



BALANÇO HÍDRICO EM CAMBISSOLOS HÁPLICOS SOB FLORESTAS E PASTAGENS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BONFIM: REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Ana Claudia de Mello Nascimento¹
Wenceslau Geraldes Teixeira²
Alexandre Ortega Gonçalves³
Alfredo Akira Ohnuma Jr.⁴

RESUMO

Objetivo: Estimar os volumes de água dos principais componentes do BH num Cambissolo Háplico em florestas e pastagens na bacia do Rio Bonfim, região serrana do RJ.

Referencial teórico: O balanço hídrico (BH) contabiliza os volumes de entrada e saída de água em determinado espaço (Cambissolos Háplicos sob florestas e pastagens).

Método: O período de estudo foi 01/01/2000 a 31/12/2019. Foi utilizado o modelo HYDRUS-1D 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 (*Sink factor*) no balanço de massa da água no solo.

Resultados e conclusão: A precipitação pluvial média anual foi de 1462 mm e a evapotranspiração potencial de 1026 mm. Na área sob pastagem: 83%, 7% e 9% do total precipitado foram percolados, transpirados e evaporados, respectivamente. Na área sob floresta: esses valores foram de 43%, 51% e 6%. Na estação seca a evapotranspiração foi de 20% do total precipitado na área de floresta e de 8% na área de pastagem. A percolação na estação de seca foi 17% do total precipitado na pastagem e 7% na floresta. Na estação chuvosa os valores percolados foram de 66% na pastagem e 36% na floresta.

Implicações da pesquisa: Conhecer os volumes de água nos componentes do BH pode auxiliar nas decisões quanto ao ordenamento dos sistemas de uso e cobertura do solo em bacias do bioma Mata Atlântica. A mudança dos sistemas de uso e cobertura do solo altera os volumes de água percolada ou evapotranspirada.

Originalidade/valor: Estimar os volumes de água nos componentes do BH em pastagem e floresta permite prever os efeitos de mudança do clima e do uso do solo e suas consequências.

Palavras-chave: Disponibilidade Hídrica, Balanço Hídrico, Uso e Cobertura do Solo, Pastagens, Florestas.

WATER BALANCE IN HAPLIC CAMBISOLS UNDER FOREST AND PASTURE IN THE BONFIM WATERSHED: MOUNTAINOUS REGION OF RIO DE JANEIRO STATE

ABSTRACT

Objective: To estimate the water volumes of the main components of BH in a Haplic Cambisol in forests and pastures in the Bonfim River basin, mountainous region of RJ.

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

E-mail: anaclaudia.mello@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-2050-931X>

²Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: wenceslau.teixeira@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2010-6078>

³Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: alexandre.ortega@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0709-9018>

⁴Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

E-mail: akira@eng.uerj.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0772-9334>



Theoretical framework: The water balance (BH) accounts for the volumes of water input and output in a given space (Haplic Cambisols under forests and pastures).

Method: The study period was 01/01/2000 and 12/31/2019. The HYDRUS-1D model was used to estimate water volumes in BH. Pedotransfer functions were used to determine the physical water parameters of water retention and conduction in the soil. The daily precipitation and evapotranspiration data were considered upper boundary conditions, and the lower boundary conditions were considered free drainage. Water absorption by the roots was considered as the additional factor (Sink factor) in the soil water mass balance.

Results and conclusion: The average annual precipitation was 1462 mm and the potential evapotranspiration was 1026 mm. In the area under pastures: 83%, 7% and 9% of the total precipitated and percolated, transpired and evaporated, respectively. In areas under forests: these values were 43%, 51% and 6%. In the dry season, evapotranspiration was 20% of the total precipitation in the forest area and 8% in the pasture areas. Percolation in the dry season was 17% of the total precipitation in the pasture and 7% in the forest. In the rainy season the percolated values were 66% in the pasture and 36% in the forest.

Implications of the research: Knowing the volumes of water in the components of the BH can help in decisions regarding the organization of land use and cover systems in basins of the Atlantic Forest biome. Changing soil use and cover systems alters the volumes of water percolated or evapotranspired.

Originality/value: Estimating the water volumes in the BH components in pasture and forest allows predicting the effects of climate change and land use and their consequences.

Keywords: Water Availability, Water Balance, Land Use and Cover, Pastures, Forests.

BALANCE HÍDRICO EN CAMBISOLES HÁPICOS BAJO BOSQUE Y PASTIZAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BONFIM: REGIÓN MONTAÑOSA DEL ESTADO DE RÍO DE JANEIRO

RESUMEN

Objetivo: Estimar los volúmenes de agua de los principales componentes de BH en un Cambisol háplico en bosques y pastizales de la cuenca del río Bonfim, región montañosa de RJ.

Marco teórico: El balance hídrico (BH) da cuenta de los volúmenes de entrada y salida de agua en un espacio determinado (Cambisoles háplicos bajo bosques y pastos).

Método: El periodo de estudio fue 01/01/2000 y 12/31/2019. Se utilizó el modelo HYDRUS-1D para estimar los volúmenes de agua en BH. Se utilizaron funciones de pedotransferencia para determinar los parámetros físicos del agua de retención y conducción en el suelo. Los datos diarios de precipitación y evapotranspiración se consideraron condiciones de límite superior y las condiciones de límite inferior se consideraron de drenaje libre. La absorción de agua por las raíces se consideró como el factor adicional (factor de sumidero) en el balance de masa de agua del suelo.

Resultados y conclusión: La precipitación media anual fue de 1462 mm y la evapotranspiración potencial fue de 1026 mm. En el área bajo pastos: 83%, 7% y 9% del total precipitado y percolado, transpirado y evaporado, respectivamente. En las zonas bajo bosque, estos valores fueron del 43%, 51% y 6%. En la época seca, la evapotranspiración fue del 20% de la precipitación total en el área forestal y del 8% en las áreas de pastoreo. La percolación en la época seca fue 17% de la precipitación total en la pastura y 7% en el bosque. En la época de lluvias los valores de percolación fueron de 66% en la pastura y 36% en el bosque.

