



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Ana Cláudia de Mello Nascimento

Balanço hídrico de florestas e pastagens em diferentes solos na bacia hidrográfica do Bonfim – Região Serrana do estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2024

Ana Cláudia de Mello Nascimento

**Balanço hídrico de florestas e pastagens em diferentes solos na bacia hidrográfica
do Bonfim – Região Serrana do estado do Rio de Janeiro**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Jr

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

N244 Nascimento, Ana Cláudia de Mello.
Balanço hídrico de florestas e pastagens em diferentes solos na bacia hidrográfica do Bonfim – Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro / Ana Cláudia de Mello Nascimento. – 2024.
100 f.

Orientador: Wenceslau Geraldês Teixeira.
Coorientador: Alfredo Akira Ohnuma Junior.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Balanço hidrológico - Serrana, Região (RJ) - Teses. 3. Solo - Uso - Teses. 4. Cobertura dos solos - Teses. I. Teixeira, Wenceslau Geraldês. II. Ohnuma Junior, Alfredo Akira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 556.3

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

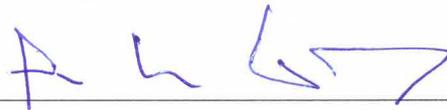
Ana Cláudia de Mello Nascimento

**Balanço hídrico de florestas e pastagens em diferentes solos na bacia hidrográfica do
Bonfim – Região Serrana do estado do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 24/04/2024

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira (Orientador)

Embrapa Solos



Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior (Coorientador)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ



Prof.ª Dra. Alena Torres Netto

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ



Dra. Alba Leonor da Silva Martins

Embrapa Solos

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, aos meus pais, Isabel Cristina e Manoel Antônio, ao meu querido sobrinho Emanuel, e ao meu parceiro de vida, Gustavo, por estarem sempre ao meu lado diante de todas as dificuldades.

Ao Professor Sérgio Aníbal Gonzalez Alonso, cuja inspiração foi o ponto de partida desta jornada. Aos meus orientadores, Prof. Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira e Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Jr., bem como a todos os professores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), pelo valioso conhecimento transmitido ao longo destes anos.

Expresso minha gratidão a todos os pesquisadores do Laboratório de Avaliação e Modelagem da Água no Solo (LAMAS) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), cujas experiências e conhecimentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Destaco especialmente o curso de modelagem oferecido pela UERJ, enriquecido pelas contribuições do Prof. Dr. Rien van Genuchten.

Agradeço ao Dr. Alexandre Ortega Gonçalves, da EMBRAPA, pela orientação e colaboração fornecidas com os dados meteorológicos, essenciais para esta pesquisa. A orientação da Dra. Aline Mari Huf dos Reis com as funções de pedotransferência, e a colaboração da Dra. Marta Vasconcelos Ottoni do Serviço Geológico do Brasil (SGB), e do Dr. Nelson F. Fernandes, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por compartilharem informações relevantes da área de estudo.

Por fim, sou grata à minha banca avaliadora pela disponibilidade e pelas contribuições que enriqueceram este trabalho.

RESUMO

NASCIMENTO, Ana Cláudia de Mello. *Balanço hídrico de florestas e pastagens em diferentes solos na bacia hidrográfica do Bonfim – Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro*. 2024. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O balanço hídrico (BH) contabiliza os volumes de entrada e saída de água em determinado intervalo de tempo, clima e sistemas de uso e cobertura da terra. Estimar esses volumes ajuda a avaliar a necessidade de implementar estratégias adequadas de gerenciamento dos recursos hídricos superficiais e subsuperficiais, permite obter conclusões estratégicas sobre o regime hidrológico e é uma das ferramentas mais importantes para o planejamento do uso da terra e dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Utilizar o BH para avaliar serviços ecossistêmicos ligados à água é fundamental para embasar decisões relacionadas a mudanças no uso da terra. A estimativa dos volumes de água dos componentes do balanço hídrico permite entender como a alteração do uso e cobertura da terra associado a um determinado solo pode modificar o ciclo hidrológico. O objetivo deste trabalho foi estimar os volumes de água dos principais componentes do BH considerando os diferentes uso e ocupação da terra (Pastagens e Florestas) e dos solos (Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico). O período de estudo foi 01/01/2000 a 31/12/2019. Foi utilizado o modelo HYDRUS-1D, na solução da equação de Richard, para estimar os volumes de água no BH. Funções de pedotransferência foram utilizadas para determinar os parâmetros físico hídricos da retenção e condução da água no solo. Consideraram-se condições de fronteira superior: dados de precipitação e evapotranspiração diários e condições de fronteira inferior: drenagem livre. A absorção da água pelas raízes foi considerada como o fator adicional na Equação de Richard (Sink factor). Os resultados obtidos foram semelhantes com resultados encontrados por outros autores; a precipitação pluvial média anual foi de 1462 mm e a evapotranspiração potencial de 1026 mm. Nas áreas com Cambissolo Háplico sob pastagem degradada, 83%, 7% e 9% do total precipitado foram percolados, transpirados e evaporados, respectivamente. Nas áreas sob Latossolo Vermelho sob floresta: esses valores foram de 35%, 58% e 7%. Na estação seca a evapotranspiração foi de 27% da precipitação anual média no Latossolo Vermelho sob floresta e de 11% no Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico sob pastagem. A percolação na estação seca foi 20% no Latossolo Vermelho sob pastagem e 9% no Latossolo Vermelho sob floresta. O escoamento superficial para um evento de chuva com intensidade igual a 25 mm h⁻¹ foi de 33% e 35% na pastagem e de 24% e 28% na floresta. As características do solo desempenham um papel fundamental nos cálculos do BH, afetando a percolação e evapotranspiração da água. Este estudo destaca a importância do BH na gestão dos recursos hídricos, fornecendo *insights* valiosos para a tomada de decisões. Além disso, a disponibilização dos dados resultantes deste estudo pode contribuir significativamente para futuras pesquisas e orientar a elaboração de políticas e planos diretores, especialmente no contexto de uso e cobertura do solo.

Palavras-chave: Evaporação; Transpiração; Precipitação; Uso e Cobertura do Solo.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Ana Cláudia de Mello. *Water balance of forests and pastures on different soils in the Bonfim watershed - Mountainous region of the state of Rio de Janeiro*. 2024. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The water balance (WB) accounts for the volumes of water entering and leaving a specific area over a given time period, climate, and land use and cover systems. Estimating these volumes helps evaluate the need to implement appropriate surface and subsurface water resource management strategies, allows for strategic conclusions about the hydrological regime, and is one of the most important tools for land and water resource use planning in a watershed. Using the WB to assess ecosystem services related to water is crucial for supporting decisions related to land use changes. Estimating the water volumes of the water balance components helps understand how changes in land use and cover associated with a particular soil type can alter the hydrological cycle. The objective of this study was to estimate the water volumes of the main WB components considering different land uses and cover (Pastures and Forests) and soils (Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho, and Neossolo Litólico). The study period was from 01/01/2000 to 31/12/2019. The HYDRUS-1D model, using Richard's equation, was applied to estimate the water volumes in the WB. Pedotransfer functions were used to determine the soil hydraulic parameters for water retention and conduction. Upper boundary conditions included daily precipitation and evapotranspiration data, while lower boundary conditions included free drainage. Water uptake by roots was considered as an additional factor in Richard's equation (Sink factor). The results obtained were similar to those found by other authors; the average annual rainfall was 1462 mm, and the potential evapotranspiration was 1026 mm. In areas with Cambissolo Háplico under degraded pasture, 83%, 7%, and 9% of the total rainfall were percolated, transpired, and evaporated, respectively. In areas with Latossolo Vermelho under forest: these values were 35%, 58%, and 7%. During the dry season, evapotranspiration was 27% of the annual average precipitation in Latossolo Vermelho under forest and 11% in Cambissolo Háplico and Neossolo Litólico under pasture. Dry season percolation was 20% in Latossolo Vermelho under pasture and 9% in Latossolo Vermelho under forest. Surface runoff for a rain event with an intensity of 25 mm h⁻¹ was 33% and 35% in pasture and 24% and 28% in forest. Soil characteristics play a fundamental role in WB calculations, affecting water percolation and evapotranspiration. This study highlights the importance of WB in water resource management, providing valuable insights for decision-making. Additionally, the data from this study can significantly contribute to future research and guide the development of policies and master plans, especially in the context of land use and cover.

Keywords: Evaporation; Transpiration; Precipitation; Land Use and Cover.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do município Petrópolis-RJ em relação ao Brasil e estado do Rio de Janeiro, e divisão dos distritos no município.....	17
Figura 2 – Mapa de relevo do município Petrópolis-RJ	18
Figura 3 – Mapa sinótico de solos do município Petrópolis-RJ.....	19
Figura 4 – Mapa de precipitação média anual do município Petrópolis-RJ	20
Figura 5 – Episódios de alagamentos no município Petrópolis-RJ	22
Figura 6 – Dados de precipitação sem inconsistências.....	31
Figura 7 – Potenciais de água no solo, no sistema radicular, na folha e na atmosfera...	32
Figura 8 – Coeficiente da cultura para diferentes culturas	34
Figura 9 – Curva de retenção	41
Figura 10 – Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica	46
Figura 11 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Bonfim e estações pluviométricas – Petrópolis-RJ.....	53
Figura 12 – Registros fotográficos da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	54
Figura 13 – Divisão do curso da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ.	54
Figura 14 - Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	55
Figura 15 – Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	57
Figura 16 – Fluxograma das simulações no HYDRUS-1D	63
Figura 17 – Fluxograma das simulações considerando a cobertura do solo sob pastagens no HYDRUS-1D.....	65
Figura 18 – Fluxograma das simulações considerando a cobertura do solo sob florestas no HYDRUS-1D.....	66
Figura 19 – Operadoras responsáveis pelas estações pluviométricas em operação no município de Petrópolis-RJ, segundo o portal da <i>HidroWeb</i> da ANA no ano de 2021..	69
Figura 20 – Operadoras com dados de precipitação pluvial atualizados no município de Petrópolis-RJ, no ano de 2023.....	70

Figura 21 – Precipitação pluvial anual entre 2000 e 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ	71
Figura 22 – Média mensal de precipitação pluvial entre 2000 e 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ	72
Figura 23 - Evapotranspiração potencial (ET _o) anual entre os anos de 2000 e 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ	72
Figura 24 – Média mensal de evapotranspiração potencial durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ	73
Figura 25 – Percentuais de percolação, transpiração e evaporação para pastagens e florestas em todas as estações - Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ.....	77
Figura 26 – Percentuais de percolação, transpiração e evaporação para pastagens e florestas na estação chuvosa (outubro a março) e seca (abril a setembro) – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ.....	78
Figura 27 – escoamento superficial em função do tempo sob pastagens do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	83
Figura 28 – escoamento superficial em função do tempo sob florestas do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do Rio Bonfim, Petrópolis-RJ	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos grupos hidrológicos para aplicação do método SCS.	37
Tabela 2 – Valores do parâmetro CN para bacias rurais na condição II de umidade antecedente do solo	37
Tabela 3 – Valores do parâmetro CN para bacias urbanas na condição II de umidade antecedente do solo	38
Tabela 4 – Funções PTFs para estimativas de densidade do solo	49
Tabela 5 – Coeficientes e expoentes ajustados para os dois modelos de PTF	50
Tabela 6 – Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	55
Tabela 7 – Resumo dos tipos de solo na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	56
Tabela 8 – Características físicas dos perfis de solos da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ, para as simulações no HYDRUS-1D	58
Tabela 9 – Informações referente as estações pluviométricas com dados utilizados na série histórica.....	61
Tabela 10 – Eventos de precipitação pluvial acima de 20 mm h^{-1} no período de 01/10/2011 a 23/12/2014 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ.....	67
Tabela 11 – Parâmetros da equação de van Genuchten estimados via PTF de Medrado e Lima (2014) para Cambissolo Háptico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ	74
Tabela 12 – Volumes mensais dos componentes do balanço hídrico (BH) de 2000 a 2019 para pastagens – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ.....	75
Tabela 13 – Volumes mensais de 2000 a 2019 dos componentes do balanço hídrico para florestas – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	76
Tabela 14 – Evento de precipitação pluvial em 06 de janeiro de 2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis - RJ.....	82

Tabela 15 – Acumulado de precipitação pluvial e escoamento superficial sob pastagens do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis – RJ	82
Tabela 16 – Acumulado de precipitação pluvial e escoamento superficial sob florestas do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis – RJ	84
Tabela 17 – Informações referentes as estações pluviométricas com dados disponíveis até o ano 2023 no município Petrópolis-RJ	97
Tabela 18 – Precipitação pluvial mensal e anual durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	99
Tabela 19 – Evapotranspiração potencial mensal e anual durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMC	<i>Antecedent Moisture Condition</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APA	Área de Proteção Ambiental
BH	Balanco Hídrico
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CN	Curva número
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LAMAS	Laboratório de Avaliação e Modelagem da Água no Solo
PMP	Ponto de Murcha Permanente
POWER	<i>Prediction of Worldwide Energy Resources</i>
PTF	Pedotransfer Function
RH	Região Hidrográfica
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIM	Simulações
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
VGM	van Genuchten – Mualem

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1 OBJETIVOS.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Município de Petrópolis – RJ.....	17
2.2 Precipitação.....	23
2.2.1 Determinação da precipitação pluvial média	25
2.2.1.1 Média aritmética.....	25
2.2.1.2 Método dos polígonos de Thiessen	26
2.2.1.3 Método das isoietas.....	27
2.2.2 Equação Intensidade Duração Frequência (IDF) do município Petrópolis, RJ..	27
2.2.3 Preenchimento de falhas e análise de dados pluviométricos.....	28
2.2.3.1 Método de ponderação regional	29
2.2.3.2 Método da regressão linear	30
2.2.3.3 Método Dupla-massa	31
2.3 Evapotranspiração	32
2.3.1 Evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura.....	33
2.4 Estimativa do Escoamento superficial pelo Método SCS-CN	35
2.5 Água no solo	39
2.5.1 Umidade volumétrica da água no solo (θ).....	39
2.5.2 Potenciais da água no solo (h).....	40
2.5.2.1 Retenção da água no solo.....	40
2.5.3 Equação de van Genuchten para descrição da retenção de água no solo.....	41
2.5.4 Movimento da água no solo	42
2.5.4.1 Equação de van Genuchten-Mualem para condutividade hidráulica	42
2.5.4.2 A Equação de Richards.....	42
2.5.4.3 Conceito de Capacidade de campo (θ_{cc}).....	44
2.5.4.4 Conceito de Ponto de Murcha Permanente (PMP).....	44
2.6 Estimativa do Balanço Hídrico	44

2.6.1	Cálculo dos componentes do Balanço Hídrico utilizando o HYDRUS 1-D.....	46
2.7	Funções de pedotransferência (PTF) para estimativas das propriedades hidráulicas do solo	47
2.7.1	PTFs para estimativa da densidade do solo.....	48
2.7.2	A PTF de Medrado e Lima (2014) para estimativas dos coeficientes da equação de van Genuchten.....	49
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.1	Área de estudo.....	52
3.2	Classes de solos predominantes e parâmetros físico-hídricos do solo	56
3.3	Série histórica de precipitação e evapotranspiração para Petrópolis–RJ... 60	
3.3.1	Precipitação pluvial.....	60
3.3.2	Evapotranspiração potencial (ET _o)	62
3.4	Simulações do Balanço Hídrico no Programa HYDRUS-1D.....	62
3.5	Escoamento superficial	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	Disponibilidade de dados de meteorológicos	68
4.2	Precipitação pluvial e evapotranspiração potencial (ET_o)	70
4.3	Parametrização das propriedades hidráulicas do solo	73
4.4	Estimativas dos componentes do balanço hídrico em pastagens e florestas	74
4.5	Estimativas do escoamento superficial.....	82
	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE A.....	97

INTRODUÇÃO

A água é um recurso imprescindível e com o crescimento urbano é essencial os investimentos e incentivos na gestão sustentável dos recursos hídricos (TUGOZ; BERTOLINI; BRANDALISE, 2017).

Em razão ao aumento da urbanização, densidade demográfica e expansão industrial, a demanda de recursos hídricos disponíveis vem crescendo e muitas vezes acaba comprometendo diretamente a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. O Balanço Hídrico (BH) corresponde à contabilização dos volumes de entrada e saída de água num volume de solo em determinado clima, em sistemas de uso e cobertura do solo em um determinado intervalo de tempo (SOUZA et al., 2015).

As estimativas dos volumes de águas nos diferentes componentes de um BH em uma bacia hidrográfica contribuem para averiguar a necessidade de implementar estratégias adequadas de gerenciamento dos recursos hídricos superficiais e subsuperficiais (ENGELBRECHT et al., 2019).

O conhecimento detalhado do BH proporciona obter conclusões importantes sobre o regime hidrológico e as possibilidades de utilização dos recursos hídricos (FILL et al., 2005). O uso e ocupação inadequado do solo, as queimadas, a compactação do solo, poluição, e outras ações, acabam interferindo diretamente no ciclo hidrológico. O BH é uma das ferramentas mais eficazes para compreender a complexidade dos recursos hídricos associados ao clima e o perfil físico local (ALBUQUERQUE et al., 2019). Compreender o BH também pode proporcionar um melhor planejamento agrícola, garantindo melhor desenvolvimento da cultura, produtividade e a segurança hídrica (VILLA et al., 2022), assim como práticas de drenagem e irrigação. A partir da determinação dos meses críticos (déficits hídricos) é possível colaborar com o planejamento das atividades agrícolas (SILVA JUNIOR et al., 2018).

Segundo VILLA et al., (2022) são de grande relevância os estudos de BH com o máximo de variáveis de entrada e que contenham séries históricas longas, em conjunto com coeficiente de cultura para estimativas de evapotranspiração calibrados.

Todos os elementos do BH estão inter-relacionados. A precipitação exerce uma influência direta na transpiração, evapotranspiração e interceptação. Por exemplo, com a diminuição nos índices pluviométricos, todos os outros componentes seguem a mesma tendência. No entanto, dentre todos, a transpiração é a que menos sofre queda, enquanto a interceptação no ciclo hidrológico representa uma parcela muito pequena no BH, independentemente da quantidade de precipitação (MARTINHAGO et al., 2021).

Segundo CARVALHO-SANTOS et al., (2016) os efeitos combinados das mudanças climáticas e alterações da cobertura do solo podem melhorar ou degradar a prestação de serviços hidrológicos. A utilização do particionamento do BH para avaliar os serviços ecossistêmicos ligados à água é essencial para embasar decisões amplas relacionadas a mudanças no uso da terra (CASAGRANDE et al., 2021).

CASAGRANDE et al., (2021) destaca que as florestas enfrentam ameaças significativas devido à alteração no uso da terra, especialmente pelo desmatamento, e que as análises convencionais têm se concentrado nos benefícios diretos para os seres humanos, considerando as florestas como consumidoras de água devido à interceptação e transpiração, mas, no entanto, a contribuição das florestas como provedoras de água, por meio da transpiração das copas das árvores, é frequentemente desconsiderada.

Há uma escassez de pesquisas sobre o impacto das mudanças no uso da terra nos recursos hídricos das bacias e microbacias hidrográficas da Mata Atlântica (RODRIGUES et al., 2021) e compreender o BH nessas regiões é uma necessidade prioritária (GUAUQUE-MELLADO et al., 2022; RODRIGUES et al., 2021). Tal compreensão é essencial para enfrentar os desafios do clima seco e deve ser considerada nas decisões relacionadas à preservação ou regeneração de áreas dentro desse bioma (GUAUQUE-MELLADO et al., 2022). O software HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013) é um modelo de elementos finitos para simulação unidimensional dos movimentos de água, calor e múltiplos solutos em meios de saturação variada. O pacote computacional soluciona matematicamente a equação de Richards para o fluxo de águas na zona saturada e insaturada, e equações do tipo convecção-dispersão para transporte de soluto e calor (ŠIMŮNEK et al., 2016). O modelo HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013) é capaz de descrever a dinâmica do conteúdo de água do solo e fracionar a evaporação total em seus componentes independentes (CASAGRANDE et al., 2021) e simular o volume de água

absorvido pelas plantas acoplando as informações da disponibilidade de água no solo, com a demanda evaporativa da atmosfera com parâmetros fisiológicos e da capacidade de determinadas espécies de planta absorver água do solo, por exemplo, com o uso do modelo de Feddes (FEDDES; ZARADNY, 1978).

Para que os cálculos dos fluxos de água possam ser realizados, pela solução da equação de Richard, as propriedades hidráulicas de retenção e condutividade da água devem ser fornecidas para cada camada de solo considerada, comumente se utiliza a equação de VAN GENUCHTEN (1980).

Diante do exposto, a estimativa dos volumes de água dos componentes do balanço hídrico é uma ferramenta de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, sendo primordial entender como a alteração do uso e cobertura do solo associado a uma determinada classe de solo pode modificar o ciclo hidrológico.

1 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Estimar os principais componentes do balanço hídrico com o uso de modelagem matemática considerando diferentes classes do solo com distintos usos e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Bonfim – região serrana do Rio de Janeiro.

Objetivos Específicos

- Publicar dados de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial com série histórica, com preenchimento de falhas de dados diários, numa série de 20 anos para a área de estudo;
- Estimar via funções de pedotransferência as propriedades físico-hídricas das classes de solo mais frequentes na bacia hidrográfica do Rio Bonfim, em Petrópolis-RJ;
- Contabilizar o fluxo de água utilizando o modelo de simulação HYDRUS-1D para estimativas dos volumes de água evaporado, transpirado e percolado;
- Estimar o escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Bonfim, utilizando a fórmula do método SCS-CN.

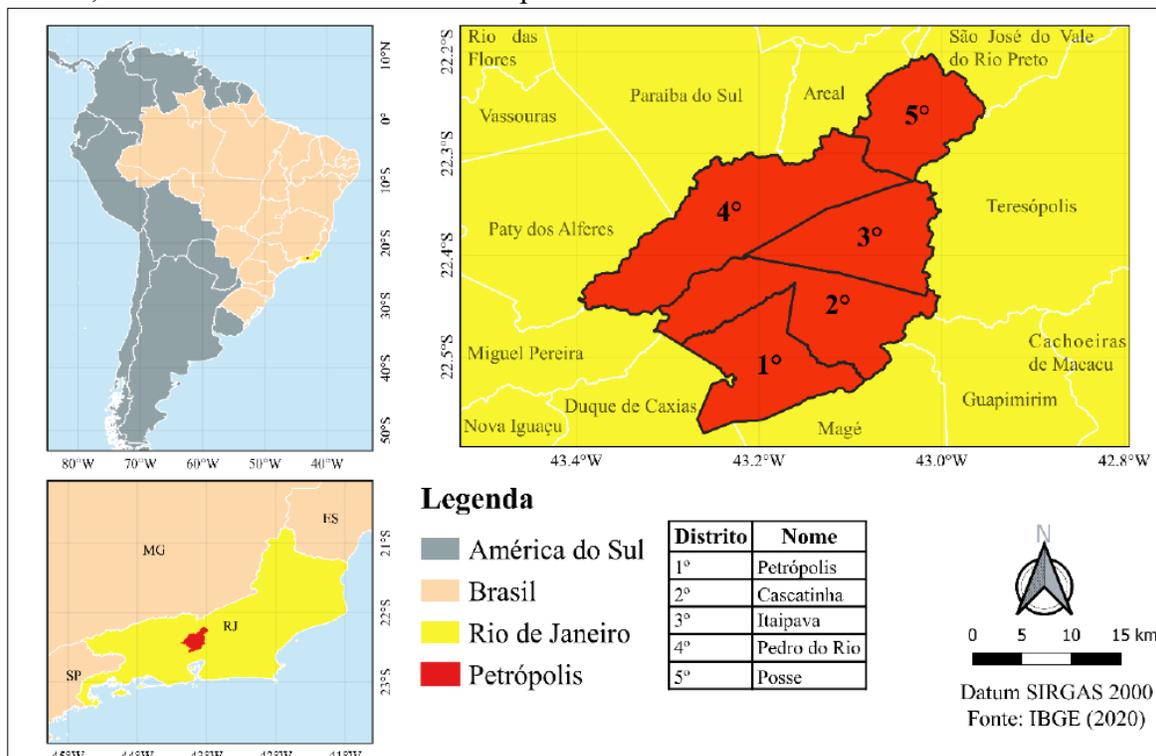
O Capítulo 1 oferece uma concisa revisão do histórico do município de Petrópolis e a base teórica essencial para a aplicação da metodologia proposta. No Capítulo 2, são detalhados os procedimentos para a obtenção dos dados de entrada e as equações fundamentais necessárias para a modelagem. O Capítulo 3 aborda os resultados obtidos e suas respectivas discussões, enquanto o Capítulo 4 apresenta as conclusões derivadas do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Município de Petrópolis – RJ

O município de Petrópolis, localizado na mesorregião metropolitana do Rio de Janeiro e na microrregião Serrana, abrange uma área de 791,144 km², com uma população de 278.881 habitantes, sua densidade demográfica é de 352,50 hab km⁻² (IBGE, 2022). O município está dividido em 5 (cinco) distritos, sendo: (1) Petrópolis (sede), (2) Cascatinha, (3) Itaipava, (4) Pedro do Rio e (5) Posse (Figura 2) (Figura 1).

Figura 1 – Localização do município Petrópolis-RJ em relação ao Brasil e estado do Rio de Janeiro, e divisão dos distritos no município.

