E MÉTODOS	16
5.1 Instalação do Experimento e Amostragem.....	16
5.2 Monitoramento.....	17
5.3 Curvas de Retenção	17
5.4 Curvas Granulométricas	19
5.5 Modelagem do Fluxo de Água	20
5.5.1 Concepção do Modelo Numérico de Fluxo	20
5.5.2 Calibração.....	21
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
6.1 Propriedades Físicas do Solo.....	22
6.2 Monitoramento.....	23
6.3 Variação Temporal da Umidade Relativa do Solo.....	24
6.4 Modelagem Numérica.....	26
6.4.1 Modelo Conceitual	26
6.4.2 Condições de Contorno	26
6.4.3 Simulação do Fluxo d'Água	27
6.5 Precisão da Calibração	31

7. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

Apesar de somarem menos de 1% do total de água do planeta, as águas subterrâneas representam quase a totalidade da água disponível para o abastecimento e consumo humano (SCHWARTZ e ZHANG, 2003). Portanto, compreender os mecanismos hidrológicos associados à recarga das águas subterrâneas é de fundamental importância para o gerenciamento de recursos hídricos.

As estimativas de recarga são difíceis de serem obtidas com precisão, especialmente por conta da heterogeneidade das características do solo, que são responsáveis por variações nos padrões de umidade, sucção, condutividade, armazenamento e movimentação da água (KOENIGER *et al.* 2016). Além disso, esses dados podem trazer muitos erros associados, visto que a recarga é um fenômeno com elevada variabilidade espacial devido às diferenças geológicas, climatológicas e de uso e ocupação da terra (MANZIONE, 2015).

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é uma das principais fontes de água subterrânea do estado de São Paulo, distribuído também por outros quatro estados brasileiros, Goiás, Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul, em uma área total de aproximadamente 370.000 km² (STRADIOTO, 2016). A importância do SAB se deve não só pela sua extensão, mas também por estar totalmente aflorante em território paulista, o que viabiliza a construção de poços rasos e com a vazão desejada (PAULA E SILVA, 2003).

Apesar do seu potencial hidrogeológico já ter sido muito estudado por autores como Barcha *et al.* (1981); Paula e Silva (2003); Paula e Silva *et al.* (2005); DAEE (1976), (1990); DAEE *et al.* (2005); e Stradioto (2016), os parâmetros que influenciam a recarga do aquífero podem variar muito localmente. Portanto, um estudo mais específico para a região de Araraquara, além de trazer uma confirmação dos mecanismos de recarga, pode também melhorar a precisão dos dados para o local.

No que concerne ao fluxo de água na zona não-saturada, a estimativa pode ser feita por meio da equação de Richards (RICHARDS, 1931), e requer um conhecimento dos parâmetros intrínsecos do solo, que devem ser obtidos em laboratório. Para tal, podem ser utilizadas amostras deformadas e indeformadas de solo para a obtenção da distribuição granulométrica e condutividade hidráulica do solo.

Sendo assim, com o uso de *softwares* específicos, como é o caso do Hydrus-1D (ŠIMŮNEK *et al.* 2008), é possível utilizar esses dados obtidos em laboratório em diversas funções matemáticas para solucionar a equação de Richards, o que permite simular a infiltração da água na zona não-saturada do solo.

Desse modo, a escolha pela elaboração de um modelo de fluxo da água na zona não-saturada pode ser relevante para confirmação dos mecanismos de recarga do SAB na região, visto que um modelo numérico permite a reprodução dos parâmetros de solo e das condições de umidade que resultam na recarga do aquífero.

Além disso, para a confirmação dos resultados gerados na simulação, foi realizado um monitoramento da temperatura, da precipitação, do nível d'água e da umidade do perfil de solo de 6 metros, entre março de 2019 a março de 2020. Logo, é possível não só averiguar a veracidade do modelo numérico, mas também apresentar dados das condições atmosféricas e de parâmetros do solo por um período de 1 ano.

2. OBJETIVO

Elaborar um modelo numérico de fluxo vertical d'água no *software* Hydrus-1D a partir dos dados de monitoramento da umidade do solo, além da verificação da eficiência do modelo para caracterização do movimento vertical da água ao longo de um perfil de solo em zona não-saturada.

Como objetivos secundários, são elencados:

- Determinação da granulometria do solo ao longo do perfil;
- Determinação do potencial mátrico do solo em laboratório;
- Determinação da condutividade hidráulica vertical do solo em laboratório;
- Monitoramento da variação temporal da umidade relativa do solo;
- Monitoramento do nível d'água.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Importância dos Aquíferos

Por definição, os aquíferos são unidades geológicas permeáveis e saturadas, que têm a capacidade de transmitir quantidades significativas de água sob condições normais de gradiente hidráulico (WEIL & BRADY, 2017). Ademais, são corpos porosos ou fraturados, compostos por rochas ou sedimentos, que atuam como reservatórios subterrâneos, classificados como livres ou confinados (FREEZE & CHERRY, 1979).

Um aquífero confinado é constituído por uma camada permeável, delimitada na base e no topo por camadas impermeáveis a semipermeáveis, onde a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto.

Já um aquífero livre tem contato direto com a camada de solo, sendo que o nível freático constitui o limite superior do aquífero. Por estar mais próximo da superfície, é mais comum, capazes de armazenar e transmitir a água proveniente da chuva para corpos d'água superficiais.

O crescente aumento do consumo de água tornou a exploração das águas subterrâneas uma alternativa viável para atender à demanda de abastecimento das cidades, podendo ser consideradas bens estratégicos para o desenvolvimento social e econômico de uma região (NIMMO; HEALY & STONESTROM, 2006). Logo, a água armazenada nos aquíferos é comumente utilizada como uma fonte confiável para suprir as necessidades hídricas de áreas rurais e urbanas, assim como um complemento do total de água disponível para consumo.

De modo geral, os aquíferos são considerados as maiores fontes de água potável do mundo (Figura 1). Entretanto, apesar de representarem a maior parte da água disponível para consumo humano, as águas subterrâneas são um recurso finito, sujeito a esgotamento e contaminação (DE VRIES & SIMMERS, 2002).

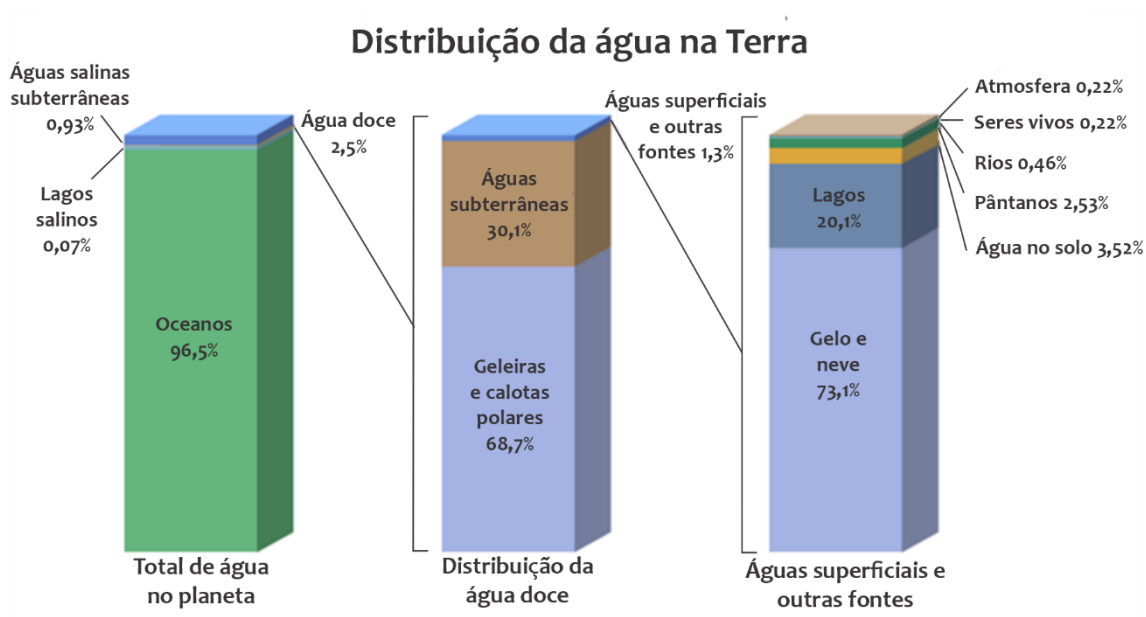


Figura 1: Distribuição da água na Terra, modificado de Shiklomanov (1993).

3.2 Recarga de Aquíferos e o Ciclo Hidrológico

As águas subterrâneas, além de importantes fontes de água potável, também desempenham um papel fundamental na movimentação da água na Terra (ALLEY; LA BAUGH & REILLY, 2006). Além de servirem como reservatório, os aquíferos livres são responsáveis por descarregar uma quantidade significativa de água nos rios e lagos e, portanto, participam de forma ativa na circulação da água na Terra (KRESIC, 2006).

A circulação da água no planeta é constante, representada pelo ciclo da água, que consiste no contínuo transporte desse recurso entre os oceanos, os rios, a atmosfera e a superfície terrestre (PAGANO & SOROOSHIAN, 2006). Também chamado de ciclo hidrológico, esse fenômeno consiste não só do transporte da água, mas também de sua transformação da fase líquida para a sólida ou gasosa e vice-versa, o que envolve grandes quantidades de energia (ADAM SCHLOSSER, 2006).

Dessa maneira, a energia proveniente do Sol é indispensável para a manutenção deste ciclo, pois aproximadamente 1/3 da energia solar que atinge a Terra como forma de radiação é absorvida pela água (WEIL & BRADY, 2017). Isso resulta na evaporação da água presente tanto na superfície terrestre, quanto nos oceanos e que, posteriormente, condensa na atmosfera, podendo retornar para a mesma região ou ser transportada por dezenas de quilômetros, até que as diferenças de pressão e temperatura causem a precipitação na forma de gotas de chuva ou granizo (PAGANO & SOROOSHIAN, 2006).

Dessa água que precipita, mais da metade é retida pelo solo, sendo a maior parte absorvida pelas plantas ou drenada para camadas profundas. Tanto a água excedente, que escoar durante um episódio mais intenso de chuva, quanto as águas subterrâneas eventualmente alcançam drenagens e rios que, por sua vez, fluem para o oceano (WEIL & BRADY, 2017), conforme a Figura 2.

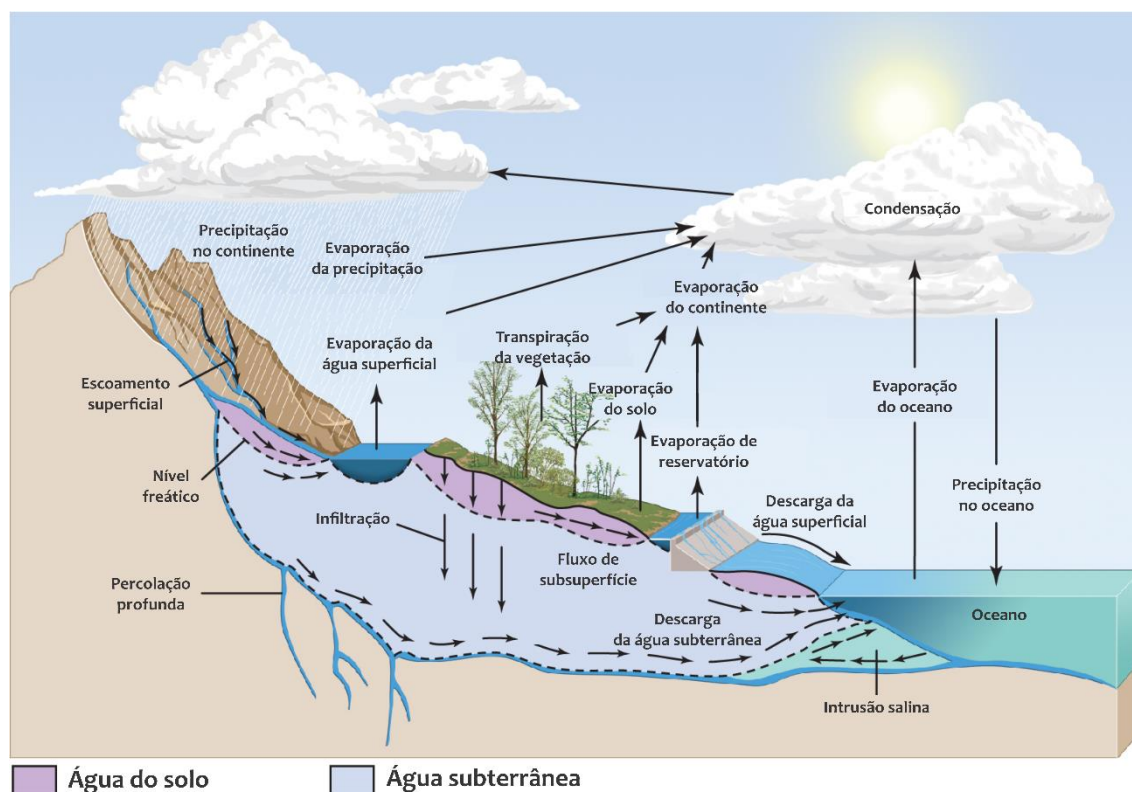


Figura 2: Ciclo da água. Modificado do site Britannica (26/11/2020).

Ainda assim, nem toda água que atinge a superfície do solo chega aos aquíferos, pois existem três destinos para essas águas: infiltração, escoamento ou evapotranspiração, que são influenciados por fatores climáticos e geomorfológicos (NIMMO; HEALY & STONESTROM, 2006).

3.3 Infiltração na Zona Não-Saturada

São diversos os fatores que influenciam a recarga das águas subterrâneas. Entretanto, o presente trabalho irá explicitar apenas aqueles ligados às propriedades físicas do solo e à movimentação vertical da água em um determinado ponto da superfície terrestre. Portanto, foi utilizado um esquema elaborado em Weil & Brady (2017) (Fig. 3), com enfoque na interação da água com a interface solo-planta-atmosfera, que compreende o estudo em questão.

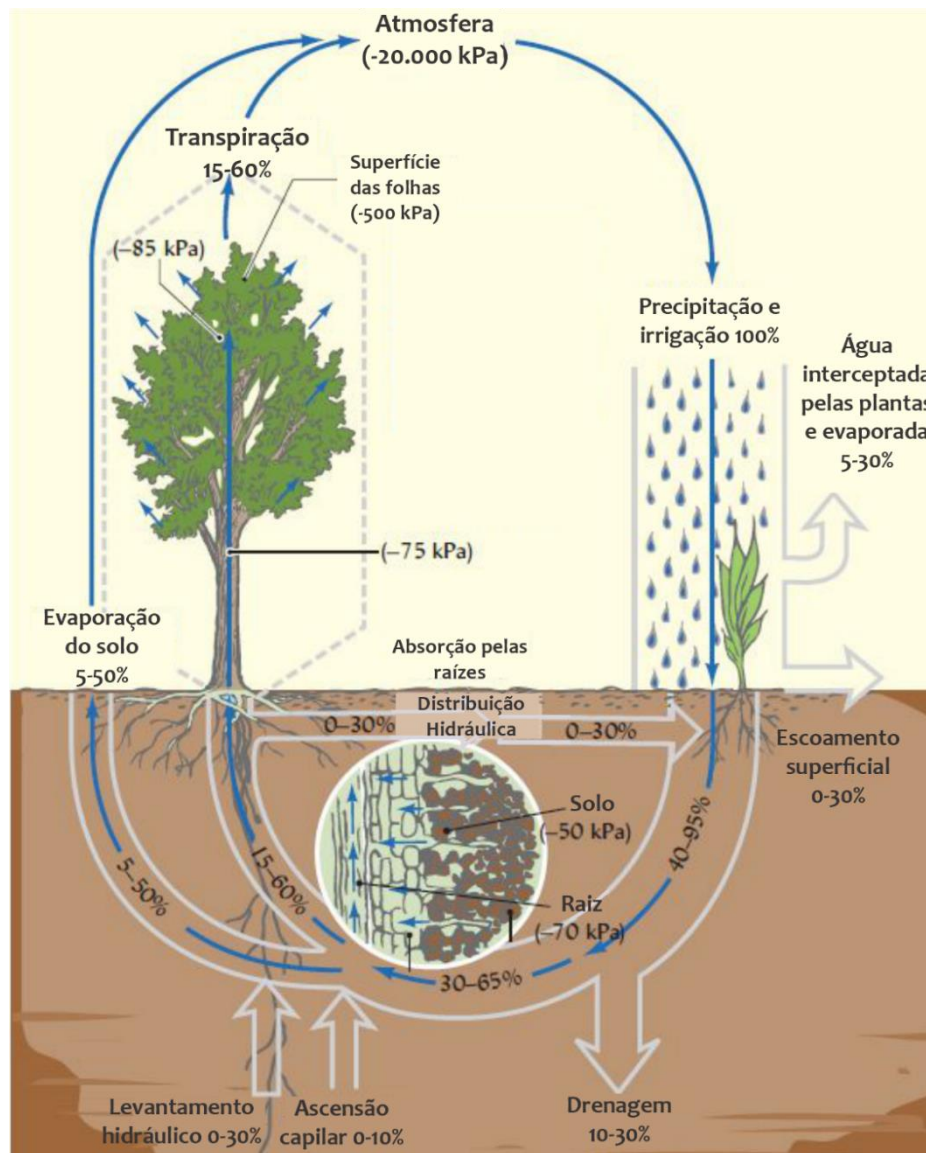


Figura 3: Comportamento da água na interface solo-planta-atmosfera. Modificado de Weil & Brady (2017).