Implicaciones de la investigación: Conocer los volúmenes de agua en los componentes del BH puede ayudar en las decisiones sobre la organización del uso del suelo y los sistemas de cobertura en las cuencas del bioma del Bosque Atlántico. Los cambios en el uso del suelo y los sistemas de cobertura alteran los volúmenes de agua filtrada o evapotranspirada.

Originalidad/valor: La estimación de los volúmenes de agua en los componentes de BH en pastos y bosques permite predecir los efectos del cambio climático y el uso del suelo y sus consecuencias.

Palabras clave: Disponibilidad de Agua, Equilibrio Hídrico, Uso y Cobertura del Suelo, Pastos, Bosques.



RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1 INTRODUÇÃO

Em razão do aumento da urbanização, da densidade demográfica e da expansão industrial, a demanda de recursos hídricos vem crescendo e muitas vezes acima da disponibilidade, o que acaba comprometendo diretamente a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. O balanço hídrico (BH) corresponde à contabilidade dos volumes de entrada e saída da água em um determinado volume de solo, clima, sistemas de uso e cobertura do solo e 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 uso e ocupação abusivo do solo, as queimadas, a compactação do solo, poluição, e outras ações, interferem 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 (de 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 do BH com o máximo de variáveis de entrada e com séries históricas longas, em conjunto com coeficientes de cultura para estimativas de evaporação calibrados. Todos os elementos do BH estão inter-relacionados. Em áreas de vegetação a precipitação pluvial exerce uma influência direta na transpiração, evapotranspiração e interceptação de água pelas plantas (Martinhago et al., 2021). Por exemplo, com a diminuição no volume de chuva, todos os outros componentes seguem a mesma tendência. No entanto, dentre todos, a transpiração é a menos impactada, enquanto a interceptação no ciclo hidrológico representa uma parcela muito pequena no BH, independentemente da quantidade de chuva (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 às mudanças no uso da terra (Casagrande et al., 2021). O autor 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, 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., 2008) 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 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, utilizando o 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).

A Região Hidrográfica Piabanha (RH-IV) formada pela bacia hidrográfica do rio Piabanha e pelas bacias afluentes do rio Paraíba do Sul. Essa área abrange 3.460 km², o equivalente a 5,64% da área total da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul. O rio Piabanha tem



80 km de extensão, e a RH-IV é constituída por 10 municípios (AGEVAP, 2021). O rio Bonfim, é um afluente do rio Piabanha, nasce no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) e deságua no rio Piabanha. Parte da água de abastecimento do município de Petrópolis é captada do rio Bonfim (Pessoa, 2013). Os Cambissolos Háplicos são uma das classes de solo predominantes na área estuda (Pereira et al., 2021). São solos pouco desenvolvidos, geralmente de baixa permeabilidade, e ocorrem em diferentes ambientes, mas principalmente em área de relevos ondulados a montanhosos. Em ambientes montanhosos, são normalmente solos rasos e possuem limitações para uso agrícola e alta suscetibilidade a erosão hídrica (Zaroni & dos Santos, 2021). Na região estão sob o uso e ocupação principalmente de vegetações florestais e pastagens (Silva et al, 2013).

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 da terra associado a uma determinada classe pode modificar o ciclo hidrológico. O objetivo do trabalho foi determinar os volumes de água dos componentes principais do balanço hídrico (BH), em dois cenários de uso e cobertura da terra (pastagem e floresta), ambos sob Cambissolo Háplico na bacia hidrográfica do Rio Bonfim - RJ.

2 MÉTODO

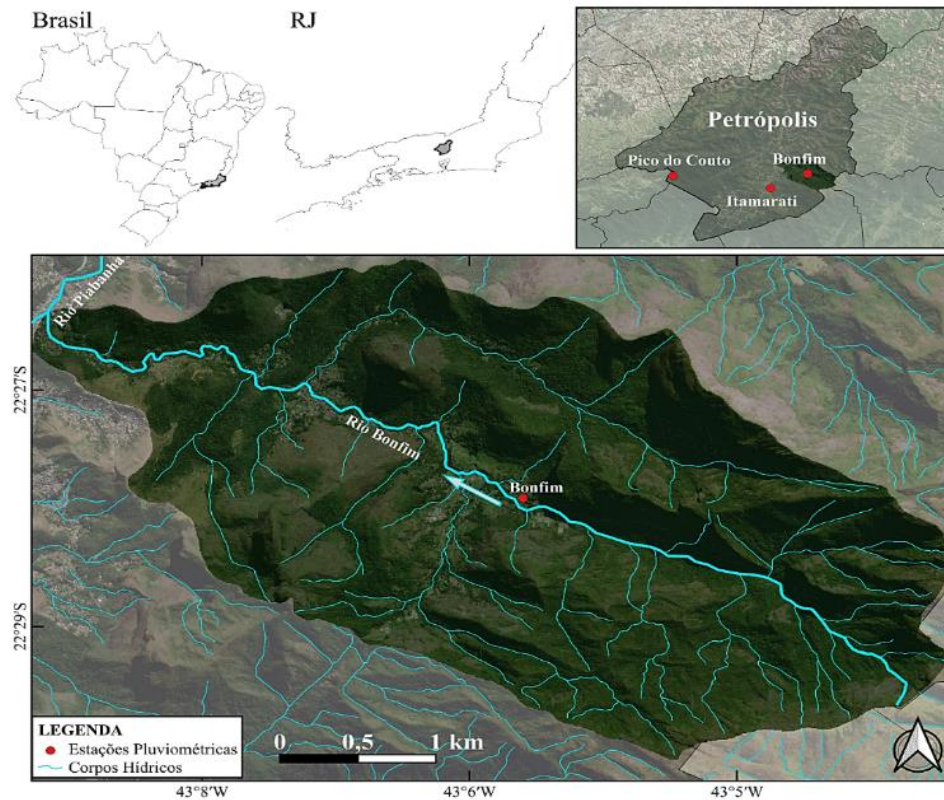
2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Bonfim, afluente do rio Piabanha, seu bioma é a Mata Atlântica e tem 30 km² de área total. O curso do rio Bonfim é geograficamente dividido em alto, médio e baixo (Lawall, 2010; Veloso, 2012). A bacia está localizada no segundo distrito do município de Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1).