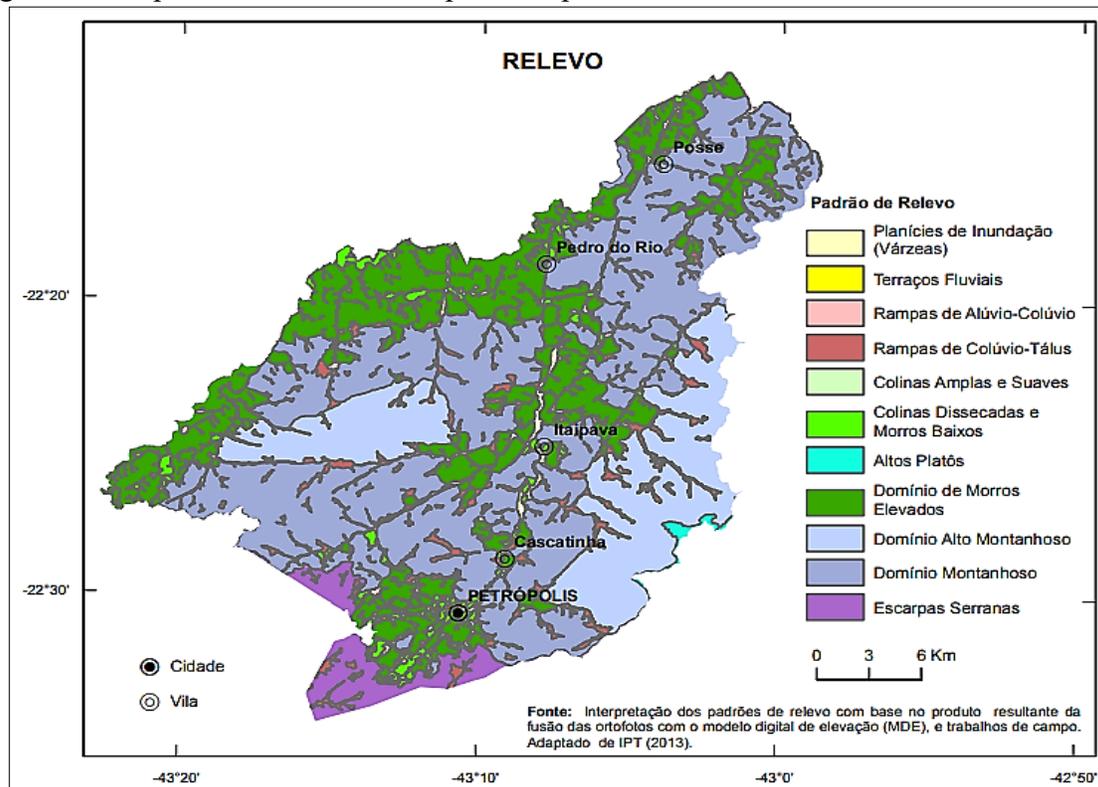


Fonte: ODA, 2022

Segundo CAMARGO et al., (2019) 78% das áreas do município de Petrópolis apresentam relevo montanhoso ou escarpado. O relevo predominante do primeiro distrito de Petrópolis consiste em escarpas serranas e morros elevados. Nos outros distritos do

município, prevalecem terrenos montanhosos e morros elevados, como indicado pelo mapa de interpretação dos padrões de relevo de Petrópolis (Figura 2).

Figura 2 – Mapa de relevo do município Petrópolis-RJ

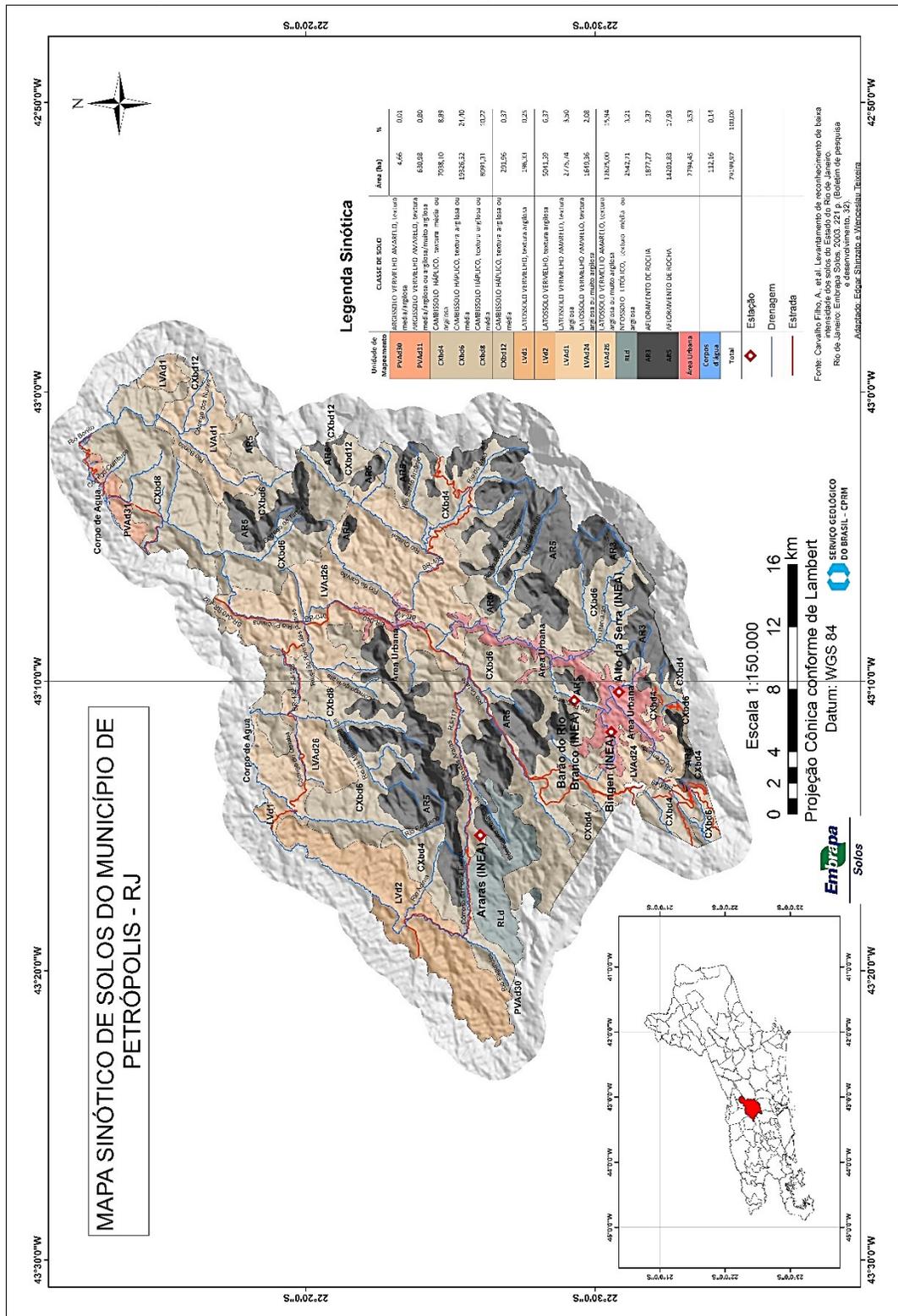


Fonte: ADAMY; HOLANDA, 2016

O município de Petrópolis é caracterizado principalmente pela presença de Cambissolos Háplicos, com textura argilosa ou média, abrangendo aproximadamente 40% de sua área, conforme observado nas unidades de mapeamento de CARVALHO FILHO et al., (2003) (Figura 3).

Segundo NASCIMENTO et al., (2021), em Petrópolis, cerca de 20% da área do município é composta por afloramentos rochosos, totalizando aproximadamente 16.000 hectares. Os corpos d'água ocupam cerca de 112 hectares, enquanto as áreas urbanas, incluindo estradas pavimentadas, somam cerca de 280 hectares.

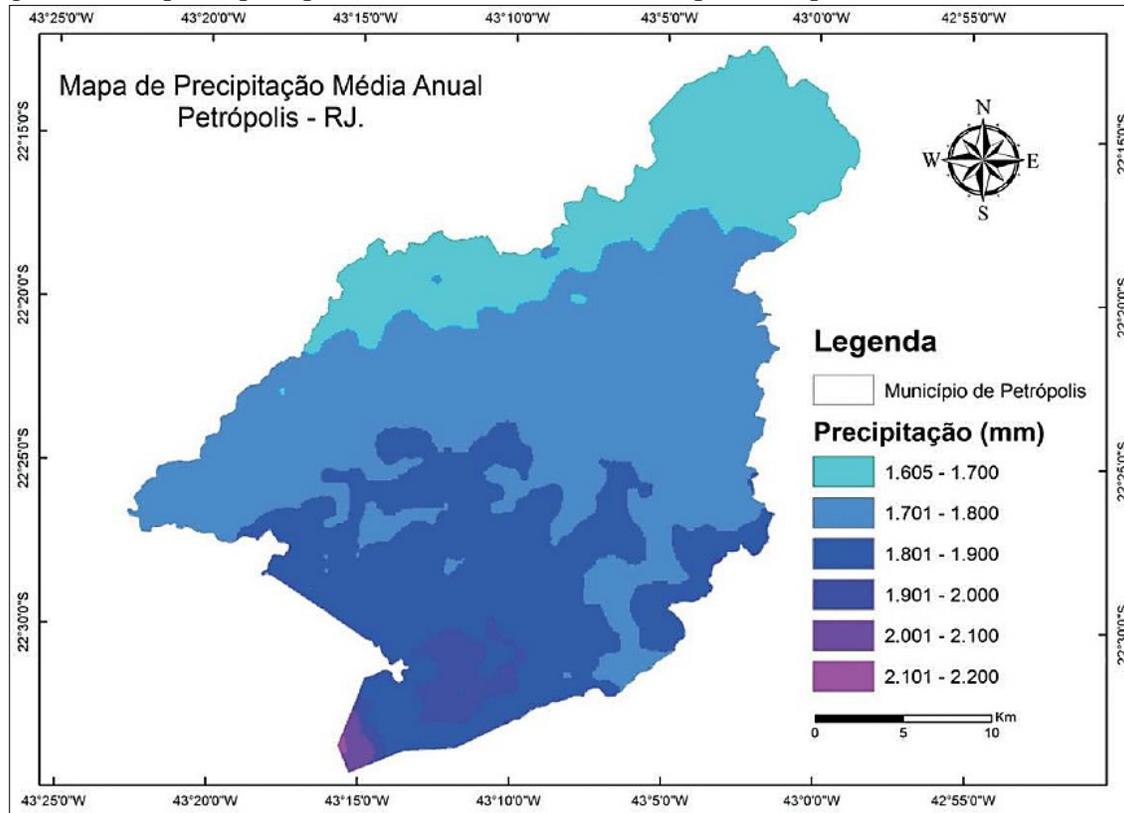
Figura 3 – Mapa sinótico de solos do município Petrópolis-RJ



Fonte: NASCIMENTO et al. 2021 adaptado de CARVALHO FILHO et al. 2003

A altitude média do município é de 845 m (PETRÓPOLIS, 2014). As precipitações médias anuais distribuídas ao longo do município variam de 1208 mm a 2.200 mm (ARAUJO, 2018; NASCIMENTO et al., 2021; PETRÓPOLIS, 2013). O mapa de precipitações das médias anuais do município mostra a variabilidade de chuva ao longo do seu território (Figura 4).

Figura 4 – Mapa de precipitação média anual do município Petrópolis-RJ



Fonte: CAMARGO et al. 2019

Petrópolis, conhecida como Cidade Imperial, foi estabelecida em 16 de março de 1843 por um decreto de Dom Pedro II. Seu plano urbanístico, conhecido como plano Köeler, foi concebido em 1846, inspirado tanto na geografia do primeiro distrito (Petrópolis) quanto no planejamento de algumas cidades alemãs. Esse plano incluía diretrizes detalhadas para o desenvolvimento urbano, como padrões para construções, dimensionamento de lotes, arborização de praças e ruas, pavimentação de calçadas e a canalização de rios, com o propósito de prevenir alagamentos e enchentes (GUERRA et al., 2024; PETRÓPOLIS, 2014).

Inicialmente, o plano também previa a preservação da cobertura vegetal nas partes mais elevadas das montanhas e colinas para conservar os recursos hídricos e prevenir deslizamentos de terra. No entanto, a partir da década de 1970, com o aumento da demanda imobiliária e a perda de consciência ambiental, os princípios do plano Köeler foram negligenciados, resultando em uma ocupação desordenada em todos os distritos do município (PETRÓPOLIS, 2014).

Segundo GUERRA; LOPES; SANTOS FILHO, (2007) o crescimento urbano desordenado tem afetado significativamente a paisagem natural da Área de Proteção Ambiental de Petrópolis (APA Petrópolis), principalmente nos 1º, 2º e 3º distritos do município. Desde a criação da APA Petrópolis em 1982, observa-se um aumento do desmatamento e da ocupação irregular de áreas antes cobertas pela Mata Atlântica.

DRACH et al., (2020) observaram que, com a expansão do município, houve uma redução das áreas de vegetação e um aumento da ocupação em regiões montanhosas. No entanto, no Centro Histórico (1º distrito), os autores notaram poucas alterações na vegetação e nos rios, devido à sua configuração e preservação, bem como às restrições legais que impedem a demolição das construções existentes.

O município de Petrópolis é suscetível a desastres naturais (PETRÓPOLIS, 2014) e constantemente é afetado por desastres naturais, especialmente deslizamentos, alagamentos e inundações, resultado de eventos meteorológicos associados às características específicas do relevo da Região Serrana (PETRUNGARO TORRES; RODRIGUES DO CARMO; PINTO DE ALMEIDA PALMEIRA, 2020). Esses eventos são agravados por fatores como ocupações irregulares, estradas não pavimentadas, desmatamento e falta de vegetação, que contribuem para a ocorrência de deslizamentos de terra e inundações na cidade ao longo das últimas décadas (GUERRA et al., 2024).

Uma análise da extensão da urbanização dentro das bacias hidrográficas de Petrópolis revela que a Bacia do Quitandinha apresenta a maior área construída quando comparada com a Bacia do Piabanha, tornando-a mais propensa a inundações devido ao aumento do escoamento e fluxo mais rápido (FERNANDES et al., 2022). No entanto, mesmo em áreas menos suscetíveis, como a Bacia do Piabanha, a crescente concentração urbana ao longo das margens do rio Piabanha eleva os riscos de inundações (SOUZA et al., 2021).

O rio Quitandinha desempenha um papel crucial como escoadouro e sistema de drenagem em Petrópolis, atravessando uma área altamente urbanizada em seu percurso até o centro da cidade, principalmente ao longo da Rua Coronel Veiga, uma via importante com diversas pontes e travessias. Entretanto, sua capacidade de escoamento é severamente reduzida em certos trechos, o que o torna vulnerável a transbordamentos durante períodos de chuvas intensas (SECRETARIA MUNICIPAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL, 2022). Como resultado, ruas como Coronel Veiga, Washington Luís, Caldas Viana e do Imperador são frequentemente alagadas durante eventos de chuvas extremas, como evidenciado pela Figura 5 (NASCIMENTO et al., 2021).

Figura 5 – Episódios de alagamentos no município Petrópolis-RJ



Legenda: (a) Rua Coronel Veiga, matéria publicada no G1 em 2020; (b) Rua Washington Luís, matéria publicada no G1 em 2019; (c) Rua Caldas Viana, matéria publicada no G1 em 2018; (d) Rua do Imperador, matéria publicada no G1 em 2017; (e) Rua Coronel Veiga, matéria publicada no G1 em 2013 e (f) Itaipava, matéria publicada no G1 em 2011.

Fonte: NASCIMENTO et al; 2021.

Essas situações de alagamentos e deslizamentos são agravadas por eventos extremos, como os ocorridos em 1988 e 2022, quando chuvas intensas causaram uma alta incidência de mortes na região (GUERRA et al., 2024; FARDIN et al., 2023).

O evento de 15 de fevereiro de 2022 registrou chuva total acima de 200 mm em poucas horas e mais de 233 mortes (GUERRA et al., 2024). Em março de 2024, mais de 527 deslizamentos foram registrados em Petrópolis, como resultado das fortes chuvas que

afetaram o município (CNN BRASIL, 2024). Tais eventos destacam a urgência de medidas preventivas e de adaptação para minimizar os impactos desses desastres naturais.

Entender a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica, juntamente com os aspectos humanos, é crucial para orientar ações e decisões dos gestores públicos e dos comitês/agências de bacias hidrográficas, visando minimizar os impactos das inundações na população local (SOUZA et al., 2021). A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para prever eventos e sugerir alternativas que garantam a sustentabilidade ecológica e funcional do ambiente, contribuindo significativamente para o aumento do conhecimento sobre os processos hidrológicos e suas consequências nas bacias hidrográficas (RUHOFF, 2004). Nesse contexto, o cálculo do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica pode subsidiar estudos futuros que busquem orientar estratégias de gestão de recursos hídricos mais eficazes e adaptativas.

2.2 Precipitação

A precipitação, seja em forma líquida ou sólida, é um fenômeno atmosférico que alcança a superfície terrestre, manifestando-se como granizo, orvalho, neve ou chuva. Esta última, comumente composta por gotas d'água em estado líquido, geralmente cai verticalmente. No contexto da medição da chuva, é comum utilizar a altura da lâmina de água, expressa em milímetros, como uma medida homogênea e uniforme sobre uma determinada área, como uma bacia hidrográfica. Esta medida está relacionada à duração, intensidade e frequência da precipitação pluvial (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

O tempo de retorno, por sua vez, indica o período médio, em anos, no qual um evento hidrológico específico é igualado ou excedido ao menos uma vez. A frequência refere-se ao número de ocorrências de um evento crítico (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

Diferentes tipos de chuvas, como as orográficas, convectivas e frontais, são influenciados por diversos fatores, incluindo características geográficas e climáticas. As orográficas são desencadeadas quando ventos úmidos encontram barreiras físicas, como montanhas, forçando o ar a subir e causando precipitação (FEITOSA et al., 2008;

STEINKE, 2012). As chuvas frontais ocorrem no encontro de massas de ar com diferente temperatura e umidade, resultando em ascensão do ar quente onde alcança as mais baixas temperaturas, ocasionando a condensação do vapor (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Já as chuvas convectivas são impulsionadas pelo aquecimento do ar úmido, gerando movimentos ascendentes e resultando em chuvas frequentes, especialmente durante o verão, em regiões como Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Porto Alegre, muitas vezes causando enchentes urbanas (PIMENTEL DA SILVA, 2015). No Brasil, as chuvas orográficas predominam em áreas serranas, enquanto as convectivas são mais comuns e intensas, com duração curta a média, e as frontais são generalizadas, especialmente na região Sul, com intensidade variável e duração média a longa (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Vários são os métodos utilizados para observar as precipitações pluviais de determinada região. Um pluviógrafo registra a quantidade de chuva em milímetros ao longo do tempo, enquanto um pluviômetro mede a quantidade total de chuva em milímetros. Ambos são instrumentos essenciais em estações meteorológicas de superfície, até mesmo as mais básicas. Isso porque a quantidade de chuva registrada é uma das informações mais importantes para a meteorologia. Além disso, tanto o pluviômetro quanto o pluviógrafo possuem a mesma área de captação das chuvas e sempre indicam a quantidade em milímetros de chuva, seja por hora (pluviógrafo) ou por dia (pluviômetro) (MIRANDA; SOUZA, 2013).

Os radares e satélites podem estimar as precipitações, sendo alternativas especialmente para bacias hidrográficas em razão da ampla cobertura espacial, proporcionando medições em áreas que não possuem redes de pluviômetros consistentes. Nas bacias urbanas, em que o escoamento superficial é rápido, usufruir do sensoriamento remoto, principalmente dos radares, o que possibilita a estimativa rápida das nuvens precipitantes (CALVETTI et al., 2009).

Os radares meteorológicos podem aliar-se aos outros tipos de dados, como os de estações totais, estações hidrológicas, telemétricas e até pluviômetros automáticos. O objetivo é ter uma base completa e diversificada de monitoramento, para aumentar a precisão dos dados gerando uma base sólida para áreas de riscos, fundamental para envio de alerta de desastres naturais (CEMADEN, 2022).

Os dados obtidos desses métodos de observação das chuvas são importantes para determinação da precipitação média de uma região. Em muitas regiões, devido às dificuldades na operação dos pluviômetros, existem dificuldades de coletar esses dados, e, portanto, muitas são as séries históricas com falhas em seus dados, dados não consistentes. Na falta de dados de chuva em alguma estação específica, as falhas podem ser preenchidas com dados de outras operadoras de estações em locais próximos.

2.2.1 Determinação da precipitação pluvial média

Em diversos estudos, como os de balanço hídrico e projetos de drenagem, é fundamental usar a precipitação pluvial média como uma medida contribuinte na área de estudo, como na bacia hidrográfica. Os métodos mais utilizados para determinação da precipitação média de uma região são: média aritmética, polígono de Thiessen e isoietas (FEITOSA et al., 2008).

2.2.1.1 Média aritmética

O cálculo da altura de chuva média ou média aritmética simples (Equação 1) entre as alturas pluviométricas é permitido quando a diferença dos valores pluviométricos pontuais é menor ou igual a 10%. Não há muito ganho em aplicar as metodologias mais complexas quando as diferenças entre os totais pluviométricos sofrem pouca variabilidade (PIMENTEL DA SILVA, 2015), nesses casos essa metodologia traz bons resultados.

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} P_i \quad (1)$$

onde:

\bar{P} = altura da chuva média;

N = número de estações pluviométricas consideradas no cálculo;

P_i = altura pluviométrica observada em determinada estação “i”.

2.2.1.2 Método dos polígonos de Thiessen

Esse método é indicado quando não há distribuição uniforme dos postos pluviométricos dentro da bacia hidrográfica.

A metodologia consiste em: 1) localizar os postos de observação; 2) traçar linhas retas que unem os postos pluviométricos uns aos outros; 3) determinar e traçar as mediatrizes de cada uma das linhas retas; 4) delimitação dos polígonos de Thiessen a partir da identificação das áreas de influência de cada posto limitadas pelas mediatrizes (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

O método supõe que cada ponto de observação exerce influência sobre dada área, delimitada pelos polígonos de Thiessen (PIMENTEL DA SILVA, 2015). Embasado na hipótese de que a chuva que atinge um ponto dentro de uma bacia é igual ao que atinge um segundo ponto, a partir do pluviômetro mais próximo. O critério de menor distância é considerado pela área de influência de cada ponto, definido de acordo com áreas de polígonos obtidas da bissetriz da união entre postos pluviométricos (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A altura da chuva média ou equivalente é definida pela média ponderada das alturas pluviométricas de cada posto observado, sendo o peso de cada parcela a razão entre área do polígono de influência do posto e área total da bacia hidrográfica (Equação 2) (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} A_i \cdot P_i \quad (2)$$

onde:

\bar{P} = precipitação média ou equivalente;

A_i = área de influência do posto, estação pluviométrica “i”;

P_i = alturas pluviométricas observadas em cada posto;

A = área total da bacia hidrográfica.

2.2.1.3 Método das isoietas

As isoietas são linhas que indicam a mesma altura pluviométrica, são semelhantes as curvas de nível, que tem ao longo de seu traçado a mesma elevação. O traçado das isoietas são mais simplificados através do uso de funções e aplicativos do Sistema de Informação Geográfica (SIG) (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

O método das isoietas parte de um mapa de isoietas em que calcula-se a área de bacia equivalente ao intervalo entre as isoietas. O método é análogo ao método de Thiessen (COLLISCHONN W.; DORNELLES F., 2013). A maior precisão dos resultados se deve a menor distância entre os postos pluviométricos, maior série histórica e maior número de postos de apoio. A altura de chuva média pode ser obtida através do uso da equação apresentada abaixo:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^{i=Nl} a_i \cdot PI_i \quad (3)$$

onde:

P_m = precipitação média;

a_i = área entre as isoietas;

PI_i = altura pluviométrica referente a isoietas i;

A = área total da bacia.

2.2.2 Equação Intensidade Duração Frequência (IDF) do município Petrópolis, RJ

O projeto Atlas Pluviométrico (CPRM, 2016) teve como um dos objetivos, definir as relações IDF (intensidade-duração-frequência) para os municípios suscetíveis a movimentos de massa e enchentes. Logo, apresentou a equação IDF e os parâmetros para o município de Petrópolis (Equação 4).

As equações IDF são fundamentais na definição da intensidade de precipitação associadas a frequência de ocorrência, e são aplicadas para dimensionamento de

diferentes estruturas de drenagem ou aproveitamento dos recursos hídricos (CPRM, 2016).

$$i = \frac{aT^b}{(t + c)^d} \quad (4)$$

onde:

i = intensidade da chuva (mm/h);

T = tempo de retorno (anos);

t = duração de precipitação (minutos);

a, b, c, d = parâmetros da equação.

Sendo os parâmetros para equação IDF de Petrópolis, $a = 2655,6$; $b = 0,1644$; $c = 30,6$ e $d = 0,8862$, para as durações de 5 minutos a 2 horas. A equação é válida para tempo de retorno de até 50 anos.

2.2.3 Preenchimento de falhas e análise de dados pluviométricos

A análise de consistência dos dados de precipitação tem como objetivo identificar e corrigir falhas e erros que ocorrem nas medições em um posto, ou quando existem períodos com falhas e sem dados, devido aos problemas com os aparelhos de registro e com o operador do posto (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Preenchimento errado do valor de precipitação na caderneta, soma errada de números de provetas, valor estimado pelo observador, crescimento da vegetação, danificação do aparelho ou problemas mecânicos, transcrição errada da planilha do observador para o banco de dados, são causas de erros mais comuns nas observações da precipitação.

Erros grosseiros são identificados mais facilmente por meios de gráficos, com uso de filtros em *softwares*, como planilhas que detectam valores suspeitos (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Dados climáticos confiáveis são imprescindíveis para calibração e validação de modelos. Os dados de precipitação são os mais difíceis em previsibilidade, em alguns modelos, falhas de até sete dias nos dados podem ser completados com ferramentas, como, *WeatherMan* e para falhas maiores deve-se interpolar dados entre estações com altitudes próximas e estimar com banco de dados do NASA - *Prediction of Worldwide Energy Resources* (POWER) ou outras fontes (ANDRADE; DE SOUZA; AMARAL, 2020). O projeto POWER é uma alternativa amplamente utilizada para obtenção de dados meteorológicos baseado em um satélite da NASA (CARRARA et al., 2023; NASA, 2020) Devido à disposição de uma rede pluviométrica extensa, as falhas dos dados de precipitação devem ser completadas através da base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (ANDRADE; DE SOUZA; AMARAL, 2020).

É comum ocorrer falhas nos dados em determinado período, mas é possível preencher essas falhas com dados de postos vizinhos. Esse preenchimento pode ser aplicado somente para dados em intervalos de tempo mensal ou anual e não substitui dados originais (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Após análise das séries de dados, as lacunas encontradas devem ser preenchidas por meio de métodos para preenchimento de falhas (TUCCI et al., 2001), conforme descritos a seguir.

2.2.3.1 Método de ponderação regional

O método de ponderação regional pode ser utilizado para preencher falhas de séries mensais ou anuais de precipitações, é um método em que são escolhidos ao menos três postos e com no mínimo dez anos de dados (TUCCI et al., 2001).