De acordo com o esquema, é visível que há uma perda do total de água para o escoamento superficial, enquanto mais da metade é perdida para processos de evapotranspiração, tanto a partir das plantas, quanto do próprio solo (WEIL & BRADY, 2017). Ou seja, apenas uma pequena parte dessa água é responsável por atingir níveis mais profundos do solo e, consequentemente, contribuir para a recarga das águas subterrâneas.

A recarga das águas subterrâneas pode ser definida como a movimentação da água da superfície do solo, ou da zona não-saturada, para a zona saturada (KRESIC, 2006). Essa quantidade de água que infiltra na zona não-saturada e atinge a zona saturada, ou o nível d'água, é difícil de ser calculada, pois envolve diversos fatores que não podem ser

medidos diretamente e que variam dependendo das condições do solo em determinado momento, assim como a sua saturação, porosidade, compactação, textura, mineralogia e cobertura vegetal (NIMMO; HEALY & STONESTROM, 2006).

Por definição, toda a parte insaturada do perfil de solo que se encontra acima do nível freático é chamada de zona não-saturada, ou zona vadosa (WEIL & BRADY, 2017), como mostra a Figura 4. A zona vadosa é um agente importante de diversas funções hidrológicas, sendo um importante reservatório de água para a biosfera, como também um controlador da transmissão de contaminantes e da recarga das águas subterrâneas (NIMMO, 2006).

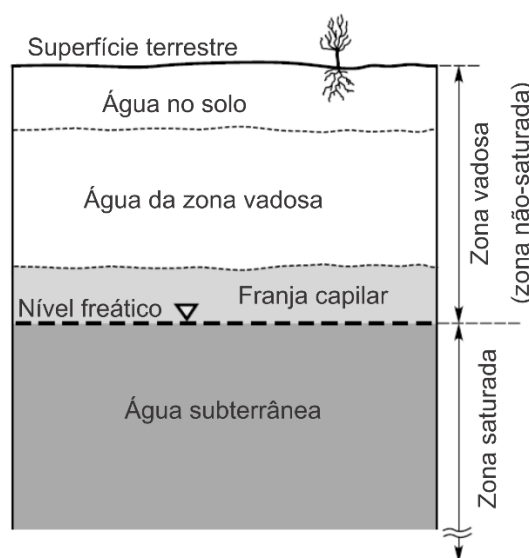


Figura 4: Zonas hidrogeológicas e os tipos de água em subsuperfície. Modificado do de Kresic (2006).

Portanto, entender os processos que influenciam na movimentação da água na zona vadosa é de grande importância para o estudo das águas subterrâneas e, conseqüentemente, da recarga de aquíferos.

3.4 Fluxo da Água no Solo

As propriedades físicas do solo influenciam de diversas maneiras o comportamento da água no solo e, conseqüentemente, na recarga das águas subterrâneas. A interação dessas propriedades pode ser resumida em um Potencial Total de Água no Solo (ψ_T), responsável por controlar a movimentação da água no solo. O ψ_T é a força que representa a combinação das forças de atração e repulsão que atuam sob a água no solo, conforme descrito em Or; Tuller & Wraith (2005):

Potencial gravitacional (ψ_z): também chamado de carga hidráulica, é expresso em unidade de energia e equivale à distância vertical entre um ponto do corpo d'água a alguma superfície de referência;

Potencial Hidrostático (ψ_p): é a pressão hidrostática exercida pela água que satura o solo e se sobrepõe a um ponto de interesse. É sempre positiva abaixo do nível d'água e igual a zero quando acima, pois não influencia na movimentação da água na zona não saturada;

Potencial Mátrico (ψ_m): resulta da combinação dos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção da água pela matriz do solo. É considerado sempre negativo, pois possui nível de energia menor do que a água pura tida como referência;

Potencial Osmótico (ψ_s): é determinado pela presença de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas na água e pode ser ignorado quando se trata apenas do fluxo de água.

De acordo com o princípio de Bernoulli, em qualquer modelo de movimentação de água, seja no solo ou em uma tubulação, a diferença de energia potencial entre dois pontos é o que determina a direção do fluxo (FETTER, 2001). Enquanto o potencial gravitacional é dominante em uma tubulação, ou mesmo em um solo saturado, em um solo não-saturado isso não é sempre verdade, pois o potencial mátrico passa a ser de grande importância, podendo superar o potencial gravitacional, o que resulta em um fluxo ascendente (WEIL & BRADY, 2017).

Além disso, outros parâmetros também são responsáveis por tornar a quantificação da recarga na zona não-saturada do solo em algo tão complicado, o que exige a combinação de diversos métodos para que se possa estimar a recarga das águas subterrâneas (NIMMO; HEALY & STONESTROM, 2006)

3.5 Equações de Fluxo

A movimentação da água na zona não-saturada do solo é descrita como sendo um fluxo em regime transiente, e a quantificação deste movimento exige a aplicação de equações de fluxo, considerando a variação de alguns parâmetros hídricos de acordo com o tempo e o espaço (LIBARDI, 2010).

As variáveis deste problema são: o Potencial Total da Água no Solo (ψ_T) e a condutividade hidráulica (K), sendo que ambos dependem do conteúdo de água no solo (θ) e da carga hidráulica (h) que, por sua vez, variam temporalmente devido à entrada e saída de água do solo (infiltração e evapotranspiração) (KRESIC, 2006).

Nesse caso, a equação que rege o movimento da água no solo insaturado é conhecida como a equação de Richards (RICHARDS, 1931), uma combinação entre a equação de Darcy-Buckingham (BUCKINGHAM, 1907) e a equação da continuidade (LIBARDI, 2010). As equações governantes existem para descrever tanto o fluxo em regime estacionário quanto em regime transiente, mas atualmente a abordagem numérica de modelos matemáticos é mais utilizada por ser uma solução prática para problemas que envolvam o fluxo em regime transiente (RADCLIFFE & SIMUNEK, 2018).

3.6 Modelagem Numérica

Um modelo matemático de fluxo é representado por uma equação governante, referente à condição a ser reproduzida, no caso, a equação de Richards; condições de contorno, que especificam a carga hidráulica ou o fluxo ao longo dos limites do modelo; e, para os problemas dependentes do tempo, condições iniciais de carga hidráulica. Dessa maneira, para um regime transiente, os modelos matemáticos são capazes de solucionar a distribuição da carga hidráulica no espaço e no tempo (ANDERSON *et al.*, 2015).

Os modelos numéricos são resolvidos com a aplicação de *softwares* específicos, pois se comportam como um sistema de equações algébricas que precisam ser resolvidas por meio de processos iterativos, providenciando uma solução para todos os pontos especificados do modelo. Nesse caso, os métodos mais utilizados na solução de problemas de água subterrânea são o das diferenças finitas (*Finite Differences Method* – FDM) e o dos elementos finitos (*Finite Elements Method* – FEM) (KRESIC, 2006).

Sendo assim, houve a necessidade de aplicação do *software* Hydrus-1D, que traz uma abordagem numérica para resolver a equação de Richards por meio de diferentes soluções, como o método de Mualem-Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980). Como ferramenta de trabalho, o Hydrus-1D apresenta uma interface simples e otimizada, além de utilizar o método dos elementos finitos para solucionar a variável do espaço (z) e o método de diferenças finitas para o tempo (t) (RADCLIFFE & SIMUNEK, 2018).

4. ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo encontra-se no município de Araraquara (SP), em região plana e de fácil acesso. A escolha do local se deve à presença de equipamentos que possibilitaram o monitoramento das condições atmosféricas e do nível freático durante o período de aquisição de dados.

Por sua vez, a região de Araraquara e toda a porção oeste do estado está inserida na unidade hidrogeológica conhecida como Sistema Aquífero Bauru. O SAB é um reservatório natural constituído essencialmente por rochas sedimentares cretáceas da Bacia do Paraná, que foram enquadradas no Grupo Bauru por Soares *et al.* (1980) ou, segundo a proposta de Fernandes (1998), nos grupos Caiuá e Bauru.

Neste trabalho foi considerada a subdivisão do Grupo Bauru em unidades geofísicas, detalhadas em Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2005). Nesses trabalhos, o autor mantém a primeira divisão formal do Grupo Bauru de Soares *et al.* (1980), em Formação Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, mas também inclui as formações Araçatuba, Pirapozinho e Birigui.

Portanto, as unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru que afloram em superfície no estado São Paulo são as formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Dessa forma, foi elaborado um mapa de localização da área de estudo, em que a delimitação dessas unidades foi feita com base no mapa de IPT (1981) (Figura 5).

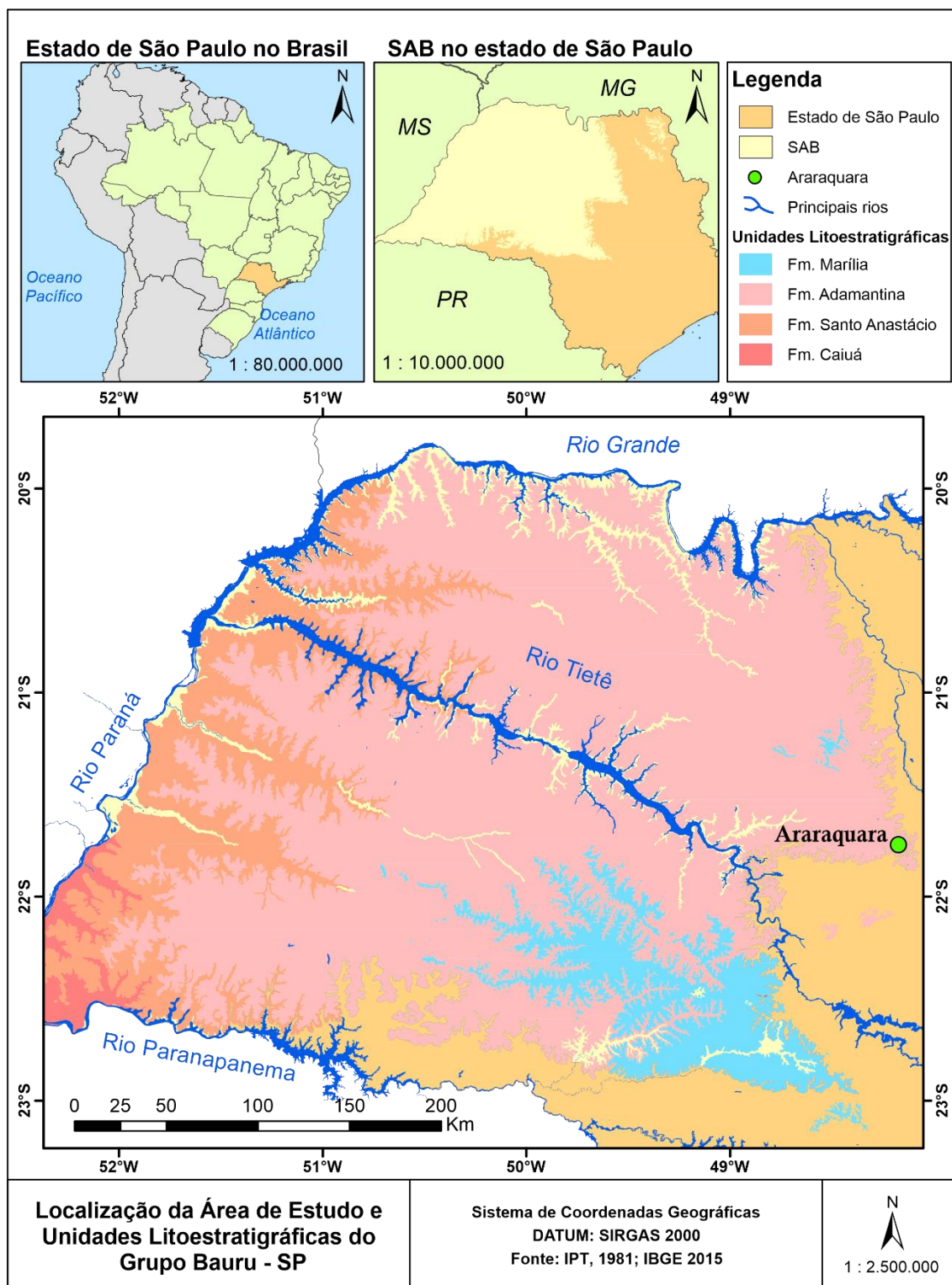


Figura 5: Mapa de localização da área de estudo, com destaque a área de ocorrência das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru em superfície.

4.1 Contexto Geológico

As rochas do Grupo Bauru ocorrem de forma extensiva e contínua no Planalto Ocidental Paulista, sendo constituídas predominantemente por sedimentos continentais

siliciclásticos (DAEE, 1990). São representativos desta sucessão: arenitos, arenitos argilosos carbonatados ou não, siltitos, lamitos e argilitos, apresentando localmente conglomerados e camadas calcárias (DAEE, 1976).

No estado de São Paulo, o Grupo Bauru pode ser encontrado acima do substrato basáltico da Formação Serra Geral, como também sob sedimentos das Formações Botucatu e Piramboia. Em ambos os casos o contato é marcado por uma discordância erosiva (SOARES *et al.* 1980; PAULA E SILVA e CAVAGUTI, 1994).

O Grupo Bauru consiste em uma sucessão sedimentar Cretácea depositada na porção centro-sul da Plataforma Sul-Americana, associada a episódios dispersos de magmatismo alcalino na Bacia do Paraná (SOARES *et al.* 1980; ALMEIDA e MELO, 1981).

Segundo Paula e Silva *et al.* (2005), a sedimentação do Grupo Bauru se deu em três sequências deposicionais principais, separadas por duas superfícies de discordância regionais. A primeira e mais antiga deposição de sedimentos clásticos é representada pelas formações Caiuá e Pirapozinho, a segunda sequência é representada pelos sedimentos arenosos da Formação Santo Anastácio e a terceira sequência, pelos depósitos das formações Birigui, Araçatuba e Adamantina (Figura 6).

Já a sedimentação da Formação Marília representa o apogeu do assoreamento da bacia Bauru (PAULA e SILVA *et al.*, 2005), quando, ao final do Cretáceo Superior, a continuação da evolução da bacia culmina na exposição das rochas paleozoicas e do embasamento pré-cambriano, responsáveis pelo fornecimento de sedimentos para os depósitos da Formação Marília (FERNANDES & COIMBRA, 1996).

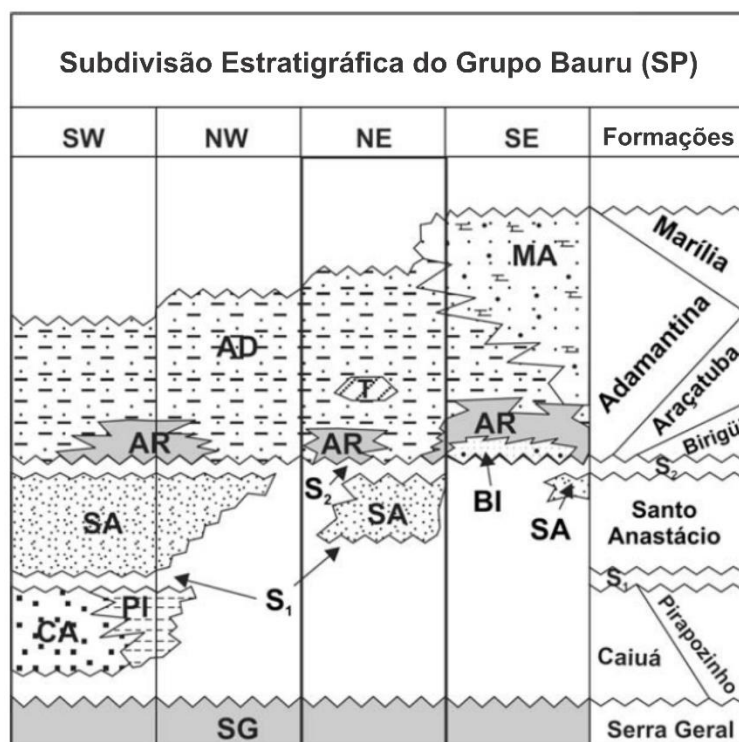


Figura 6: Relações estratigráficas entre as formações cretáceas suprabasálticas nos diferentes compartimentos do Grupo Bauru no Estado de São Paulo (modificado de Paula e Silva, 2009). MA = Marília; AD = Adamantina; AR = Araçatuba; BI = Birigui; SA= Santo Anastácio. CA = Caiuá; PI = Pirapozinho; SG = Serra Geral; T = Analcimitos Taiúva; S1 e S2 = Discordâncias

4.2 Hidroestratigrafia

Uma caracterização hidrogeológica do SAB é apresentada nos trabalhos de Paula e Silva (2003), e Paula e Silva *et al.* (2005), a partir de sua partição nos aquíferos Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio e Caiuá, e os aquitardos Araçatuba e Pirapozinho, conforme suas correspondências com as unidades litoestratigráficas apresentadas na Figura 6.

Sendo assim, o local onde foi realizado o estudo encontra-se sob o Aquífero Adamantina, que abrange uma área de aproximadamente 99.600 km². Esse aquífero ocorre extensivamente em superfície, estando coberto localmente pela Formação Marília e ausente, por erosão, no extremo sudoeste paulista (PAULA e SILVA, 2003).

Devido à sua extensão, o Aquífero Adamantina responde por 50% do volume de água armazenado em todo o SAB, o que demonstra sua grande importância para a caracterização do sistema, ainda que as vazões fornecidas se mostrem extremamente variáveis (STRADIOTO, 2016).

4.3 Potencial Hidrogeológico

O SAB é uma unidade hidrogeológica sedimentar e permeável de extensão regional, que ocorre de forma livre a semiconfinada em uma área de aproximadamente 117.000 km² do estado de São Paulo (DAEE *et al.* 2005).