Figura 1

Mapa de localização da bacia hidrográfica Bonfim e estações pluviométricas - Rio de Janeiro–RJ



Fonte: Base cartográfica IBGE, ANA e EMBRAPA, mapa elaborado pelos autores

2.2 CLASSES DE SOLOS PREDOMINANTES E PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO

Os solos dominantes na bacia do rio Bonfim são os Neossolos Litólicos Distróficos e Cambissolos Háplicos Tb Distróficos (Tabela 1).



Tabela 1

Resumo dos tipos de solo distribuídos ao longo da bacia hidrográfica do Bonfim, Petrópolis–RJ

Classes de solo	%	Área (km ²)
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)

O estudo de Pereira et al., (2021) apresenta a caracterização físico-química dos perfis modais de solo com dados físicos e químicos dos horizontes de solos de 41 perfis.

Selecionou-se para esse estudo, para caracterização do perfil modal dos Cambissolos Háplicos o perfil 33 (Tabela 2). Esse solo é a classe de solo dominante onde ocorrem as áreas de floresta e de pastagens.

Tabela 2

Características físicas do Perfil 33 de Cambissolo Háplico selecionado na Bacia do Rio Bonfim - Petrópolis–RJ

Classe	Classe textura l	Horizont e	Profund. d.	A _T	A _G	A _F	S	Ar	MO	CO	ρ	Ds
			cm	%							g 3	cm ³
Cambissolo Háplico	Franco-Argilos o-Arenosa	A1	0-20	55	45	10	14	31	3,10	1,80	2,47	1,02
	Franco-Argilos o-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

A_T = areia total; A_G = areia grossa; A_F = areia fina; S = silte; Ar = argila; MO = matéria orgânica; CO = carbono orgânico; ρ = densidade das partículas e Ds = densidade do solo. Dados em negrito foram estimados

Fonte: Adaptado e complementado de Pereira et al., (2021)



O horizonte (Bi2) na profundidade do solo 70 a 96⁺ (cm), que não apresentava dados de densidade de partícula (ρ) e nem densidade do solo (D_s) adotou-se o valor de 2,65g cm⁻³. Para estimativa da D_s foi utilizada a PTF de Huf dos Reis et al., 2024 (Equação 1).

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

Onde:

D_s = Densidade do solo; A_G = areia grossa; A_F = areia fina; A_r = argila; CO = carbono orgânico.

Os parâmetros hidráulicos de retenção da água no solo da equação de van Genuchten (1980), α , n , θ_s e θ_r , foram obtidos pelas PTFs Full Model de Medrado & Lima (2014). A PTF propostas por Medrado e Lima (2014) vem sendo utilizadas com sucesso em vários estudos no Brasil para estimativas dos coeficientes da equação de van Genuchten (Barros et al., 2021; Costa et al., 2021; Ottoni et al., 2018; Tassinari et al., 2019).

2.3 SISTEMAS ATUAIS DE USO E COBERTURA DO SOLO PREDOMINANTE NA BACIA DO RIO BONFIM

A vegetação original característica da área de estudo pode ser dividida em áreas florestais em diferentes estágios: florestas primárias, florestas secundárias em estágio inicial, médio e avançado, e a vegetação rupestre (Kieling, 2014).

Os sistemas atuais de uso e cobertura do solo predominante na bacia do rio Bonfim são as áreas de florestas e afloramentos rochosos. As duas classes somadas chegam a 77% da área total da bacia (Tabela 3). As áreas agrícolas abrangem cerca de 7,7% sendo principalmente cultivos de oleícolas. As áreas de pastagens a compreendem cerca de 3,2% da área (Tabela 3).

Tabela 3

Sistema de Uso e cobertura do solo na bacia do 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: Adaptado de Silva, 2013

2.4 DADOS METEOROLÓGICOS

O clima da bacia hidrográfica do rio Bonfim é caracterizado com verão mais ameno e inverno mais seco, e a temperatura média varia entre 13° e 23 °C (Lawall, 2010; Pessoa, 2013).

O município de Petrópolis é classificado na unidade climática Tropical Ameno Úmido Litorâneo Sul do Brasil, e possui variação da evapotranspiração potencial média anual de 790 mm a 1158 mm (Fialho & Machado, 2024; Novais & Machado, 2023).

O município de Petrópolis apresenta precipitação pluvial média anual entre 2076 mm e 1208 mm (Nascimento et al., 2021). A precipitação pluvial média anual no alto curso da bacia do Bonfim pode ultrapassar 2000 mm e no baixo curso, 1300 mm até 900 mm no período mais seco (Goulart & Guerra, 1999; Silva, 2013). O período da série histórica meteorológica utilizada no estudo foram dados diários entre 01/01/2000 a 31/12/2019.

Os dados de precipitação pluvial foram obtidos inicialmente no portal *HidroWeb* após a identificação das estações pluviométricas em operação no município de Petrópolis. O portal *HidroWeb* é uma plataforma 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), através 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 (*INMET: Tempo*). Do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) (<http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>) e no repositório FTP do Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ).

Foram obtidos dados diários de precipitação pluvial obtidos nas estações pluviométricas listadas na Tabela 4. A estação “Bonfim” do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2021) fica situada dentro da área de estudo. A estação “Itamarati” da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022) fica situada a 6,1 km de distância da estação do Bonfim. A estação “Pico do Couto” do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) fica situada a 20,2 km de distância da estação Bonfim, todas as estações estão localizadas no município de Petrópolis, conforme apresentado na Figura 1.



Tabela 4

Informações referente às estações pluviométricas com dados utilizados na série histórica (2000 a 2019) da bacia hidrográfica Bonfim - Rio de Janeiro–RJ

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: Os autores

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) e “Itamarati” (ANA). Logo, foram compilados em planilhas eletrônicas que resultou em uma série histórica com 20 anos de dados diários sem falhas. 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 4) para preenchimento de falhas.