A equação 5 pode ser adotada para preencher falhas de um determinado posto “Y”, considerando ao menos três postos da vizinhança com no mínimo dez anos de dados (X1, X2 e X3) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

$$PY = \left(\frac{PM_y}{PMX_1} \cdot PX1 + \frac{PM_y}{PMX_2} \cdot PX2 + \frac{PM_y}{PMX_3} \cdot PX3 \right) \cdot \frac{1}{3} \quad (5)$$

onde:

PY é a precipitação do posto Y a ser estimada;

$PX1$, $PX2$, $PX3$ são as precipitações equivalentes ao mês ou ano;

PM_y é a precipitação média no posto Y;

PMX_1, PMX_2, PMX_3 são as precipitações médias nos três postos vizinhos.

O método apresentado não deve ser utilizado para preenchimento de dados diários, pois esses dados possuem altas variáveis espaciais e temporais de precipitações (TUCCI et al., 2001).

2.2.3.2 Método da regressão linear

O método de regressão linear utiliza uma equação matemática simples ou múltipla para estimar as precipitações de um posto com falhas em seus dados.

No método de regressão linear simples, as precipitações de um posto com falhas (Y) e de um posto vizinho (X) são correlacionadas. Pode ser obter as estimativas dos dois parâmetros da equação graficamente ou pelo critério dos mínimos quadrados (TUCCI et al., 2001).

Após a formulação da equação semelhante a apresentada abaixo, é possível proceder ao preenchimento das falhas (Equação 6).

$$Y = a + b \cdot X \quad (6)$$

onde:

Y é a precipitação do posto Y a ser estimada; X é a precipitação a ser correlacionada; a, b, são os coeficientes a serem estimados a partir dos dados disponíveis.

No método de regressão linear múltipla as informações são correlacionadas com as observações do posto vizinhos (Equação 7) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

$$Y = a + b \cdot X1 + c \cdot X2 + c \cdot X3 + \dots \quad (7)$$

onde:

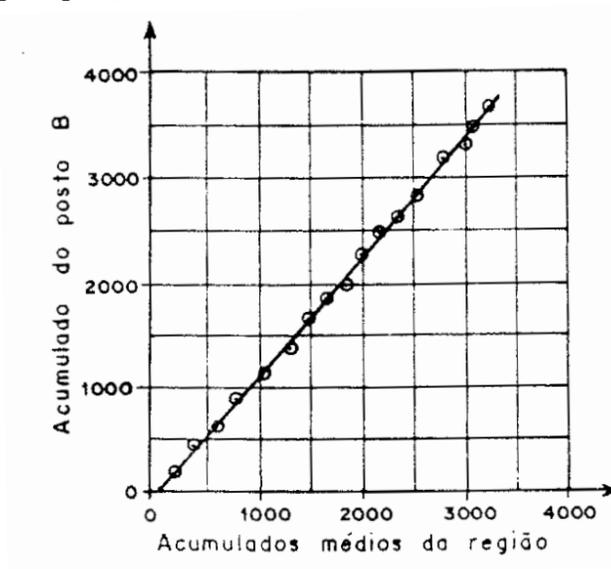
Y é a precipitação do posto Y a ser estimada; X1, X2, X3 são as precipitações correspondente de cada posto vizinho a serem correlacionadas; a, b, c são os coeficientes a serem estimados a partir dos dados disponíveis.

2.2.3.3 Método Dupla-massa

O método Dupla-massa é um dos métodos mais conhecidos para analisar a consistência dos dados de precipitação e foi desenvolvido pelo *Geological Survey* (USA). O principal objetivo do método é identificar se ocorrem alterações de comportamento da precipitação ao longo do tempo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Para verificar a consistência dos dados de um posto pluviométrico em comparação com os registros dos postos vizinhos, é necessário selecionar os postos de uma região e somar os valores de precipitação mensais ou anuais para cada um deles. Em seguida, esses valores acumulados podem ser representados graficamente em um gráfico cartesiano. No gráfico, os valores acumulados do posto em questão seriam representados no eixo y, enquanto os valores médios das precipitações acumuladas em vários postos da região seriam usados como base de comparação no eixo x (TUCCI et al., 2001). Quando os valores do posto a ser analisado são proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem se alinhar uma única reta, conforme Figura 6.

Figura 6 – Dados de precipitação sem inconsistências.



Fonte: TUCCI et al., (2001)

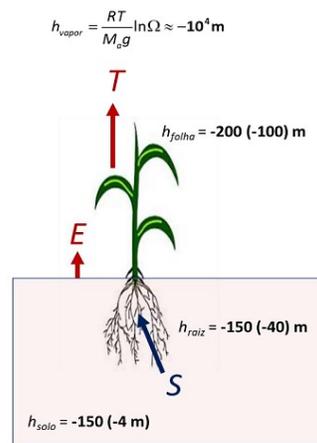
2.3 Evapotranspiração

A evaporação é o movimento da água direto da superfície para a atmosfera. A transpiração é quando a água é absorvida pelo sistema radicular e evapora (“transpira”) nas folhas da planta. Devido à dificuldade em separar os dois processos é comum chamar o conjunto, evaporação mais transpiração, de evapotranspiração (ET) (FEITOSA et al., 2008; MIRANDA; SOUZA, 2013; STEINKE, 2012).

Os processos evaporação e transpiração são movimentados por uma diferença de potencial total da água nas diversas partes do sistema. O potencial mais negativo, ou seja, de menor água é encontrado na atmosfera, onde o vapor d’água tem um potencial (h_{vapor}) em função da umidade relativa. O potencial da água na zona não-saturada do solo (h_{solo}) atinge o valor máximo de zero, quando o solo encontra-se saturado com água e será negativo em qualquer condição não saturada (JONG VAN LIER, 2020).

Os potenciais na planta (raízes, caule, folhas) se estabelecem em função dos potenciais do solo, da atmosfera e das resistências ao fluxo encontradas no sistema. O potencial do solo (h_{solo}) é função do teor de água e das propriedades de retenção de água no solo. A figura 7 apresenta os valores mínimos de potenciais h_{solo} , h_{raiz} , h_{folha} e entre parênteses os valores modais.

Figura 7 – Potenciais de água no solo, no sistema radicular, na folha e na atmosfera



Legenda: h_{solo} = potencial no solo, h_{raiz} = potencial na raiz, h_{folha} = potencial na folha, E = evaporação, T= transpiração e S= extração radicular.

Fonte: DE JONG VAN LIER, 2020

2.3.1 Evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração de referência (ET_0) é um parâmetro climático calculado a partir da obtenção dos dados meteorológicos. A ET_0 expressa o poder de evaporação a atmosfera em um local e época específicos do ano e não considera a cultura (características e fatores do solo). O método recomendado no boletim 56 da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO, 1998) utiliza a equação de Penman-Monteith para determinar a ET_0 (ALLEN et al., 1998).

A equação de Penman-Monteith necessita dos dados de radiação, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento. Requer procedimentos de cálculo, derivar parâmetros climáticos de dados meteorológicos e estimar dados faltantes são as variáveis necessárias para calcular a ET_0 (ALLEN et al., 1998).

ALLEN et al., (1998) parametrizou e reduziu a equação da FAO Penman-Monteith, apresentada na Equação 8.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + y \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + y(1 + 0,34 u_2)} \quad (8)$$

onde

ET_0 = evaporação de referência (mm dia⁻¹);

R_n = radiação líquida à superfície de cultura (MJ m⁻² dia⁻¹);

G = densidade do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

T = temperatura média diária do ar medida a 2 m (°C);

u_2 = velocidade do vento medido a 2 m (m s⁻¹);

e_s = pressão de vapor de saturação (kPa);

e_a = pressão de vapor atual (kPa);

Δ = inclinação da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹),

y = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

A evapotranspiração da cultura (ET_c) em condições padrões remete a culturas cultivadas em grandes campos sob excelentes condições agrônômicas e hídricas do solo. O que distingue a ET_c e a ET_0 é o coeficiente da cultura (K_c) (ALLEN et al., 1998), conforme Equação 9.

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (9)$$

onde

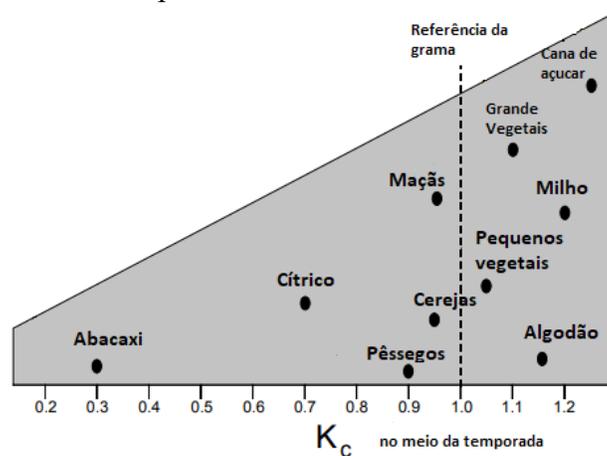
ET_c = evaporação da cultura (mm dia^{-1});

K_c = coeficiente da cultura (adimensional);

ET_0 = evaporação de referência (mm dia^{-1}).

A estimativa da evapotranspiração da cultura ET_c baseia se a partir da ET_0 e do coeficiente de cultura K_c . O conhecimento da ET_c assume um papel importante, tanto para projeto quanto para manejo de irrigação, e também para se racionalizar o uso da água, em projetos agrícolas (CARVALHO et al., 2011). A figura a seguir apresenta o K_c para diferentes tipos de cultura.

Figura 8 – Coeficiente da cultura para diferentes culturas



Fonte: Adaptado de ALLEN et al., 1998

2.4 Estimativa do Escoamento superficial pelo Método SCS-CN

A precipitação efetiva ou chuva efetiva corresponde a parcela de água da chuva que não infiltra e não fica retida na superfície, é a parcela da chuva que gera o escoamento sobre a superfície (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

O escoamento superficial direto pode ser obtido por meio de experimentos de parcelas de solos e simulação de chuva, por técnicas de separação de hidrogramas, obtidos de modelos ou equações empíricas. Uma das equações utilizadas para determinação do escoamento superficial é a do modelo Curva número (CN) (PIMENTEL DA SILVA, 2015).

O procedimento CN criado nos anos 1950 pelo *Soil Conservation Service* (SCS), atualmente chamado de *Natural Resources Conservation Service*, é um modelo empírico, comumente utilizado e tem uma série de procedimentos não tão conhecidos (GAREN; MOORE, 2005). Porém ainda é o método mais utilizado mundialmente na Engenharia Hidrológica para estimativas em bacias pequenas e sem dados (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

O método SCS-CN é baseado na equação do balanço hídrico e em duas hipóteses apresentadas na Equação 10 e Equação 11 (MISHRA; KUMRE; PANDEY, 2019).

$$P = I_a + F + Q \quad (10)$$

$$\frac{Q}{(P - I_a)} = \frac{F}{S} \quad (11)$$

onde:

P = precipitação total (mm);

I_a = abstrações iniciais (mm);

F = infiltração acumulada excluído I_a (mm);

Q = escoamento direto, denominado também de precipitação direta (mm);

S = potencial máximo de retenção ou infiltração (mm);

Sendo I_a abstrações (perdas) iniciais, atribui-se que o coeficiente de abstrações inicial λ é igual a 0,2 (Equação 12):

$$I_a = \lambda S \quad (12)$$

A equação 13 que trata da precipitação efetiva também denominada de chuva excedente, ou volume de escoamento superficial, é obtida a partir da combinação das equações anteriormente apresentadas:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ para } P > I_a \quad (13)$$

A equação só é válida quando a precipitação total for maior que as abstrações iniciais I_a , caso ao contrário o valor de $Q = 0$ mm:

Substituindo I_a na equação (13), tem-se:

$$Q = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \text{ para } P > 0,2 S \quad (14)$$

O parâmetro S é estimado em função do parâmetro CN :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (15)$$

O parâmetro principal CN é estimado por meio de tabelas elaboradas pelo SCS e considera a combinação dos quatro grupos hidrológicos do solo com diversos tipos de uso e manejo do solo, conforme apresentado na Tabela 1 (GENOVEZ; SARTORI; NETO, 2005).

Tabela 1 – Características dos grupos hidrológicos para aplicação do método SCS.

Tipo SCS	Características	Textura
A	Solos com alta capacidade de infiltração e que produzem baixo escoamento superficial. São arenosos profundos com pouco silte e argila	Arenosa; Areia Franca; Franco Arenosa
B	Solos de média capacidade de infiltração. São arenosos e menos profundo do que o tipo A.	Franco Siltosa; Franca
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentual considerável de argila e pouco profundo.	Franco Argilo Arenosa
D	Solos com muito baixa capacidade de infiltração, que geram maior proporção de escoamento superficial. Contém argilas expansivas e são pouco profundos.	Franco Argilosa; Franco Argilo Arenosa; Argilo Arenosa; Argilo Siltosa; Argilosa

Fonte: TUCCI et al., 2001 e COLLISCHONN; DORNELLES, 2013

O parâmetro CN é determinado em função dos valores tabelados para usos de solo em bacias rurais e em bacias urbanas, e referem-se as condições médias de umidade antecedente (TUCCI et al., 2001), as Tabelas 2 e 3 apresentam estes valores:

Tabela 2 – Valores do parâmetro CN para bacias rurais na condição II de umidade antecedente do solo

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo do solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	em curvas de nível	67	77	83	87
	terraceado em nível	64	76	84	88
	em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	em curvas de nível	62	74	82	85
	terraceado em nível	60	71	79	82
	em fileiras retas	60	71	79	82
Plantações de legumes ou cultivados	em curvas de nível	60	72	81	84
	terraceado em nível	57	70	78	89
	pobres	68	79	86	89
	normais	49	69	79	94
	boas	39	61	74	80
Pastagens	pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	normais	30	58	71	78
	esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	normais	36	60	73	7
	densas, de alta transpiração	25	55	70	77

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo do solo			
		A	B	C	D
Chácaras Estradas de terra	normais	56	75	86	91
	más	72	82	87	89
	de superfície dura	74	84	90	92
Florestas	muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	esparsas	46	68	78	84
	densas, alta transpiração	26	52	62	69
	normais	36	60	70	76

Fonte: TUCCI et al., 2001

Tabela 3 – Valores do parâmetro CN para bacias urbanas na condição II de umidade antecedente do solo

Utilização ou cobertura do solo		Grupo do solo			
		A	B	C	D
Zonas cultivadas	sem conservação do solo	72	81	88	91
	com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos Baldios	más condições	68	79	86	89
	em boas condições	39	61	74	80
Prado	em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas Floresta	cobertura ruim	45	66	77	83
	cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios	em boas condições, com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	em boas condições, com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	-	89	92	94	95
Zonas industriais	-	81	88	91	93
Zonas residenciais, lotes de (m²)	média impermeável (%)				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	-	98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
	Paralelepípedos	76	85	89	91
	Terra	72	82	87	89

Fonte: Adaptado de TUCCI et al., 2001

Os valores apresentados nas tabelas 2 e 3 são equivalentes a condição *Antecedent Moisture Condition* (AMC) AMC II e podem ser corrigidos para as seguintes condições de umidade antecedente:

AMC I: A precipitação acumulada dos cinco dias anteriores na estação de crescimento menor que 36 mm e na estação seca, menor que 13 mm (TUCCI et al., 2001);

AMC II: Situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo (TUCCI et al., 2001);

AMC III: O solo encontra se na condição saturada devido a ocorrência de precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores, sendo no período de crescimento, precipitações acumuladas maiores que 53 mm e na estação seca maior que 28 mm (TUCCI et al., 2001).

Os valores corrigidos podem ser obtidos para diferentes usos de solos e condições hidrológicas, utilizando as equações empíricas mostradas nas Equações 16 e 17 (ARA; ZAKWAN, 2018).

$$CNI = \frac{4,2 CNII}{10 - 0,058 CNII} \quad (16)$$

$$CNIII = \frac{23 CNII}{10 + 0,13 CNII} \quad (17)$$

O método SCS pode ser aplicado em bacias hidrográficas com diferentes tipos de solos, para esta condição o valor de CN é obtido por meio da média ponderada dos valores de CN. A partir da obtenção do CN, o procedimento é mesmo descrito anteriormente (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

2.5 Água no solo

2.5.1 Umidade volumétrica da água no solo (θ)

A umidade volumétrica da água no solo (θ), ou teor de água no solo, é crucial para a produtividade biológica, influenciando diretamente a vegetação e as culturas agrícolas, pois, a disponibilidade de água no solo, depende das propriedades do solo e do teor de umidade (CLARKE TOPP; FERRÉ, 2018; TEIXEIRA et al., 2021).

O teor de água é geralmente expresso como a razão entre a massa de água em uma amostra antes e depois da secagem a 105°C, ou como o volume de água por unidade de volume de solo. Na prática, é representado como uma razão, sendo θ o teor de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (CLARKE TOPP; FERRÉ, 2018).

2.5.2 Potenciais da água no solo (h)

O potencial matricial relaciona a energia da água em função da sua adesão aos sólidos que formam a matriz do solo (JONG VAN LIER, 2020).

O potencial da água no solo, e a soma dos potenciais:

ψ_g = potencial gravitacional;

ψ_p = potencial de pressão;

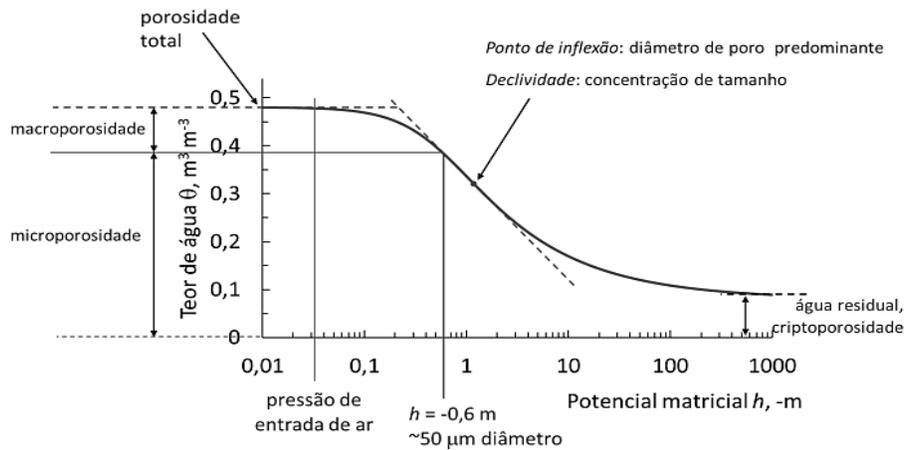
h = potencial matricial;

h_π = potencial osmótico.

2.5.2.1 Retenção da água no solo

A retenção da água no solo, ou relação entre potencial matricial e a umidade volumétrica de água no solo. A representação gráfica e o ajuste contínuo da relação entre a umidade (θ) em função do potencial matricial (h) se denomina curva de retenção de água no solo (CRA). A Figura 9 apresenta algumas grandezas que podem ser identificadas pela da curva de retenção.

Figura 9 – Curva de retenção



Fonte: VAN LIER, 2020

2.5.3 Equação de van Genuchten para descrição da retenção de água no solo

Dentre as equações propostas para a descrição matemática da retenção, a relação entre θ e h se destaca a equação proposta por VAN GENUCHTEN, (1980).

A equação de VAN GENUCHTEN, (1980) é o modelo mais aplicado para caracterizar a retenção de água no solo e está descrita na Equação 18.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (18)$$

onde

α (m^{-1}), n e m = coeficientes obtidos por ajuste de modelo não linear;

θ_s = teor de água na saturação, valor próximo da porosidade total do solo;

θ_r = teor de água residual.

A equação de VAN GENUCHTEN, (1980) pode ser simplificada com a restrição:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \text{ e } n > 1 \quad (19)$$

Obtendo-se a equação 20:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^{\frac{n-1}{n}}} \quad (20)$$

2.5.4 Movimento da água no solo

2.5.4.1 Equação de van Genuchten-Mualem para condutividade hidráulica

A correlação entre a retenção e condutividade hidráulica é descrita pela equação de van Genuchten-Mualem (YATES et al., 1992).

A equação de van Genuchten-Mualem é usada para a condutividade hidráulica de solos não saturados, corresponde a Equação 21:

$$K(h) = K_s [1 + (\alpha|h|)^n]^{\frac{I(1-n)}{n}} \left[1 - \left(\frac{(\alpha|h|^n)}{[1 + (\alpha|h|^n)]} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 \quad (21)$$

onde:

K_s = Condutividade hidráulica saturada.

O parâmetro n obtido na equação de retenção de VAN GENUCHTEN, (1980), o parâmetro K_s pode ser medido, e o parâmetro I , fator de tortuosidade do solo, definido geralmente como $I=0,5$, valor sugerido por MUALEM, (1976).

2.5.4.2 A Equação de Richards

A equação de Richards é obtida pela combinação da equação de Buckingham-Darcy (Equação 22) e a equação da continuidade (Equação 23).

$$q = -K(\theta, h) \frac{dH}{dx} = -K(\theta, h) \nabla h \quad (22)$$

onde:

K = condutividade hidráulica de um solo não-saturado;

$K(\theta)$, $K(h)$, $K(\theta, h)$ = função do teor de água e do potencial matricial da água.

A equação da continuidade ou conservação de massa:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dq}{dx} \quad (23)$$

A equação de Richards (Equação 24) mostrada a seguir, é fundamental na modelagem do movimento de água no solo não saturado. Em muitos estudos o fluxo ocorre na direção vertical, indicada pela coordenada z .

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[k \frac{dH}{dz} \right] = \frac{d}{dz} \left[k \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right) \right] \quad (24)$$

A equações acima relacionam os teores de água θ e potenciais de água h no espaço e tempo. São equações diferenciais, que para sua manipulação se faz necessário conhecer as relações entre o teor de água, potenciais da água com espaço e tempo, e a condutividade hidráulica, e também determinar as condições de contorno da superfície, como por exemplo evapotranspiração e precipitação ao longo do tempo, e na condição de contorno inferior por exemplo, drenagem livre ou a presença do lençol freático (ŠIMŮNEK et al., 2009).

A equação 24 em condições em que há presença de raízes extratoras de água, pode ser incluída o termo sumidouro S_r como apresentado na Equação 25.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[k \frac{dH}{dz} \right] - S_r \quad (25)$$

Atualmente com a ampla disponibilidade de recursos computacionais, as soluções numéricas da equação de Richards tornaram-se acessíveis para realizar simulações em uma variedade quase ilimitada de cenários. Essas soluções são disponibilizadas na forma de algoritmos ou programas de computador, e entre os modelos bem conhecidos e amplamente utilizados destaca-se o HYDRUS (ŠIMŮNEK et al., 2016).

2.5.4.3 Conceito de Capacidade de campo (θ_{cc})

A umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) representa a quantidade máxima de água que o solo pode reter, sendo o ponto onde o armazenamento de água atinge seu limite superior (TEIXEIRA et al., 2021). A capacidade de campo é definida como a umidade do solo retida sob uma tensão de 10 kPa a 33 KPa (TEIXEIRA et al., 2017; ZONTA et al., 2016).

2.5.4.4 Conceito de Ponto de Murcha Permanente (PMP)

O ponto de murcha permanente (PMP) é o nível de umidade do solo no qual as folhas de uma planta que crescem nele entram em um estado de murchamento irreversível, mesmo quando expostas a uma atmosfera saturada de vapor de água (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949). O PMP também denominado como limite inferior e umidade no potencial de 1.500 kPa (TEIXEIRA et al., 2017, 2021).

2.6 Estimativa do Balanço Hídrico

A contabilização das entradas e saídas do volume de água em um determinado volume de solo, define o balanço hídrico. Na análise do balanço hídrico, unidimensional, o volume (ou altura) do solo é expresso por unidade de área superficial, portanto o volume pode ser um perfil inteiro, parte dele, ou um horizonte ou camada (JONG VAN LIER, 2020).

A equação do balanço hídrico apresenta todos os componentes em relação a um perfil de solo, conforme a Equação 26:

$$\Delta L_h = \underbrace{(P + I - R)}_{\text{infiltração}} - \underbrace{(E + T)}_{\text{evapotranspiração}} \quad (26)$$

onde:

ΔL_h = variação do armazenamento de água (mm);

P = precipitação (mm);

I = irrigação (mm);

R = escoamento/ runoff (mm);

E = evaporação (mm);

T = transpiração (mm).

Os componentes (fluxos) de entrada são: $P + I$ (precipitação + irrigação). Os fluxos de saída são: R (escoamento/ runoff), E (evaporação), T (transpiração).

A evaporação e transpiração são estimados em função dos parâmetros meteorológicos e das características fisiológicas das plantas.

A precipitação e irrigação são dados obtidos diretamente através de avaliação dos volumes dos eventos. Os componentes mais complexos de quantificar são o escoamento superficial, o componente de drenagem e a ascensão, sendo que os dois últimos podem ser calculados baseados na equação de Richards (JONG VAN LIER, 2020).

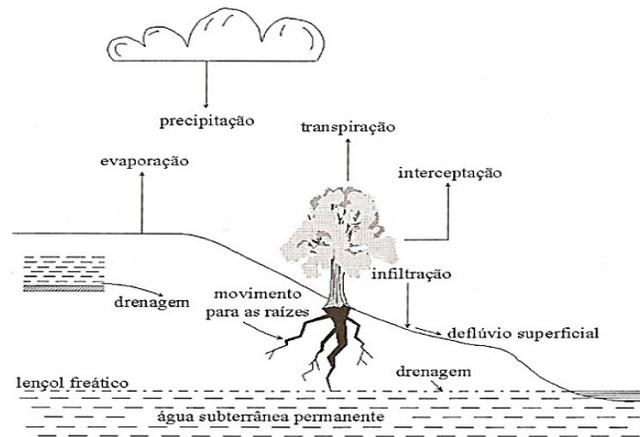
A equação do balanço hídrico no solo pode ser aplicada para caracterizar a intensidade e duração das secas e também para estimar a recarga de aquíferos. Pode ser utilizada para simular o armazenamento de água ao longo do tempo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

O balanço hídrico particionado é o fracionamento do balanço hídrico em seus componentes principais, como, os fluxos de entrada e os fluxos de saída (CASAGRANDE et al., 2021).

Pode ser avaliado em várias escalas, seja mundial em uma escala maior, ou em uma escala menor, como numa bacia hidrográfica ou em solo com cultura agrícola (LIBARDI, 2005).

Em bacias hidrográficas, quando a água precipitada atinge a superfície do solo e excede a capacidade de infiltração, ocorre o deflúvio superficial (escoamento superficial) pela ação da gravidade. A parte da precipitação que é interceptada pela vegetação, evapora diretamente sem atingir o solo. O volume da água que infiltra, parte ficará mantida no solo, devido as forças matriciais, e quando absorvida pelas raízes das plantas, a maioria é transpirada (LIBARDI, 2005). O restante da água precipitada, percola profundamente e alcança o lençol freático, ou ressurge em nascentes e rios. A Figura 10 ilustra os componentes do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica.