Por ser um aquífero livre, as águas provindas da precipitação são as principais fontes de recarga do aquífero, que apresenta uma vazão explorável de 10 a 120 m³/h, com maior potencial ao longo do Rio Paraná e no Pontal do Paranapanema (CETESB, 2019).

Segundo Barcha *et al.* (1981), esse aquífero apresenta uma produtividade muito heterogênea nas áreas onde é explotado devido à presença de diferentes litologias, que possuem características variadas de textura, teor de cimento, porosidade e permeabilidade.

Apesar dessa diferença de produtividade, segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2010), o SAB é responsável pelo abastecimento de mais de 400 municípios, que se utilizam direta ou indiretamente de suas águas, atendendo a uma média de 8 milhões de habitantes (Tabela 1).

Tabela 1: Indicação do abastecimento d'água dos municípios que compõem a área do SAB.

Estados	Municípios	Água Subterrânea (%)	Mista (%)	Água Superficial (%)
GO	9	44.4	22.2	33.3
MG	22	40.9	22.7	36.4
MS	37	86.5	8.1	5.4
SP	265	83.8	10.9	5.3
PR	70	91.4	5.7	2.9

Elaborado por Campos *et al.* (2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do modelo numérico no *software* Hydrus-1D foi necessário, primeiramente, o levantamento de informações relacionadas às propriedades físicas do perfil de solo, além das condições de umidade, precipitação, radiação solar e nível d'água durante o período de estudo.

Portanto, como o estudo necessitou de diversas abordagens para obtenção desses dados, optou-se por apresentar os métodos em etapas, visto que a determinação das propriedades do solo envolve desde a instalação do experimento em campo e amostragem, a experimentos de laboratório.

5.1 Instalação do Experimento e Amostragem

A instalação do experimento consistiu em escavar um poço, com 6 metros de profundidade e 1 metro de diâmetro, revestido com anéis de concreto armado (Figura 7). A profundidade do poço foi definida com base nas informações do nível d'água na área, situado a aproximadamente 10 metros de profundidade.

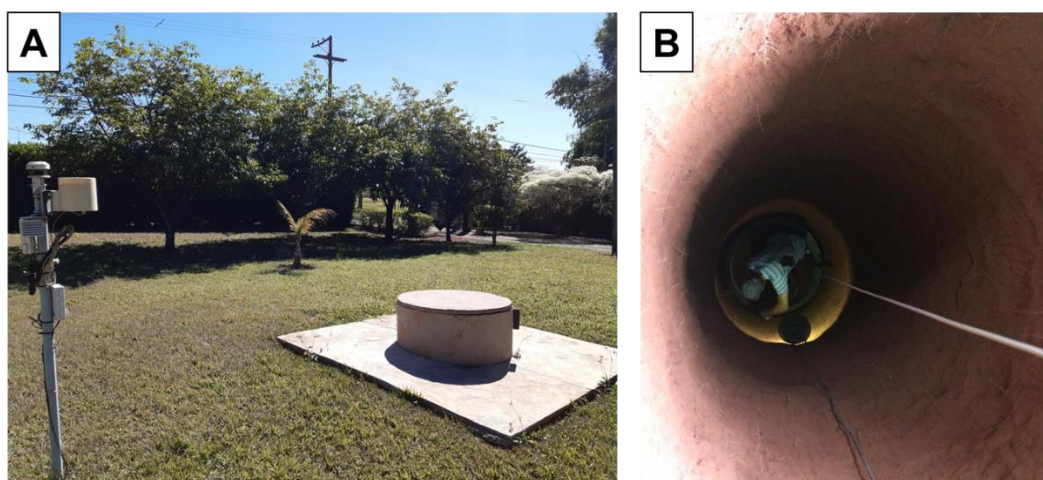


Figura 7: (A) Local de instalação do poço, ao lado da estação meteorológica; (B) Escavação do poço de monitoramento.

Durante a escavação foram coletadas amostras de solo indeformadas em anéis de alumínio com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 8A), nas profundidades 0,4; 1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 m, para a determinação das curvas de retenção. Neste momento, também foram instalados sensores de umidade do solo modelo 10HS (Meter Group, Pullman, WA, EUA) nas paredes do poço, nas mesmas profundidades supracitadas. Cada sensor foi então conectado à *data-loggers* modelo Em60, também da Meter Group, que registram o conteúdo volumétrico de água por volume de solo, θ .

No processo de escavação também foram coletadas, a cada meio metro, amostras de solo deformadas (Figura 8B) para determinação da curva granulométrica e a determinação da condutividade hidráulica vertical do solo.

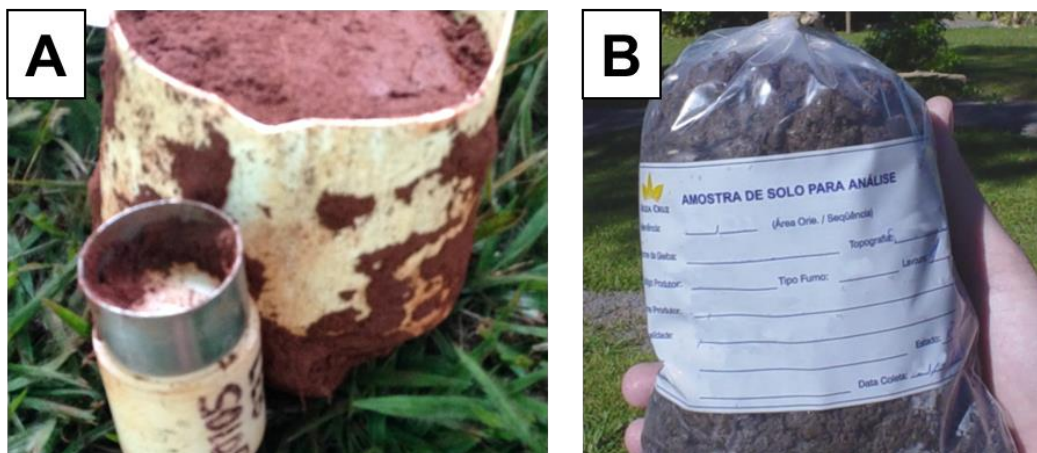


Figura 8: (A) Exemplo de anel de alumínio utilizado para coleta de amostra indeformada de solo; (B) exemplo de amostra de solo deformada.

5.2 Monitoramento

O local de escavação do poço foi monitorado por um período de 366 dias, entre 24 de março de 2019 a 24 de março de 2020, a fim de gerar dados suficientes para a elaboração do modelo numérico.

As condições atmosféricas, como umidade relativa do ar, precipitação, temperatura e radiação solar foram registradas a cada 15 minutos por um pluviômetro de alta resolução, modelo ecrn-100 e um medidor Atmos 14 (METER GROUP, PULLMAN, WA, EUA). Já em relação ao monitoramento dos parâmetros do solo, a umidade foi registrada pelos sensores de umidade 10HS a cada 12 horas, nas profundidades mencionadas anteriormente. Já o nível d'água foi medido uma vez por mês, com o auxílio de um medidor de fita graduada em centímetros.

Com o objetivo de padronizar o registro desses dados, foram feitas médias diárias para cada um dos parâmetros, que foram posteriormente inseridas no Hydrus-1D.

5.3 Curvas de Retenção

As características de retenção da água no solo $\theta(h)$ e função condutividade $K(h)$ são descritas pela abordagem de Mualem-van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) da seguinte maneira:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$K(h) = K_s Se^l \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

onde:

$\theta(h)$ = conteúdo volumétrico de água em função da carga hidráulica;

θ_s = conteúdo volumétrico de água do solo saturado;

θ_r = conteúdo volumétrico de água do solo na saturação residual;

α , n , e m = parâmetros empíricos que definem o formato das curvas de retenção, sendo que $m = 1 - 1/n$;

$K(h)$ = condutividade hidráulica em função da carga hidráulica;

K_s = condutividade hidráulica do solo saturado;

Se = saturação efetiva, sendo que:

$$Se(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

Para a determinação das curvas de retenção de água no solo, as amostras foram enviadas para o Laboratório de Hidráulica da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, onde foram utilizados funis de placa porosa e câmaras de Richards. Neste experimento, as amostras são saturadas de água e, posteriormente, submetidas a diferentes tensões, variando de 1 a 1500 kilopascal (KPa), como descrito em Klute (1986).

Depois de atingido o equilíbrio em cada tensão aplicada, o conteúdo de água ou umidade é determinado gravimetricamente (θ_m), obtendo o valor em unidade de massa. Nesse caso, foi necessário converter a unidade para volume (θ) através da equação:

$$\theta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \theta_m \quad (4)$$

Onde:

ρ_s = massa específica dos sólidos;

ρ_w = massa específica da água;

θ_m = conteúdo de água a base de massa.

É importante ressaltar que, para cada tensão aplicada, foram utilizadas três amostras, sendo que o ajuste das curvas de retenção foi feito a partir do valor médio de umidade volumétrica dessas três amostras.

5.4 Curvas Granulométricas

Para determinação das curvas granulométricas foi necessário realizar um ensaio de sedimentação concomitante ao peneiramento, ou ensaio de granulometria conjunta nas amostras de solo deformadas (Figura 9).

O peneiramento é realizado com um conjunto de peneiras específicas para análise granulométrica, determinadas na norma ABNT NBR 7181, e tem como objetivo separar os grãos maiores que 0,063mm (cascalho, areia fina, média e grossa), determinando sua porcentagem de ocorrência na amostra.

Já o ensaio de sedimentação serve para separar as frações menores que 0,063mm (silte e argila) e consiste em separar essa porção mais fina, que passou por todas as peneiras, em provetas de 1 litro com água, conforme descrito em Stancati *et al.* (1992).

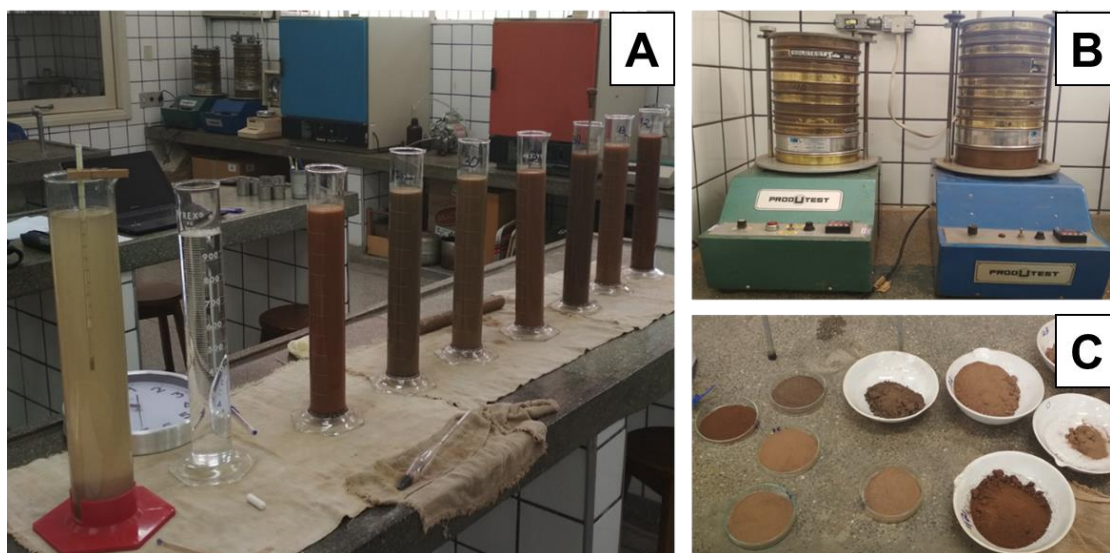


Figura 9: (A) Ensaio de sedimentação; (B) Ensaio de peneiramento; (C) desagregação e secagem das amostras deformadas.

Após essa preparação, é preciso agitar mecanicamente a proveta, realizando medições de densidade da mistura em intervalos de 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos, ao mesmo tempo em que se mede a densidade da água em outra proveta idêntica, anotando a temperatura do ambiente a cada medição.

Dessa maneira, é possível obter uma relação da densidade da mistura com a massa específica dos sólidos (obtida nos ensaios do Laboratório de Hidráulica da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP) e relacionar com o tamanho das partículas que sedimentaram, podendo estabelecer quais são as quantidades de grãos finos e suas porcentagens de ocorrência na amostra como um todo, baseando-se na Lei de Stokes, conforme as seguintes equações:

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times n}{\rho_s - \rho_w} \times \frac{a}{t}} \quad (5)$$

$$Q_s = N \times \frac{\rho}{\rho_s - \rho_w} \times \frac{Lc}{M} \quad (6)$$

Onde,

d = diâmetro máximo das partículas (mm);

n = coeficiente de viscosidade;

ρ_s = massa específica dos sólidos;

ρ_w = massa específica da água;

a = altura de queda das partículas (cm);

t = tempo de queda (s);

Qs = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura;

Lc = valor corrigido da densidade da mistura;

M = massa inicial do material em suspensão (g).

5.5 Modelagem do Fluxo de Água

5.5.1 Concepção do Modelo Numérico de Fluxo

A etapa inicial da simulação consiste em elaborar um modelo conceitual que possa replicar a situação observada da maneira mais fiel possível, baseando-se nas informações da literatura sobre o SAB e nos dados de precipitação, nível da água, granulometria e condutividade hidráulica vertical.

Por sua vez, para simular a infiltração da água na zona não-saturada, foi utilizado um modelo numérico de fluxo para um regime transiente, com parâmetros iniciais estabelecidos a partir dos dados obtidos em campo para as diferentes profundidades do perfil.

Após estabelecidas essas condições iniciais do modelo, é calculada a umidade (θ), ou conteúdo volumétrico de água, nos pontos escolhidos. Nesse caso, o modelo de movimentação de água no perfil de solo foi elaborado no software Hydrus-1D, que soluciona de diversas maneiras a Equação de Richards (ŠIMŮNEK *et al.*, 2008), podendo ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = - \frac{\delta q}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta z} \left[K(h) \frac{\delta h}{\delta z} - K(h) \right] \quad (7)$$

onde,

z = coordenada vertical,

q (z,t) = fluxo vertical d'água;

t = tempo (s);

$K(h)$ = condutividade hidráulica em função da carga hidráulica;

H = carga hidráulica;

θ = conteúdo volumétrico de água no solo.

Na primeira concepção do modelo, foram utilizados os parâmetros obtidos na confecção das curvas de retenção, que sozinha já permite uma solução da equação de Richards pelo método de Mualem-Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980). Dessa maneira, a partir dos parâmetros hidráulicos do solo (θ_r , θ_s , K_s , α , m , n), foi possível elaborar uma primeira representação modelo.

5.5.2 Calibração

A calibração consiste em adequar os parâmetros do modelo conceitual para reproduzir, da melhor forma possível, as condições observadas durante os 366 dias de monitoramento.

Esses ajustes no modelo são feitos com o intuito de melhorar a correlação entre os valores reais de umidade e os calculados pelo modelo. No caso, os valores foram ajustados com base na análise de erro percentual absoluto médio (MAPE) e na raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE), visto que são duas métricas distintas, que possuem suas vantagens e desvantagens.

Ambos são parâmetros percentuais, sendo que o MAPE é uma métrica que leva em consideração os erros absolutos, e o NRMS se ajusta à unidade em questão e penaliza predições muito distantes da real (*outliers*), o que o torna uma métrica muito boa para a validação de modelos numéricos.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (8) \quad NRMSE = \frac{1}{y_{max} - y_{min}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (9)$$

Onde,

y = valor real

$\hat{y}$ = valor calculado

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Propriedades Físicas do Solo

As medidas obtidas nos experimentos de laboratório são referentes à distribuição do tamanho dos grãos, condutividade hidráulica vertical e capacidade de retenção de água. Esses dados fornecem informações básicas do perfil de solo e serviram para determinar as propriedades físicas e hidráulicas do local. Com isso, foi possível a confecção das curvas de retenção a partir dos dados da Tabela 2 e das curvas granulométricas a partir dos dados da Tabela 3.

Tabela 2. Dados das curvas de retenção.

Profundidade	θ_r	θ_s	α	n	l	Ks (cm/s)	Ks (cm/dia)
0,4 m	0,1404	0,4428	0,0439	1,6831	0,5	8,51E-03	7,35E+02
1,5 m	0,1587	0,4551	0,0493	1,6052	0,5	9,02E-03	7,79E+02
3,0 m	0,1791	0,4277	0,0411	1,5497	0,5	1,30E-02	1,12E+03
4,5 m	0,1813	0,4970	0,0605	1,5309	0,5	2,21E-03	1,91E+02
6,0 m	0,1404	0,4428	0,0439	1,6831	0,5	2,54E-03	2,20E+02

Tabela 3. Dados das curvas granulométricas.

Profundidade	% Areia	% Silte	% Argila	Profundidade	% Areia	% Silte	% Argila
0,5 m	69,58	4,05	26,37	3,5 m	64,26	3,12	32,62
1,0 m	69,34	2,87	27,79	4,0 m	61,89	8,60	29,51
1,5 m	66,10	3,65	30,25	4,5 m	62,85	9,52	27,62
2,0 m	66,75	4,70	29,55	5,0 m	62,08	9,59	28,31
2,5 m	66,17	3,10	30,73	5,5 m	64,91	9,79	25,30
3,0 m	67,05	2,48	30,47	6,0 m	65,59	10,87	23,51

A análise desses dados e as observações de campo permitiram a caracterização do solo, determinado como Latossolo Vermelho-Amarelo e classe textural franco argilo-arenosa. No que concerne ao perfil do poço, há uma pequena variação na composição granulométrica das amostras, sendo que as camadas superiores apresentam uma maior fração arenosa, com aumento da fração fina conforme a profundidade, até alcançar 4 metros, quando a quantidade de finos passa a diminuir.