Os dados de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar global (W m^{-2}), velocidade do vento (m s^{-1}) e umidade relativa do ar (%), variáveis necessárias para o cálculo da evapotranspiração potencial (ET_0) pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), foram obtidos na base NASA POWER (NASA, 2023) com base nas coordenadas geográficas da estação pluviométrica Bonfim (INEA 2243327). Os dados são disponibilizados sem custos no endereço eletrônico (<https://power.larc.nasa.gov/>). Esses dados têm sido utilizados na recuperação de dados meteorológicos mundialmente (Marzouk, 2021; White et al., 2008) e validado com dados obtidos de estações meteorológicas de superfície no Brasil (Monteiro et al., 2018; Rosa et al., 2023). 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).

A série histórica de evapotranspiração da cultura (ET_c) para pastagens e florestas foram obtidas pela multiplicação dos dados diários de ET_0 pelo coeficiente da cultura (K_c). O coeficiente para pastagem já estabelecida 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 $K_c = 0,70$, devido à degradação das pastagens em muitas das áreas.



Em florestas primárias tropicais, o valor de $K_c = 1,00$ foi utilizado (Muniz, 2017; Villa Nova et al., 1976), sendo esse o valor utilizado nesse estudo. Os dados de ET_c foram particionados em evaporação e transpiração. Para pastagens utilizou os valores de 25% para evaporação e 75% para transpiração. O percentual relativamente elevado para evaporação foi devido ao conhecimento de pastagens degradadas na região, constatado por visitas ao local. Para área de floresta foi considerado que 10% da ET_c tinha potencial de ser perdido por evaporação e 90% por transpiração. 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.

2.5 SIMULAÇÃO NO HYDRUS-1D

Utilizou-se a o programa HYDRUS-1D, versão 4.17.01.40 (Šimůnek et al., 2008). Realizou-se duas simulações diretas, para o Cambissolo Háplico sob pastagens e florestas. A condição de fronteira superior (*Variable Upper Boundary Condition*), consistiram em dados meteorológicos diários (7305 dias) de precipitação, evaporação e transpiração, todos com unidade de (cm/dia). Foi admitindo até 10 cm de empoçamento da água na superfície. Para a condição de fronteira inferior (*Lower Boundary Condition*) optou-se por drenagem livre (*Free Drainage*) considerando que o lençol freático estava bem abaixo do limite inferior do perfil estudado. Considerou-se o teor de água na capacidade de campo (10 kPa) para condições iniciais do solo. Adotou-se um perfil com profundidade de 200 cm, sendo este, sido simplificado com apenas duas camadas (*layers*). Sendo a primeira camada com espessura entre 0-70 cm e segunda de 71-200 cm, com retenção propriedades hidráulicas distintas, estimadas via PTF de Medrado & Lima (2014) para os parâmetros de van Genuchten (1980), considerando o coeficiente $m = 1 - 1/n$.

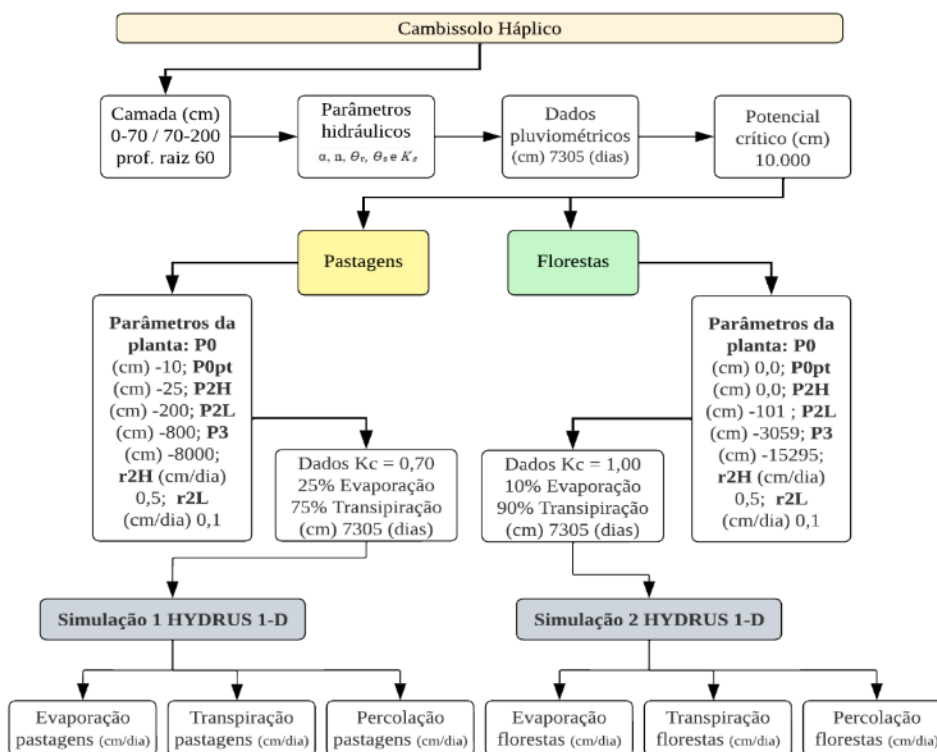
Os dados de condutividade hidráulica saturada K_s foram estimados pelo modelo Splintex 2.0 (Silva et al., 2020) e, fator de tortuosidade do solo, foi adotado o valor $I=0,5$, valor sugerido por Mualem (1976).

A simulação sob pastagens distingue-se da simulação sob floresta, 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 da evapotranspiração potencial em evaporação e transpiração de pastagens e florestas (Figura 2). O comprimento do sistema radicular foi considerado 60 cm para os dois sistemas de uso.



Figura 2

Fluxograma das simulações considerando diferentes coberturas de solo, pastagens e florestas no HYDRUS-1D



Fonte: Os autores

Os cálculos da ETo foram estimados pela equação de Penman-Monteith (FAO, 56) (Allen et al., 1998) como detalhado acima, com os dados de ETo multiplicados pelo Kc das culturas e divididos em Evaporação e Transpiração.