Figura 10 – Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica



Fonte: LIBARDI, 2005

2.6.1 Cálculo dos componentes do Balanço Hídrico utilizando o HYDRUS 1-D

O software HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013) é um modelo de elementos finitos para simulação unidimensional dos movimentos de água, calor e múltiplos solutos em variados meios saturados. Já o software HYDRUS-2D/3D realiza a simulação bidimensional e tridimensional, respectivamente.

O programa soluciona matematicamente a equação de Richards para o fluxo de águas na zona saturada e insaturada, e equações do tipo convecção-dispersão para transporte de soluto e calor (ŠIMŮNEK et al., 2016).

O modelo consegue descrever a dinâmica da água no solo e fracionar a evaporação total em seus componentes independentes (CASAGRANDE et al., 2021) e estimar o volume de água absorvido pelas plantas utilizando o modelo de Feddes para descrever como diferentes plantas se comportam em relação a disponibilidade e ao potencial da água no solo (FEDDES; ZARADNY, 1978)

O programa HYDRUS-1D oferece uma variedade de modelos, como os propostos por BROOKS; COREY, (1964), VAN GENUCHTEN (1980), VOGEL; CISLEROVA, (1988), DURNER, (1994) e KOSUGI, (1996), para descrever as características hidráulicas de retenção do solo. Na simulação da absorção de água pelas raízes, é possível utilizar o modelo desenvolvido por FEDDES; ZARADNY, (1978) no HYDRUS-1D.

As informações iniciais necessárias para o modelo incluem os valores de umidade ou potencial de água no solo, juntamente com as condições de contorno (ŠIMŮNEK et al., 2009). O HYDRUS-1D oferece a flexibilidade de incorporar dados relacionados às condições de contorno superiores, que dizem respeito à interface solo-ar exposta às condições atmosféricas (ŠIMŮNEK et al., 2013). Essas condições são determinadas por variáveis como dados meteorológicos de precipitação, evaporação, transpiração, ou evapotranspiração de referência, ou cultura, que são inseridos no programa ao longo do tempo para orientar as simulações.

Além disso, o HYDRUS-1D requer informações sobre as condições de limite inferior, que estão abaixo da zona de saturação do solo. O software oferece opções para as condições iniciais de potencial de água no solo, fluxo e tipo de drenagem.

Para calcular a evapotranspiração de referência (ET_o), é utilizada a equação de Penman-Monteith, recomendada no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998; FAO, 1998). Com estes valores possibilita-se calcular os valores de evapotranspiração de referência (ET_o), conforme explicado anteriormente.

2.7 Funções de pedotransferência (PTF) para estimativas das propriedades hidráulicas do solo

O termo função de pedotransferência, em inglês *pedotransfer function* (PTF), é definido como equações de correlação entre características e propriedades. As características (grandezas) são os preditores, e a propriedade estimada é o predito. As PTF são amplamente utilizadas para estimativas de condutividade hidráulica, curva de retenção e parâmetros relacionados à infiltração, e são aplicadas em áreas como: ciência do solo, hidrologia e agrometeorologia (BARROS, 2010).

2.7.1 PTFs para estimativa da densidade do solo

A densidade do solo é um parâmetro físico indispensável nos modelos de curva de retenção e para estimar as propriedades hidráulicas do solo.

Analisar a densidade do solo por exemplo, é custoso, envolve uma infraestrutura laboratorial e recursos humanos capacitados. É um atributo que varia em função do tipo de solo, manejo, cobertura do solo, etc. Portanto, medir a densidade do solo é importante, não apenas para avaliação de estoque de carbono, mas também para estimativa de estoque de elementos no solo em geral (CARVALHO JUNIOR et al., 2016).

Segundo BOSCHI et al., (2018) a densidade do solo vem ganhando mais atenção em razão das conversões de peso por volume usado para avaliar os estoques de carbono orgânico.

HUF DOS REIS et al., (2024) desenvolveram PTFs para estimar a densidade aparente do solo com base em diversos bancos de dados de solos brasileiros, totalizando 3.050 dados de densidades de solos observados. Foram testados quatro modelos, utilizando um sistema hierárquico.

O modelo 1 contempla como preditores as frações texturais de areia total, silte e argila, o modelo 2 inclui todas as frações texturais (areia total, silte e argila) e mais o carbono orgânico, o modelo 3 areia grossa, areia fina, silte e argila. Já o modelo 4 engloba todas as variáveis de entrada (areia grossa, areia fina, silte, argila e carbono orgânico). A densidade do solo pode ser estimada em função dos coeficientes das PTFs para cada modelo, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Funções PTFs para estimativas de densidade do solo

Funções	Preditores	PTF
PTF 1	Sa, Cl	$BD = 1,286 + 3,208 \times 10^{-3} (Sa) - 2,013 \times 10^{-3} (Cl)$
PTF 2	Sa, Cl, OC	$BD = 1,358 + 2,79 \times 10^{-3} (Sa) - 2,328 \times 10^{-3} (Cl) - 0,052 (OC)$
PTF 3	Sa_f, Sa_c, Cl	$BD = 1,198 + 2,971 \times 10^{-3} (Sa_f) + 4,472 \times 10^{-3} (Sa_c) - 8,706 \times 10^{-4} (Cl)$
PTF 4	Sa_f, Sa_c, Cl, OC	$BD = 1,243 + 2,983 \times 10^{-3} (Sa_f) + 4,187 \times 10^{-3} (Sa_c) - 5,793 \times 10^{-4} (Cl) - 6,208 \times 10^{-2} (OC)$

Legenda: Sa = % de areia total; Sa_f = % de areia fina; Sa_c = % de areia grossa; Cl = % de argila e OC = % de carbono orgânico.

Fonte: Adaptado de HUF DOS REIS et al., 2024

Quando as medições diretas de amostras não perturbadas de solos se tornam trabalhosas ou demandam muito tempo, as PTFs podem ser utilizadas para estimar as propriedades físicas do solo de maneira isolada (COSTA; SOARES, 2021).

2.7.2 A PTF de Medrado e Lima (2014) para estimativas dos coeficientes da equação de van Genuchten

O objetivo do trabalho de MEDRADO; LIMA, (2014) foi gerar um banco de dados para solos tropicais do cerrado brasileiro e apresentar as PTFs para estimar as características de retenção de água no solo pela equação de van Genuchten. Foi formado um banco de dados para o bioma Cerrado por meio de características físicas de solos e dados de retenção da água no solo medidos, provenientes de 413 locais e diversas profundidades, totalizando 1401 camadas de solos. Foram apresentados dois modelos não lineares, um modelo reduzido e um modelo completo, ambos para estimar os quatro parâmetros da equação de VAN GENUCHTEN, (1980) (MEDRADO; LIMA, 2014).

As propriedades do solo (densidade aparente, teor de argila, areia total, silte e matéria orgânica) são consideradas como variáveis independentes para as funções de pedotransferência e a densidade das partículas do solo considerada como uma variável auxiliar para estimar a porosidade total (MEDRADO; LIMA, 2014). Os parâmetros da

equação de Van Genuchten, (1980) podem ser estimados com base nas variáveis de entrada (propriedades do solo), com os coeficientes ajustados (a_{ij}) e expoentes (b_{ij}), que são os termos PTF apresentados na tabela 5 para cada modelo.

Tabela 5 – Coeficientes e expoentes ajustados para os dois modelos de PTF

Parâmetros de ajustes	Variáveis de entrada	Termos PTF	Modelo completo	Modelo reduzido
K (kg kg ⁻¹)	X_1	$a_{1,1}$	-	-
		$b_{1,1}$	-	-
	X_2	$a_{2,1}$	-0,01831805	-
		$b_{2,1}$	0,89935543	-
	X_3	$a_{3,1}$	-0,01131157	-
		$b_{3,1}$	1,00134021	-
	X_4	$a_{4,1}$	-0,0068434	-
		$b_{4,1}$	1,11564515	-
	X_5	$a_{5,1}$	0,0162212	0,88626397
		$b_{5,1}$	0,48555009	0,00786574
-	-	F_1	2,01973831	-
θ_r (kg kg ⁻¹)	X_1	$a_{1,2}$	0,13461391	0,11268382
		$b_{1,2}$	-1,58555722	-2,31854838
	X_2	$a_{2,2}$	0,04883605	-
		$b_{2,2}$	0,19647777	-
	X_3	$a_{3,2}$	-0,00949548	0,17891998
		$b_{3,2}$	0,56355803	-0,41220364
	X_4	$a_{4,2}$	-0,00005212	-
		$b_{4,2}$	1,43345189	-
	X_5	$a_{5,2}$	0,01057297	0,01329004
		$b_{5,2}$	1,14951659	1,02011236
-	-	F_2	0,01153532	-
α (kPa ⁻¹)	X_1	$a_{1,3}$	-0,00351317	6,32532102
		$b_{1,3}$	2,42317427	-0,02318223
	X_2	$a_{2,3}$	-0,03460735	-7,49868149
		$b_{2,3}$	0,58034639	-0,03241971
	X_3	$a_{3,3}$	-0,01845649	-
		$b_{3,3}$	0,85117517	-
	X_4	$a_{4,3}$	-0,04897867	-7,26003177
		$b_{4,3}$	0,59621217	0,00905719
	X_5	$a_{5,3}$	0,00001279	8,51527042
		$b_{5,3}$	5,38486557	0,00322043
-	-	F_3	1,58532681	-
n	X_1	$a_{1,4}$	1,82865464	0,71330436
		$b_{1,4}$	-0,57582713	-1,28657786
	X_2	$a_{2,4}$	-0,04262312	3,21317122
		$b_{2,4}$	0,59924802	-0,2928978
	X_3	$a_{3,4}$	1,51361637	-

Continua

Parâmetros de ajustes	Variáveis de entrada	Termos PTF	Modelo completo	Modelo reduzido
		$b_{3,4}$	0,0098583	-
	X_4	$a_{4,4}$	-0,67293635	-0,23122583
		$b_{4,4}$	0,05966974	0,12757866
	X_5	$a_{5,4}$	-0,00163216	-0,00511163
		$b_{5,4}$	2,66119588	1,68342787
	-	F_4	-0,64209861	-

Legenda: X_1 = densidade do solo (Mg m^{-3}); X_2 = argila (%); X_3 = areia total (%); X_4 = silte (%) e X_5 = matéria orgânica (%).

Fonte: Adaptado de MEDRADO E LIMA (2014)

O valor do teor de água (θ_s) pode ser calculado conforme a equação (27), em consideração aos coeficientes de ajustes (termos PTF) tabelados acima para $K = \theta_s$

$$\theta_s = (a_{2,1} X_2^{b_{2,1}} + a_{3,1} X_3^{b_{3,1}} + a_{4,1} X_4^{b_{4,1}} + a_{5,1} X_5^{b_{5,1}} + F_1) \theta_p \quad (27)$$

onde:

$$\theta_p = \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{D_p} \right)$$

sendo:

D_p = densidade das partículas (Mg m^{-3}).

O teor de água residual (θ_r) pode ser obtido pela Equação 28, no qual considera-se os termos PTF para θ_r , apresentados na Tabela 5.

$$\theta_r = a_{1,2} X_1^{b_{1,2}} + a_{2,2} X_2^{b_{2,2}} + a_{3,2} X_3^{b_{3,2}} + a_{4,2} X_4^{b_{4,2}} + a_{5,2} X_5^{b_{5,2}} + F_2 \quad (28)$$

A estimativa dos parâmetros α e n segue o mesmo procedimento de cálculo. Utiliza-se a tabela 5 e as equações similares a equação 28 (Equações 29 e 30).

$$\alpha = a_{1,3} X_1^{b_{1,3}} + a_{2,3} X_2^{b_{2,3}} + a_{3,3} X_3^{b_{3,3}} + a_{4,3} X_4^{b_{4,3}} + a_{5,3} X_5^{b_{5,3}} + F_3 \quad (29)$$

$$n = a_{1,4} X_1^{b_{1,4}} + a_{2,4} X_2^{b_{2,4}} + a_{3,4} X_3^{b_{3,4}} + a_{4,4} X_4^{b_{4,4}} + a_{5,4} X_5^{b_{5,4}} + F_4 \quad (30)$$

A PTF's propostas por MEDRADO; LIMA, (2014) vem sendo utilizadas com sucesso em vários estudos no Brasil para estimativas dos coeficientes da equação de van Genuchten (BARROS; SOARES; HOLANDA, 2021; COSTA; SOARES, 2021; OTTONI et al., 2018; TASSINARI et al., 2019).

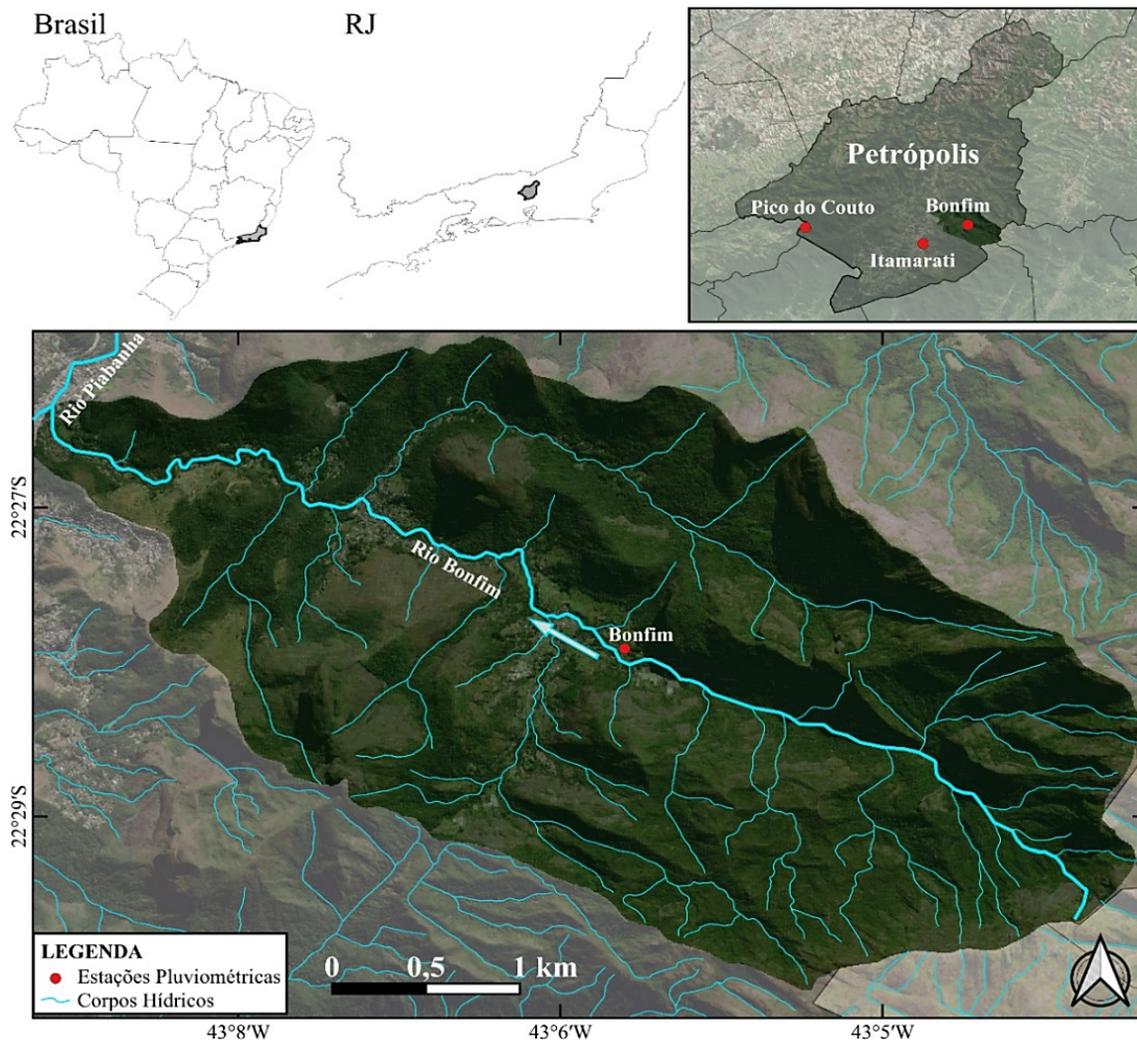
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A Região Hidrográfica Piabanha (RH-IV) é formada pela bacia hidrográfica do Piabanha e pelas bacias afluentes do rio Paraíba do Sul, abrange 3.460 km² de área aproximadamente, o equivalente a 5,64% da área total da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (AGEVAP, 2021). O rio Piabanha tem 80 km de extensão e corta os municípios de Petrópolis, Areal e Três Rios. A RH-IV é constituída por 10 municípios (AGEVAP, 2021). O rio Bonfim afluente do rio Piabanha, nasce na região da unidade de conservação PARNASO (Parque Nacional da Serra dos Órgãos) e desagua no rio Piabanha. Parte da água do município de Petrópolis é captada dos rios Bonfim e Caxambu (PESSOA, 2013).

A bacia hidrográfica do rio Bonfim está situada no 2º distrito (Cascatinha) do município de Petrópolis, região serrana do estado do Rio de Janeiro (Figura 11). Com uma área total de aproximadamente 30 km², e foi selecionada como área de estudo devido a maior disponibilidade de dados físicos de solos medidos.

Figura 11 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Bonfim e estações pluviométricas – Petrópolis-RJ

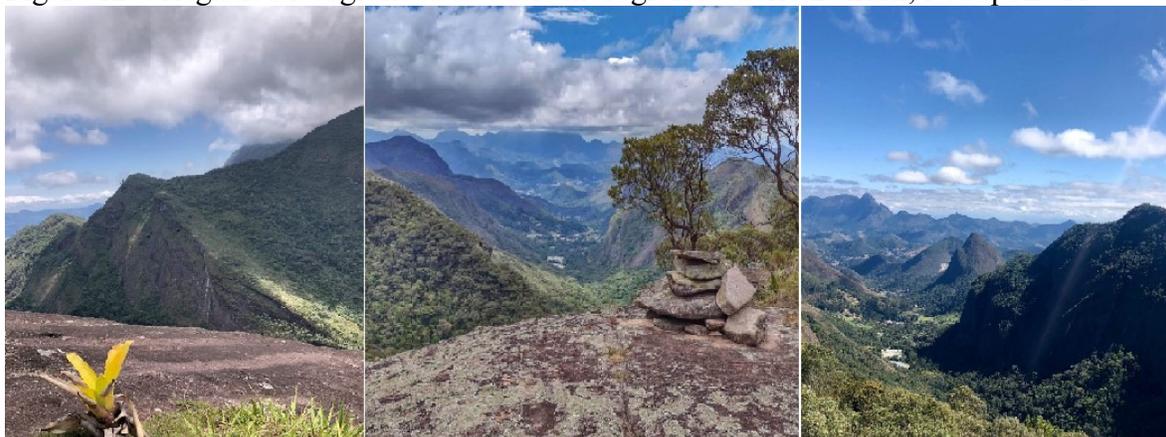


Fonte: Base cartográfica IBGE, ANA e EMBRAPA acesso em: 2021, mapa elaborado pela autora.

Segundo PEREIRA et al., (2021) os solos dominantes na bacia do rio Bonfim são os Neossolos Litólicos Distróficos e Cambissolos Háplicos Tb Distróficos. As áreas de mapeamento em que esses solos surgem como componente predominante abrange 57,8% da área de estudo e estão distribuídas em várias classes de relevo, com maior incidência em áreas de relevo ondulado, forte ondulado e montanhoso (Figura 12).

A vegetação característica da bacia pode ser dividida em áreas florestais baseadas em diferentes estágios, como: florestas primárias, florestas secundárias em estágio inicial, mediano e avançado e vegetação rupestre (KIELING, 2014).

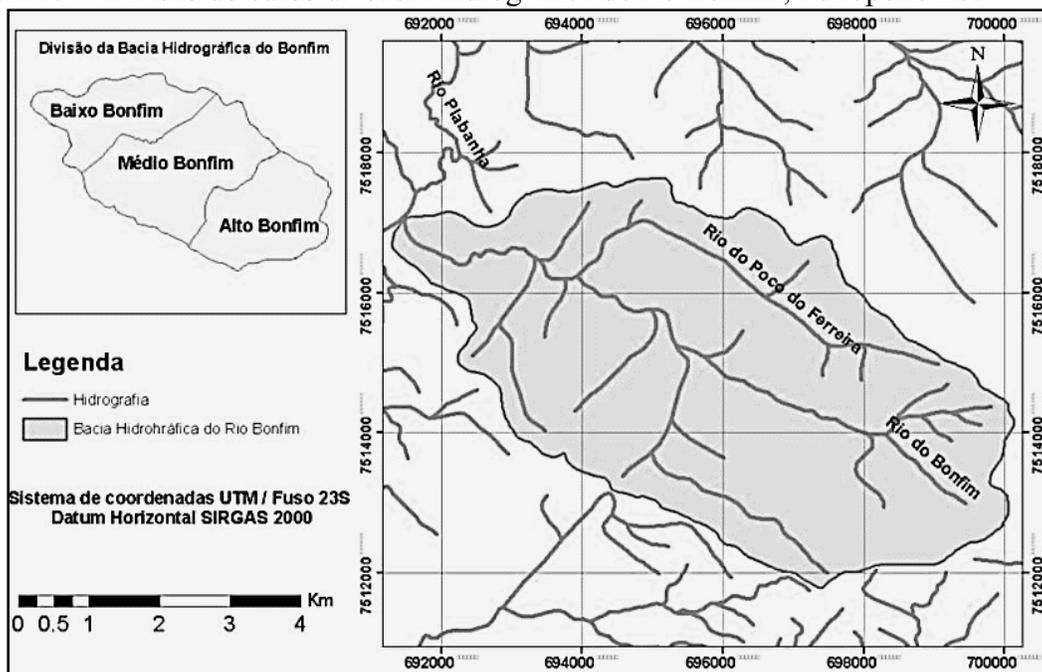
Figura 12 – Registros fotográficos da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Fonte: Daiane Fernandes Caiaffa, dezembro 2023.

O clima da bacia hidrográfica do rio Bonfim é caracterizado como Cfb segundo Köppen, com verão mais ameno e inverno mais seco, e a temperatura média, variando de 13° a 23° C (LAWALL, 2010; PESSOA, 2013). A precipitação média anual no alto curso da bacia pode ultrapassar 2000 mm e no baixo curso, 1300 mm chegando até 900 mm no período mais seco (GOULART; GUERRA, 1999; SILVA, 2013). O curso do rio Bonfim geograficamente é dividido em alto, médio e baixo (LAWALL, 2010) (Figura 13).

Figura 13 – Divisão do curso da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ.



Fonte: VELOSO, 2012

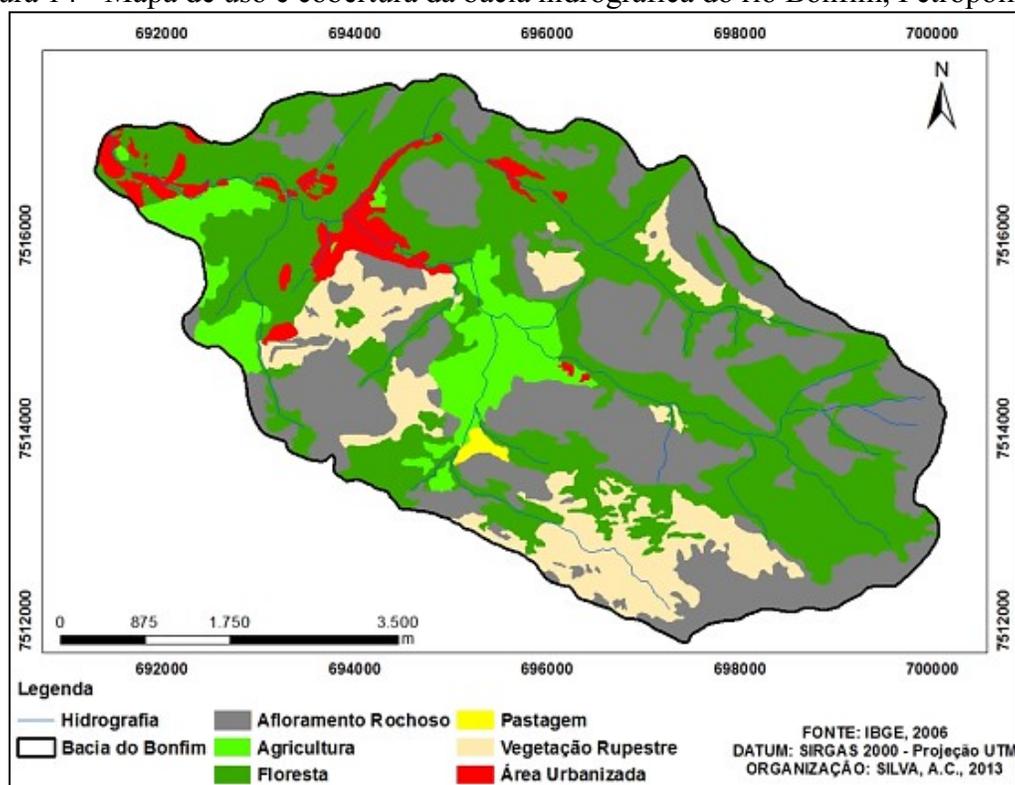
Os sistemas de uso e cobertura do solo predominantes na bacia do rio Bonfim são as florestas e afloramentos rochosos (Figura 14). As duas classes somadas chegam a 77% da área total da bacia, conforme apresentado na Tabela 6 (SILVA, 2013).