Como a parte superior do perfil é mais arenosa, a infiltração nos primeiros metros deve ser mais rápida e a condutividade hidráulica acaba sendo maior, o que condiz com os resultados da Tabela 2. Já aos 3,0 m de profundidade há um aumento na condutividade hidráulica do perfil, que não pode ser explicado por uma mudança na granulometria das amostras.

Essa diferença pode ter sido causada devido à presença de fraturas no perfil de solo, que condicionam o aumento da condutividade hidráulica, como também por um erro do ensaio de laboratório, o que não pode ser confirmado. Ainda assim, essa pequena discrepância não é considerada um erro, visto que a distribuição granulométrica é apenas um dos fatores que influenciam na condutividade hidráulica

6.2 Monitoramento

O registro das condições atmosféricas gerou uma série de dados mensais de precipitação e temperatura para a área de estudo. Além disso, juntamente com os dados de precipitação, foram utilizados os dados da estação pluviométrica C5-050 do DAEE, para relacionar a quantidade de chuvas durante o período de estudo com uma série histórica da precipitação entre os anos de 1993 a 2018 (Figura 10).

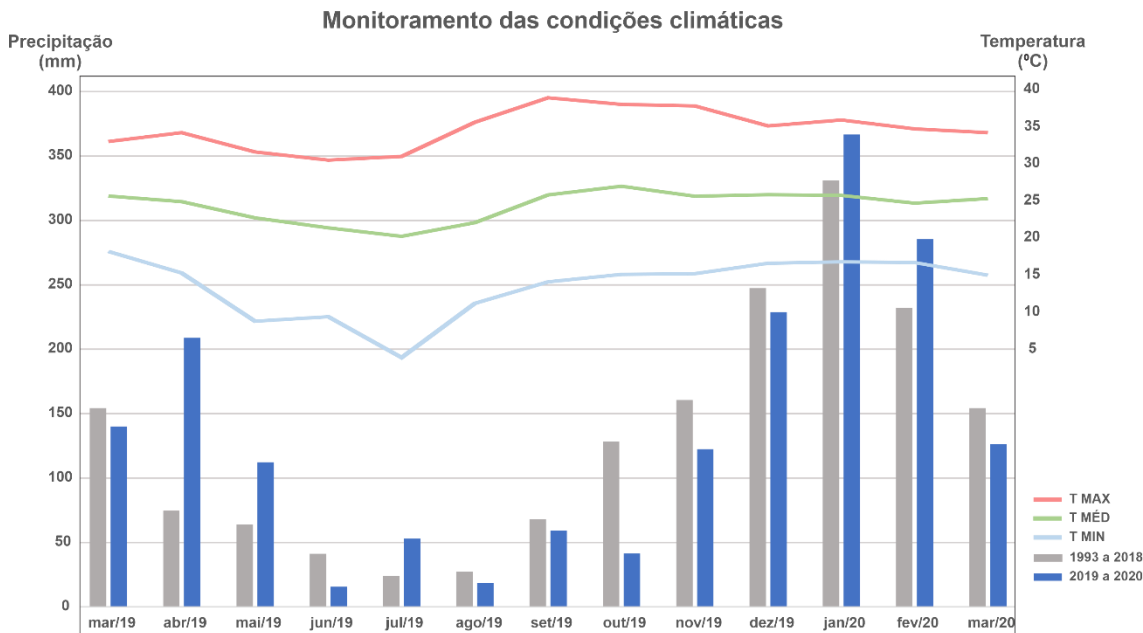


Figura 10: Comparação entre a média da precipitação mensal e da média da série histórica, obtida a partir dos dados da estação C5-050, localizada no município de Araraquara.

No período de estudo, a média anual da precipitação foi de 1707,1 mm, enquanto a série histórica apresentou uma média anual de 1778,7 mm, o que reflete um ano normal em termos de precipitação por apresentar uma média próxima à média típica da região.

A comparação mensal da pluviometria mostra que o volume das chuvas durante o período de estudo apresenta algumas variações em relação à média histórica, principalmente nos meses de fevereiro, abril, maio e outubro, mas em geral, foram considerados similares.

Além disso, é apresentado também o monitoramento do nível da água, que foi medido mensalmente em um outro poço situado no local de estudo (Figura 11).

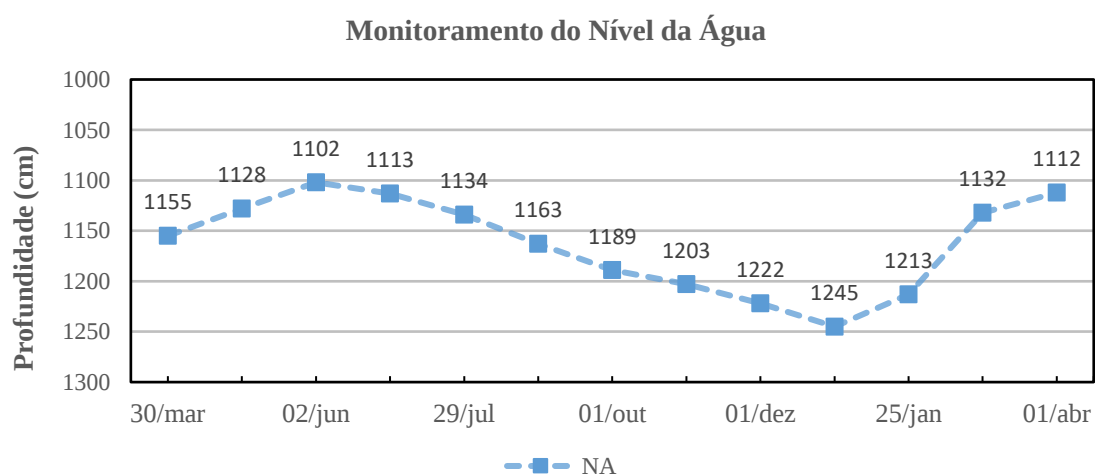


Figura 11: Dados do nível da água obtidos durante o período de monitoramento.

6.3 Variação Temporal da Umidade Relativa do Solo

Como resultado desses 366 dias de monitoramento, foi obtida também a variação de umidade do solo ao longo do perfil, registrada pelos sensores de umidade instalados no poço. Todos os sensores registraram a variação da umidade de maneira contínua, com duas medições por dia, com exceção do sensor 3 (3,0 m), que parou de funcionar a partir do 336º dia.

Esses dados de umidade, juntamente com os dados da estação pluviométrica, representam os dados reais de umidade do solo e de precipitação entre os dias 24 de março de 2019 a 24 de março de 2020.

Dessa maneira, como forma de apresentar esses dados obtidos, foi elaborado um esquema representativo dessa variação temporal (Figura 12). Os gráficos estão organizados conforme a profundidade em que se apresentam no perfil de solo, sendo que os dados de chuva estão no topo e, na sequência, os dados referentes aos sensores.

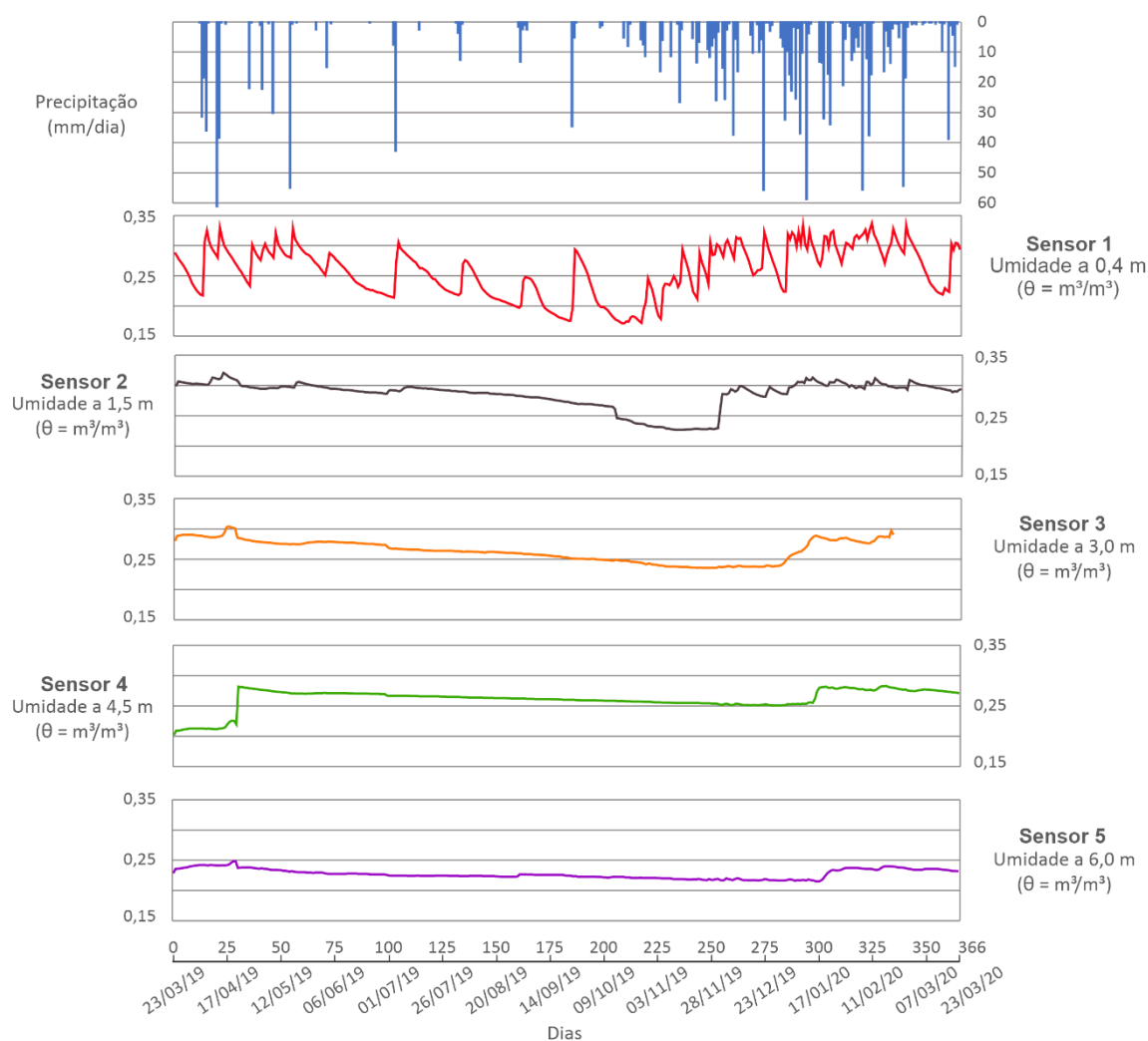


Figura 12: Registro diário do volume de chuva (em milímetros) e da umidade, θ (em volume de água pelo volume de solo), medida em cada profundidade durante o monitoramento.

Os valores mostram uma diferença na variação da umidade (θ) para cada profundidade monitorada. Dessa maneira, os dados permitem analisar o comportamento do movimento vertical d'água, da superfície até a base do perfil de solo. Por exemplo, no sensor mais próximo à superfície (0,4 m), a umidade varia muito com o tempo, pois, nas porções mais superficiais do perfil, o solo está mais exposto a condições de precipitação e evapotranspiração, o que resulta em uma resposta quase que imediata a episódios de chuva e seca.

No caso dos sensores mais profundos, por estarem mais distantes da superfície, apresentam uma resposta a episódios de chuva e seca mais demorada, pois a evapotranspiração é menos atuante, e as águas das chuvas demoram mais tempo para chegar em maiores profundidades, dependendo de precipitações contínuas ou de maior volume.

Além disso, foi possível estimar a velocidade do fluxo da água, ou frente de molhamento, que varia bastante de acordo com a profundidade do perfil de solo. Para estimar a velocidade desse fluxo, foram comparados os dias em que ocorreram picos de umidade em cada um dos sensores, exceto o sensor 1 (0,4 m), por apresentar muitas variações de umidade.

Dessa maneira, foi estimada uma velocidade média de 9 cm/dia a partir da comparação entre os sensores 2 (1,5 m) e 5 (6,0 m), sendo que a velocidade do fluxo é menor nos primeiros metros do perfil, crescendo significativamente nas porções inferiores da seguinte maneira: entre os sensores 2 (1,5 m) e 3 (3,0 m), a velocidade foi de 5 cm/dia; entre os sensores 3 (3,0 m) e 4 (4,5 m), de 10 cm/dia; e entre os sensores 4 (4,5 m) e 5 (6,0 m) de 30 cm/dia.

6.4 Modelagem Numérica

6.4.1 Modelo Conceitual

A concepção do modelo conceitual é dada a partir das informações que foram extraídas do perfil de solo, das características do aquífero e dos dados de monitoramento. Sendo assim, o modelo conceitual tem como intuito ditar os principais aspectos do meio, para que o modelo numérico possa responder de forma similar à situação a ser reproduzida.

Portanto, as premissas impostas pelo modelo são:

- O aquífero é considerado livre e poroso;
- Só é contabilizada a entrada de água no sistema a partir da água da chuva;
- A composição do perfil de solo é homogênea, apresentando parâmetros hidráulicos levemente diferentes;
- O nível da água está situado inicialmente a 10 metros de profundidade.

6.4.2 Condições de Contorno

De maneira a reproduzir a infiltração da água no perfil, foram delimitadas algumas condições com base na interpretação do modelo conceitual, sendo assim, o modelo numérico interage a partir das seguintes condições:

- O topo do perfil é delimitado pelo limite da atmosfera com a superfície do solo (*atmospheric BC with surface layer*), o que permite o acúmulo de água na

superfície até um limite estipulado de 2 centímetros, como recomendado em Šimůnek *et al.* (2008);

- No início da simulação, a base do perfil admite uma variação da carga hidráulica;
- A fim de calcular as perdas de água por evapotranspiração e pelas plantas, foi determinado uma cobertura vegetal rasteira, do tamanho de gramíneas, sem considerar a existência de condições de histerese;
- Como o sistema admite o acúmulo de água na superfície, foi utilizado a equação de Penman–Monteith (MONTEITH, 1981; FAO, 2006) para calcular a evapotranspiração potencial do modelo;
- Para determinação do estresse hídrico devido a efeitos de capilaridade, foi utilizado o modelo de Feddes (FEDDES *et al.*, 1978), considerando as características da cobertura vegetal.

Além disso, esses parâmetros são dependentes de dados como: precipitação, radiação solar, umidade e temperatura, que são dados de entrada que atuam como condições contorno, mas que variam com o tempo, sendo uma grande condicionante do modelo.

6.4.3 Simulação do Fluxo d'Água

Em uma primeira concepção do modelo, a simulação utilizou os dados obtidos em campo e seguiu sugestões da própria interface gráfica do Hydrus-1D e do manual elaborado por Šimůnek *et al.* (2008). Baseado nisso e nas informações do perfil de solo, o primeiro modelo apresentou uma estimativa um pouco distante da situação observada durante o período de monitoramento da umidade do solo.

Como forma de melhorar os resultados e simplificar a simulação, ficou decidido que a calibração do modelo deveria ser feita a partir do ajuste dos valores de condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo, visto que os parâmetros hidráulicos do solo são consequência de um conjunto de outros fatores (granulometria, estrutura do solo, umidade, compactação, composição etc.).

Portanto, depois de algumas tentativas, a simplificação do modelo em duas camadas de solo apresentou os melhores resultados, sendo que, inicialmente, os valores correspondiam à média dos parâmetros da Tabela 2, que posteriormente foram ajustados até atingir os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros do solo após a calibração do modelo.

Parâmetros	Camada 1	Camada 2
θ_r	0,1594	0,1609
θ_s	0,4419	0,4699
α	0,0448	0,0522
n	1,6127	1,6070
l	0,5	0,5
Ks (cm/s)	8,84E-03	3,54E-03
Ks (cm/dia)	7,64E+02	3,06E+02

Lembrando que:

θ_r = Volume de água residual;

θ_s = Volume de água do solo saturado;

Ks = Condutividade hidráulica saturada vertical;

e α , n e l são parâmetros empíricos.

Seguindo esses parâmetros, a divisão do modelo em duas camadas apresentou melhores resultados quando separado na profundidade de 4 metros. Dessa forma, foi elaborado um esquema do perfil construtivo do poço (Figura 13), com o intuito de melhorar a visualização da situação proposta.

Nesse esquema, é indicada a divisão das camadas, além da profundidade de cada um dos sensores de umidade e da profundidade em que foram retiradas as amostras de solo, sendo apresentadas também as curvas granulométricas e as curvas de retenção obtidas nos ensaios de laboratório.