Para a simulação em pastagens adotou-se o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) de pastagens e para floresta, o cálculo da ET_c de florestas. Adotou-se as raízes com 60 cm de profundidade e sua distribuição foi considerada uniformemente distribuída.

O modelo de Feddes que parametriza a capacidade das culturas de absorver água em função da disponibilidade e potencial da água no solo (Feddes et al., 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 2.



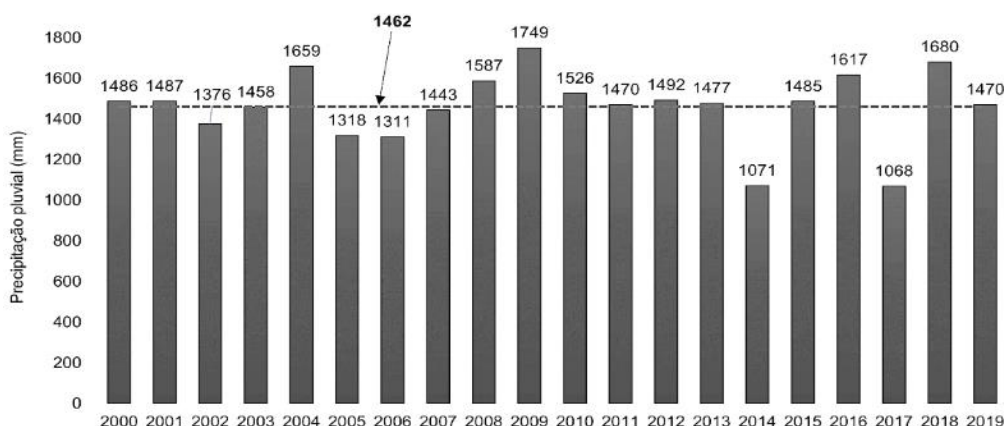
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PRECIPITAÇÃO PLUVIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ETO)

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 3).

Figura 3

Precipitação pluvial durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ



Fonte: INMET, ANA e INEA, NASAPOWER dados organizados pelos autores

Os meses mais secos (abril a setembro) ao longo dos anos 2000 a 2019, apresentam uma média de 298 mm de precipitação pluvial, equivalente a 20% da precipitação média anual, e os meses mais chuvosos (outubro a março) uma média de 1163 mm, equivalente a 80% da precipitação média pluvial anual (Figura 4), 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.

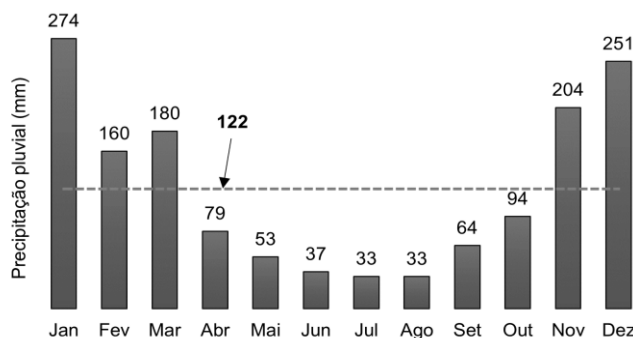
Segundo Lawall (2018) a média de precipitação pluvial dos anos 2009 a 2012 para os meses mais secos (abril a setembro) foi de 294,5 mm e os meses úmidos (outubro a março) foi



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 4

Média mensal de precipitação pluvial durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



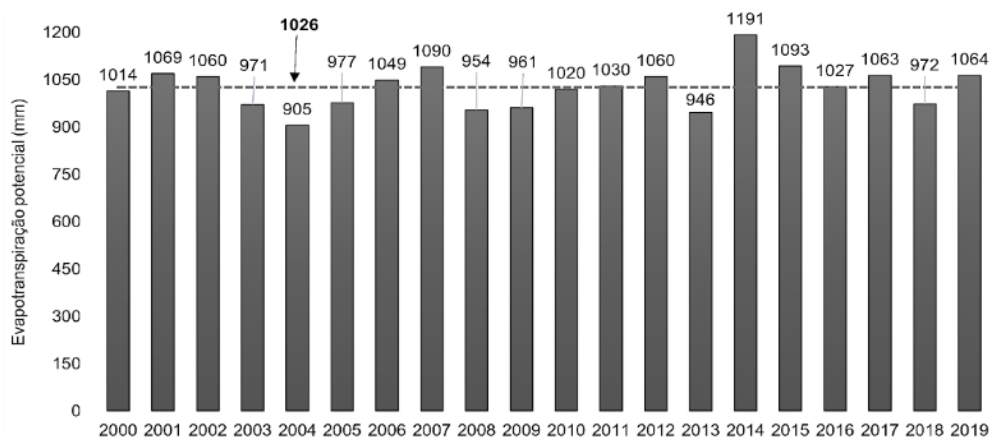
Fonte: Os autores

O município de Petrópolis 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, entretanto esse ano apresentou a precipitação abaixo da média do período, totalizando 1071 mm. O ano com menor ETo foi 2004 com 905 mm (Figura 5), e a precipitação em 2004 foi de 1659 mm, acima da média anual em mm (Figura 3).