Tabela 6 – Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

Uso e ocupação (2006)	Área (km ²)	%
Afloramento rochoso	10,0	33,1%
Agricultura	2,3	7,7%
Floresta	13,2	43,6%
Pastagem	1,0	3,2%
Vegetação rupestre	2,6	8,5%
Área Urbana	1,2	3,8%
Total	30,2	100%

Fonte: SILVA, 2013

Figura 14 - Mapa de uso e cobertura da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Fonte: SILVA, 2013

3.2 Classes de solos predominantes e parâmetros físico-hídricos do solo

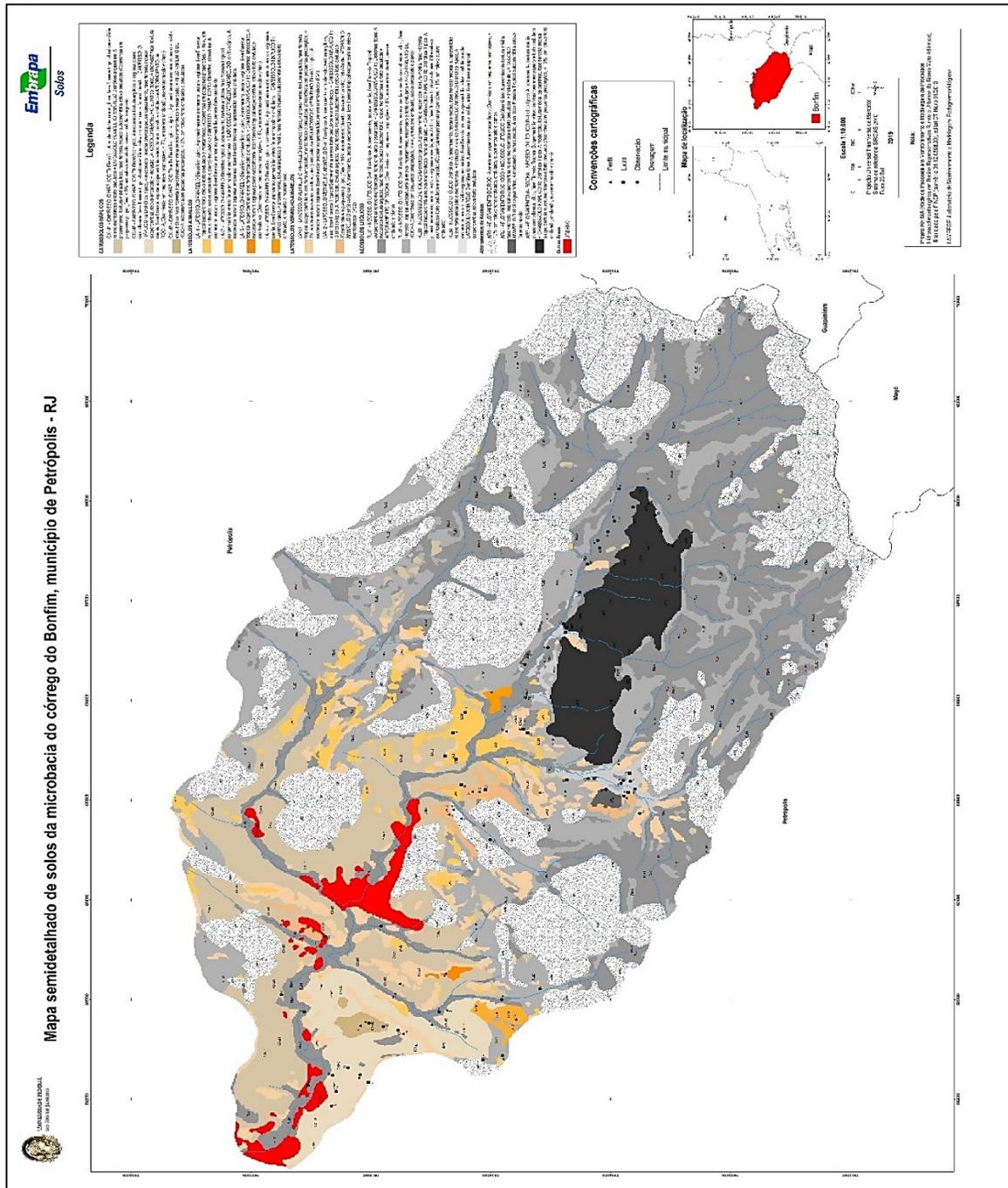
O relevo da bacia é montanhoso e acidentado, com predominância de afloramentos rochosos. A atitude ultrapassa 2.000 m. Resumidamente os tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Bonfim, segundo o levantamento semidetalhado dos solos de PEREIRA et al., (2021), são apresentados na Tabela 7 e Figura 15.

Tabela 7 – Resumo dos tipos de solo na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

Classes de solo	%	Área (km²)
Neossolos Litólicos associados a Cambissolos Háplicos e afloramentos de rocha	23%	7,04
Cambissolos Háplicos associados a Neossolos Litólicos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Amarelos e afloramentos de rochas	21%	6,33
Latossolos Vermelho-Amarelo, Latossolos Amarelos e Cambissolos Háplicos	10%	3,12
Afloramentos rochosos e área urbana	45%	13,74
Total	100%	30,23

Fonte: Adaptado de PEREIRA et al., 2021

Figura 15 – Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Fonte: PEREIRA et al., 2021

O levantamento semidetalhado dos solos da bacia hidrográfica do rio Bonfim contempla a caracterização física e química dos solos e sua representação cartográfica na área da bacia. Os dados digitados foram fornecidos em uma planilha eletrônica e contêm informações descritas referente a 41 perfis de solo (PEREIRA et al., 2021). Do total de perfis de solo, selecionou-se os solos mais relevantes, aparecem com mais frequência, na bacia do rio Bonfim, os Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos e os Latossolos, perfis 33, 34 e AE151, respectivamente. As características físicas do solo destes perfis, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Características físicas dos perfis de solos da bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ, para as simulações no HYDRUS-1D

Classe	Classe Textural	Horizonte	Profund. cm	A _T	A _G	A _F	S	Ar	MO	CO	ρ	D _s
			%.....			g cm ³				
Cambissolo Háptico	Franco-Argiloso-Arenosa	A1	0-20	55	45	10	14	31	3,10	1,80	2,47	1,02
	Franco-Argiloso-Arenosa	A2	20-42	58	44	14	12	31	2,26	1,31	2,56	1,42
	Argilo Arenosa	Bi1	42-70	52	39	13	11	37	0,98	0,57	2,57	1,43
	Argila	Bi2	70-96+	41	31	10	13	47	0,97	0,56	2,65	1,34
Latossolo Vermelho	Franco-Argiloso-Arenosa	A	0-14	55	47	7	11	35	4,07	2,36	2,39	0,99
	Argila	AB	14-32	45	34	11	12	43	2,07	1,20	2,46	1,10
	Argila	Bw1	32-70	36	26	10	12	51	1,55	0,90	2,48	1,30
	Argila	Bw2	70-116	33	23	9	12	55	1,05	0,61	2,55	1,25
	Argila	Bw3	116-162	36	27	9	9	55	0,83	0,48	2,65	1,32
Neossolo Litólico	Franco-Argiloso-Arenosa	A1	0-25	57	47	10	23	21	5,59	3,24	2,65	1,26
	Franco-Argiloso-Arenosa	A2	25-80	58	43	15	17	25	3,43	1,99	2,65	1,33

Legenda: P = profundidade do solo; A_T = areia total; A_G = areia grossa; A_F = areia fina; S = silte; Ar = argila; MO = material orgânica; CO = carbono orgânico; ρ = densidade das partículas e D_s = densidade do solo. Dados em **negrito** foram estimados.

Fonte: Adaptado e complementado de PEREIRA et al., 2021

As profundidades Bi2 em Cambissolo Háplico, Bw3 em Latossolo Vermelho, e A1 e A2 em Neossolo Litólico, que não apresentava dados de densidade de partículas (ρ) e nem densidade do solo (D_s) adotou-se o valor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$. Para a estimativa de D_s foi utilizada a PTF de HUF DOS REIS et al., (2024) (Equação 31). Que estima a densidade com base nos valores percentuais de A_F , A_G , A_r e CO.

$$PTF\ 4 = D_s = 1,243 + 2,983 \times 10^{-3} (A_F) + 4,187 \times 10^{-3} (A_G) - 6,208 \times 10^{-2} (CO) - 5,793 \times 10^{-4} (A_r) \quad (31)$$

onde:

D_s = Densidade do solo;

CO = carbono orgânico;

A_G = areia grossa; A_F = areia fina; A_r = argila.

As funções de pedotransferência (PTFs) para estimativa dos valores da densidade de solo foram avaliadas com o cálculo raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* - RMSE) (HUF DOS REIS et al., 2024), conforme Equação 32 apresentada.

$$RMSE = \left[(1/N) \sum_{i=1}^N (D_{s_{pred,i}} - D_{s_{obs,i}})^2 \right]^{1/2} \quad (32)$$

onde:

$D_{s_{obs,i}}$ = i -ésimo valor observado;

$D_{s_{pred,i}}$ = i -ésimo valor predito;

N = número de observações.

Os valores adotados para os parâmetros de D_s foram os estimados pela PTF 4, pois, apresentou os menores valores de RMSE. Para esta avaliação foi utilizado 83 observações de densidades do solo da bacia hidrográfica do rio Bonfim.

Os parâmetros hidráulicos de retenção da água no solo (α , n , θ_s e θ_r) equação de VAN GENUCHTEN, (1980), foram obtidos pela PTF (MEDRADO; LIMA, 2014) (Equações 33, 34, 35 e 36).

$$\alpha = -0,0351317 \times D_s^{2,42317427} - 0,03460735 \times A_r^{0,58034639} - 0,01845649 \times A_T^{0,85117517} - 0,04897867 \times S^{0,59621217} + 0,00001279 \times MO^{5,38486557} + 1,58532681 \quad (33)$$

$$n = 1,82865464 \times D_s^{-0,57582713} - 0,04262312 \times A_r^{0,59924802} + 1,51361637 \times A_T^{0,0098583} - 0,67293635 \times S^{0,05966974} - 0,00163216 \times MO^{2,66119588} - 0,64209861 \quad (34)$$

$$\theta_s = (-0,01831805 \times A_r^{0,89935543} - 0,01131157 A_T^{1,00134021} - 0,0068434 \times S^{1,11564515} + 0,0162212 \times MO^{0,48555009} + 2,01973831) \times \left(\frac{1}{D_s} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (35)$$

$$\theta_r = 0,13461391 \times D_s^{-1,58555722} + 0,04883605 \times A_r^{0,19647777} - 0,00949548 \times A_T^{0,56355803} - 0,00005212 \times S^{1,43345189} + 0,01057297 \times MO^{1,14951659} + 0,01153532 \quad (36)$$

onde:

A_T = areia total; A_G = areia grossa; A_F = areia fina; S = silte; A_r = argila;

MO = matéria orgânica;

CO = carbono orgânico;

ρ = densidade das partículas;

D_s = densidade do solo.

3.3 Série histórica de precipitação e evapotranspiração para Petrópolis–RJ

3.3.1 Precipitação pluvial

As informações e dados de precipitação pluvial foram obtidos inicialmente no portal *HidroWeb* após identificação das estações pluviométricas em operação no município de Petrópolis-RJ. O portal *HidroWeb* é uma plataforma integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), a partir do endereço eletrônico (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>) (ANA, 2023).

Concomitantemente, conduziu-se uma pesquisa nos portais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no endereço eletrônico (<https://tempo.inmet.gov.br/>). Do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) (<http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>) e o repositório FTP do Instituto Estadual do Ambiente (INEA).

Para a série histórica de precipitação pluvial, foram obtidos dados diários de precipitação pluvial obtidos nas estações pluviométricas listadas na Tabela 9. A estação “Bonfim” do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2021) estação situada dentro da área de estudo. A estação “Itamarati” da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021) fica situada a 6,1 km de distância da estação do Bonfim. A estação “Pico do Couto” do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) situada a 20,2 km de distância da estação Bonfim, todas as estações localizadas no município de Petrópolis, conforme apresentado na Figura 12.

Os dados da estação “Bonfim” INEA, disponibilizados originalmente em escala temporal de 15 minutos foram acumulados para dados diários, para compatibilização com aqueles das estações “Pico do Couto” (INMET), “Itamarati” (ANA) e NASA POWER. O preenchimento de falhas existente, consistiu em comparar as chuvas diárias medidas em cada uma das estações escolhidas e calcular a média aritmética de precipitação diária entre todas as estações. Também foram utilizados os dados de precipitação obtidos do NASA POWER (NASA, 2020) com coordenadas geográficas da estação Bonfim do INEA (Tabela 9) para preenchimento de falhas. Logo, foram compilados em planilhas eletrônicas que resultou em uma série histórica com 20 anos de dados diários sem falhas.

Tabela 9 – Informações referente as estações pluviométricas com dados utilizados na série histórica.

Cód. Estação	Nome	Responsável	Latitude	Longitude	Altitude (m)
2243327	BONFIM	INEA	-22.4614	-43.0950	1026
A610	PICO DO COUTO	INMET	-22.4650	-43.2914	1777
2243010	ITAMARATI	ANA	-22.4853	-43.1492	1085
N/A	N/A	NASA POWER	-22.4614	-43.0950	1026

Fonte: A autora, 2024

3.3.2 Evapotranspiração potencial (ET_0)

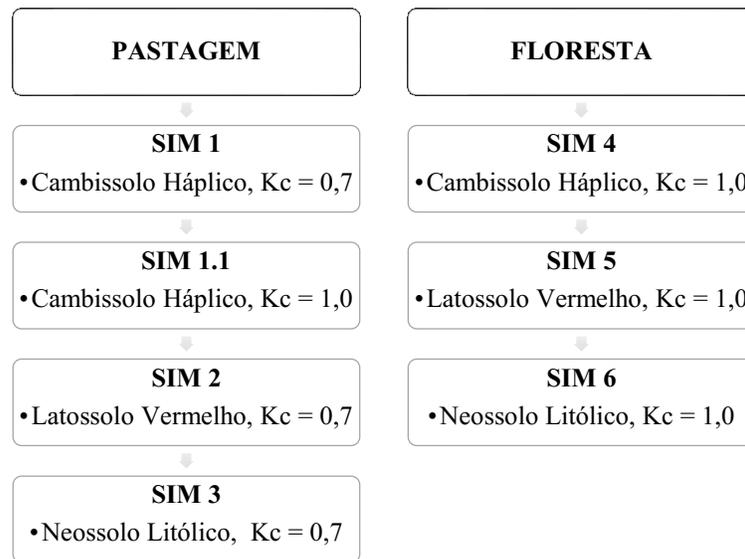
Os dados meteorológicos de temperatura do ar, radiação, velocidade de vento, pressão de vapor e de saturação, variáveis necessárias para o cálculo da ET_0 (ALLEN et al., 1998), foram obtidos na base NASA POWER *Prediction Of Worldwide Energy Resource* (NASA, 2021) baseado nas coordenadas geográficas da estação pluviométrica Bonfim (INEA). Os dados distribuídos livremente para download são disponibilizados no endereço eletrônico (<https://power.larc.nasa.gov/>). Os dados são disponibilizados desde 1983 até o presente para todos os parâmetros, exceto precipitação que é disponibilizada a partir de janeiro de 1997. Esses dados têm sido intensamente utilizados na recuperação de dados meteorológicos mundialmente (MARZOUK, 2021; WHITE et al., 2008) e validações com estações meteorológicas de superfície no Brasil (MONTEIRO; SENTELHAS; PEDRA, 2018; ROSA; SOUZA; SANTOS, 2023).

Com os dados de radiação solar (Wm^{-2}), Temperatura média ($^{\circ}C$), Velocidade média do vento (ms^{-1}) e umidade relativa do ar (%) foram estimados os valores diários da evapotranspiração de referência (ET_0) calculados pelo método de FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). A série histórica de dados utilizada no cálculo da ET_0 compreende o mesmo período (20 anos) obtido para a precipitação (01/01/2000 – 31/12/2019).

3.4 **Simulações do Balanço Hídrico no Programa HYDRUS-1D**

Os cenários selecionados para as simulações foram divididos em dois grupos, um grupo considerando o uso e cobertura da terra de pastagens e outro para florestas vegetando em Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico (perfis: 33, 34 e AE151), conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma das simulações no HYDRUS-1D



Legenda: SIM = simulação; K_c = coeficiente da cultura.

Fonte: A autora, 2024

A série histórica de evapotranspiração da cultura (ET_c) para pastagens e florestas foram obtidas pela multiplicação dos dados diários da ET_0 pelo coeficiente da cultura (K_c).

O coeficiente da cultura para pastagem já estabelecida (único e constante) varia entre $K_c = 0,8 - 1,0$ (ALENCAR et al., 2009; ANTONIEL et al., 2016; ROCHA, 2021; SANCHES, 2018; SANCHES et al., 2019). Neste trabalho, para as pastagens adotou-se o $K_c = 0,70$ nas simulações SIM 1, SIM 2 e SIM 3, devido à degradação das pastagens em muitas das áreas, e como comparação, a SIM 1.1, em que considera uma área de pastagem não degradada, com valor de $K_c = 1,00$ (Figura 17).

Em florestas primárias, o valor de $K_c = 1,00$ foi utilizado (MUNIZ, 2017; VILLA NOVA; SALATI; MATSUI, 1976), sendo esse o valor utilizado nesse estudo para as simulações SIM 4; SIM 5 e SIM 6 (Figura 18).

Utilizou-se a versão 4.17.01 40, HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013), em pré-processos (*Pre-processing*) selecionou-se o menu de processos (*Main processes*), marcaram-se as opções, simulação de fluxo de água (*Water Flow*) e absorção de água pelas raízes (*Root Water Uptake*).

Realizou-se simulações diretas para os solos Cambissolo Háptico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico sob pastagens (Figura 17) e florestas (Figura 18). As

condições de fronteira superior (*Upper Boundary Condition*), consistiram em dados meteorológicos diários (7305 dias) de precipitação, evaporação e transpiração, todos com unidade de medida em cm/dia, admitindo-se 10 cm de empoçamento da água na superfície do solo. Para as condições de fronteira inferior (*Lower Boundary Condition*) optou-se por drenagem livre (*Free Drainage*) considerando que o lençol freático estava abaixo do limite inferior do perfil estudado.

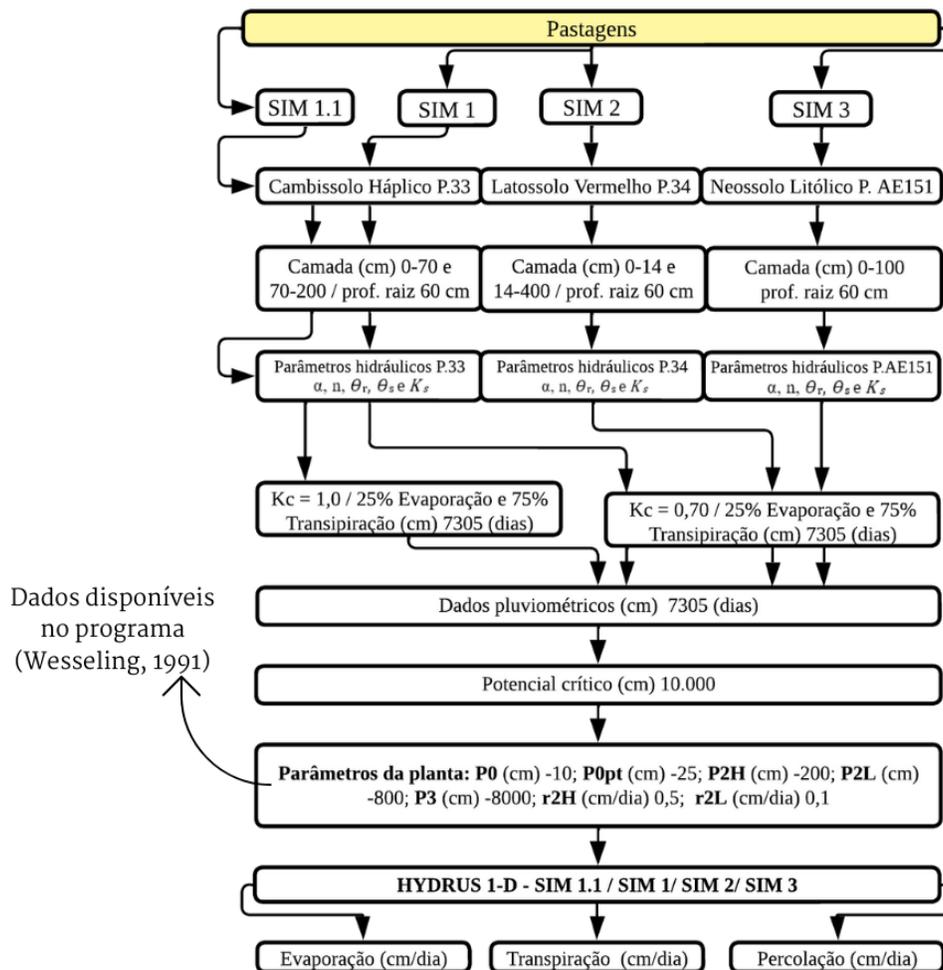
Considerou-se também o teor de água na capacidade de campo (10 kPa) para condições iniciais do solo. Adotou-se um perfil com profundidade de 200 cm para as simulações em Cambissolo Háplico (SIM 1.1/ SIM 1 e SIM 4), sendo este com duas camadas de material, a 1ª camada de 0-70 cm e 2ª camada de 71-200 cm. Para simulações em Latossolo Vermelho (SIM 2 e SIM 5) considerou-se um perfil com camadas de 0-14 e 14-400 cm, e em Neossolo Litólico (SIM 3 e SIM 6) apenas uma camada de 0-100 cm.

Para todas as camadas foram consideradas as propriedades de retenção, estimadas via PTF de MEDRADO; LIMA, (2014) (Equações 33, 34, 35 e 36). Os dados de condutividade hidráulica saturada K_s (cm dia⁻¹) foram estimados pelo modelo Splintex 2.0 (SILVA; ARMINDO; PREVEDELLO, 2020) para as simulações em Cambissolo Háplico (SIM 1.1; SIM 1 e SIM 4) e em Neossolo Litólico (SIM 3 e SIM 6). As estimativas das propriedades hidráulicas se deram pela falta de dados medidos na bacia hidrográfica do rio Bonfim.

Para as simulações com Latossolos Vermelho (SIM 2 e SIM 5) o valor de K_s foi estimado por Rosetta HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013). Para todas as simulações o parâmetro I, fator de tortuosidade do solo, foi adotado o valor $I=0,5$, valor sugerido por MUALEM, (1976).

As simulações sob pastagens distinguem-se das simulações sob florestas, principalmente em relação aos parâmetros de absorção de água pelas raízes (parâmetros de absorção radicular da água pelo modelo de Feddes) e o particionamento dos dados meteorológicos de evapotranspiração potencial em evaporação e transpiração de pastagens (Figura 17) e florestas (Figura 18).

Figura 17 – Fluxograma das simulações considerando a cobertura do solo sob pastagens no HYDRUS-1D

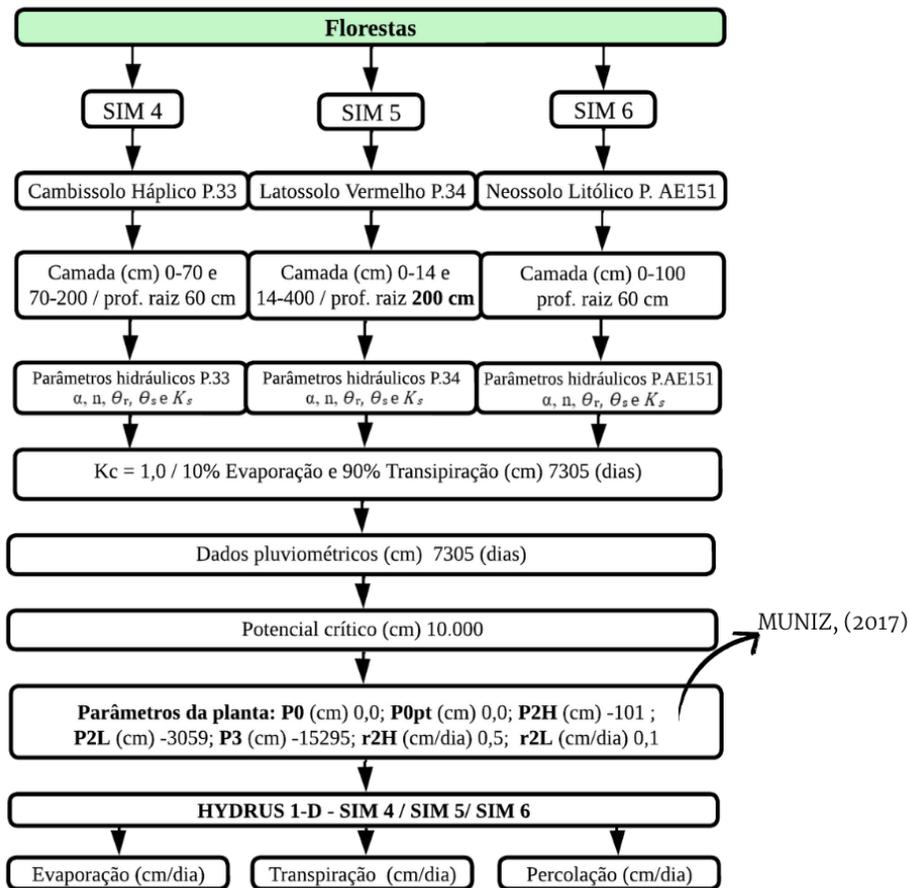


Fonte: A autora, 2024.

Para as áreas de florestas (SIM 4, SIM 5 e SIM 6) foi considerado que 10% da ET_c tinha potencial de ser perdido por evaporação e 90% por transpiração (Figura 18). A partição do valor de 10% para evaporação direta do solo em áreas de florestas é devido à fragmentação das áreas de floresta nessa bacia e grande ocorrência de afloramentos de rocha intercalados nas áreas de florestas. Para pastagens utilizou os valores de 25% para evaporação e 75% para transpiração (Figura 17). O percentual relativamente elevado para evaporação foi devido ao conhecimento de pastagens degradadas na região, constatado por visitas ao local.

O comprimento do sistema radicular foi considerado 60 cm para todos os cenários, exceto, a simulação com Latossolo Vermelho sob floresta (SIM 5), em que foi adotado 200 cm de profundidade (Figura 18).

Figura 18 – Fluxograma das simulações considerando a cobertura do solo sob florestas no HYDRUS-1D



Fonte: A autora, 2024

O modelo de Feddes que parametriza a capacidade das culturas de absorver água em função da disponibilidade e potencial da água no solo (FEDDES; ZARADNY, 1978), foi parametrizado para pastagens, com os dados disponíveis no programa e floresta com os valores utilizados por MUNIZ, (2017). Os valores de Feddes estão apresentados na Figura 17 e Figura 18.