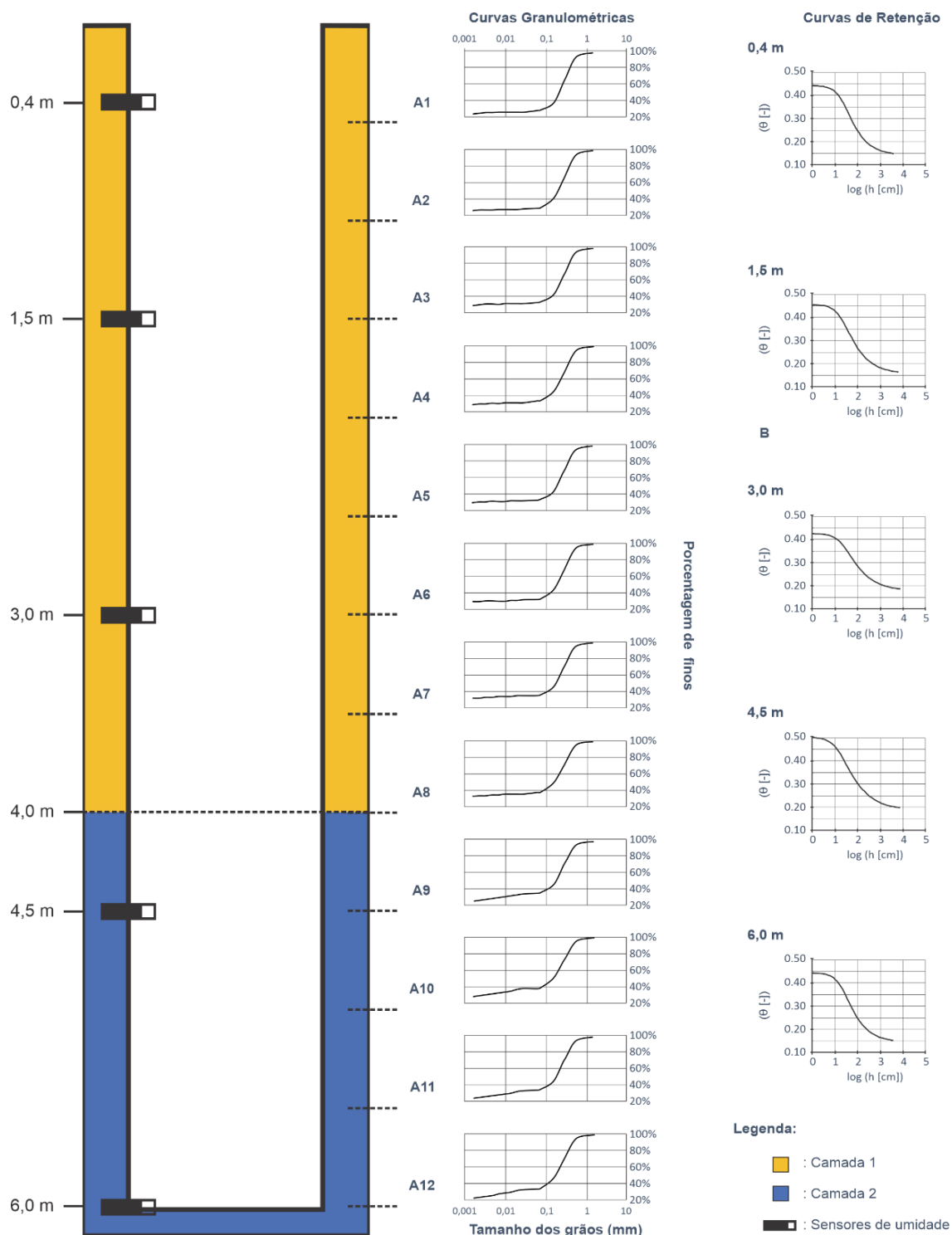


Figura 13: Esquema representativo do perfil construtivo do poço de monitoramento, e das curvas de retenção e granulométricas para cada profundidade amostrada.

A calibração do modelo foi realizada conforme essa proposta, e o resultado obtido na simulação desses parâmetros é apresentado na Figura 14, juntamente com os dados do monitoramento, a fim de facilitar a visualização da correspondência entre os dados de umidade medidos pelos sensores e os resultados da umidade calculada na simulação.

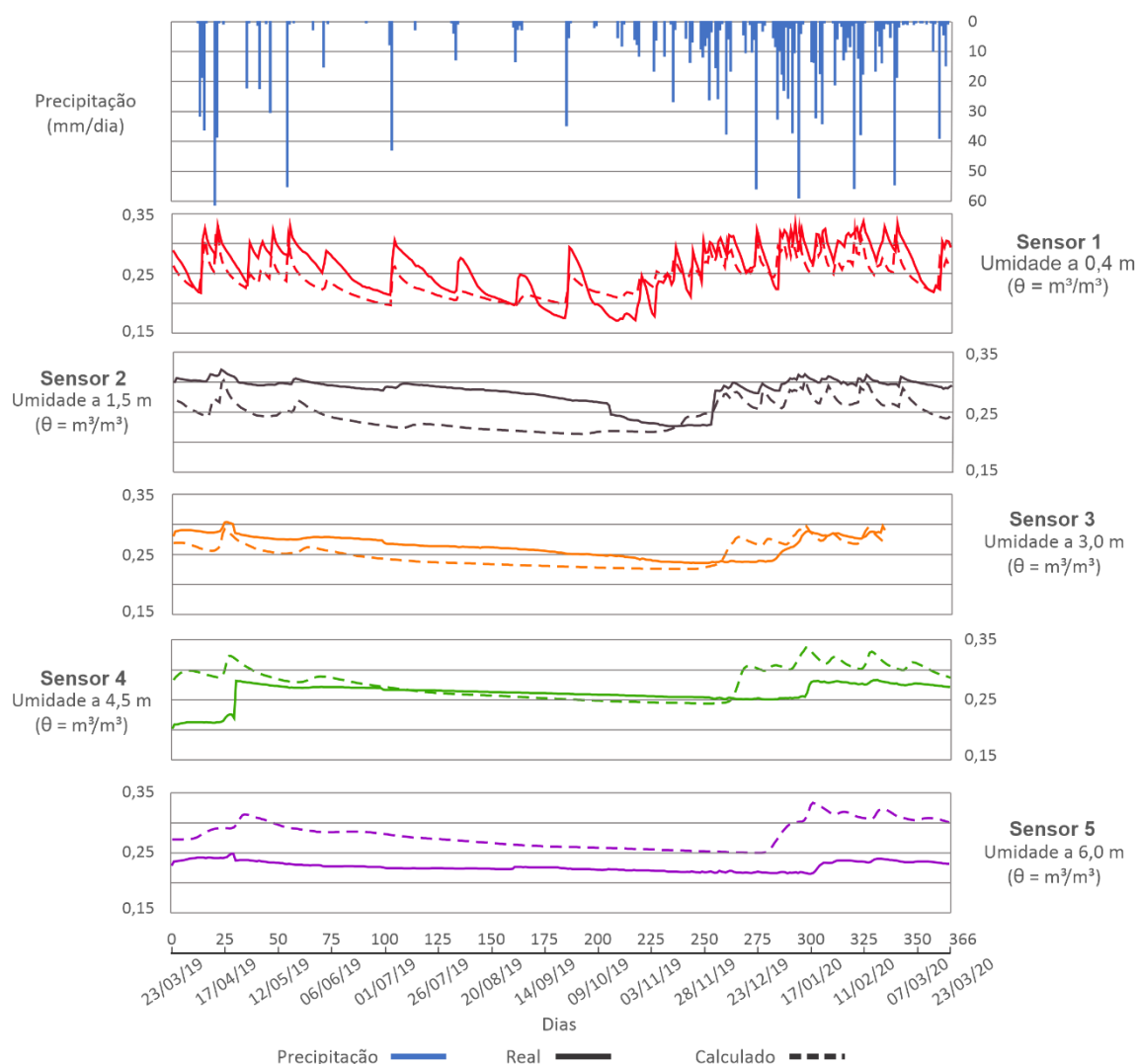


Figura 14: Comparação entre os dados diários de umidade (θ) medidos pelos sensores e os dados calculados no Hydrus 1-D.

Os gráficos referentes a cada profundidade permitem visualizar a proximidade dos valores de umidade (θ) entre as séries reais e as calculadas, mostrando o comportamento da água no perfil de solo.

Assim como os dados do monitoramento, os valores de umidade calculados também apresentaram uma resposta mais rápida quando próximos à superfície. Da mesma maneira, para as porções mais profundas do perfil, os valores calculados apresentaram uma resposta mais demorada a episódios de chuva, dependendo de chuvas contínuas ou de maior volume.

Apesar disso, a variação da umidade nos dados simulados, de um modo geral, apresentou respostas mais rápidas, visto que os picos de umidade observados nos sensores 2 (1,5 m), 3 (3,0 m), 4 (4,5 m) e 5 (6,0 m) ocorrem respectivamente nos dias 253, 283,

297 e 302, e os picos da umidade simulada para as mesmas profundidades ocorrem respectivamente nos dias 236, 253, 264 e 281.

Apesar do valor da velocidade média do fluxo simulado ser bem próximo do real, aproximadamente 10 cm/dia, a variação da velocidade simulada não condiz com a variação da velocidade real, uma vez que foram apresentados valores bem menores ao longo do perfil, sendo que a velocidade entre os sensores 2 (1,5 m) e 3 (3,0 m) foi de 8,8 cm/dia; entre os sensores 3 (3,0 m) e 4 (4,5 m) foi de 13,6 cm/dia; e entre os sensores 4 (4,5 m) e 5 (6,0 m) também foi de 8,8 cm/dia.

Outro fator que merece destaque é a influência da divisão do modelo em duas camadas nos resultados calculados, visto que os pontos de análise mais superficiais, localizados na camada 1, apresentaram valores subestimados, enquanto os pontos mais profundos, localizados na camada 2, apresentaram valores superestimados.

6.5 Precisão da Calibração

O critério de calibração utilizado foi de menor erro observado entre os valores de umidade reais e os calculados, segundo a análise do erro percentual absoluto médio (MAPE) e da raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE).

Como o intuito foi de simplificar a simulação, a divisão do perfil em duas camadas permitiu a calibração do modelo a partir do ajuste dos valores de condutividade hidráulica para somente duas camadas. Sendo assim, foram feitos sucessivos ajustes desses parâmetros, e a simulação com menor erro apresentou os seguintes valores (Tabela 5).

Tabela 5. Erros apresentados para cada sensor

Sensores	MAPE	NRMSE
(1) - 0,4 m	10,18%	11,72%
(2) - 1,5 m	14,14%	15,65%
(3) - 3,0 m	7,52%	8,13%
(4) - 4,5 m	9,16%	12,48%
(5) - 6,0 m	22,66%	23,97%

Da forma com que o modelo foi elaborado, não existe a possibilidade de calibração de um só sensor sem que o sistema inteiro fosse alterado, portanto, a melhor calibração foi aquela em que a maioria dos sensores apresentaram o menor erro. Sendo

assim, apesar de ser possível diminuir o erro do sensor 5, as novas calibrações interferiam nos resultados dos outros sensores.

Porém, como modelos numéricos são simplificações da realidade, até certo ponto, esses erros são aceitáveis, pois são condicionados por parâmetros obtidos em laboratório, que não reproduzem exatamente as condições reais do solo.

7. CONCLUSÃO

Os dados obtidos a partir do monitoramento do poço e das condições atmosféricas permitem confirmar que nem toda água da chuva que infiltra nas camadas superficiais do solo pode ser contabilizada para a recarga do aquífero. Pois, devido a um atraso na chegada da água em camadas inferiores, um volume considerável de água pode ser perdido por conta da evapotranspiração e ascensão capilar.

Sendo assim, é confirmado que a recarga das águas subterrâneas não ocorre de maneira contínua, ou seja, não são eventos isolados de chuva os responsáveis por essa recarga. Para que haja a reposição dos recursos hídricos subterrâneos, são necessárias chuvas contínuas e de intensidade moderada, pois a infiltração da água no solo depende da sua capacidade de retenção e da umidade do perfil de solo.

O monitoramento da umidade do solo por um período ininterrupto de 1 ano traz uma confirmação de como a umidade se comporta em um perfil de 6 metros de solo. Essa contribuição, integrada a mais dados de monitoramento, pode ser útil para um melhor dimensionamento de estudos voltados à recarga das águas subterrâneas, uso e ocupação da terra e agronomia.

Por conseguinte, as curvas granulométricas e as curvas de retenção também podem ser relevantes na determinação de outras características do perfil de solo, como porosidade efetiva e condutividade hidráulica. Logo, possibilitam a utilização de outros métodos para determinação de características locais do SAB, principalmente na partição do Aquífero Adamantina.

A obtenção dos parâmetros do solo constituiu boa parte do trabalho e foi fundamental na elaboração do modelo numérico. Esses dados, juntamente com o monitoramento das condições atmosféricas, foram imprescindíveis na caracterização do meio físico e permitiram estabelecer as condições iniciais do modelo.

Na calibração do modelo, uma alternativa foi alterar os parâmetros hidráulicos do solo. Como esses parâmetros são influenciados uns pelos outros, foi escolhido que a maneira mais correta de manipular o modelo seria alterando somente a condutividade hidráulica das camadas, o que foi apresentado na Tabela 4. Essa alteração é justificada, pois a condutividade hidráulica é muito influenciada pela estrutura do solo, fator importante de ser considerado na movimentação da água, mas difícil de ser reproduzido em laboratório.

Ainda assim, como o modelo é unidimensional e os pontos de análise se sobrepõem, sua divisão em duas camadas faz com que os parâmetros hidráulicos da camada superior influenciem a inferior, o que justifica a dificuldade de reduzir o erro relacionado aos sensores mais profundos.

É evidente que a diferença nos resultados foi influenciada pela divisão das camadas, visto que os pontos calculados na camada 1 apresentaram valores subestimados, e os pontos calculados na camada 2, valores superestimados. Apesar dos parâmetros de condutividade hidráulica estarem ajustados, deve haver outro parâmetro influenciando a simulação que possa estar descalibrado, além das limitações da utilização de parâmetros de condutividade hidráulica para reproduzir efeitos de histerese.

A velocidade do fluxo, apesar de apresentar um valor médio próximo ao observado, não foi reproduzida da maneira desejada para cada porção do perfil de solo. Mesmo assim, a coerência entre os dados simulados e observados confirma que a utilização dos parâmetros do solo é uma ferramenta eficaz na determinação do processo de infiltração da água no solo.

Portanto, de maneira geral, os resultados do modelo numérico simulam de maneira aceitável os valores de umidade observados durante o monitoramento, principalmente nos primeiros metros do solo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 7181:2016: Solo – Análise Granulométrica. Versão Corrigida 2: ABNT, 2018**
- ADAM SCHLOSSER, C. ***Global Water Budgets–Fundamental Theory and Mechanisms***. Encyclopedia of Hydrological Sciences, 2006.
- Agência Nacional de Águas – ANA. 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/ConsultaDados.aspx>> Acesso em 5 de abril de 2018.
- ALLEY, W. M., LA BAUGH, J. W., & REILLY, T. E. ***Groundwater as an element in the hydrological cycle***. Encyclopedia of Hydrological Sciences, 2006.
- ALMEIDA, F. F. M.; MELO, M. S. **A Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico**. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo. IPT, Escala 1:500.000, v. 1, p. 46-81, 1981.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic press, 564 p., 2015.
- BARCHA, S. F.; ARID, F. M.; MEZZALIRA, S. **Sub-províncias hidrogeológicas do Grupo Bauru na região norte-ocidental do Estado de São Paulo**. Revista do Instituto Geológico-IG, São Paulo – SP, 2(2), p.17-33, 1981.
- BUCKINGHAM, E. ***Studies of the movement of soil moisture***. USDA Bur., Soil Bull. v. 38, p. 61, 1907.
- CAMPOS, J. C. V., GASTMANS, D., SANTAROSA, L. V., & BETANCUR, S. B. **Gestão integrada dos recursos hídricos na área de ocorrência do Sistema Aquífero Bauru**. Revista de Águas Subterrâneas, 2018.
- CETESB *et al.* **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo 2016-2018**. São Paulo: 291p. (Série de Relatórios), 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>> Acesso em: agosto 2020.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 7, 8 e 9: Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba**. São Paulo: v.1 e v.2, 1976.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. **Plano estadual de recursos hídricos: Primeiro plano do Estado - Síntese**. São Paulo - SP: 97p, 1990.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. *et al.* **Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo**. São Paulo. Escala 1:1.000.000. (Nota explicativa), 2005. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutogeologico/2012/03/mapa-de-aguas-subterraneas-do-estado-de-sao-paulo-escala-11-000-000>> Acesso em: Outubro 2019.

DE VRIES, J. J.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: an overview of processes and challenges**. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 5-17, 2002.

Food and Agriculture Organization of The United Nations - FAO. **Guidelines for soil description**, 4 ed. FAO, Rome, 2006.

FEDDES, R.A., KOWALIK, P.J., ZARADNY, H. **Simulation of Field Water Use and Crop Yield**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978.

FERNANDES, L. A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)**. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 1998.

FERNANDES, L. A. & COIMBRA. **A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil)**. Revista de Geociências, v. 93, p. 4524-9, 1996.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**, 4a edicao, Prentice Hall, New Jersey, 598 f, 2001.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Groundwater**. 1979.

KLUTE, A. **Water retention: laboratory methods**, in: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods. American Society of Agronomy, Madson, pp. 635–662, 1986.

KOENIGER, P., GAJ, M., BEYER, M., & HIMMELSBACH, T. **Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations**. Hydrological Processes, 30(16), 2817–2834, 2016.

KRESIC, N. **Hydrogeology and groundwater modeling**. CRC press, 2006.

LIBARDI, P. L. Água no solo. **Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo**, p.103-152, 2010.

MANZIONE, R. **Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial. 383 p, 2015.

MONTEITH, J. L. **Evaporation and surface temperature**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 107, n. 451, p. 1-27, 1981.

NIMMO, J. R. **Unsaturated zone flow processes**. Encyclopedia of hydrological sciences, 2006.

NIMMO, J. R., HEALY, R. W., & STONESTROM, D. A. **Aquifer recharge**. Encyclopedia of hydrological sciences, 2006.

OR, D.; TULLER, M.; WRAITH, J. M. **Soil water potential**. Encyclopedia of soils in the environment, v. 3, p. 270-277, 2005.