Figura 5

Evapotranspiração potencial (ET_o) durante os anos de 2000 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis–RJ

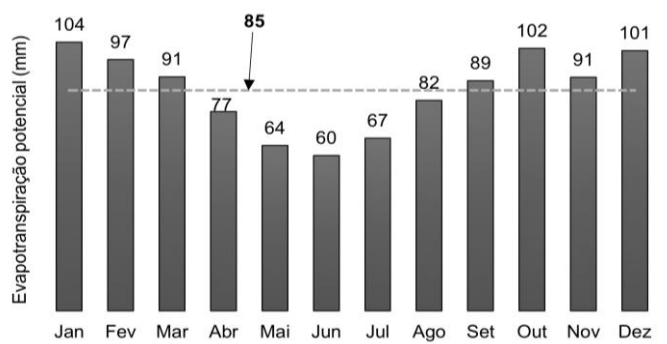


Fonte: Os autores

Os meses mais secos (abril a setembro) ao longo dos anos 2000 a 2019, tem em média 441 mm de ET_o, equivalente a 43% da ET_o média anual (1026 mm), e os meses mais chuvosos (outubro a março) tem 585 mm, equivalente a 57% da ET_o média anual. A média mensal de evapotranspiração foi de 85 mm (Figura 6). Os volumes de ET_o na estação de seca excedem em 47% os volumes totais de chuva. Na estação chuvosa os volumes totais de chuva são 50% maiores que as quantidades de ET_o. Ressalta-se que ET_o é um volume de água com potencial de voltar a atmosfera por evaporação e ou transpiração, os volumes estimados de água evaporada e transpirada serão apresentados abaixo.

Figura 6

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



Fonte: Os autores



3.2 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, foram estimados com a PTF de Medrado & Lima (2014) e estão apresentados na Tabela 5. Os parâmetros preditores utilizados na PTF foram obtidos da caracterização de um perfil de Cambissolo Háplico, apresentados na Tabela 2.

Tabela 5

Parâmetros da equação de van Genuchten estimados via PTF de Medrado e Lima (2014) para um Cambissolo Háplico - Bacia do Bonfim - RJ

Camada	θ_s	θ_r	α	n	I	K_s
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

θ_s e θ_r , são as umidades residuais na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); α e n são parâmetros empíricos, adimensional; K_s , é a condutividade hidráulica saturada do solo (cm dia^{-1}); I é um fator de tortuosidade do solo, valor sugerido por Mualem (1976) a utilização do valor de 0.5.

Fonte: Os autores

3.3 ESTIMATIVAS DOS COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO DA ÁGUA NO SOLO - PASTAGENS E FLORESTAS

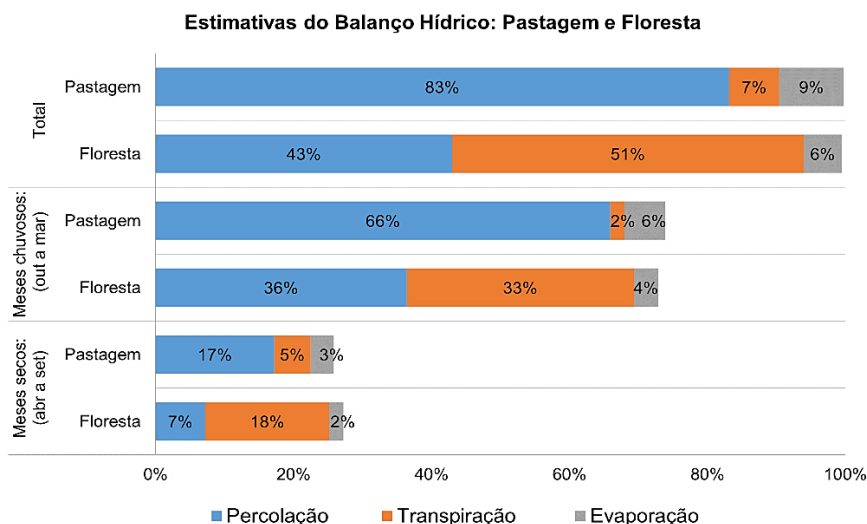
Os volumes médios (em mm) dos componentes do balanço hídrico para todo o período foram de 107 mm de transpiração (7% da precipitação anual média), 136 de evaporação mm (9%), perfazendo um total de 243 mm e percolação totaliza 1215 mm correspondendo a 83%, na área sob pastagem (Figura 7). O BH na área sob pastagem, considerando a média de precipitação pluvial (1462 mm), mostrou que nos meses mais chuvosos (outubro a março) a transpiração foi de 30 mm (2%), a evaporação foi 87 mm (6%) e percolação foi 964 mm (66% da precipitação pluvial média). Nos meses mais secos (abril a setembro) a transpiração foi de 77 mm (5%) e o volume evaporado foi de 49 mm (3%) e o volume percolado de 251 mm (17%).

O BH na área sob floresta, nos meses mais chuvosos (outubro a março) indicou um volume de 482 mm transpirado (33%) e 51 mm evaporado (4%) e a percolação totalizou 532 mm (36%). Nos meses mais secos (abril a setembro), nas áreas sob floresta, o volume médio de água transpirado foi de 263 mm (18%), a evaporação apresentou um volume de 30 mm (2%) e percolação totaliza um volume de 105 mm (7%). Nas áreas de floresta os totais de percolação, transpiração e evaporação em relação à precipitação pluvial média foram 637 mm (43%), 745 mm (51%) e 81 mm (6%), respectivamente (Figura 7).



Figura 7

Percentual dos volumes de água percolados, transpirados e evaporados em relação à precipitação para o Cambissolo Háplico sob pastagens e florestas na bacia hidrográfica do rio Bonfim, Petrópolis-RJ



Fonte: Os autores

A incerteza no balanço de massa de água foi de 0,045% para a simulação com cobertura do solo sob pastagem e 0,10% 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 (run off) 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 pastagens e sob florestas na Amazônia. 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 foi 51% e na pastagem 7% do volume precipitado. Os percentuais da evaporação foi 9% na pastagem e 6% na floresta (Figura 7).



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.

A redução do percentual de água evapotranspirada dos meses mais chuvosos para os mais seco na área de floresta foi de 82% passando de valores médios de 553 mm para 293 mm.

Durante os meses mais secos, os percentuais de evaporação e transpiração para pastagem foram 5% de transpiração e 3% de evaporação, e para as áreas de floresta 18% e 2%, respectivamente. Hodnett et al. (1995) mostraram que a variabilidade do armazenamento de água no solo foi consideravelmente maior sob pastagem do que sob floresta, especialmente após eventos de chuva na estação seca. Neste estudo, os resultados corroboram com os encontrados pelos autores, pois, nos meses mais secos, a percolação na pastagem foi de 251 mm (17%) e floresta 105 mm (7%), nos meses mais chuvosos, a percolação na pastagem foi de 964 mm (66%) e na floresta 532 mm (36%).