O efeito da variação da capacidade de absorver água em função dos parâmetros fisiológicos de cada espécie, nesse estudo pastagens e floresta, deve ser atentando pois o

ponto de murcha permanente (8.000 cm e 15.295 cm – veja Figura 17 e 18), que é o valor potencial que a água no solo apresenta em que a planta reduz sua capacidade de absorver e transpirar, pode influenciar substancialmente os volumes de água transpirado, em especial na épocas quando o solo se apresenta mais seco (elevados potenciais).

Após as simulações, por padrão, o usuário pode selecionar a impressão dos resultados sobre pressão média, fluxos de água e soluto, cumulativos ou não, e detalhes de tempo e interação a cada intervalo de tempo. A janela de diálogo “informações de saída” controla como o HYDRUS exhibe seus resultados (ŠIMŮNEK et al., 2013).

3.5 Escoamento superficial

O método SCS-CN foi aplicado para estimativa do escoamento superficial em áreas sob pastagem e floresta. A série histórica de dados de precipitação pluvial sem falhas, compreendeu o período de 01/10/2011 a 23/12/2014. Os dados são registrados a cada 15 minutos e provenientes da estação pluviométrica do INEA “Bonfim”. A escolha do evento analisado foi em função do maior tempo de retorno, aproximadamente 5 anos, e se deu a partir dos eventos de intensidade superior a 20 mm h⁻¹ e duração máxima de 120 minutos (Tabela 10).

Tabela 10 – Eventos de precipitação pluvial acima de 20 mm h⁻¹ no período de 01/10/2011 a 23/12/2014 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

Evento	Duração (min)	Intensidade (mm h ⁻¹)	TR	P _{5 dias}	Condição de umidade do solo
11/10/2011	45	21,67	2,29	30,00	Normal
15/10/2011	120	20,13	3,92	65,75	Úmido
06/01/2012	120	25,13	4,90	130,25	Úmido
16/01/2012	45	29,67	3,14	2,00	Seco
11/12/2012	60	20,75	2,58	2,75	Seco
09/01/2014	60	23,00	2,86	12,75	Seco
14/01/2014	45	26,33	2,79	37,00	Normal

Legenda: TR = Tempo de retorno em anos; P_{5 dias} = Precipitação pluvial acumulada nos 5 dias anteriores ao evento; *Evento selecionado destacado em **negrito**.

Fonte: Dados da estação “Bonfim” do INEA, organizados pela autora, 2024.

A Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) com os parâmetros para o município de Petrópolis-RJ, foi aplicada no cálculo do tempo de retorno (Equação 4). O evento de precipitação pluvial selecionado foi 06/01/2012, a intensidade da chuva neste evento foi aproximadamente 25 mm/h (Tabela 10).

Para obtenção do valor CN de pastagens e florestas, foi utilizada a tabela de valores CN para bacias rurais (Tabela 2), considerado grupo tipo C (textura franco argilo arenosa) para Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico e grupo tipo D (textura argilosa) no Latossolo Vermelho sob pastagens de superfície pobre em curvas de nível. Para o valor de CN florestas, considerado grupo tipo C (textura franco argilo arenosa) para Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico e grupo tipo D (textura argilosa) no Latossolo Vermelho sob florestas de superfície densa e alta transpiração.

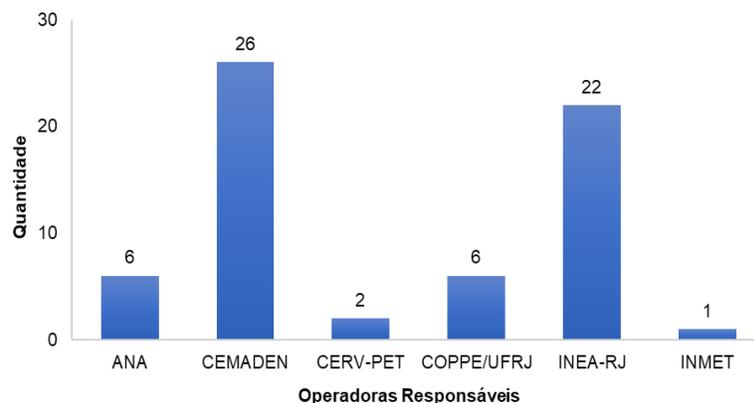
Os valores de CN para pastagens e florestas foram corrigidos em função da condição de umidade antecedente do solo. Foi utilizada a equação para Condição III de umidade (Equação 17). A equação que trata da precipitação efetiva ou volume de escoamento superficial, foi aplicada para pastagens e florestas conforme equação proposta pelo método SCS-CN (Equação 14).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Disponibilidade de dados de meteorológicos

Conforme informações disponibilizadas no portal *HidroWeb* (ANA, 2023) o município de Petrópolis dispõe ao todo de 63 estações pluviométricas em operação e 6 estações não-operando. As operadoras responsáveis pelos dados pluviométricos das estações em operação no município, segundo a ANA, são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Operadoras responsáveis pelas estações pluviométricas em operação no município de Petrópolis-RJ, segundo o portal da *HidroWeb* da ANA no ano de 2021



Fonte: A autora, 2024

Segundo informações disponibilizadas no *Hidroweb*, a estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em funcionamento é a estação 2243249 GRANJA JURITY, contudo, quando a informação foi verificada no portal do INMET, a estação que está em operação é a A610 PICO DO COUTO e não a GRANJA JURITY. O município de Petrópolis possui apenas uma estação pluviométrica sob responsabilidade do INMET, estação denominada como Pico do Couto, código A610.

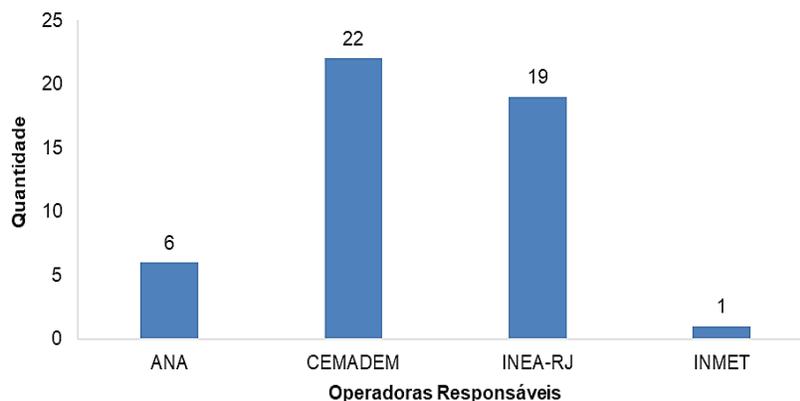
As estações pluviométricas sob responsabilidade do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) e operadas pela antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) atual Sistema de Serviços Geológicos do Brasil (SGB), foram implantadas para subsidiar pesquisas referente ao projeto Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativa da Região Serrana do Rio de Janeiro (EIBEX/MA), os dados das estações estão disponíveis em https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/dados_hidro.html (acesso em março de 2022).

Os dados de precipitação das estações pluviométricas sob responsabilidade da ANA e operadas pela SGB estão disponibilizados em escala diária. Já os dados em escala temporal de 15 minutos são disponibilizados pelo banco de dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ). Os dados das estações pluviométricas da rede de monitoramento de desastres naturais do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) /MCTIC estão disponíveis a partir do ano de 2013. Duas estações

não constam no portal *HidroWeb*, a 330390601G Quitandinha e 330390604A Saldanha Marinho, conforme verificado na base de dados do CEMADEN.

O levantamento de dados conforme informações disponibilizadas nas páginas webs, repositório FTP e portais webs do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2023), Instituto Estadual do Ambiente (INEA – RJ) (INEA, 2021), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi compilado e analisado as estações com dados disponíveis atualmente. As informações sobre as estações em operação e responsáveis de acordo com o levantamento de dados encontra-se na Tabela 18 - APÊNDICE A. A quantidade de estações pluviométricas com dados atualizados e disponibilizados atualmente foram 48 estações (Figura 20). As operadoras responsáveis com maiores quantitativos de estações pluviométricas no município são do CEMADEM e do INEA – RJ.

Figura 20 – Operadoras com dados de precipitação pluvial atualizados no município de Petrópolis-RJ, no ano de 2023

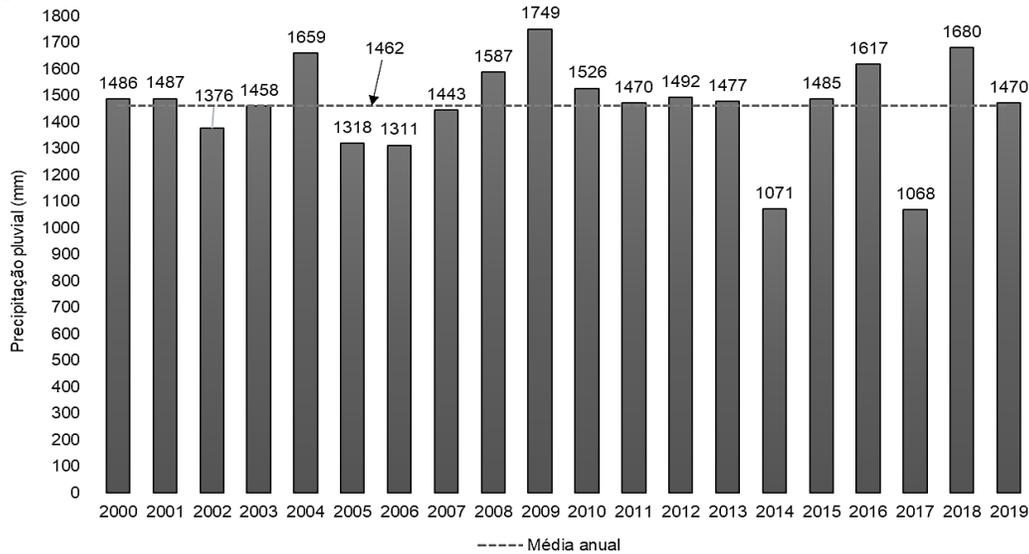


Fonte: A autora, 2024

4.2 Precipitação pluvial e evapotranspiração potencial (ET_o)

O total de chuva acumulada na bacia do Bonfim, em Petrópolis-RJ, ao longo dos anos 2000 a 2019 foi de 29231 mm, com uma média anual de 1462 mm. O ano que mais choveu foi 2009 com 1749 mm e o ano mais seco foi 2017 com 1068 mm (Figura 21).

Figura 21 – Precipitação pluvial anual entre 2000 e 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ



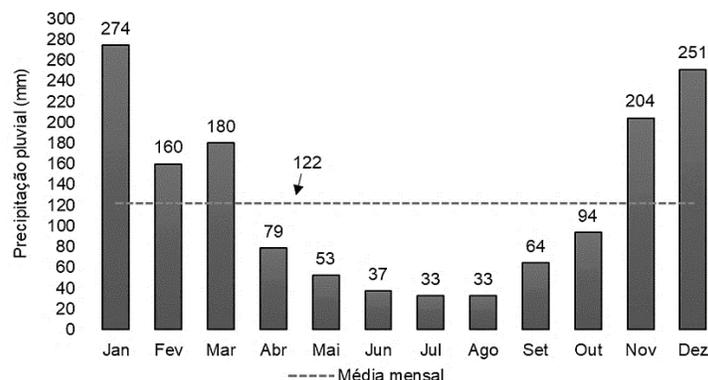
Fonte: INMET, ANA e INEA, NASAPOWER dados organizados pela autora, 2024

Os meses mais secos (abril a setembro) ao longo dos anos 2000 a 2019, apresentaram uma média mensal de 298 mm de precipitação pluvial, equivalente a 20% da precipitação média anual, e os meses mais chuvosos (outubro a março) uma média mensal de 1163 mm, equivalente a 80% da precipitação média pluvial anual (Figura 22), corroborando com os valores encontrados na região serrana do Rio de Janeiro e na região do Bonfim (ANDRÉ et al., 2008; LAWALL, 2018).

ANDRÉ et al., (2008) corroboram com a distribuição percentual de chuva dos meses mais chuvosos e secos encontrados no Bonfim. Segundo o autor, a região Serrana apresenta 1330 mm de precipitação média, e nos meses mais chuvosos (outubro a março), 79% da precipitação média anual (1056 mm) e nos meses mais secos um total de 274 mm (21%) da precipitação média anual.

Segundo LAWALL, (2018) a média de precipitação pluvial dos anos 2009 a 2012 para os meses mais secos (abril a setembro) foi de 294,5 mm e os meses úmidos (outubro a março) foi de 975,75 mm, conforme dados de precipitação observados na estação Sítio das Nascentes, localizada na região do Bonfim, resultados semelhantes foram encontrados no presente estudo.

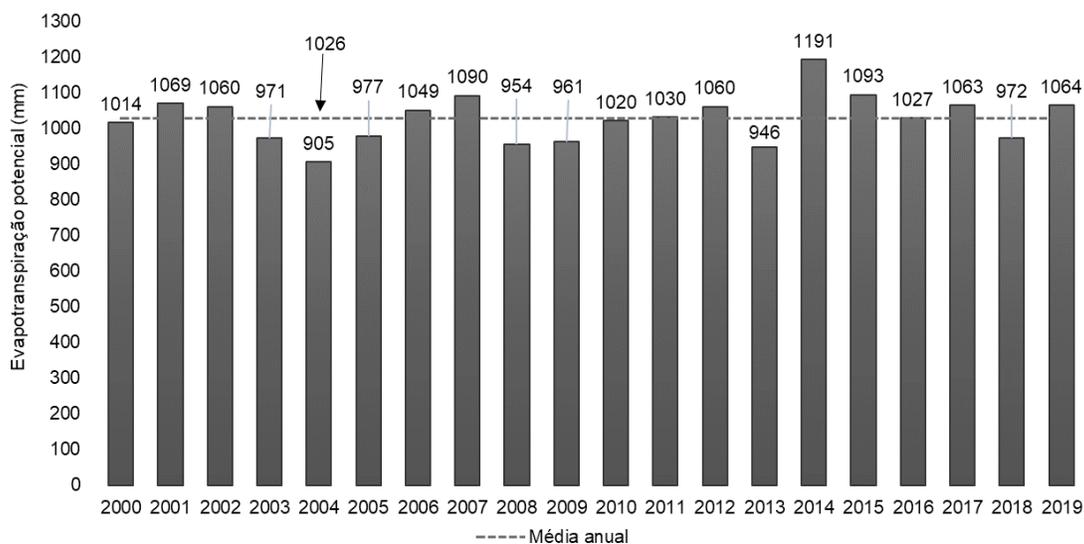
Figura 22 – Média mensal de precipitação pluvial entre 2000 e 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ



Fonte: A autora, 2024

O município de Petrópolis-RJ tem uma ETo média anual de 790 mm a 1158 mm segundo FIALHO; MACHADO, (2024) e NOVAIS; MACHADO, (2023). Esses valores são concordantes com o encontrado no presente estudo. O potencial de água que poderia ser evapotranspirada (ETo) ao longo dos anos 2000 a 2019 foi estimado em 20518 mm, com uma média anual de 1026 mm. O ano com maior ETo foi 2014 com 1191 mm e o ano com menor ETo foi 2004 com 905 mm (Figura 23).

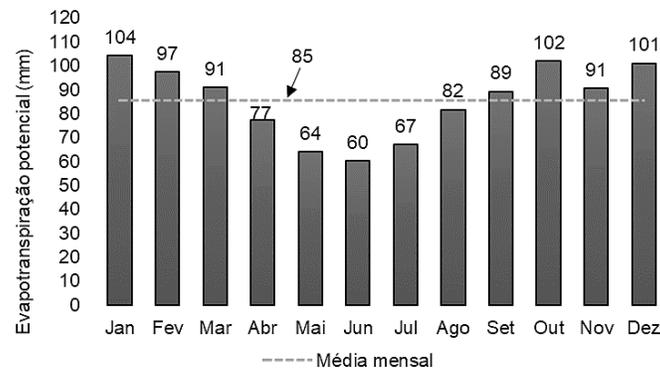
Figura 23 - Evapotranspiração potencial (ETo) anual entre os anos de 2000 e 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ



Fonte: A autora, 2024

Os meses mais secos (abril a setembro) ao longo dos anos 2000 a 2019, tem em média 441 mm de ETo, equivalente a 43% da ETo média anual (1026 mm), e os meses mais chuvosos (outubro a março) tem 585 mm, equivalente a 57% da ETo média anual. A média mensal de evapotranspiração foi de 85 mm (Figura 24).

Figura 24 – Média mensal de evapotranspiração potencial durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ



Fonte: A autora, 2024

A série histórica com os dados mensais e anuais de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial pode ser consultado na Tabela 18 e Tabela 19, no APÊNDICE A.

4.3 Parametrização das propriedades hidráulicas do solo

Os coeficientes da equação de VAN GENUCHTEN, (1980), α , n , θ_s e θ_r , para o Cambissolo Háplico para duas camadas, para o Latossolo Vermelho para duas camadas e para o Neossolo Litólico para uma camada, foram estimados com a PTF de (MEDRADO; LIMA, 2014) (Tabela 11). Os parâmetros preditores utilizados na PTF foram obtidos da caracterização dos perfis de Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico, apresentados anteriormente (Tabela 8). A equação PTF 4 apresentou a menor raiz do erro quadrático médio (RMSE) da densidade do solo ($1,62 \text{ gcm}^{-3}$) e foi selecionada

para estimar os valores de horizontes onde dados de densidade do solo não foram mensuradas.

Tabela 11 – Parâmetros da equação de van Genuchten estimados via PTF de Medrado e Lima (2014) para Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ

Classe	Camada	θ_s	θ_r	α	n	I	K_s (cm dia ⁻¹)
Cambissolo Háplico	1 - 0-70	0,513	0,183	0,536	1,588	0,5	133,220
	2 - 71-200	0,324	0,132	0,603	1,262	0,5	57,846
Latossolo Vermelho	1 - 0-14	0,526	0,208	0,580	1,571	0,5	95,040
	2- 15-400	0,358	0,155	0,650	1,279	0,5	59,030
Neossolo Litólico	1- 0-100	0,335	0,136	0,513	1,353	0,5	96,724

Fonte: A autora, 2024

O modelo *Full Model* segundo MEDRADO; LIMA, (2014) apresentou mais de 70% de sucesso quando comparado com a PTF de TOMASELLA; HODNETT; ROSSATO, (2000) modelo nível 1 (*Level 1*), que apresentou em torno de 20% para a mesma região do cerrado brasileiro.

4.4 Estimativas dos componentes do balanço hídrico em pastagens e florestas

Os volumes médios (em mm) dos componentes do balanço hídrico (BH) para todo o período (2000 a 2019) nas áreas sob pastagens foram de 1215 mm de percolação (83% da precipitação pluvial anual média), 107 mm de transpiração (7%) e 136 mm de evaporação (9%) para o Cambissolo Háplico sob pastagem degradada (SIM 1). Na SIM 1.1 em Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada, os volumes médios foram 1133 mm de percolação (78%), 156 mm (11% da precipitação anual média) de transpiração e 175 mm de evaporação (12%). No Latossolo Vermelho sob pastagens (SIM 2), os volumes médios do BH corresponderam a 1201 mm de percolação (82%), 88 mm de transpiração (6%) e 161 mm de evaporação (11%). No Neossolo Litólico (SIM 3), os

volumes foram 1190 mm de percolação (81%), 147 mm de transpiração (10%) e 140 mm de evaporação (10%). Os volumes médios do BH sob pastagens são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Volumes mensais dos componentes do balanço hídrico (BH) de 2000 a 2019 para pastagens – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

Mês	Percolação (mm)				Transpiração (mm)				Evaporação (mm)			
	SIM 1	SIM 1.1	SIM 2	SIM 3	SIM 1	SIM 1.1	SIM 2	SIM 3	SIM 1	SIM 1.1	SIM 2	SIM 3
Janeiro	248	240	246	254	3	5	2	6	16	21	18	16
Fevereiro	165	159	173	146	7	11	5	11	13	17	16	14
Março	152	144	148	153	3	6	2	5	14	20	15	15
Abril	98	94	113	81	5	10	3	10	11	14	13	11
Mai	47	44	60	35	8	15	6	14	9	10	11	9
Junho	38	30	41	29	10	18	7	16	7	8	9	7
Julho	25	22	34	15	16	20	13	18	7	8	9	7
Agosto	20	15	26	12	21	26	19	24	8	9	11	8
Setembro	23	18	25	23	17	19	15	17	9	10	11	9
Outubro	35	24	27	44	12	16	11	16	12	15	15	13
Novembro	124	110	78	162	3	6	3	6	14	19	16	15
Dezembro	240	233	229	235	2	3	1	4	16	23	17	17
Total	1215	1133	1201	1190	107	156	88	147	136	175	161	140
%	83%	78%	82%	81%	7%	11%	6%	10%	9%	12%	11%	10%
Estação chuvosa (out a mar)	964	910	902	995	30	48	24	48	87	116	97	89
%	66%	62%	62%	68%	2%	3%	2%	3%	6%	8%	7%	6%
Estação seca (abr. a set.)	251	223	299	196	77	108	63	99	49	59	64	51
%	17%	15%	20%	13%	5%	7%	4%	7%	3%	4%	4%	4%

SIM 1: Cambissolo Háplico sob pastagem; SIM 1.1: Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada; SIM 2: Latossolo Vermelho sob pastagem; SIM 3: Neossolo Litólico sob pastagem.

Fonte: A autora, 2024

Nas áreas sob florestas os volumes médios dos principais componentes do BH para todo o período (2000 a 2019), foram 637 mm (44% da precipitação pluvial anual média) de percolação, 745 mm (51%) de transpiração e 81 mm (6%) de evaporação no Cambissolo Háplico sob floresta (SIM 4). No Latossolo Vermelho (SIM 5), esses valores foram 516 mm (35%) percolado, 843 mm (58%) transpirado e 100 mm (7%) evaporado.

No Neossolo Litólico (SIM 6) foi 672 mm (46%) percolado, 722 mm (49%) transpirado e 83 mm (6%). Os volumes médios do BH para florestas são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Volumes mensais de 2000 a 2019 dos componentes do balanço hídrico para florestas – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

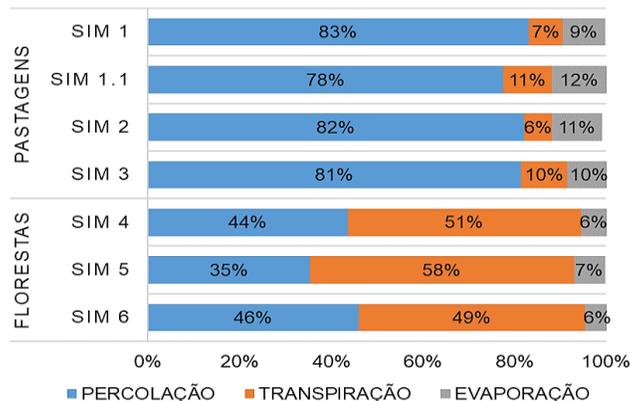
Mês	Percolação (mm)			Transpiração (mm)			Evaporação (mm)		
	SIM 4	SIM 5	SIM 6	SIM 4	SIM 5	SIM 6	SIM 4	SIM 5	SIM 6
Janeiro	173	144	178	93	94	91	9	10	9
Fevereiro	104	98	99	80	88	76	8	10	8
Março	84	79	85	77	82	75	9	9	9
Abril	49	55	39	67	70	64	6	8	6
Maió	23	33	11	50	58	47	5	6	5
Junho	13	19	8	42	54	39	4	6	4
Julho	9	13	4	33	59	31	4	6	4
Agosto	6	10	3	33	63	31	5	8	5
Setembro	6	7	8	38	55	38	5	8	6
Outubro	5	6	6	66	62	65	7	10	8
Novembro	26	5	74	75	69	75	8	9	8
Dezembro	141	49	159	91	90	90	10	10	10
Total	637	516	672	745	843	722	81	100	83
%	44%	35%	46%	51%	58%	49%	6%	7%	6%
Estação chuvosa (out a mar)	532	379	600	482	485	472	51	58	52
%	36%	26%	41%	33%	33%	32%	4%	4%	4%
Estação seca (abr. a set.)	105	136	72	263	359	250	30	42	31
%	7%	9%	5%	18%	25%	17%	2%	3%	2%

SIM 4: Cambissolo Háplico sob floresta; SIM 5: Latossolo Vermelho sob floresta; SIM 6: Neossolo Litólico sob floresta.

Fonte: A autora, 2024

O maior percentual de evapotranspiração foi de 65% (58% transpirado + 7% evaporado) da precipitação pluvial anual média no Latossolo Vermelho sob floresta (SIM 5) (Figura 25). O menor percentual de evapotranspiração foi 16% (7% + 9%) e o maior percentual de percolação foi 83%, ambos em Cambissolo Háplico sob pasto degradado (SIM1). Os percentuais de percolação, transpiração e evaporação para pastagens e florestas em todas as estações são apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Percentuais de percolação, transpiração e evaporação para pastagens e florestas em todas as estações - Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Legenda: SIM 1: Cambissolo Háplico sob pastagem; SIM 1.1: Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada; SIM 2: Latossolo Vermelho sob pastagem; SIM 3: Neossolo Litólico sob pastagem; SIM 4: Cambissolo Háplico sob floresta; SIM 5: Latossolo Vermelho sob floresta; SIM 6: Neossolo Litólico sob floresta.

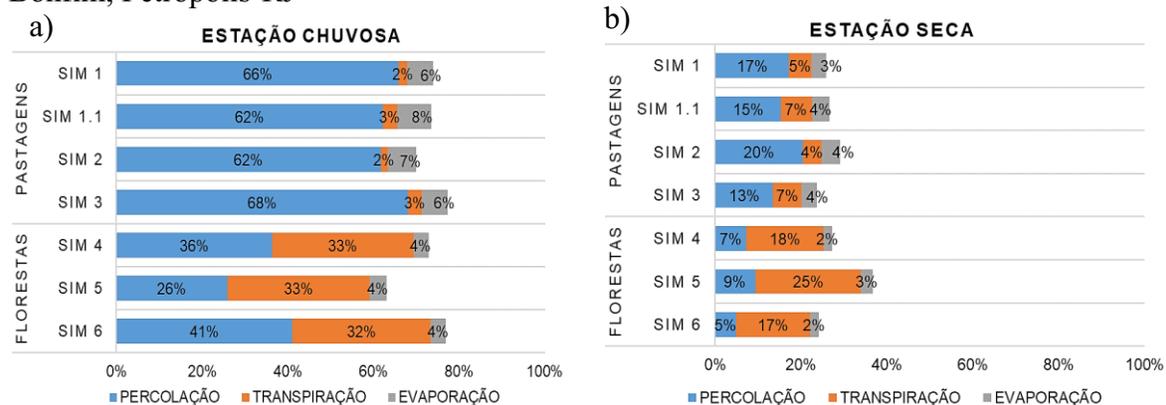
Fonte: A autora, 2024

Na estação chuvosa (outubro a março), o BH na área sob pastagem e sob floresta, mostrou que o maior volume de chuva precipitada que retornou à atmosfera foi de 543 mm (485 mm transpirado + 58 mm evaporado), aproximadamente 37% da precipitação pluvial anual média (1462 mm) no Latossolo Vermelho sob floresta (SIM 5) (Tabela 13). O menor volume de chuva evapotranspirada foi de 117 mm (30 mm transpirado + 87 mm evaporado) (Tabela 12) equivalente a 8% da precipitação pluvial anual média (1462 mm) no Cambissolo Háplico sob pasto degradado (SIM 1). Os maiores volumes de percolação no pasto e na floresta foram 995 mm - 68% no Neossolo Litólico sob pastagem (SIM 3) e 600 mm - 41% no Neossolo Litólico sob floresta (SIM 6).