- PAGANO, T. C., & SOROOSHIAN, S. *Global water cycle (fundamental, theory, mechanisms)*. Encyclopedia of hydrological sciences, 2006.
- PAULA E SILVA, F. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo**, 2003. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. **Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 1, p.77-88, 2005.
- PAULA E SILVA, F., CHANG, H.K., CAETANO-CHANG, M.R. **Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo**. Revista de Águas Subterrâneas, v.19, n.2, p.19-36, 2005.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. *Sedimentation of the Cretaceous Bauru Group in São Paulo, Paraná Basin, Brazil*. Journal of South American Earth Sciences, v. 28, n. 1, p. 25-39, 2009.
- PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. **Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru – SP**. Geociências, UNESP, p.83-99, 1994.
- RADCLIFFE, D. E., & SIMUNEK, J. *Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications*. CRC press, 2018.
- RICHARDS, L. A. *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Journal of Applied Physics, 1(5), 318–333, 1931.
- SCHWARTZ, F. W., & ZHANG, H. *Fundamentals of Groundwater*. New York (NY): John Wiley & Sons, 2003.
- SHIKLOMANOV, I. *World fresh water resources, water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*, 1993.
- ŠIMŮNEK, J. *et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. v. 4, p. 281, 2008.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. **Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.10 (n.3), p.177-185, 1980.
- STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**, 1992.
- STRADIOTO, M. R. **Caracterização hidrogeoquímica, isotópica e diagenética do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo**, 2016. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.** Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892, 1980.

WEIL, R. R., & BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**, fifteenth ed. Pearson Education, Inc, 2017.

ANEXO I – Dados do monitoramento do poço

Data	Dia	Média Sensor 1 θ (m ³ /m ³)	Média Sensor 2 θ (m ³ /m ³)	Média Sensor 3 θ (m ³ /m ³)	Média Sensor 4 θ (m ³ /m ³)	Média Sensor 5 θ (m ³ /m ³)
24/03/2019	1	0,289	0,299	0,280	0,202	0,228
25/03/2019	2	0,283	0,306	0,288	0,209	0,235
26/03/2019	3	0,277	0,306	0,289	0,209	0,236
27/03/2019	4	0,272	0,305	0,290	0,210	0,236
28/03/2019	5	0,267	0,304	0,290	0,210	0,237
29/03/2019	6	0,261	0,304	0,290	0,211	0,237
30/03/2019	7	0,255	0,303	0,290	0,212	0,238
31/03/2019	8	0,247	0,303	0,290	0,212	0,239
01/04/2019	9	0,238	0,302	0,290	0,212	0,240
02/04/2019	10	0,232	0,303	0,290	0,212	0,240
03/04/2019	11	0,226	0,302	0,289	0,212	0,241
04/04/2019	12	0,222	0,302	0,289	0,212	0,241
05/04/2019	13	0,219	0,302	0,288	0,212	0,242
06/04/2019	14	0,217	0,301	0,288	0,212	0,242
07/04/2019	15	0,307	0,301	0,287	0,212	0,242
08/04/2019	16	0,325	0,301	0,287	0,212	0,242
09/04/2019	17	0,307	0,306	0,286	0,212	0,241
10/04/2019	18	0,297	0,313	0,286	0,212	0,242
11/04/2019	19	0,291	0,312	0,286	0,212	0,242
12/04/2019	20	0,286	0,310	0,286	0,212	0,242
13/04/2019	21	0,280	0,310	0,287	0,212	0,241
14/04/2019	22	0,330	0,312	0,288	0,212	0,241
15/04/2019	23	0,313	0,321	0,288	0,212	0,241
16/04/2019	24	0,300	0,319	0,294	0,213	0,242
17/04/2019	25	0,294	0,315	0,303	0,215	0,241
18/04/2019	26	0,289	0,313	0,304	0,220	0,242
19/04/2019	27	0,283	0,311	0,303	0,224	0,243
20/04/2019	28	0,278	0,310	0,301	0,225	0,246
21/04/2019	29	0,272	0,309	0,300	0,225	0,248
22/04/2019	30	0,267	0,306	0,285	0,219	0,248
23/04/2019	31	0,260	0,300	0,284	0,282	0,237
24/04/2019	32	0,256	0,299	0,284	0,281	0,238
25/04/2019	33	0,250	0,299	0,283	0,281	0,238
26/04/2019	34	0,244	0,298	0,282	0,280	0,238
27/04/2019	35	0,238	0,297	0,281	0,280	0,238
28/04/2019	36	0,233	0,296	0,281	0,279	0,238
29/04/2019	37	0,302	0,296	0,280	0,279	0,238

30/04/2019	38	0,294	0,296	0,280	0,278	0,237
01/05/2019	39	0,286	0,295	0,279	0,278	0,237
02/05/2019	40	0,280	0,294	0,279	0,277	0,236
03/05/2019	41	0,276	0,294	0,278	0,277	0,236
04/05/2019	42	0,293	0,294	0,278	0,276	0,237
05/05/2019	43	0,303	0,294	0,278	0,276	0,236
06/05/2019	44	0,294	0,295	0,277	0,275	0,236
07/05/2019	45	0,288	0,296	0,277	0,275	0,235
08/05/2019	46	0,284	0,296	0,277	0,274	0,234
09/05/2019	47	0,280	0,295	0,276	0,274	0,234
10/05/2019	48	0,321	0,295	0,276	0,274	0,234
11/05/2019	49	0,304	0,296	0,275	0,273	0,234
12/05/2019	50	0,297	0,298	0,275	0,273	0,233
13/05/2019	51	0,291	0,298	0,275	0,273	0,233
14/05/2019	52	0,286	0,298	0,275	0,272	0,233
15/05/2019	53	0,283	0,298	0,275	0,272	0,233
16/05/2019	54	0,282	0,297	0,275	0,271	0,232
17/05/2019	55	0,279	0,296	0,275	0,271	0,231
18/05/2019	56	0,329	0,296	0,275	0,270	0,232
19/05/2019	57	0,310	0,304	0,275	0,271	0,231
20/05/2019	58	0,304	0,306	0,275	0,270	0,230
21/05/2019	59	0,299	0,304	0,275	0,270	0,230
22/05/2019	60	0,294	0,304	0,275	0,270	0,230
23/05/2019	61	0,290	0,303	0,276	0,270	0,230
24/05/2019	62	0,286	0,302	0,277	0,270	0,230
25/05/2019	63	0,285	0,301	0,277	0,270	0,230
26/05/2019	64	0,282	0,300	0,278	0,270	0,229
27/05/2019	65	0,278	0,300	0,278	0,270	0,229
28/05/2019	66	0,273	0,299	0,278	0,271	0,229
29/05/2019	67	0,269	0,298	0,279	0,271	0,229
30/05/2019	68	0,266	0,298	0,279	0,271	0,229
31/05/2019	69	0,260	0,297	0,279	0,271	0,229
01/06/2019	70	0,256	0,296	0,278	0,271	0,229
02/06/2019	71	0,251	0,296	0,278	0,271	0,229
03/06/2019	72	0,267	0,295	0,279	0,271	0,228
04/06/2019	73	0,287	0,294	0,279	0,271	0,227
05/06/2019	74	0,284	0,294	0,279	0,271	0,227
06/06/2019	75	0,281	0,294	0,278	0,271	0,227
07/06/2019	76	0,277	0,294	0,278	0,271	0,227

08/06/2019	77	0,273	0,293	0,278	0,271	0,227
09/06/2019	78	0,269	0,293	0,278	0,271	0,227
10/06/2019	79	0,266	0,292	0,278	0,271	0,227
11/06/2019	80	0,262	0,292	0,277	0,271	0,227
12/06/2019	81	0,258	0,292	0,277	0,271	0,227
13/06/2019	82	0,254	0,292	0,277	0,271	0,228
14/06/2019	83	0,249	0,291	0,277	0,271	0,228
15/06/2019	84	0,244	0,291	0,277	0,271	0,228
16/06/2019	85	0,240	0,290	0,277	0,270	0,228
17/06/2019	86	0,237	0,290	0,276	0,270	0,228
18/06/2019	87	0,235	0,290	0,276	0,270	0,227
19/06/2019	88	0,233	0,290	0,276	0,270	0,227
20/06/2019	89	0,231	0,289	0,276	0,270	0,227
21/06/2019	90	0,228	0,288	0,275	0,270	0,227
22/06/2019	91	0,227	0,288	0,275	0,270	0,227
23/06/2019	92	0,226	0,288	0,275	0,270	0,227
24/06/2019	93	0,226	0,288	0,275	0,270	0,226
25/06/2019	94	0,224	0,288	0,274	0,270	0,226
26/06/2019	95	0,223	0,287	0,274	0,270	0,226
27/06/2019	96	0,222	0,287	0,274	0,270	0,226
28/06/2019	97	0,221	0,287	0,274	0,269	0,226
29/06/2019	98	0,220	0,286	0,273	0,269	0,226
30/06/2019	99	0,218	0,286	0,273	0,269	0,226
01/07/2019	100	0,216	0,291	0,269	0,267	0,225
02/07/2019	101	0,216	0,292	0,268	0,266	0,225
03/07/2019	102	0,214	0,291	0,267	0,266	0,225
04/07/2019	103	0,214	0,291	0,267	0,266	0,225
05/07/2019	104	0,274	0,291	0,267	0,266	0,225
06/07/2019	105	0,305	0,290	0,267	0,266	0,225
07/07/2019	106	0,295	0,292	0,267	0,266	0,225
08/07/2019	107	0,291	0,295	0,266	0,266	0,225
09/07/2019	108	0,288	0,297	0,266	0,266	0,224
10/07/2019	109	0,284	0,297	0,266	0,266	0,224
11/07/2019	110	0,281	0,297	0,266	0,266	0,224
12/07/2019	111	0,278	0,297	0,266	0,266	0,224
13/07/2019	112	0,274	0,296	0,266	0,266	0,224
14/07/2019	113	0,272	0,296	0,266	0,266	0,224
15/07/2019	114	0,266	0,296	0,266	0,266	0,224
16/07/2019	115	0,262	0,295	0,265	0,266	0,224

17/07/2019	116	0,262	0,295	0,265	0,266	0,224
18/07/2019	117	0,260	0,295	0,264	0,266	0,224
19/07/2019	118	0,258	0,294	0,264	0,266	0,224
20/07/2019	119	0,254	0,294	0,264	0,266	0,224
21/07/2019	120	0,249	0,294	0,264	0,266	0,224
22/07/2019	121	0,245	0,294	0,264	0,266	0,224
23/07/2019	122	0,244	0,293	0,264	0,266	0,224
24/07/2019	123	0,240	0,293	0,264	0,266	0,225
25/07/2019	124	0,235	0,292	0,264	0,266	0,225
26/07/2019	125	0,232	0,292	0,264	0,265	0,225
27/07/2019	126	0,229	0,292	0,264	0,265	0,225
28/07/2019	127	0,226	0,291	0,264	0,265	0,224
29/07/2019	128	0,225	0,291	0,264	0,265	0,224
30/07/2019	129	0,223	0,290	0,263	0,265	0,224
31/07/2019	130	0,222	0,290	0,263	0,265	0,224
01/08/2019	131	0,220	0,290	0,263	0,265	0,224
02/08/2019	132	0,219	0,290	0,263	0,265	0,224
03/08/2019	133	0,218	0,290	0,263	0,265	0,224
04/08/2019	134	0,221	0,290	0,263	0,264	0,224
05/08/2019	135	0,269	0,290	0,262	0,264	0,224
06/08/2019	136	0,276	0,289	0,262	0,264	0,224
07/08/2019	137	0,273	0,288	0,263	0,264	0,224
08/08/2019	138	0,268	0,287	0,262	0,264	0,224
09/08/2019	139	0,262	0,287	0,262	0,264	0,224
10/08/2019	140	0,256	0,287	0,262	0,264	0,224
11/08/2019	141	0,249	0,287	0,262	0,264	0,224
12/08/2019	142	0,242	0,287	0,262	0,264	0,224
13/08/2019	143	0,235	0,287	0,262	0,264	0,224
14/08/2019	144	0,229	0,287	0,261	0,263	0,224
15/08/2019	145	0,224	0,287	0,261	0,263	0,224
16/08/2019	146	0,220	0,287	0,262	0,263	0,224
17/08/2019	147	0,218	0,286	0,262	0,263	0,224
18/08/2019	148	0,215	0,286	0,262	0,263	0,224
19/08/2019	149	0,213	0,286	0,262	0,263	0,224
20/08/2019	150	0,212	0,285	0,262	0,263	0,224
21/08/2019	151	0,211	0,285	0,262	0,263	0,223
22/08/2019	152	0,210	0,285	0,261	0,263	0,223
23/08/2019	153	0,208	0,285	0,261	0,263	0,223
24/08/2019	154	0,207	0,284	0,261	0,263	0,223

25/08/2019	155	0,206	0,284	0,260	0,263	0,223
26/08/2019	156	0,204	0,284	0,260	0,262	0,223
27/08/2019	157	0,203	0,284	0,260	0,262	0,223
28/08/2019	158	0,201	0,283	0,260	0,262	0,223
29/08/2019	159	0,200	0,283	0,260	0,262	0,223
30/08/2019	160	0,198	0,283	0,259	0,262	0,223
31/08/2019	161	0,197	0,283	0,259	0,262	0,223
01/09/2019	162	0,199	0,282	0,259	0,262	0,226
02/09/2019	163	0,242	0,281	0,259	0,262	0,226
03/09/2019	164	0,248	0,281	0,258	0,262	0,226
04/09/2019	165	0,246	0,281	0,258	0,262	0,226
05/09/2019	166	0,245	0,280	0,258	0,261	0,226
06/09/2019	167	0,243	0,280	0,258	0,261	0,226
07/09/2019	168	0,237	0,280	0,258	0,261	0,226
08/09/2019	169	0,230	0,280	0,257	0,261	0,226
09/09/2019	170	0,221	0,280	0,257	0,261	0,225
10/09/2019	171	0,211	0,279	0,257	0,261	0,225
11/09/2019	172	0,203	0,279	0,257	0,261	0,225
12/09/2019	173	0,197	0,278	0,257	0,261	0,225
13/09/2019	174	0,193	0,277	0,256	0,261	0,225
14/09/2019	175	0,191	0,277	0,256	0,261	0,225
15/09/2019	176	0,189	0,276	0,256	0,261	0,225
16/09/2019	177	0,187	0,276	0,255	0,261	0,225
17/09/2019	178	0,185	0,275	0,255	0,261	0,225
18/09/2019	179	0,182	0,274	0,254	0,261	0,225
19/09/2019	180	0,180	0,274	0,254	0,260	0,225
20/09/2019	181	0,179	0,273	0,253	0,260	0,225
21/09/2019	182	0,178	0,273	0,253	0,260	0,225
22/09/2019	183	0,177	0,272	0,253	0,260	0,225
23/09/2019	184	0,175	0,272	0,252	0,260	0,225
24/09/2019	185	0,175	0,271	0,251	0,260	0,225
25/09/2019	186	0,197	0,270	0,251	0,260	0,224
26/09/2019	187	0,294	0,270	0,251	0,260	0,223
27/09/2019	188	0,290	0,269	0,251	0,260	0,224
28/09/2019	189	0,283	0,269	0,250	0,259	0,223
29/09/2019	190	0,276	0,269	0,250	0,259	0,223
30/09/2019	191	0,269	0,269	0,250	0,259	0,223
01/10/2019	192	0,261	0,269	0,250	0,259	0,223
02/10/2019	193	0,252	0,269	0,250	0,259	0,223

03/10/2019	194	0,240	0,269	0,250	0,259	0,223
04/10/2019	195	0,229	0,268	0,250	0,259	0,223
05/10/2019	196	0,218	0,268	0,250	0,259	0,223
06/10/2019	197	0,208	0,268	0,250	0,259	0,223
07/10/2019	198	0,202	0,267	0,249	0,259	0,222
08/10/2019	199	0,198	0,267	0,249	0,259	0,222
09/10/2019	200	0,198	0,266	0,249	0,258	0,222
10/10/2019	201	0,196	0,266	0,248	0,258	0,222
11/10/2019	202	0,193	0,265	0,248	0,258	0,222
12/10/2019	203	0,189	0,265	0,248	0,258	0,221
13/10/2019	204	0,185	0,264	0,248	0,258	0,222
14/10/2019	205	0,180	0,261	0,248	0,258	0,222
15/10/2019	206	0,177	0,245	0,249	0,258	0,223
16/10/2019	207	0,175	0,245	0,248	0,258	0,222
17/10/2019	208	0,173	0,244	0,248	0,258	0,222
18/10/2019	209	0,171	0,244	0,247	0,258	0,222
19/10/2019	210	0,171	0,243	0,248	0,258	0,222
20/10/2019	211	0,174	0,242	0,247	0,258	0,222
21/10/2019	212	0,174	0,242	0,247	0,257	0,222
22/10/2019	213	0,181	0,240	0,246	0,257	0,221
23/10/2019	214	0,183	0,238	0,245	0,257	0,221
24/10/2019	215	0,181	0,237	0,245	0,257	0,221
25/10/2019	216	0,178	0,237	0,245	0,257	0,221
26/10/2019	217	0,174	0,236	0,244	0,257	0,221
27/10/2019	218	0,172	0,236	0,244	0,257	0,221
28/10/2019	219	0,195	0,235	0,242	0,257	0,221
29/10/2019	220	0,206	0,233	0,241	0,256	0,221
30/10/2019	221	0,245	0,232	0,242	0,256	0,221
31/10/2019	222	0,235	0,232	0,242	0,256	0,221
01/11/2019	223	0,227	0,231	0,241	0,256	0,221
02/11/2019	224	0,211	0,231	0,240	0,256	0,221
03/11/2019	225	0,193	0,231	0,240	0,256	0,221
04/11/2019	226	0,183	0,231	0,240	0,256	0,220
05/11/2019	227	0,178	0,231	0,239	0,256	0,220
06/11/2019	228	0,229	0,230	0,239	0,256	0,220
07/11/2019	229	0,237	0,228	0,238	0,256	0,220
08/11/2019	230	0,236	0,228	0,238	0,256	0,220
09/11/2019	231	0,234	0,227	0,238	0,255	0,220
10/11/2019	232	0,240	0,227	0,238	0,255	0,220