O aumento da recarga subterrânea (percolação) após desmatamento de floresta apenas sucederá se as propriedades hidráulicas do solo continuarem inalteradas após desmatamento, 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. Ao analisar cenários de conversão de floresta para pastagem, deve-se considerar que as taxas de evaporação e transpiração na floresta são maiores durante as estações de seca. Durante os meses mais chuvosos, o maior volume de percolação ocorre na pastagem e as maiores taxas de evaporação e transpiração na floresta. 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), não se recomenda a conversão de florestas para pastagens em bacias hidrográficas de solo Cambissolo Háplico. 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.



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 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 que para as áreas de pastagens 83% do volume precipitado percola, 7% transpirado e 9% evaporado.

O balanço hídrico mostrou para as áreas de floresta 43% do volume precipitado percola, 51% transpirado e 6% evaporado.

Os percentuais da precipitação evapotranspirada nas áreas de pastagem e floresta nos meses mais secos, foram 8% e 20%, respectivamente. Nos meses mais chuvosos os percentuais são de 8% na pastagem e 37% nas áreas de floresta.

Os percentuais da precipitação percolada na estação de seca foram de 17% na área de pastagem e de 7% nas áreas com florestas. Na estação chuvosa esses percentuais são de 66% e 36%, respectivamente.

Recomenda-se calibrar e validar o modelo utilizando dados medidos na Bacia hidrográfica do Bonfim, Petrópolis-RJ, com monitoramento da dinâmica da água nos diferentes sistemas de uso do solo e/ou o monitoramento da água percolada.

Sugere-se a aplicação desta metodologia de modelagem para outros solos da bacia e outros sistemas de uso do solo para ter num futuro um mosaico dos diferentes sistemas de uso do solo nas diferentes classes de solo e os impactos dessas mudanças nos fluxos dos componentes do balanço hídrico.



AGRADECIMENTOS

O co-autor Wenceslau Geraldtes Teixeira, agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade a taxa de bancada [Processo 311375/2022-7].

REFERÊNCIAS

- AGEVAP. (2021). *PF-05 – Plano de Bacia Hidrográfica da RH-IV*. Agência da Bacia
- Alencar, C. A. B. de, Da Cunha, F. F., Martins, C. E., Cóser, A. C., Da Rocha, W. S. D., & Araújo, R. A. S. (2009). Irrigação de pastagem: Atualidade e recomendações para uso e manejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(SUPPL. 1) <https://doi.org/10.1590/S1516-359820092>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (56th ed., Vol. 56). FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ANA. (2022). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. <https://www.gov.br/ana/pt-br>
- André, R. G. B., Marques, V. da S., Pinheiro, F. M. A., & Ferraudo, A. S. (2008). Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(4). <https://doi.org/10.1590/s0102-77862008000400009>
- Antonieli, L. S., do Prado, G., Tinos, A. C., Beltrame, G. A., de Almeida, J. V. C., & Cuco, G. P. (2016). Pasture production under different irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(6). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n6p539-544>
- Barros, C. B. R. de, Soares, W. de A., & Holanda, M. A. C. R. de. (2021). 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*, 10(5). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.15401>
- Carvalho-Santos, C., Nunes, J. P., Monteiro, A. T., Hein, L., & Honrado, J. P. (2016). 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*, 30(5). <https://doi.org/10.1002/hyp.10621>
- Casagrande, E., Recanatì, F., Rulli, M. C., Bevacqua, D., & Melià, P. (2021). Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon. *Ecological Indicators*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107155>
- Costa, C., Galford, G. L., Coe, M. T., Macedo, M., Jankowski, K. J., O'Connell, C., & Neill, C. (2021). Modeling Nitrous Oxide Emissions From Large-Scale Intensive Cropping



- Systems in the Southern Amazon. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.701416>
- de Albuquerque, A. M., Ferreira, Y. B., Silva, S. B., & Linhares Sales, M. C. (2019). 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)*, 21(2). <https://doi.org/10.35701/rcgs.v21n2.601>
- Engelbrecht, B. Z., Gonçalves, R. D., Teramoto, E. H., & Chang, H. K. (2019). Disponibilidade hídrica e balanço hídrico da bacia do rio Cachoeira na região de Itabuna/BA. *Geosciences*, 38(3), 731–740. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13806>
- Feddes, R. A., & Zaradny, H. (1978). Model for simulating soil-water content considering evapotranspiration — Comments. *Journal of Hydrology*, 37(3–4), 393–397. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90030-6)
- Fialho, E. S., & Machado, L. A. (2024). Classificação climática do estado do Rio De Janeiro: Revisão, reanálise e reflexões. *RC*, 23, 367. <https://doi.org/10.51308/continentes.v1i23.213>
- Guaque-Mellado, D., Rodrigues, A., Terra, M., Mantovani, V., Yanagi, S., Diotto, A., & Mello, C. de. (2022). Evapotranspiration under Drought Conditions: The Case Study of a Seasonally Dry Atlantic Forest. *Atmosphere*, 13(6), 871. <https://doi.org/10.3390/atmos13060871>
- Hodnett, M. G., da Silva, L. P., da Rocha, H. R., & Cruz Senna, R. (1995). Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hydrology*, 170(1–4). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02672-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02672-X).
- Huf dos Reis, A. M., Teixeira, W. G., Fontana, A., Barros, A. H. C., Victoria, D. de C., Vasques, G. M., Samuel-Rosa, A., Ottoni, M. V., & Monteiro, J. E. B. de A. (2024). Hierarchical pedotransfer functions for predicting bulk density in Brazilian soils. *Scientia Agricola*, 81. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2022-0255>
- INEA. (2021). Instituto Estadual do Ambiente. <https://www.inea.rj.gov.br>
- INMET. (2021). Instituto Nacional de Meteorologia. <https://portal.inmet.gov.br>
- Kieling, D. (2014). *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]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Lawall, S. (2010). *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]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Lawall, S. (2018). *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*.
- Martinhago, D., Marcolin, J. F., Ramallo, P., Araújo, E. C. de, Sandmann, A., Tonin, P. C., & Schutz, F. C. de A. (2021). Balanço hídrico de uma bacia hidrográfica localizada no oeste