Na estação seca (abril a setembro), o maior volume de evapotranspiração foi no Latossolo Vermelho sob floresta (SIM 5), média de 401 mm (359 mm transpirado + 42 mm evaporado) (Tabela 13) equivalente a 27% da precipitação pluvial média anual (1462 mm). O menor volume de evapotranspiração foi de 126 mm (77 mm transpirado + 49 mm evaporado) no Cambissolo Háplico sob pastagem degradada (SIM 1) (Tabela 12). Os maiores volumes de percolação foram no Latossolo Vermelho, média de 299 mm (20% da precipitação pluvial anual média) na pastagem (SIM 2) e na floresta (SIM 5) foi 136 mm (9%).

Os percentuais de percolação, evaporação e transpiração da estação chuvosa (outubro a março) e da estação seca (abril a setembro) são apresentadas na Figura 26.

Figura 26 – Percentuais de percolação, transpiração e evaporação para pastagens e florestas na estação chuvosa (outubro a março) e seca (abril a setembro) – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Legenda SIM 1 Cambissolo Háplico sob pastagem; SIM 1.1: Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada; SIM 2: Latossolo Vermelho sob pastagem; SIM 3: Neossolo Litólico sob pastagem; SIM 4: Cambissolo Háplico sob floresta; SIM 5: Latossolo Vermelho sob floresta; SIM 6: Neossolo Litólico sob floresta. a) Estação chuvosa e b) Estação seca.

Fonte: A autora, 2024

O balanço de massa no HYDRUS é a quantidade total de massa em todo o domínio de fluxo, ou em uma sub-região pré-selecionada, é dada pela soma de todos os elementos dentro da região especificada (ŠIMŮNEK et al., 2013). A incerteza no balanço de massa de água para as simulações com cobertura do solo sob pastagem foi de 0,045% na SIM 1 (Cambissolo Háplico), 0,029% a SIM 1.1 (Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada), 0,055% na SIM 2 (Latossolo Vermelho sob pastagem), 0,12% na SIM 3 (Neossolo Litólico sob pastagem). Para as simulações com cobertura do solo sob floresta, esses valores foram 0,10% na SIM 4 (Cambissolo Háplico sob floresta), 0,236% na SIM 5 (Latossolo Vermelho sob floresta) e 0,038% na SIM 6 (Neossolo Litólico sob floresta), segundo os resultados obtidos no HYDRUS-1D. Como a variação do armazenamento de água no solo no momento inicial e final não foi considerada no balanço, provavelmente uma parte desse valor se refere a variação da água armazenada no solo. No presente estudo, o escoamento superficial não foi calculado devido à utilização de dados diários na simulação, o processo de geração e estimativas de volumes de água (runoff) escoados

superficialmente demandam dados horários ou em melhor resolução temporal, quando da sua estimativa no HYDRUS-1D.

CASAGRANDE et al., (2021) desenvolveram um modelo, o *Soil-Vegetation-Water* (SOVEWA) e juntamente com outros dois programas de simulação, o *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM), e HYDRUS 1-D calcularam os principais componentes do balanço hídrico para avaliar o uso de cobertura do solo, sob pastagem obtida por desmatamento e sob floresta tropical virgem no estado de Rondônia. Segundo esses autores, a transpiração da floresta totaliza cerca de 50% do total precipitado, com valores próximos nos modelos utilizados. Os autores concluíram que florestas possuem taxas mais altas de transpiração e interceptação em relação às pastagens, e que as taxas de evaporação foram mais altas nas pastagens. Neste trabalho, os resultados corroboram esses valores, pois, os percentuais de transpiração na floresta foram de 49% a 58% e na pastagem de 6% a 11% do volume precipitado (Figura 25). Os percentuais da evaporação foram de 9% a 12% na pastagem e de 6% a 7% na floresta (Figura 25).

Segundo GUAUQUE-MELLADO et al., (2022), estudando um Latossolo Vermelho, na Mata Atlântica, as características do solo de infiltrar, reter e disponibilizar água são fundamentais para manter as taxas de evapotranspiração durante os períodos de seca, em especial em períodos de seca severa. Neste trabalho, a redução do percentual de água evapotranspirada da estação chuvosa para a estação seca no Latossolo Vermelho sob floresta de Mata Atlântica foi de 26%, passando de valores médios de 543 mm para 401 mm. No Cambissolo Háptico sob floresta, a redução foi de 45% (533 mm para 293 mm), valores próximos foram observados no Neossolo Litólico sob floresta.

HODNETT et al., (1995) mostraram que a variabilidade do armazenamento de água em um Latossolo Amarelo foi consideravelmente maior sob pastagem do que sob floresta, no segundo metro do perfil, especialmente após eventos de chuva na estação seca. Neste estudo, os resultados corroboram com os encontrados pelos autores, pois, na estação seca, a percolação no Latossolo Vermelho sob pastagem (SIM 2) foi de 299 mm (20%) e no Latossolo Vermelho sob floresta (SIM 5) foi 136 mm (9%). Na estação chuvosa, a percolação no Latossolo Vermelho sob pastagem (SIM 2) foi 902 mm (62%) e no Latossolo Vermelho sob floresta (SIM 5) foi 379 mm (26%). Para as simulações

com Latossolo Vermelho, sob pastagem e florestas, em ambos foi considerado o perfil com 4 metros.

O aumento da recarga subterrânea (percolação) após desmatamento de floresta apenas sucederá se as propriedades hidráulicas do solo continuarem inalteradas, porém, em casos de desmatamentos mecânicos de florestas e conversão para pastagens, na maioria das vezes levam a uma grave compactação e degradação da superfície do solo (HODNETT et al., 1995). Segundo o autor, o desmatamento numa área florestada acaba reduzindo as taxas de infiltração gerando aumento do escoamento superficial e consequentemente a erosão e com isso, aumento dos riscos de inundações.

A conversão de florestas em pastagens neste estudo não considerou o potencial significativo de aumento do escoamento superficial devido à redução na capacidade de infiltração e percolação da água no solo, especialmente em áreas montanhosas. Para realizar essa análise, seriam necessários dados atmosféricos horários, como precipitação e evapotranspiração, que não estão disponíveis para a região. Adicionalmente para a simulação nesses cenários com fluxos em duas dimensões seria necessário o uso de modelos com capacidade de simular em 2 ou 3 dimensões (SIMUNEK et al., 2013).

Os solos Cambissolo Háplico, geralmente possuem alta erodibilidade em função do grande potencial de escoamento superficial. Já os solos Latossolos apresentam valores de 50 a 60% de porosidade total, mesmo os mais argilosos, e devido à alta porosidade são solos com boa drenagem interna, são solos com baixa erodibilidade associado ao baixo escoamento superficial (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005). Os solos Neossolos Litólicos apresentam grande potencial para escoamento superficial, sendo esses muito suscetíveis a erosão (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005).

Os Cambissolos Háplicos são solos pouco desenvolvidos, geralmente de baixa permeabilidade, variam de pouco profundo a profundos e ocorrem em diferentes ambientes, mas principalmente em área de relevos ondulados a montanhosos. Em ambientes montanhosos, os solos mais rasos possuem grandes limitações para uso agrícola e alta suscetibilidade à processos erosivos, portanto há necessidade da aplicação de práticas conservacionistas (ZARONI; DOS SANTOS, 2021).

Durante a estação chuvosa, os maiores volumes de percolação ocorrem no Cambissolo Háplico e no Neossolo Litólico sob pastagem, estes solos são rasos e possuem baixa capacidade de infiltração.

Deve-se considerar que os volumes de evapotranspiração na floresta, em especial no Latossolo Vermelho, são maiores durante a estação chuvosa, e na estação seca sua redução é menor quando comparados ao Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico.

LAWALL, (2010) avaliou a influência das mudanças de tipo de uso e cobertura vegetal na hidrologia dos solos na bacia do Rio Bonfim. A autora verificou menor retenção e maior fluxo vertical na Unidade de Resposta Hidrológica da Floresta, enquanto na pastagem, uma maior retenção e saturação na superfície podendo gerar fluxos laterais e escoamento superficial no excedente a precipitação.

A redução da evapotranspiração na pastagem pode ocasionar redução da água devolvida à atmosfera, em forma de vapor, o que poderá influenciar diretamente na disponibilidade de água. Enquanto as florestas, com taxas mais altas de evapotranspiração, causam um efeito oposto na disponibilidade de água. Considerando que as florestas desempenham um papel importante no ciclo hidrológico, uma vez que interferem diretamente na redistribuição das chuvas (CARVALHO-SANTOS et al., 2016), contribuem com a regulação do microclima e preservação do solo em uma bacia hidrográfica (BALBINOT et al., 2008), e considerando os estudos realizados por LAWALL, (2010) e SILVA, (2013), não se recomenda a conversão de florestas para pastagens em bacias hidrográficas de solos Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico. Os benefícios em manter a área florestada são maiores do que convertê-las em pasto, pois as florestas têm elevada capacidade ecossistêmica de preservar os recursos hídricos e regulação do clima e proteger contra erosão.

As alterações que intervêm no balanço hídrico devem ser consideradas ao planejar programas de mudanças de uso da terra e conservação dos recursos naturais, em bacias hidrográficas.

4.5 Estimativas do escoamento superficial

O evento de precipitação pluvial analisado ocorreu em 06/01/2012, com duração de 2 horas, o total de precipitação pluvial acumulada de 50,25 mm (Tabela 14), e a intensidade da chuva de 25 mm h⁻¹.

Tabela 14 – Evento de precipitação pluvial em 06 de janeiro de 2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis - RJ

Duração (min)	Evento - 06/01/2012							Total	
	15	30	45	60	75	90	105		120
Chuva (mm)	0,75	4,25	1,25	13,5	22,25	7,25	0,75	0,25	50,25

Fonte: Adaptado do banco de dados do INEA (2021)

O tempo de retorno do Evento 06/01/2012 foi de aproximadamente 5 anos, conforme a Equação 37:

$$T = \left[\frac{25,13 (120 + 30,6)^{0,8862}}{2655,6} \right]^{0,1644} = 4,9 \text{ anos} \quad (37)$$

O volume de escoamento superficial estimado no evento de 06/01/2012, em Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico de textura franco argilo arenosa (grupo tipo C) sob pastagens foi 16,53 mm, ou seja, do total de chuva precipitada, cerca de 33% desta chuva, foi escoamento superficial, e Latossolo Vermelho de textura argilosa (grupo tipo D) foi 17,74 mm, equivalente a 35% de escoamento superficial. A Tabela 15 apresenta os acumulados de precipitação e escoamento superficial sob pastagens para o grupo tipo C e grupo tipo D.

Tabela 15 – Acumulado de precipitação pluvial e escoamento superficial sob pastagens do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis – RJ

Tempo (min)	Precipitação acumulada (mm)	Escoamento superficial pastagem (mm) – Grupo C	Escoamento superficial pastagem (mm) – Grupo D
15	0,75	0,00	0,00
30	5,00	0,00	0,05

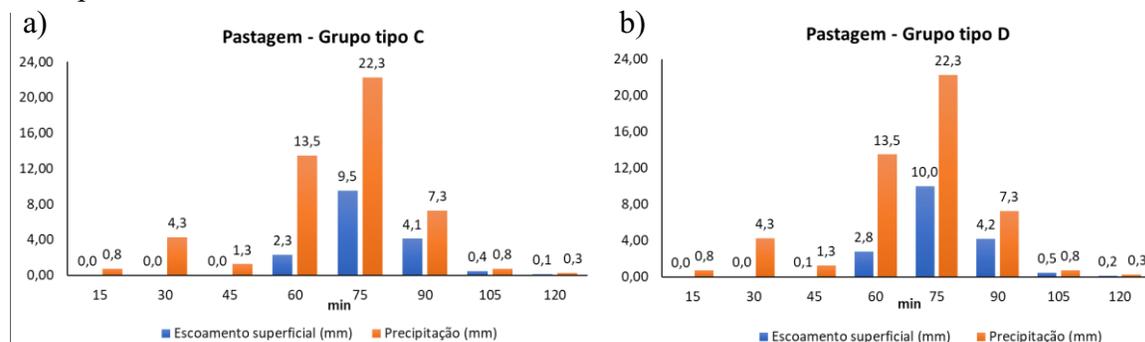
Continua

Tempo (min)	Precipitação acumulada (mm)	Escoamento superficial pastagem (mm) – Grupo C	Escoamento superficial pastagem (mm) – Grupo D
45	6,25	0,01	0,08
60	19,75	2,28	2,81
75	42,00	9,53	9,99
90	49,25	4,11	4,20
105	50,00	0,45	0,45
120	50,25	0,15	0,15
Total	50,25	16,53	17,74

Legenda: Grupo C (textura franco argilo arenosa) e Grupo D (textura argilosa)
 Fonte: A autora, 2024

Os maiores volumes de escoamento superficial sob pastagem foi 9,5 mm no solo de textura franco argilo arenosa e 10 mm no solo mais argiloso, em 75 minutos após o início do evento, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Escoamento superficial em função do tempo sob pastagens do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Legenda: a) Grupo tipo C (textura franco argilo arenosa); b) Grupo tipo D (textura argilosa)
 Fonte: A autora, 2024

O volume de escoamento superficial estimado no evento 06/01/2012 para florestas foi de 11,88 mm, correspondente a 24% do volume de chuva para solo Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico de textura franco argilo arenosa (grupo tipo C) e 13,88 mm (28%) de escoamento superficial para solo Latossolo Vermelho mais argiloso (grupo tipo D). A Tabela 16 apresenta os acumulados de precipitação e escoamento superficial sob floresta para o grupo tipo C e grupo tipo D.

Tabela 16 – Acumulado de precipitação pluvial e escoamento superficial sob florestas do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis – RJ

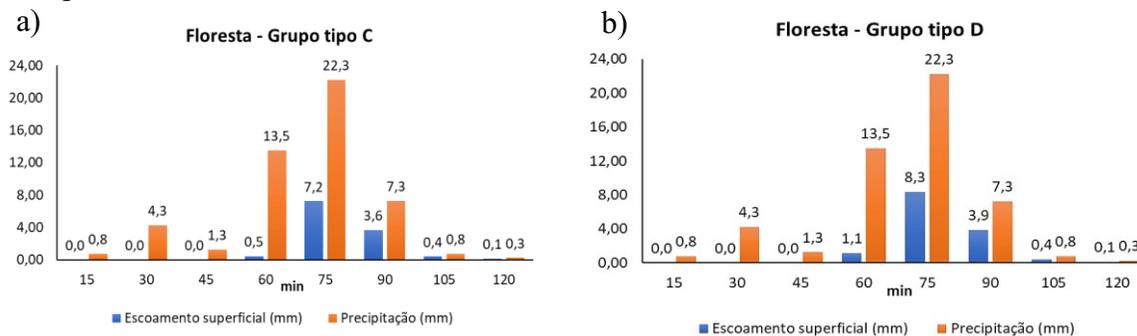
Tempo (min)	Precipitação acumulada (mm)	Escoamento superficial floresta (mm) – Grupo C	Escoamento superficial floresta (mm) – Grupo D
15	0,75	0,00	0,00
30	5,00	0,00	0,00
45	6,25	0,00	0,00
60	19,75	0,47	1,11
75	42,00	7,24	8,33
90	49,25	3,64	3,87
105	50,00	0,40	0,42
120	50,25	0,14	0,14
Total	50,25	11,88	13,88

Legenda: Grupo C (textura franco argilo arenosa) e Grupo D (textura argilosa)

Fonte: A autora, 2024

Os maiores volumes de escoamento superficial sob floresta foi 7,2 mm no solo de textura franco argilo arenosa e 8,3 mm no solo mais argiloso, em 75 minutos após o início do evento, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Escoamento superficial em função do tempo sob florestas do grupo tipo C e grupo tipo D para o evento ocorrido em 06/01/2012 – Bacia hidrográfica do Rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Legenda: a) Grupo tipo C (textura franco argilo arenosa); b) Grupo tipo D (textura argilosa)

Fonte: A autora, 2024

Segundo DE CASTRO et al., (2012) as áreas ocupadas por pastagens degradadas proporcionam maiores densidades do solo e escoamento superficial em relação a áreas ocupadas por floresta nativa, no entanto, o aumento da altura precipitada produz aumento do escoamento superficial independente da cobertura do solo. As estimativas apresentadas neste trabalho corroboram com a conclusão do autor, pois, o escoamento superficial em solos argilosos sob pastagens foi maior que em solos de textura franco argilo arenosa sob florestas.

Ao analisar as pastagens na bacia hidrográfica do rio Bonfim LAWALL, (2018) concluiu que mesmo nas estações de chuvas de baixa intensidade a moderada, 10 a 25 mm h⁻¹, são suficientes para saturar o solo e gerar escoamento superficial, corroborando com a estimativa deste trabalho.

A erosão hídrica dos solos está diretamente relacionada ao processo de escoamento superficial direto (AVANZI et al., 2008), pois, o escoamento superficial pode acarretar a erosão do solo, e, atualmente a gestão de conservação do solo tem sido amplamente aplicada para o combater problemas de erosão. Segundo DU et al., (2022) práticas de conservação do solo, como agrofloresta, culturas de cobertura, plantio direto, cultivo reduzido, devolução dos resíduos, reduzem expressivamente a erosão dos solos, média de 80% e reduz o escoamento superficial em média 67%.

Uma limitação do estudo é que a região e o relevo se apresentam ondulado e forte ondulado o que demanda o uso de ferramentas de modelagem bi ou tridimensionais e uma parametrização muito mais detalhada do solo. Entretanto a maior parte das áreas agrícolas e pastagens não se encontram nos relevos fortes ondulado.

Todas as paisagens que contenham alguma declividade, usualmente 3°, podem sofrer o processo de erosão do solo, por tanto é considerado um fenômeno natural, porém, a erosão gerada por escoamento superficial e subsuperficial nas encostas, é a que possui maior distribuição geográfica em diversos países (GUERRA et al., 2020). As áreas com declives acentuados e o uso do solo com ausência de práticas de conservação do solo, leva o aumento das perdas de potenciais de solo acima do nível de tolerância (HENRIQUE et al., 2018).

CONCLUSÕES

O valor médio anual de precipitação encontrado foi de 1462 mm, com o ano mais seco (2017) com 1068 mm e o mais chuvoso (2009) com 1749 mm. Durante os meses chuvosos (outubro a março) ocorrem 80% da precipitação anual.

A média de evapotranspiração potencial foi de 1026 mm. Com um valor mínimo de 905 mm no ano de 2004 e máximo de 1191 no ano 2014.

O balanço hídrico mostrou para as áreas de pastagens no Cambissolo Háplico degradadas que 83% do volume precipitado percola, 7% é transpirado e 9% é evaporado. Estes percentuais foram 82%, 6% e 11% no Latossolo Vermelho, 81%, 10% e 10% no Neossolo Litólico, respectivamente.

No Cambissolo Háplico sob área de pastagem não degradada, 78% do volume precipitado percola, 11% transpirado e 12% evaporado.

O balanço hídrico mostrou para as áreas de floresta que em solos rasos, como o Cambissolo Háplico, 44% do volume precipitado percola, 51% é transpirado e 6% é evaporado. No Neossolo Litólico, estes percentuais foram 46%, 49% e 6%, respectivamente. No Latossolo Vermelho, com raízes mais profundas, 35% do volume precipitado percola, 58% é transpirado e 7% é evaporado.

Os maiores percentuais da precipitação evapotranspirada na estação seca para as áreas de pastagens e florestas, foram 11% no Latossolo Vermelho sob pastagem e no Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada, e 27% no Latossolo Vermelho sob floresta. Nos meses mais chuvosos os maiores percentuais foram de 11% no Cambissolo Háplico sob pastagem não degradada e 37% no Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico sob floresta.

Os maiores volumes de água percolada na estação de seca foram de 20% no Latossolo Vermelho sob pastagem e de 9% no Latossolo Vermelho sob floresta. Na estação chuvosa esses percentuais foram de 62% e 26%, respectivamente da precipitação no período.

O escoamento superficial estimado para um evento de chuva com intensidade igual a 25 mm h^{-1} , foi de 33% e 35% na pastagem, e 24% e 28% na floresta do volume precipitado no evento.

As características do solo são relevantes nos cálculos do balanço hídrico. Conclui-se que o cálculo do balanço hídrico, assim como a disponibilização dos dados meteorológicos organizados, resultantes deste estudo, podem contribuir para a realização de outras pesquisas fundamentais para embasar a tomada de decisões por comitês de

bacias hidrográficas e até na elaboração de planos diretores, especialmente no que se refere ao uso e ocupação do solo de bacias hidrográficas.

Recomenda-se considerar na modelagem numérica o escoamento superficial devido à redução na infiltração e percolação da água, especialmente em áreas montanhosas com possível compactação do solo, quando ocorre o desmatamento e formação de pastagens. Para esses estudos, são necessários dados atmosféricos horários, como precipitação e evapotranspiração.

Sugere-se calibrar e validar o modelo utilizando dados medidos na Bacia Hidrográfica do rio Bonfim, em Petrópolis-RJ, com monitoramento da dinâmica da água nos diferentes sistemas de uso do solo e/ou o monitoramento da água percolada e vazão dos rios, assim como a variação da altura do lençol freático.

Adicionalmente, recomenda-se a aplicação desta metodologia de modelagem para outros solos da bacia e outros sistemas de uso do solo. Dessa forma, será possível criar, no futuro, um mosaico dos diferentes sistemas de uso do solo nas diferentes classes de solo que compõem a Bacia Hidrográfica do rio Bonfim. Com isso, será possível estimar os impactos dessas mudanças nos fluxos dos componentes do balanço hídrico.

REFERÊNCIAS

- AGEVAP. **PF-05 – Plano de Bacia Hidrográfica da RH-IV**. Petrópolis Agência da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, , 26 mar. 2021.
- ALBUQUERQUE, A. M. DE et al. Balanço hídrico como ferramenta de gerenciamento de recursos hídricos: Aplicação na área de influência direta do Açude Castanhão - CE. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, v. 21, n. 2, p. 1–13, 2019.
- ALENCAR, C. A. B. DE et al. Irrigação de pastagem: Atualidade e recomendações para uso e manejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. SUPPL. 1, p. 98–108, 2009.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. 56. ed. Rome, Italy: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. v. 56
- ANA. **HIDROWEB**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 1 jul. 2023.
- ANDRADE, C.; DE SOUZA, I. R. P.; AMARAL, T. A. **Protocolo para coleta e análise de dados experimentais para calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-Maize para a cultura do milho**. (Embrapa Milho e Sorgo-Documents 253, Ed.) **Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E)**. Sete Lagoas - MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2020.
- ANDRÉ, R. G. B. et al. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 501–509, 2008.
- ANTONIEL, L. S. et al. Pasture production under different irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 539–544, 2016.
- ARA, Z.; ZAKWAN, M. Estimating Runoff Using SCS Curve Number Method. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 8, n. 5, p. 195–200, 2018.
- ARAUJO, L. M. N. **Variabilidade da precipitação na bacia do rio Piabanha**. Juiz de Fora: III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, 2018.
- AVANZI, J. C. et al. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 563–569, 2008.
- BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência, Guarapuava - PR**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.

BARROS, A. H. C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico**. Tese de Doutorado—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.

BARROS, C. B. R. DE; SOARES, W. DE A.; HOLANDA, M. A. C. R. DE. Influência do substrato dos telhados verdes na redução do escoamento superficial quando submetido às condições climáticas da Região Metropolitana do Recife. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. 1–18, 2021.

BOSCHI, R. S. et al. How accurate are pedotransfer functions for bulk density for brazilian soils? **Scientia Agricola**, v. 75, n. 1, p. 70–78, 2018.

BROOKS, R.; COREY, A. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers, Colorado State University**, v. 3, n. March, p. 1–37, 1964.

CALVETTI, L. et al. **Validação de estimativas de precipitação por radar e satélite: análise de relações ZR e integração com pluviômetros**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...Campo Grande - MS: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009.

CAMARGO, L. et al. Map of Areas Susceptible to Forest Fires in the Municipality of Petrópolis- RJ. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, p. 630–641, 13 maio 2019.

CARRARA, E. R. et al. NASA POWER satellite meteorological system is a good tool for obtaining estimates of the temperature-humidity index under Brazilian conditions compared to INMET weather stations data. **International Journal of Biometeorology**, v. 67, n. 7, p. 1273–1277, 2023.

CARVALHO, L. G. DE et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.

CARVALHO FILHO, A. et al. **Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro, escala 1:250.000**. 32. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. v. 32

CARVALHO JUNIOR, W. DE et al. Regressão linear múltipla e modelo Random Forest para estimar a densidade do solo em áreas montanhosas. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1428–1437, 2016.

CARVALHO-SANTOS, C. et al. Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 5, p. 720–738, 2016.

CASAGRANDE, E. et al. Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon. **Ecological Indicators**, v. 121, p. 1–9, 2021.

CEMADEN. **Radares meteorológicos.** Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/radares-meteorologicos-2/>>. Acesso em: 27 nov. 2022.

CEMADEN. **Mapa Interativo.** Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>>. Acesso em: 1 jul. 2023.

CLARKE TOPP, G.; FERRÉ, P. A. T. 3.1 Water Content. Em: **Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts and Modeling.** [s.l.] Wiley, 2018. p. 417–545.

CNN BRASIL. **Petrópolis já tem mais de 700 ocorrências devido as fortes chuvas.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/petropolis-ja-tem-mais-de-700-ocorrencias-devido-as-fortes-chuvas/>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e ciências ambientais**. Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. v. 1

COSTA, L. V. B.; SOARES, W. DE A. Avaliações de Funções de Pedotransferência para Solos Brasileiros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2028–2041, 2021.