11/11/2019	233	0,249	0,226	0,238	0,255	0,219
12/11/2019	234	0,242	0,226	0,238	0,255	0,219
13/11/2019	235	0,231	0,226	0,237	0,255	0,219
14/11/2019	236	0,239	0,226	0,237	0,255	0,219
15/11/2019	237	0,294	0,226	0,237	0,255	0,219
16/11/2019	238	0,281	0,227	0,237	0,254	0,219
17/11/2019	239	0,269	0,227	0,237	0,254	0,218
18/11/2019	240	0,256	0,227	0,237	0,255	0,218
19/11/2019	241	0,241	0,227	0,236	0,255	0,218
20/11/2019	242	0,223	0,228	0,236	0,255	0,218
21/11/2019	243	0,217	0,228	0,236	0,254	0,218
22/11/2019	244	0,211	0,228	0,236	0,254	0,218
23/11/2019	245	0,287	0,228	0,236	0,255	0,219
24/11/2019	246	0,272	0,227	0,236	0,254	0,218
25/11/2019	247	0,263	0,227	0,236	0,254	0,218
26/11/2019	248	0,252	0,227	0,236	0,254	0,217
27/11/2019	249	0,236	0,228	0,236	0,254	0,217
28/11/2019	250	0,305	0,228	0,236	0,254	0,219
29/11/2019	251	0,284	0,228	0,236	0,254	0,217
30/11/2019	252	0,285	0,228	0,236	0,254	0,217
01/12/2019	253	0,302	0,229	0,236	0,254	0,218
02/12/2019	254	0,299	0,261	0,237	0,253	0,219
03/12/2019	255	0,290	0,285	0,237	0,252	0,218
04/12/2019	256	0,281	0,285	0,237	0,252	0,217
05/12/2019	257	0,303	0,285	0,237	0,253	0,217
06/12/2019	258	0,309	0,287	0,238	0,253	0,220
07/12/2019	259	0,299	0,294	0,238	0,252	0,219
08/12/2019	260	0,288	0,292	0,237	0,251	0,218
09/12/2019	261	0,278	0,289	0,237	0,251	0,217
10/12/2019	262	0,314	0,292	0,238	0,253	0,219
11/12/2019	263	0,311	0,299	0,239	0,253	0,220
12/12/2019	264	0,312	0,298	0,239	0,253	0,220
13/12/2019	265	0,300	0,297	0,238	0,252	0,218
14/12/2019	266	0,291	0,294	0,238	0,251	0,217
15/12/2019	267	0,283	0,292	0,238	0,251	0,217
16/12/2019	268	0,273	0,290	0,237	0,251	0,217
17/12/2019	269	0,260	0,288	0,238	0,251	0,217
18/12/2019	270	0,251	0,286	0,238	0,251	0,217
19/12/2019	271	0,254	0,285	0,238	0,251	0,217

20/12/2019	272	0,259	0,283	0,237	0,251	0,217
21/12/2019	273	0,259	0,282	0,237	0,251	0,216
22/12/2019	274	0,263	0,281	0,237	0,252	0,217
23/12/2019	275	0,322	0,281	0,238	0,252	0,218
24/12/2019	276	0,311	0,290	0,239	0,252	0,219
25/12/2019	277	0,295	0,297	0,239	0,252	0,218
26/12/2019	278	0,284	0,294	0,238	0,251	0,217
27/12/2019	279	0,274	0,292	0,238	0,251	0,217
28/12/2019	280	0,264	0,290	0,239	0,251	0,217
29/12/2019	281	0,253	0,289	0,239	0,251	0,217
30/12/2019	282	0,241	0,287	0,239	0,251	0,216
31/12/2019	283	0,230	0,286	0,240	0,251	0,216
01/01/2020	284	0,223	0,285	0,243	0,251	0,216
02/01/2020	285	0,224	0,285	0,248	0,251	0,216
03/01/2020	286	0,319	0,296	0,252	0,252	0,217
04/01/2020	287	0,311	0,297	0,255	0,252	0,218
05/01/2020	288	0,322	0,299	0,257	0,252	0,218
06/01/2020	289	0,316	0,301	0,259	0,253	0,217
07/01/2020	290	0,298	0,306	0,260	0,252	0,216
08/01/2020	291	0,323	0,305	0,262	0,253	0,217
09/01/2020	292	0,303	0,306	0,263	0,253	0,217
10/01/2020	293	0,333	0,304	0,265	0,253	0,217
11/01/2020	294	0,303	0,312	0,268	0,253	0,217
12/01/2020	295	0,293	0,309	0,272	0,253	0,216
13/01/2020	296	0,324	0,308	0,280	0,256	0,218
14/01/2020	297	0,306	0,313	0,284	0,256	0,218
15/01/2020	298	0,295	0,309	0,288	0,255	0,217
16/01/2020	299	0,284	0,306	0,289	0,262	0,216
17/01/2020	300	0,273	0,305	0,288	0,275	0,215
18/01/2020	301	0,266	0,303	0,286	0,280	0,215
19/01/2020	302	0,279	0,301	0,285	0,281	0,216
20/01/2020	303	0,316	0,299	0,285	0,281	0,219
21/01/2020	304	0,315	0,299	0,284	0,282	0,224
22/01/2020	305	0,298	0,305	0,282	0,280	0,229
23/01/2020	306	0,321	0,304	0,281	0,280	0,231
24/01/2020	307	0,324	0,305	0,282	0,280	0,233
25/01/2020	308	0,303	0,309	0,281	0,279	0,233
26/01/2020	309	0,291	0,308	0,282	0,278	0,233
27/01/2020	310	0,281	0,306	0,284	0,279	0,233

28/01/2020	311	0,270	0,305	0,284	0,280	0,233
29/01/2020	312	0,287	0,303	0,285	0,280	0,235
30/01/2020	313	0,304	0,301	0,285	0,281	0,237
31/01/2020	314	0,303	0,297	0,284	0,280	0,237
01/02/2020	315	0,299	0,300	0,282	0,280	0,237
02/02/2020	316	0,295	0,298	0,281	0,279	0,237
03/02/2020	317	0,313	0,295	0,280	0,279	0,237
04/02/2020	318	0,317	0,297	0,280	0,279	0,237
05/02/2020	319	0,311	0,297	0,279	0,278	0,237
06/02/2020	320	0,315	0,296	0,278	0,277	0,237
07/02/2020	321	0,319	0,294	0,277	0,277	0,236
08/02/2020	322	0,326	0,306	0,277	0,277	0,236
09/02/2020	323	0,310	0,305	0,276	0,276	0,235
10/02/2020	324	0,326	0,300	0,276	0,276	0,235
11/02/2020	325	0,337	0,303	0,279	0,277	0,236
12/02/2020	326	0,319	0,311	0,280	0,275	0,235
13/02/2020	327	0,311	0,308	0,284	0,276	0,234
14/02/2020	328	0,302	0,305	0,287	0,278	0,234
15/02/2020	329	0,292	0,303	0,288	0,281	0,235
16/02/2020	330	0,283	0,302	0,287	0,283	0,237
17/02/2020	331	0,270	0,301	0,286	0,283	0,239
18/02/2020	332	0,284	0,299	0,287	0,283	0,240
19/02/2020	333	0,296	0,298	0,286	0,281	0,240
20/02/2020	334	0,305	0,297	0,297	0,280	0,240
21/02/2020	335	0,328	0,296	0,290	0,280	0,240
22/02/2020	336	0,317	0,295		0,279	0,239
23/02/2020	337	0,306	0,296		0,279	0,239
24/02/2020	338	0,299	0,296		0,278	0,238
25/02/2020	339	0,292	0,296		0,277	0,238
26/02/2020	340	0,287	0,296		0,277	0,237
27/02/2020	341	0,334	0,293		0,277	0,237
28/02/2020	342	0,316	0,309		0,275	0,236
29/02/2020	343	0,309	0,307		0,275	0,236
01/03/2020	344	0,303	0,305		0,274	0,235
02/03/2020	345	0,295	0,303		0,274	0,234
03/03/2020	346	0,289	0,302		0,275	0,234
04/03/2020	347	0,282	0,301		0,275	0,234
05/03/2020	348	0,274	0,300		0,276	0,234
06/03/2020	349	0,265	0,300		0,277	0,234

07/03/2020	350	0,256	0,299		0,277	0,235
08/03/2020	351	0,248	0,298		0,277	0,235
09/03/2020	352	0,239	0,298		0,277	0,235
10/03/2020	353	0,234	0,297		0,276	0,235
11/03/2020	354	0,229	0,296		0,276	0,235
12/03/2020	355	0,225	0,295		0,275	0,235
13/03/2020	356	0,222	0,295		0,275	0,235
14/03/2020	357	0,220	0,294		0,275	0,235
15/03/2020	358	0,219	0,293		0,274	0,235
16/03/2020	359	0,229	0,293		0,274	0,234
17/03/2020	360	0,225	0,292		0,274	0,234
18/03/2020	361	0,223	0,291		0,273	0,233
19/03/2020	362	0,303	0,288		0,273	0,233
20/03/2020	363	0,293	0,290		0,272	0,232
21/03/2020	364	0,304	0,289		0,272	0,232
22/03/2020	365	0,303	0,292		0,271	0,232
23/03/2020	366	0,293	0,294		0,271	0,232

ANEXO II – Dados do monitoramento das condições atmosféricas

DATA	DIA	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)	Precipitação (mm)	Radiação Diária (W/m ²)	Umidade Relativa do Ar
24/03/2019	1	32,30	18,90	0,00	22,764	0,681
25/03/2019	2	33,00	20,90	0,00	22,020	0,649
26/03/2019	3	32,00	20,50	0,00	19,426	0,649
27/03/2019	4	32,20	20,50	0,00	18,292	0,697
28/03/2019	5	31,50	19,80	0,00	18,818	0,695
29/03/2019	6	30,40	18,30	0,00	21,458	0,694
30/03/2019	7	31,30	18,20	0,00	23,595	0,652
31/03/2019	8	32,30	18,50	0,00	23,264	0,642
01/04/2019	9	31,90	19,30	0,00	19,226	0,613
02/04/2019	10	32,70	19,30	0,00	22,154	0,644
03/04/2019	11	32,20	18,90	0,00	16,677	0,604
04/04/2019	12	34,20	19,50	0,00	20,403	0,611
05/04/2019	13	31,90	22,50	0,20	12,158	0,728
06/04/2019	14	33,60	22,00	31,40	18,184	0,734
07/04/2019	15	30,00	20,70	18,40	11,825	0,821
08/04/2019	16	25,50	19,70	36,00	5,096	0,892
09/04/2019	17	25,30	18,50	0,20	9,230	0,819
10/04/2019	18	29,00	17,50	0,00	19,697	0,768
11/04/2019	19	31,70	17,20	0,00	18,292	0,739
12/04/2019	20	32,50	18,60	0,00	18,358	0,698
13/04/2019	21	30,90	20,00	61,20	10,389	0,748
14/04/2019	22	23,90	19,40	38,40	4,957	0,897
15/04/2019	23	31,30	17,60	0,20	18,441	0,787
16/04/2019	24	30,00	21,10	0,00	14,782	0,780
17/04/2019	25	30,00	19,60	0,60	13,868	0,787
18/04/2019	26	29,70	15,90	0,00	21,584	0,666
19/04/2019	27	30,10	15,30	0,00	21,573	0,619
20/04/2019	28	31,30	16,20	0,00	20,607	0,619
21/04/2019	29	31,40	18,60	0,00	19,559	0,601
22/04/2019	30	32,30	19,20	0,00	19,241	0,612
23/04/2019	31	30,70	21,20	0,00	10,919	0,712
24/04/2019	32	33,20	18,90	0,00	17,047	0,750
25/04/2019	33	31,90	21,00	0,00	16,782	0,709
26/04/2019	34	31,80	20,90	0,00	17,957	0,686
27/04/2019	35	32,10	20,50	0,00	18,203	0,699
28/04/2019	36	32,00	19,90	22,00	15,330	0,745
29/04/2019	37	28,90	17,80	0,20	14,531	0,802
30/04/2019	38	30,00	15,80	0,00	19,177	0,690

01/05/2019	39	29,90	17,60	0,00	12,398	0,689
02/05/2019	40	29,60	20,90	0,00	9,600	0,685
03/05/2019	41	30,80	21,10	1,00	14,370	0,704
04/05/2019	42	30,70	18,80	22,20	11,168	0,785
05/05/2019	43	30,90	20,60	0,00	15,661	0,736
06/05/2019	44	31,30	20,30	0,00	15,341	0,738
07/05/2019	45	30,90	20,30	0,40	12,303	0,770
08/05/2019	46	28,70	18,30	0,00	15,062	0,761
09/05/2019	47	30,50	17,30	30,20	16,419	0,761
10/05/2019	48	29,70	19,40	0,00	12,949	0,804
11/05/2019	49	29,30	20,30	0,00	9,789	0,794
12/05/2019	50	31,20	19,90	0,00	14,930	0,769
13/05/2019	51	31,50	20,10	0,00	16,013	0,732
14/05/2019	52	27,40	18,10	0,00	13,303	0,795
15/05/2019	53	25,20	16,20	0,00	9,988	0,767
16/05/2019	54	25,50	16,20	0,00	10,375	0,760
17/05/2019	55	23,40	15,70	55,00	4,459	0,852
18/05/2019	56	25,30	15,70	0,60	11,655	0,829
19/05/2019	57	26,80	14,70	0,00	14,969	0,790
20/05/2019	58	27,00	13,80	0,20	17,651	0,761
21/05/2019	59	27,80	14,70	0,00	16,578	0,686
22/05/2019	60	29,20	13,30	0,00	17,067	0,654
23/05/2019	61	29,20	14,80	0,00	14,949	0,648
24/05/2019	62	23,90	14,10	0,00	4,021	0,793
25/05/2019	63	21,90	8,80	0,00	16,567	0,749
26/05/2019	64	25,80	8,80	0,00	17,613	0,688
27/05/2019	65	28,70	12,20	0,00	17,053	0,583
28/05/2019	66	30,50	16,20	0,00	14,354	0,642
29/05/2019	67	30,50	17,50	2,60	14,440	0,738
30/05/2019	68	31,60	19,50	0,00	15,764	0,689
31/05/2019	69	30,50	18,10	0,00	13,748	0,661
01/06/2019	70	30,50	16,20	0,00	15,280	0,706
02/06/2019	71	28,90	17,10	0,00	10,895	0,749
03/06/2019	72	21,40	16,80	15,00	3,067	0,865
04/06/2019	73	21,00	12,30	0,00	14,119	0,786
05/06/2019	74	21,70	9,40	0,40	16,961	0,703
06/06/2019	75	25,00	12,90	0,00	16,692	0,667
07/06/2019	76	26,30	13,20	0,00	16,428	0,664
08/06/2019	77	26,10	12,30	0,00	14,804	0,666

09/06/2019	78	24,80	13,90	0,00	16,311	0,662
10/06/2019	79	26,00	14,40	0,00	16,322	0,648
11/06/2019	80	27,10	16,00	0,00	15,350	0,633
12/06/2019	81	28,60	16,30	0,00	15,181	0,650
13/06/2019	82	29,70	18,50	0,00	14,491	0,650
14/06/2019	83	29,60	18,50	0,00	15,895	0,607
15/06/2019	84	28,90	16,00	0,00	15,817	0,585
16/06/2019	85	28,10	16,10	0,00	14,826	0,608
17/06/2019	86	26,40	16,50	0,00	12,116	0,626
18/06/2019	87	27,90	15,30	0,00	15,372	0,648
19/06/2019	88	28,30	14,90	0,00	11,136	0,676
20/06/2019	89	27,70	15,00	0,00	13,303	0,651
21/06/2019	90	26,30	16,80	0,00	14,398	0,674
22/06/2019	91	26,70	15,90	0,00	12,731	0,679
23/06/2019	92	27,00	13,50	0,20	14,033	0,662
24/06/2019	93	27,70	14,20	0,00	15,833	0,663
25/06/2019	94	29,70	14,10	0,00	13,797	0,610
26/06/2019	95	30,10	17,80	0,00	14,434	0,568
27/06/2019	96	27,30	17,70	0,00	11,292	0,670
28/06/2019	97	30,30	19,40	0,00	14,680	0,592
29/06/2019	98	29,80	16,70	0,00	15,483	0,620
30/06/2019	99	29,30	16,50	0,00	15,560	0,645
01/07/2019	100	30,20	15,50	0,00	14,478	0,632
02/07/2019	101	29,00	15,10	0,00	12,109	0,614
03/07/2019	102	30,20	16,60	0,00	13,405	0,568
04/07/2019	103	27,20	17,70	7,60	7,971	0,685
05/07/2019	104	20,30	11,80	42,80	4,232	0,894
06/07/2019	105	17,30	5,80	0,00	17,296	0,700
07/07/2019	106	20,00	3,90	0,00	17,375	0,643
08/07/2019	107	22,60	8,90	0,00	17,186	0,625
09/07/2019	108	25,30	12,80	0,00	17,034	0,565
10/07/2019	109	26,50	13,00	0,00	16,813	0,581
11/07/2019	110	26,30	12,20	0,00	16,595	0,584
12/07/2019	111	28,80	14,20	0,00	16,549	0,525
13/07/2019	112	29,90	14,50	0,00	15,670	0,543
14/07/2019	113	30,30	15,50	0,00	16,498	0,505
15/07/2019	114	31,00	17,20	0,00	14,738	0,510
16/07/2019	115	23,80	12,30	2,60	12,149	0,754
17/07/2019	116	22,10	8,50	0,00	16,501	0,606