- do estado do Paraná. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26(5), 965–970. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020374>
- Marzouk, O. A. (2021). 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*, 7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06625>
- Medrado, E., & Lima, J. E. F. W. (2014). Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. *Geoderma Regional*, 1(C). <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.08.003>
- Monteiro, L. A., Sentelhas, P. C., & Pedra, G. U. (2018). Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology*, 38(3). <https://doi.org/10.1002/joc.5282>
- Muniz, R. S. (2017). *Alterações do fluxo hídrico e seus efeitos na dinâmica do ferro e na estrutura de um Latossolo Amarelo na Amazônia* [Tese (Doutorado)]. UFRJ/ COPPE.
- NASA. (2020). NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER). In <https://power.larc.nasa.gov/Data-Access-Viewer/>.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Power Data Access Viewer: Prediction of Worldwide Energy Resource. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Accessed on: Mar. 2023.
- Nascimento, A. C. D. M., Teixeira, W. G., Gonçalves, A. O., & Shinzato, E. (2021). Chuvas de alta intensidade e volume no município de Petrópolis - RJ. In Associação Brasileira de Recursos Hídricos (Ed.), *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 24., 2021. 2021.
- Novais, G. T., & Machado, L. A. (2023). Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16163>
- Ottoni, M. V., Ottoni Filho, T. B., Schaap, M. G., Lopes-Assad, M. L. R. C., & Rotunno Filho, O. C. (2018). Hydrophysical Database for Brazilian Soils (HYBRAS) and Pedotransfer Functions for Water Retention. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–17. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0095>
- Pereira, N. R., Junior, W. D. C., Filho, E. I. F., Filho, B. C., Bhering, S. B., Chagas, C. D. S., Dart, R. D. O., Aglio, M. L. D., Lawall, S., Pinheiro, H. S. K., & Pereira, V. R. (2021). *Levantamento semidetalhado dos solos da microbacia do Córrego do Bonfim, município de Petrópolis, Região Serrana do estado do Rio de Janeiro* (Embrapa Solos, Ed.; 1st ed.). (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 273).
- Pessoa, F. A. (2013). *Formas De Húmus Na Identificação Do Estado Funcional De Fragmentos Florestais Na Bacia Hidrográfica Do Bonfim, Petrópolis - Rj* [Dissertação de mestrado em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19346.27842>



- Rocha, F. I. (2021). *Alterações Edáficas, Microbianas e na Saúde Animal Decorrentes da Conversão Floresta-Pastagem na Amazônia Ocidental* [(Tese)]. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Rodrigues, A. L., Villa, P. M., Rodrigues, A. C., Mata, R. A., & Martorano, L. G. (2021). Balanço hídrico de uma microbacia hidrográfica no sudeste do Brasil: Implicações para o manejo de serviços ecossistêmicos. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.68856>
- Rosa, S. L. K., Souza, J. L. M. de, & Santos, A. A. dos. (2023). Data from NASA Power and surface weather stations under different climates on reference evapotranspiration estimation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 58. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2023.v58.03261>
- Sanches, A. C. (2018). *Coeficiente de cultura (Kc) e correlações de consumo de água, fatores produtivos e biométricos de gramíneas tropicais em cultivo exclusivo e em sobresemeadura com forrageiras de inverno* [Tese (Doutorado) USP]. Universidade de São Paulo.
- Sanches, A. C., De Souza, D. P., De Jesus, F. L. F., Mendonça, F. C., & Gomes, E. P. (2019). Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat. *Scientia Agricola*, 76(6). <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0386>
- Silva Junior, J. F., Hernandez, F. B. T., Silva, I. P. F., Reis, L. S., & Teixeira, A. H. de C. (2018). Estabelecimento dos meses mais críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 12(2). <https://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n2p122-131>
- Silva, A. C. (2013). *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]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Silva, A. C., Armindo, R. A., & Prevedello, C. L. (2020). Splintex 2.0: A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105157>
- Šimůnek, J., Genuchten, M. Th., & Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7). <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., & van Genuchten, M. T. (2008). The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.0, HYDRUS software series 3. In Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA (Issue July).
- Souza, R. M. S., Souza, E. S. de, Antonino, A. C. D., & Lima, J. R. de S. (2015). Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(5), 449–455. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p449-455>



- Tassinari, D., Andrade, M. luiza de C., Dias Junior, M. de S., Martins, R. P., Rocha, W. W., Pais, P. S. A. M., & de Souza, Z. R. (2019). Soil compaction caused by harvesting, skidding and wood processing in eucalyptus forests on coarse-textured tropical soils. *Soil Use and Management*, 35(3). <https://doi.org/10.1111/sum.12509>
- Tomasella, J., Hodnett, M. G., & Rossato, L. (2000). Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64(1). <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641327x>
- van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5). <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Veloso, N. R. (2012). *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]. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Villa Nova, N. A., Salati, E., & Matsui, E. (1976). Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. *Acta Amazonica*, 6(2). <https://doi.org/10.1590/1809-43921976062215>
- Villa, B. de, Petry, M. T., Martins, J. D., Tonetto, F., Tokura, L. K., Moura, M. B. de, Silva, C. M. da, Gonçalves, A. F., Cerveira, M. P., Slim, J. E., Santos, M. S. dos, Bellé, M. G., & Jimenez, D. H. (2022). Balanço hídrico climatológico: uma revisão. *Research, Society and Development*, 11(6). <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.26669>
- White, J. W., Hoogenboom, G., Stackhouse, P. W., & Hoell, J. M. (2008). Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.017>
- Zaroni, M. J., & dos Santos, H. G. dos (Im memorium). (2021, December 9). *Solos Tropicais: Cambissolos*. Embrapa. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/cambissolos>