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil; Equações Intensidade-Duração-Frequência. Município: Petrópolis/RJ. Estação Pluviográfica: Rio da Cidade, Código ANA 02243011. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais** São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>

DE CASTRO, M. et al. Atributos físico-hídricos do solo ocupado com pastagem degradada e floresta nativa no cerrado Sul-Mato-Grossense. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, v. 3, n. 2, 2012.

DRACH, P. et al. Evolução urbana do centro histórico de Petrópolis: Processo de arqueologia da paisagem 1860-2020. **Revista de Morfologia Urbana**, v. 8, n. 2, p. 1–22, 2020.

DU, X. et al. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 2, p. 188–196, 2022.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211–223, 1994.

ENGELBRECHT, B. Z. et al. Disponibilidade Hídrica E Balanço Hídrico Da Bacia Do Rio Cachoeira Na Região De Itabuna/BA. **Geosciences**, v. 38, n. 3, p. 731–740, 2019.

FEDDES, R. A.; ZARADNY, H. Model for simulating soil-water content considering evapotranspiration — Comments. **Journal of Hydrology**, v. 37, n. 3–4, p. 393–397, 1 maio 1978.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008.

FERNANDES, M. et al. Floods in Petrópolis City, Brazil: A geocological analysis. **Geography Review**, v. 35, p. 22–27, 1 fev. 2022.

FIALHO, E. S.; MACHADO, L. A. Classificação climática do estado do Rio De Janeiro: Revisão, reanálise e reflexões. **RC**, n. 23, p. 367, 29 jan. 2024.

FILL, H. D. et al. Balanço hídrico da bacia do rio Barigüi, PR. **RA'E GA**, v. 8, n. 9, p. 59–67, 2005.

GAREN, D. C.; MOORE, D. S. Curve number hydrology in water quality modeling: Uses, abuses, and future directions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 377–388, 2005.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

GENOVEZ, A.; SARTORI, A.; NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005.

GOULART, D. R.; GUERRA, A. J. T. **Diagnóstico da suscetibilidade à erosão dos solos da Bacia hidrográfica do Bonfim Correias, Petrópolis - RJ**. Dissertação (mestrado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

GUAUQUE-MELLADO, D. et al. Evapotranspiration under Drought Conditions: The Case Study of a Seasonally Dry Atlantic Forest. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 871, 26 maio 2022.

GUERRA, A. et al. Four decades of landslides and floods in Petrópolis. **Geography Review**, v. 38, p. 10–14, 31 jan. 2024.

GUERRA, A. J. T. et al. Soil erosion, different approaches and techniques applied to gullies and trail erosion. **William Morris Davis – Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, p. 75–117, 2020.

GUERRA, A. J. T.; LOPES, P. B. M.; SANTOS FILHO, R. D. DOS. Características Geográficas e Geomorfológicas da APA, Petrópolis, RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 1, p. 77–86, 2007.

HENRIQUE, M. J. et al. Water erosion in oxisols under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 42, n. e0170093, p. 1–14, 2018.

HODNETT, M. G. et al. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. **Journal of Hydrology**, v. 170, n. 1–4, 1995.

IBGE. **População no último censo**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

INEA. **Orientações para acesso dos dados hidrometeorológicos do INEA através de repositório FTP**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/Orienta%C3%A7%C3%B5es_FTP_site_06.12.21.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2023.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br>>. Acesso em: 17 nov. 2021.

JONG VAN LIER, Q. DE. **Física do solo - baseada em processos**. do autor ed. Piracicaba: Quirijn de Jong van Lier, 2020.

KIELING, D. **Evolução do uso e cobertura do solo, com foco nas Áreas de Preservação Permanente na Bacia Hidrográfica do Bonfim, Petrópolis – Rio de Janeiro**. Dissertação de mestrado em Ciências—Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, v. 32, n. 9, p. 2697–2703, 1996.

LAWALL, S. **Modificações na hidrologia dos solos em resposta as alterações de uso e cobertura na bacia hidrográfica do Bonfim, região serrana do Rio de Janeiro**. Dissertação de mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

LAWALL, S. **Os Efeitos dos Diferentes Tipos de Uso e Cobertura da Terra, Características dos Solos e Chuvas na Hidrologia dos Solos da Região Serrana do Rio de Janeiro**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo : Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

MARTINHAGO, D. et al. Balanço hídrico de uma bacia hidrográfica localizada no oeste do estado do Paraná. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 965–970, out. 2021.

MARZOUK, O. A. Assessment of global warming in Al Buraimi, sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements. **Heliyon**, v. 7, n. 3, p. 1–19, 2021.

MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59–66, 2014.

MIRANDA, R. A. C. DE; SOUZA, L. DE. **Climatologia Geografica**. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2013. v. 2

MISHRA, S.; KUMRE, S.; PANDEY, A. SCS-CN method revisited in perspective of strange data. **International Journal of Hydrology**, v. 3, n. 6, p. 488–498, 2019.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PEDRA, G. U. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 3, p. 1–11, 2018.

MUALEM, Y. Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 6, 1976.

MUNIZ, R. S. **Alterações do fluxo hídrico e seus efeitos na dinâmica do ferro e na estrutura de um Latossolo Amarelo na Amazônia**. Tese (Doutorado)—Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, out. 2017.

NASA. **NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER)**. <https://Power.Larc.Nasa.Gov/Data-Access-Viewer/>, 2020.

NASCIMENTO, A. C. DE M. et al. **Chuvas de alta intensidade e volume no município de Petrópolis - RJ**. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...Belo Horizonte: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2021.

NOVAIS, G. T.; MACHADO, L. A. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 1–39, 2023.

ODA, P. S. S. **Plano diretor municipal e plano de manejo de unidades de conservação: colaborações nos objetivos da política nacional de proteção e defesa civil**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)—Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2022.

OTTONI, M. V. et al. Hydrophysical Database for Brazilian Soils (HYBRAS) and Pedotransfer Functions for Water Retention. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p. 1–17, 12 jan. 2018.

PEREIRA, N. R. et al. **Levantamento semidetalhado dos solos da microbacia do Córrego do Bonfim, município de Petrópolis, Região Serrana do estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Rio de Janeiro: (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 273), 2021.

PESSOA, F. A. **Formas de húmus na identificação do estado funcional de fragmentos florestais na bacia hidrográfica do Bonfim, Petrópolis - RJ**. Dissertação de mestrado em Geografia—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

PETRÓPOLIS. **Diagnóstico do Plano Diretor de Petrópolis**. Prefeitura Municipal de Petrópolis, 2013. Disponível em: <<https://sig.petropolis.rj.gov.br/cpge/planodir.html#home>>. Acesso em: 30 jun. 2023

PETRÓPOLIS. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Petrópolis/RJ. Prefeitura Municipal de Petrópolis**, 2014. Disponível em: <<https://sig.petropolis.rj.gov.br/cpge/PMSB.html#home>>. Acesso em: 30 jun. 2023

PETRUNGARO TORRES, G.; RODRIGUES DO CARMO, L. F.; PINTO DE ALMEIDA PALMEIRA, A. C. Estudo da relação entre precipitação e deslizamentos no município de Petrópolis – RJ. **Sistemas & Gestão**, v. 15, n. 1, 2020.

PIMENTEL DA SILVA, L. **Hidrologia: engenharia e meio ambiente**. 1a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 2015. v. 1

HUF DOS REIS, A. M. et al. Hierarchical pedotransfer functions for predicting bulk density in Brazilian soils. **Scientia Agricola**, v. 81, n. e20220255, p. 1–10, 2024.

ROCHA, F. I. **Alterações Edáficas, Microbianas e na Saúde Animal Decorrentes da Conversão Floresta-Pastagem na Amazônia Ocidental**. (Tese)—Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, dez. 2021.

RODRIGUES, A. L. et al. Balanço hídrico de uma microbacia hidrográfica no sudeste do Brasil: Implicações para o manejo de serviços ecossistêmicos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, n. 16, p. 614–628, 2021.

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M. DE; SANTOS, A. A. DOS. Data from NASA Power and surface weather stations under different climates on reference evapotranspiration estimation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, n. e03261, p. 1–11, 2023.

RUHOFF, A. L. **Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas**. Mestrado em Geociências—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

SANCHES, A. C. **Coefficiente de cultura (Kc) e correlações de consumo de água, fatores produtivos e biométricos de gramíneas tropicais em cultivo exclusivo e em sobressemeadura com forrageiras de inverno**. Tese (Doutorado) USP—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2018.

SANCHES, A. C. et al. Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 6, p. 448–458, 2019.

SECRETARIA MUNICIPAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL. **PLANO DE CONTINGÊNCIA DO MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS/RJ PARA CHUVAS INTENSAS**. Prefeitura Municipal de Petrópolis Petrópolis, 31 out. 2022.

SILVA, A. C. **Simulação da descarga fluvial em resposta a mudanças de uso e cobertura da terra: Bacia do rio Bonfim, Petrópolis (RJ)**. Dissertação de Mestrado em Geografia—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; PREVEDELLO, C. L. Splintex 2.0: A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169, 2020.

SILVA JUNIOR, J. F. et al. Estabelecimento dos meses mais críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 122–131, 2018.

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**. Riverside: Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2009.

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**. Riverside: Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2013.

ŠIMŮNEK, J. et al. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 7, p. 1–25, 2016.

SOUZA, R. M. S. et al. Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 449–455, maio 2015.

SOUZA, W. et al. **Análise das características morfométricas e do uso e ocupação do solo e seus reflexos quanto aos riscos de cheias na sub-bacia hidrográfica do rio Piabanha**. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Belo Horizonte: 21 nov. 2021.

STEINKE, E. T. **Climatologia fácil**. [s.l.] Oficina de Textos, 2012.

TASSINARI, D. et al. Soil compaction caused by harvesting, skidding and wood processing in eucalyptus forests on coarse-textured tropical soils. **Soil Use and Management**, v. 35, n. 3, p. 400–411, 2019.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, W. G. et al. Predição da Água Disponível no Solo em Função da Granulometria para Uso nas Análises de Risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 272, 2021.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, 2000.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e aplicação/ Organizado por Carlos E. M. Tucci**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. v. 4

TUGOZ, J. EL; BERTOLINI, G. R. F.; BRANDALISE, L. T. Captação e Aproveitamento da Água das Chuvas: O Caminho para uma Escola Sustentável. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 1, p. 26–39, 2017.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 75–94, 1949.

VELOSO, N. R. **Processamento digital de imagens destinado ao mapeamento da ocupação humana do alto Bonfim e análise histórica dos remanescentes florestais entre os anos de 1965 a 2006**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Computação—[s.l.] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2012.

VILLA, B. DE et al. Balanço hídrico climatológico: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, 2022.

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Acta Amazonica**, v. 6, n. 2, p. 215–228, 1976.

VOGEL, T.; CISLEROVA, M. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. **Transport in Porous Media**, v. 3, n. 1, p. 1–15, 1988.

WHITE, J. W. et al. Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1574–1584, 2008.

YATES, S. R. et al. Analysis of Measured, Predicted, and Estimated Hydraulic Conductivity Using the RETC Computer Program. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 2, p. 347–354, 1992.

ZARONI, M. J.; DOS SANTOS, H. G. DOS (IM MEMORIUM). **Solos Tropicais: Cambissolos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/cambissolos>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

ZONTA, J. H. et al. **Manejo da Irrigação do Algodoeiro**. 139. ed. Campina Grande: Embrapa, 2016.

APÊNDICE A

Tabela 17 – Informações referentes as estações pluviométricas com dados disponíveis até o ano 2023 no município Petrópolis-RJ

Cód.	Nome	Responsável	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
2243268	BINGEN	ANA	-22,305	-43,225	-	01/08/2005 setembro de 2023
2243014	FAGUNDES	ANA	-22,300	-43,178	460	01/01/1954 setembro de 2023
2243010	ITAMARATI - SE	ANA	-22,485	-43,149	1085	01/07/1938 setembro de 2023
2243016	MORELI (PARADA MORELI)	ANA	-22,193	-43,008	600	01/01/1955 setembro de 2023
2243012	PEDRO DO RIO	ANA	-22,333	-43,136	645	01/11/1938 setembro de 2023
2243011	RIO DA CIDADE	ANA	-22,438	-43,170	704	01/07/1938 setembro de 2023
2243009	PETRÓPOLIS	ANA	-22,512	-43,171	890	01/05/1938 31/12/2007
2243023	TRISTÃO CÂMARA	ANA	-22,000	-43,000	490	- -
330390602A	ALTO DA SERRA	CEMADE N	-22,530	-43,171	863	07/09/2013 setembro de 2023
330390616A	ALTO DA SERRA2	CEMADE N	-22,530	-43,170	889	22/10/2013 18/03/2016
330390605A	ARARAS	CEMADE N	-22,427	-43,249	980	07/09/2013 setembro de 2023
330390613A	CIEP BRIZOLÃO 281	CEMADE N	-22,258	-43,076	516	06/09/2013 setembro de 2023
330390614A	CIEP BRIZOLÃO137	CEMADE N	-22,454	-43,143	698	18/09/2013 setembro de 2023
330390607A	ESTRADA DO BREJAL	CEMADE N	-22,255	-43,063	642	07/09/2013 26/09/2017
330390606A	ESTRADA DO CANTAGALO	CEMADE N	-22,374	-43,046	1114	07/09/2013 setembro de 2023
330390608A	ESTRADA PETRÓPOLIS/TERESÓPOLIS	CEMADE N	-22,428	-43,058	1099	09/09/2013 setembro de 2023
330390622A	ITAIPAVA2	CEMADE N	-22,369	-43,112	799	20/09/2013 setembro de 2023
330390620A	MORIN	CEMADE N	-22,527	-43,161	889	18/09/2023 setembro de 2023
330390619A	NOGUEIRA	CEMADE N	-22,418	-43,122	793	07/09/2013 setembro de 2023
330390629A	PETRÓPOLIS_ARARAS 2	CEMADE N	-22,419	-43,173	724	24/09/2013 03/11/2018
330390625A	PETRÓPOLIS_CORREAS	CEMADE N	-22,461	-43,099	988	07/09/2013 setembro de 2023
330390624A	PETRÓPOLIS_ESTRADA DA CACHOEIRA	CEMADE N	-22,353	-43,095	761	07/09/2013 setembro de 2023
330390610A	PETRÓPOLIS_INDEPENDÊNCIA	CEMADE N	-22,550	-43,210	840	08/09/2013 setembro de 2023
330390612A	PETRÓPOLIS_INDEPENDÊNCIA 2	CEMADE N	-22,548	-43,209	829	07/09/2013 setembro de 2023
330390611A	PETRÓPOLIS_ITAIPAVA	CEMADE N	-22,388	-43,132	692	01/10/2015 setembro de 2023
330390627A	PETRÓPOLIS_MOSELA	CEMADE N	-22,481	-43,219	1071	01/07/2014 setembro de 2023
330390623A	PETRÓPOLIS_PEDRO DO RIO	CEMADE N	-22,335	-43,134	685	06/09/2013 setembro de 2023
330390618A	PETRÓPOLIS_RUA AMAZONAS/QUITANDINHA	CEMADE N	-22,529	-43,223	964	07/09/2013 setembro de 2023
330390617A	PETRÓPOLIS_RUA ARARUAMA/QUITANDINHA	CEMADE N	-22,520	-43,220	1071	18/09/2013 setembro de 2023
330390626A	PETRÓPOLIS_VALE DO CUIABÁ2	CEMADE N	-22,336	-43,047	1116	07/09/2013 30/11/2019

Cód.	Nome	Responsável	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período	
330390609A	PETRÓPOLIS_VILA CONSTÂNCIA	CEMADE N	-22,401	-43,097	771	07/09/2013	setembro de 2023
330390601G	QUITANDINHA - GEO	CEMADE N	-22,525	-43,224	962	11/11/2021	setembro de 2023
330390603A	RUA PARANA/QUITANDINHA	CEMADE N	-22,520	-43,210	1001	07/09/2013	13/07/2019
330390604A	SALDANHA MARINHO	CEMADE N	-22,534	-43,187	1020	07/09/2013	30/11/2014
330390615A	VALE DO CUIABÁ	CEMADE N	-22,402	-43,047	1065	05/09/2013	setembro de 2023
330390628A	VILA RICA	CEMADE N	-22,349	-43,132	730	01/07/2014	setembro de 2023
2243000	BARRAGEM ANTIGA	CERV-PET	-22,351	-43,158	791	-	-
2243299	FAZENDA SEDE	CERV-PET	-22,352	-43,164	785	-	-
2243287	ESPERANÇA	CPRM	-22,511	-43,210	819	20/07/2007	23/03/2017
2243289	LICEU CARLOS CHAGAS	CPRM	-22,487	-43,177	815	29/04/2007	02/09/2022
2243288	MORIN	CPRM	-22,517	-43,169	818	25/05/2007	29/09/2016
2243286	PARQUE PETRÓPOLIS	CPRM	-22,405	-43,133	700	04/06/2008	02/09/2022
2243012	PEDRO DO RIO	CPRM	-	-	-	15/12/2006	04/09/2018
2243290	POÇO TARZAN	CPRM	-22,454	-43,108	926	-	-
2243302	ROCIO 2	CPRM	-22,448	-43,258	972	28/04/2010	27/07/2019
2243291	SÍTIO DAS NASCENTES	CPRM	-22,469	-43,103	-	11/02/2007	06/09/2019
2243301	VILA AÇU	CPRM	-22,461	-43,095	1004	15/12/2006	24/07/2019
2243285	CAMPO DE VENTURAS	CPRM	-22,463	-43,091	1004	-	-
2243247	RAIZ DA SERRA	DNOS	-22,533	-43,183	-	-	-
2243315	ALTO DA SERRA	INEA-RJ	-22,514	-43,173	828	06/10/2011	setembro de 2023
2243323	ARARAS	INEA-RJ	-22,384	-43,076	-	01/10/2011	setembro de 2023
2243324	BARÃO DO RIO BRANCO	INEA-RJ	-22,488	-43,178	-	17/10/2011	setembro de 2023
2243316	BINGEN	INEA-RJ	-22,509	-43,196	819	01/10/2011	setembro de 2023
2243327	BOMFIM	INEA-RJ	-22,461	-43,095	1026	01/10/2011	setembro de 2023
2243330	CAPIM ROXO	INEA-RJ	-22,352	-43,192	-	01/10/2011	setembro de 2023
2243313	CENTRO	INEA-RJ	-22,513	-43,180	831	01/10/2011	setembro de 2023
2243317	CORONEL VEIGA	INEA-RJ	-22,526	-43,194	844	25/10/2011	setembro de 2023
2243318	CORRÊAS	INEA-RJ	-22,445	-43,144	-	20/10/2011	setembro de 2023
2243325	CUIABÁ	INEA-RJ	-22,379	-43,068	-	04/05/2011	setembro de 2023
2243321	INDEPENDÊNCIA	INEA-RJ	-22,548	-43,209	-	31/10/2011	setembro de 2023
2243319	ITAIPAVA	INEA-RJ	-22,406	-43,103	-	04/11/2011	setembro de 2023
2243320	ITAMARATI	INEA-RJ	-22,485	-43,149	-	13/10/2011	setembro de 2023
2243329	LNCC	INEA-RJ	-22,530	-43,217	-	10/06/2011	setembro de 2023
2243332	MORIN	INEA-RJ	-22,527	-43,161	-	14/10/2011	setembro de 2023
2243322	PEDRO DO RIO	INEA-RJ	-22,333	-43,133	-	01/09/2011	28/06/2017

Cód.	Nome	Responsável	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período	
2243284	PETRÓPOLIS	INEA-RJ	-22,519	-43,187	824,2	-	-
2243326	POSSE	INEA-RJ	-22,258	-43,076	-	01/09/2011	30/06/2021
2243331	QUITANDINHA	INEA-RJ	-22,529	-43,224	-	26/10/2011	30/06/2021
2243328	SAMAMBAIA	INEA-RJ	-22,460	-43,141	-	01/09/2011	30/06/2021
2243188	PETRÓPOLIS (PARQUE NAC)	INMET	-22,533	-43,183	896	-	-
2243189	ARARAS	INMET	-22,517	-43,183	820	-	-
2243249	GRANJA JURITY	INMET	-22,300	-43,033	980	-	-
A610	PICO DO COUTO	INMET	-22,465	-43,291	1777	01/01/1974	setembro de 2023

Legenda: Para informações não encontradas foi utilizado “-“

Fonte: A autora, 2024

Tabela 18 – Precipitação pluvial mensal e anual durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

Mês/ Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
.....mm.....													
2000	279,30	150,60	176,70	52,40	28,70	6,20	52,20	108,60	114,90	51,90	177,60	287,00	1486,10
2001	197,70	153,40	271,60	57,10	91,10	21,00	28,70	13,20	45,00	91,90	159,10	357,30	1487,10
2002	239,90	166,40	127,80	23,30	80,40	25,40	36,10	37,60	87,70	71,30	190,70	289,30	1375,90
2003	317,60	38,10	250,10	58,50	45,60	22,10	21,90	57,40	43,80	113,80	301,70	187,30	1457,90
2004	272,40	319,70	136,90	126,10	56,30	35,90	74,00	14,20	16,20	100,20	190,00	316,90	1658,80
2005	342,20	172,40	168,60	99,70	41,80	29,70	39,40	5,60	40,10	74,30	143,00	161,20	1318,00
2006	187,40	187,10	115,60	56,20	48,70	17,70	19,40	36,30	88,30	74,50	255,00	225,10	1311,30
2007	446,50	116,60	137,00	74,80	96,20	16,40	38,30	15,00	14,80	94,20	183,80	209,20	1442,80
2008	218,10	259,00	215,10	137,00	23,10	12,40	10,00	30,40	50,80	104,50	265,10	261,70	1587,20
2009	314,30	142,30	103,90	73,40	20,70	50,80	44,80	36,50	67,90	160,90	328,20	405,70	1749,40
2010	204,00	124,10	231,90	90,80	58,60	24,00	31,60	10,50	45,40	164,10	181,20	359,40	1525,60
2011	196,00	63,20	224,50	58,70	46,40	30,80	6,70	14,30	12,60	160,60	221,90	434,30	1470,00
2012	436,50	72,60	148,10	162,80	59,10	90,10	36,00	49,30	96,20	54,10	146,90	140,60	1492,30
2013	342,00	147,20	201,80	46,90	53,90	57,90	90,00	9,20	129,30	92,90	194,60	111,00	1476,70
2014	171,10	54,70	212,80	103,00	31,20	58,00	34,80	18,20	31,60	48,60	140,60	166,70	1071,30
2015	223,10	206,40	201,50	58,90	37,30	37,10	30,80	23,80	127,10	50,50	287,70	201,20	1485,40
2016	359,20	223,40	184,40	33,50	37,30	95,10	2,40	40,40	49,40	98,20	183,60	310,00	1616,90
2017	212,50	88,90	113,40	0,00	58,60	88,30	19,30	39,00	18,60	98,30	177,10	154,40	1068,40
2018	330,20	267,60	193,80	120,00	61,00	4,90	22,10	73,00	104,20	77,60	186,50	238,80	1679,70
2019	195,70	243,70	190,00	141,50	76,20	25,20	17,00	19,40	97,40	90,40	170,00	203,50	1470,00
μ	274,29	159,87	180,28	78,73	52,61	37,45	32,78	32,60	64,07	93,64	204,22	251,03	1461,54

Legenda: μ = valores médios

Fonte: A autora, 2024

Tabela 19 – Evapotranspiração potencial mensal e anual durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ

Mês/ Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
.....mm.....													
2000	101,64	89,07	82,11	79,34	71,46	70,39	61,52	77,32	74,84	112,22	88,14	105,99	1014,05
2001	116,11	105,88	101,90	88,08	62,45	62,22	71,00	85,55	81,60	100,85	93,90	99,44	1068,98
2002	99,99	75,32	107,72	90,90	64,28	67,01	60,71	89,58	77,06	130,36	99,35	97,31	1059,58
2003	89,57	114,31	84,57	76,57	65,59	64,68	66,59	65,83	73,77	91,53	85,97	92,34	971,32
2004	86,50	77,25	83,79	69,07	54,07	54,56	52,53	72,76	91,88	81,38	92,64	88,75	905,18
2005	87,76	89,24	85,55	78,90	66,42	61,58	59,82	90,65	69,39	106,55	89,10	92,32	977,30
2006	118,38	91,32	95,21	80,51	67,53	65,55	81,92	93,76	84,52	88,69	85,67	96,25	1049,31
2007	75,94	98,22	114,19	85,48	68,29	70,76	72,58	88,07	108,91	117,53	82,62	107,44	1090,03
2008	92,70	86,02	90,51	67,02	64,28	53,03	75,51	84,14	82,50	95,82	79,89	82,33	953,76
2009	87,37	96,44	84,89	70,22	66,49	55,68	56,44	77,86	86,99	80,50	108,83	89,59	961,29
2010	114,17	106,48	90,46	72,48	62,37	58,57	65,22	82,67	92,69	89,87	86,72	98,15	1019,86
2011	106,53	110,59	73,91	79,53	59,39	57,83	71,31	89,15	101,28	99,98	92,43	88,42	1030,34
2012	90,95	110,97	97,53	71,86	59,48	52,44	68,47	79,37	97,84	122,81	82,47	125,32	1059,51
2013	85,31	97,06	77,84	65,81	60,92	51,66	58,79	79,08	89,42	87,10	98,45	94,48	945,93
2014	141,21	124,39	102,01	77,50	70,16	65,10	60,84	83,12	105,54	123,78	107,61	129,99	1191,25
2015	146,74	100,86	87,06	76,53	64,68	62,60	69,80	92,57	87,22	112,88	83,69	108,55	1093,19
2016	93,08	105,00	86,86	89,26	60,86	49,35	70,74	88,19	87,69	94,95	91,23	110,19	1027,39
2017	113,13	100,41	93,15	68,28	59,77	60,73	65,85	74,05	117,74	115,71	95,91	98,72	1063,45
2018	98,58	79,97	90,80	75,46	65,61	55,55	73,41	65,11	87,69	78,20	86,95	115,10	972,42
2019	140,63	90,67	87,34	82,42	68,35	66,66	76,91	74,96	88,19	107,12	80,73	99,86	1063,85
μ	104,31	97,47	90,87	77,26	64,12	60,30	67,00	81,69	89,34	101,89	90,61	101,03	1025,90

Legenda: μ = valores médios

Fonte: A autora, 2024