18/07/2019	117	24,00	12,10	0,00	14,696	0,613
19/07/2019	118	25,10	13,30	0,00	14,090	0,614
20/07/2019	119	25,30	14,10	0,00	16,981	0,575
21/07/2019	120	26,70	14,20	0,00	14,960	0,604
22/07/2019	121	26,70	14,90	0,00	7,623	0,650
23/07/2019	122	28,50	16,00	0,00	16,941	0,623
24/07/2019	123	29,10	14,50	0,00	16,967	0,610
25/07/2019	124	29,10	16,30	0,00	14,079	0,547
26/07/2019	125	29,50	17,80	0,00	13,766	0,518
27/07/2019	126	28,80	16,50	0,00	15,804	0,523
28/07/2019	127	27,30	14,70	0,00	16,190	0,531
29/07/2019	128	28,30	15,50	0,00	11,281	0,598
30/07/2019	129	29,10	17,30	0,00	12,462	0,560
31/07/2019	130	28,90	14,90	0,00	16,664	0,573
01/08/2019	131	31,40	17,10	0,00	15,478	0,494
02/08/2019	132	33,00	17,70	0,20	14,764	0,476
03/08/2019	133	18,30	12,70	3,60	4,045	0,824
04/08/2019	134	13,00	11,20	12,60	892	0,877
05/08/2019	135	17,00	11,40	0,60	4,184	0,846
06/08/2019	136	24,80	14,40	0,00	11,360	0,737
07/08/2019	137	29,50	16,30	0,00	15,152	0,675
08/08/2019	138	31,20	17,70	0,00	17,921	0,569
09/08/2019	139	31,20	17,70	0,00	17,921	0,569
10/08/2019	140	32,40	17,80	0,00	17,646	0,503
11/08/2019	141	32,30	15,80	0,00	17,653	0,479
12/08/2019	142	33,00	20,30	0,00	17,234	0,476
13/08/2019	143	33,30	16,50	0,00	17,155	0,541
14/08/2019	144	25,00	12,10	0,00	15,615	0,704
15/08/2019	145	26,40	11,60	0,00	18,263	0,627
16/08/2019	146	27,90	14,40	0,00	18,948	0,537
17/08/2019	147	30,20	15,10	0,00	18,772	0,523
18/08/2019	148	32,40	17,30	0,00	15,866	0,480
19/08/2019	149	29,80	17,00	0,00	9,661	0,622
20/08/2019	150	28,40	15,60	0,00	13,497	0,718
21/08/2019	151	29,30	14,00	0,00	17,351	0,684
22/08/2019	152	27,70	12,90	0,00	19,276	0,647
23/08/2019	153	26,70	11,70	0,00	15,368	0,673
24/08/2019	154	27,30	11,20	0,00	20,024	0,600
25/08/2019	155	29,00	12,70	0,00	20,101	0,586

26/08/2019	156	31,40	15,60	0,00	19,479	0,526
27/08/2019	157	30,30	17,90	0,00	15,262	0,495
28/08/2019	158	29,00	16,30	0,00	14,057	0,570
29/08/2019	159	31,10	16,80	0,00	19,737	0,499
30/08/2019	160	33,20	18,60	0,00	19,252	0,483
31/08/2019	161	35,60	20,20	1,60	17,375	0,450
01/09/2019	162	31,00	17,50	13,20	12,997	0,751
02/09/2019	163	29,70	16,70	2,40	16,194	0,780
03/09/2019	164	26,40	19,60	1,00	5,021	0,772
04/09/2019	165	30,70	18,60	2,60	10,378	0,698
05/09/2019	166	29,30	16,00	0,00	17,882	0,725
06/09/2019	167	31,60	15,90	0,00	19,318	0,668
07/09/2019	168	33,30	18,80	0,00	21,096	0,629
08/09/2019	169	34,40	22,10	0,00	19,839	0,515
09/09/2019	170	34,80	21,70	0,00	21,539	0,463
10/09/2019	171	36,60	21,80	0,00	21,584	0,415
11/09/2019	172	37,70	24,10	0,00	21,140	0,381
12/09/2019	173	38,90	21,30	0,00	19,420	0,371
13/09/2019	174	36,60	20,20	0,00	20,925	0,504
14/09/2019	175	35,50	17,60	0,00	19,545	0,562
15/09/2019	176	36,20	22,20	0,00	20,570	0,474
16/09/2019	177	36,20	21,80	0,00	20,806	0,437
17/09/2019	178	37,30	22,20	0,00	21,833	0,384
18/09/2019	179	38,10	21,00	0,00	19,184	0,365
19/09/2019	180	37,40	21,10	0,00	13,273	0,411
20/09/2019	181	33,60	22,30	0,00	9,822	0,520
21/09/2019	182	34,40	19,70	0,00	16,430	0,646
22/09/2019	183	31,70	17,10	0,00	18,896	0,670
23/09/2019	184	29,00	14,70	0,00	22,932	0,606
24/09/2019	185	32,50	16,40	0,00	17,842	0,572
25/09/2019	186	22,30	17,60	34,60	1,166	0,871
26/09/2019	187	20,30	16,90	5,20	3,149	0,900
27/09/2019	188	27,90	14,10	0,20	22,370	0,714
28/09/2019	189	31,30	14,10	0,00	9,653	0,635
29/09/2019	190	31,80	15,50	0,00	10,342	0,557
30/09/2019	191	34,00	19,30	0,00	10,400	0,479
01/10/2019	192	35,70	20,50	0,00	10,034	0,478
02/10/2019	193	36,70	22,00	0,00	9,974	0,476
03/10/2019	194	35,60	20,80	0,00	10,602	0,419

04/10/2019	195	35,20	16,60	0,00	10,887	0,464
05/10/2019	196	36,00	21,50	0,00	10,472	0,416
06/10/2019	197	35,80	20,00	0,00	8,478	0,558
07/10/2019	198	31,40	18,00	0,00	7,192	0,691
08/10/2019	199	27,80	19,30	1,80	2,996	0,772
09/10/2019	200	28,30	18,70	1,20	4,039	0,786
10/10/2019	201	31,70	18,50	0,00	6,923	0,704
11/10/2019	202	34,20	19,40	0,00	9,247	0,602
12/10/2019	203	36,70	22,10	0,00	9,924	0,527
13/10/2019	204	38,00	21,80	0,00	9,542	0,483
14/10/2019	205	37,70	21,30	0,00	18,605	0,455
15/10/2019	206	33,80	20,50	0,00	13,621	0,617
16/10/2019	207	35,10	18,90	0,00	18,730	0,584
17/10/2019	208	36,30	20,70	0,00	19,935	0,532
18/10/2019	209	37,10	23,00	0,00	17,503	0,448
19/10/2019	210	35,50	19,30	5,20	19,301	0,631
20/10/2019	211	33,50	18,60	0,00	20,720	0,621
21/10/2019	212	25,50	15,10	8,00	6,634	0,775
22/10/2019	213	28,00	16,50	0,60	11,713	0,793
23/10/2019	214	32,50	17,90	0,00	19,849	0,631
24/10/2019	215	35,30	19,10	0,00	19,325	0,588
25/10/2019	216	37,60	20,30	0,00	22,405	0,487
26/10/2019	217	37,80	22,20	0,00	20,458	0,474
27/10/2019	218	36,90	21,50	5,80	18,292	0,526
28/10/2019	219	31,40	19,10	7,40	10,096	0,747
29/10/2019	220	34,80	19,00	11,40	17,800	0,681
30/10/2019	221	35,00	19,40	0,00	18,067	0,642
31/10/2019	222	33,60	20,30	0,00	17,325	0,617
01/11/2019	223	34,40	20,70	0,00	20,021	0,620
02/11/2019	224	34,40	20,50	0,00	20,781	0,586
03/11/2019	225	37,30	22,20	0,00	20,790	0,501
04/11/2019	226	37,80	22,30	0,00	19,155	0,508
05/11/2019	227	35,60	21,00	16,40	18,380	0,674
06/11/2019	228	29,90	20,00	6,00	11,136	0,765
07/11/2019	229	31,70	19,10	0,00	12,885	0,697
08/11/2019	230	28,10	19,90	0,00	8,912	0,782
09/11/2019	231	31,50	21,30	0,00	12,867	0,730
10/11/2019	232	25,10	20,20	11,40	4,310	0,835
11/11/2019	233	31,60	20,60	0,00	17,574	0,712

12/11/2019	234	30,80	19,80	0,00	14,227	0,660
13/11/2019	235	30,90	20,40	0,60	11,885	0,693
14/11/2019	236	29,70	19,60	26,60	12,263	0,809
15/11/2019	237	26,50	20,10	2,40	7,489	0,847
16/11/2019	238	30,10	17,80	0,00	13,958	0,647
17/11/2019	239	32,10	16,30	0,00	20,724	0,594
18/11/2019	240	34,40	17,40	0,00	19,215	0,641
19/11/2019	241	34,00	19,00	0,00	20,702	0,636
20/11/2019	242	32,70	19,30	5,40	12,301	0,730
21/11/2019	243	32,70	20,20	0,00	19,578	0,646
22/11/2019	244	34,10	19,40	13,40	14,059	0,702
23/11/2019	245	33,50	19,30	6,60	18,495	0,706
24/11/2019	246	25,50	17,80	0,00	10,313	0,754
25/11/2019	247	31,40	15,20	0,00	13,493	0,700
26/11/2019	248	34,10	20,60	0,00	17,349	0,657
27/11/2019	249	31,00	20,30	9,00	9,716	0,767
28/11/2019	250	29,20	19,30	11,60	12,235	0,809
29/11/2019	251	29,40	16,70	7,80	11,241	0,764
30/11/2019	252	30,60	21,30	5,20	10,344	0,820
01/12/2019	253	29,90	20,70	26,00	9,955	0,828
02/12/2019	254	30,20	19,10	3,20	12,107	0,755
03/12/2019	255	31,40	16,60	0,00	15,645	0,718
04/12/2019	256	32,10	21,60	15,20	12,098	0,762
05/12/2019	257	28,90	21,10	25,60	8,987	0,865
06/12/2019	258	29,10	20,40	2,60	8,831	0,836
07/12/2019	259	32,20	20,80	0,40	14,544	0,684
08/12/2019	260	32,70	20,60	0,00	15,284	0,635
09/12/2019	261	31,20	20,00	37,40	10,243	0,773
10/12/2019	262	28,40	21,30	5,60	6,832	0,843
11/12/2019	263	24,40	19,90	16,40	3,547	0,859
12/12/2019	264	28,70	18,70	0,00	10,591	0,809
13/12/2019	265	31,30	20,40	0,00	10,120	0,773
14/12/2019	266	31,60	21,50	0,00	12,252	0,750
15/12/2019	267	33,60	21,40	0,00	15,375	0,690
16/12/2019	268	34,00	22,30	0,00	14,387	0,615
17/12/2019	269	33,30	21,30	4,20	12,048	0,677
18/12/2019	270	27,50	19,30	10,20	7,745	0,807
19/12/2019	271	30,60	21,20	0,00	10,970	0,757
20/12/2019	272	29,50	21,30	0,80	10,776	0,766

21/12/2019	273	31,00	19,40	10,00	12,367	0,773
22/12/2019	274	27,20	19,10	5,80	8,240	0,854
23/12/2019	275	23,10	20,10	55,80	3,149	0,899
24/12/2019	276	31,50	18,30	0,20	15,577	0,721
25/12/2019	277	33,20	20,50	0,20	14,511	0,671
26/12/2019	278	34,50	21,90	3,00	11,957	0,641
27/12/2019	279	35,10	20,50	1,00	14,888	0,681
28/12/2019	280	35,00	21,90	0,00	14,698	0,649
29/12/2019	281	35,00	22,30	0,00	15,811	0,647
30/12/2019	282	34,30	21,20	0,00	16,011	0,653
31/12/2019	283	34,20	22,30	5,20	12,484	0,701
01/01/2020	284	33,50	20,40	8,20	11,146	0,765
02/01/2020	285	32,00	19,80	32,40	11,924	0,782
03/01/2020	286	28,40	19,60	9,40	8,710	0,834
04/01/2020	287	30,30	19,40	17,40	14,471	0,772
05/01/2020	288	31,40	19,10	22,80	13,491	0,818
06/01/2020	289	32,00	18,70	1,60	18,300	0,773
07/01/2020	290	33,00	20,70	25,40	16,485	0,774
08/01/2020	291	31,40	20,80	2,00	14,031	0,830
09/01/2020	292	31,50	21,00	37,00	9,225	0,841
10/01/2020	293	32,30	20,30	10,20	16,097	0,790
11/01/2020	294	32,30	21,70	0,20	14,696	0,778
12/01/2020	295	33,20	20,90	58,80	12,935	0,795
13/01/2020	296	29,80	20,70	3,80	9,351	0,835
14/01/2020	297	32,60	20,40	0,60	14,238	0,771
15/01/2020	298	35,20	20,10	0,00	21,161	0,675
16/01/2020	299	35,90	22,10	0,00	20,195	0,673
17/01/2020	300	29,00	20,80	0,00	9,102	0,768
18/01/2020	301	31,00	19,80	13,20	13,028	0,759
19/01/2020	302	31,80	20,00	13,40	14,751	0,780
20/01/2020	303	32,80	21,00	32,00	16,190	0,787
21/01/2020	304	32,80	18,10	0,00	17,814	0,729
22/01/2020	305	31,50	20,00	17,20	11,296	0,784
23/01/2020	306	23,80	19,90	34,00	4,572	0,881
24/01/2020	307	29,30	18,90	0,20	19,030	0,791
25/01/2020	308	30,20	16,80	0,00	21,773	0,691
26/01/2020	309	31,90	17,40	0,00	18,558	0,592
27/01/2020	310	33,60	17,70	0,00	22,233	0,559
28/01/2020	311	34,20	20,20	0,20	20,217	0,640

29/01/2020	312	30,10	20,50	21,00	14,257	0,792
30/01/2020	313	30,60	21,60	5,60	8,423	0,814
31/01/2020	314	29,80	20,70	0,20	11,202	0,798
01/02/2020	315	29,00	21,30	1,40	7,324	0,816
02/02/2020	316	30,70	20,70	12,60	10,267	0,813
03/02/2020	317	30,00	21,00	10,00	10,924	0,805
04/02/2020	318	30,70	20,90	5,00	13,239	0,806
05/02/2020	319	30,80	20,30	8,20	12,488	0,819
06/02/2020	320	29,70	20,80	1,20	11,305	0,817
07/02/2020	321	25,40	18,90	55,60	9,868	0,867
08/02/2020	322	29,70	19,80	0,20	16,879	0,766
09/02/2020	323	27,40	21,10	12,00	9,890	0,843
10/02/2020	324	23,50	21,00	37,60	3,477	0,899
11/02/2020	325	24,30	18,60	17,40	5,753	0,874
12/02/2020	326	25,20	18,10	0,20	5,870	0,841
13/02/2020	327	30,30	16,70	0,00	16,077	0,772
14/02/2020	328	32,80	18,40	0,00	20,665	0,726
15/02/2020	329	33,40	20,60	0,00	17,543	0,699
16/02/2020	330	34,70	20,90	0,00	22,253	0,695
17/02/2020	331	33,20	20,60	16,40	16,414	0,766
18/02/2020	332	33,30	20,80	2,80	19,360	0,789
19/02/2020	333	31,80	21,70	8,00	13,389	0,815
20/02/2020	334	33,30	21,50	13,60	14,072	0,807
21/02/2020	335	25,30	21,10	2,20	5,338	0,867
22/02/2020	336	30,80	19,90	0,40	15,145	0,793
23/02/2020	337	29,50	18,40	0,60	15,538	0,757
24/02/2020	338	29,10	21,00	5,00	9,073	0,811
25/02/2020	339	31,30	21,20	0,20	17,560	0,784
26/02/2020	340	28,90	20,70	54,40	5,942	0,875
27/02/2020	341	25,80	18,40	18,40	8,936	0,844
28/02/2020	342	23,50	18,00	1,60	4,543	0,853
29/02/2020	343	29,30	17,60	0,00	13,693	0,807
01/03/2020	344	28,50	19,50	0,80	16,456	0,786
02/03/2020	345	28,10	17,40	0,40	19,210	0,741
03/03/2020	346	29,10	17,40	0,80	19,081	0,754
04/03/2020	347	30,60	16,70	0,00	24,196	0,713
05/03/2020	348	31,10	17,50	0,00	26,746	0,645
06/03/2020	349	30,20	16,70	0,80	25,479	0,661
07/03/2020	350	30,90	15,00	0,20	22,657	0,667

08/03/2020	351	31,90	18,00	0,00	25,483	0,651
09/03/2020	352	32,00	19,40	0,20	18,754	0,682
10/03/2020	353	32,80	20,70	0,20	20,004	0,662
11/03/2020	354	33,20	21,40	0,00	25,031	0,647
12/03/2020	355	33,60	21,40	0,60	23,287	0,632
13/03/2020	356	34,20	20,90	0,00	21,740	0,648
14/03/2020	357	34,00	22,00	0,20	22,487	0,628
15/03/2020	358	33,90	20,80	9,80	18,734	0,680
16/03/2020	359	33,00	20,40	0,40	23,015	0,728
17/03/2020	360	32,70	21,50	0,00	18,560	0,723
18/03/2020	361	31,50	21,10	38,80	11,142	0,806
19/03/2020	362	29,30	20,40	1,20	8,934	0,798
20/03/2020	363	29,70	21,20	4,20	11,779	0,818
21/03/2020	364	28,10	20,70	14,60	9,954	0,820
22/03/2020	365	29,30	18,50	0,60	19,589	0,697
23/03/2020	366	30,40	17,80	0,00	20,909	0,699