



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Análise de Sensibilidade da Umidade do Solo com Hydrus 1D no Município de Garanhuns-PE

Eduarda Luciana Larissa de Lima¹; Jean Firmino Cardoso²; Severino Martins dos Santos Neto³; Ialy Rayane de Aguiar Costa⁴; Tássia dos Anjos Tenório de Melo⁵; Artur Paiva Coutinho⁶

¹Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Universidade Federal de Pernambuco - Campus do Agreste (UFPE-CAA), email: eduarda.larissa@ufpe.br

²Mestrando em Tecnologias Energéticas e Nucleares pelo Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), email: jean.firmino@ufpe.br

³Professor Visitante na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), email: severino.martins@ufpe.br

⁴Doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), email: ialy.costa@ufpe.br

⁵Professora na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), email: tassia.melo@ufpe.br

⁶Professor na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), email: arthur.coutinho@ufpe.br

Artigo recebido em 15/07/2024 e aceito em 07/05/2025

RESUMO

A compreensão dos processos hidrológicos no solo e da sensibilidade dos parâmetros envolvidos é crucial para o manejo sustentável de recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas como o bioma Caatinga. Este estudo utiliza o software HYDRUS-1D para modelar a umidade do solo e realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos em solos de áreas de Caatinga nativa e pastagem no município de Garanhuns, Pernambuco. Dados hidrometeorológicos e geotécnicos de 2017 foram utilizados para simular a umidade do solo em condições de presença e ausência de precipitação. Parâmetros como coeficiente de retenção de água, condutividade hidráulica saturada (Ks), parâmetro alfa (α) e fator de curvatura da curva de retenção (n) foram avaliados. Os resultados mostram alta sensibilidade da evapotranspiração acumulada às variações nos parâmetros, refletindo o impacto direto na dinâmica de saturação e disponibilidade hídrica. Por outro lado, variáveis como escoamento superficial e infiltração acumulada apresentaram baixa sensibilidade. Esses achados reforçam a importância de considerar a sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos na formulação de estratégias para a conservação e o manejo hídrico em áreas semiáridas. A análise também evidencia os impactos das mudanças no uso da terra sobre o potencial de armazenamento de água no solo, contribuindo para um planejamento mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos na região.

Palavras-Chave: Caatinga; Compactação do solo; Infiltração de água; Modelagem hidrológica; Parâmetros hidráulicos.

Sensitivity Analysis of Soil Moisture with Hydrus 1D in the municipality of Garanhuns, PE

ABSTRACT

Understanding the hydrological processes in soil and the sensitivity of the associated parameters is crucial for the sustainable management of water resources, especially in semi-arid regions such as the Caatinga biome. This study employs the HYDRUS-1D software to model soil moisture and perform a sensitivity analysis of hydrodynamic parameters in soils from native Caatinga and pasture areas in Garanhuns, Pernambuco, Brazil. Hydrometeorological and geotechnical data from 2017 were used to simulate soil moisture under precipitation and non-precipitation conditions. Parameters such as water retention coefficient, saturated hydraulic conductivity (Ks), alpha parameter (α), and the curvature factor of the retention curve (n) were analyzed. Results indicate high sensitivity of cumulative evapotranspiration to parameter

variations, highlighting a direct impact on saturation dynamics and water availability. Conversely, variables such as surface runoff and cumulative infiltration showed low sensitivity. These findings emphasize the importance of accounting for hydrodynamic parameter sensitivity when developing strategies for water conservation and management in semi-arid areas. The analysis also underscores the impacts of land use changes on the soil's water storage potential, contributing to more efficient and sustainable water resource planning in the region.

Keywords: Caatinga; Soil compaction; Water infiltration; Hydrological modeling; Hydraulic parameters.

Introdução

A Caatinga, um bioma exclusivamente brasileiro e característico da região semiárida, enfrenta intensos processos de degradação ambiental (Jardim et al., 2023). Entre as principais causas estão o desmatamento para produção de energia e a conversão de áreas naturais em pastagens destinadas à pecuária de subsistência (Araujo et al., 2023). Essas atividades têm desencadeado graves impactos, como o aumento da probabilidade de desastres naturais, incluindo a escassez hídrica e a intensificação dos processos de desertificação (Araujo et al., 2023; Refati et al., 2023). Como resultado, a Caatinga se destaca como um dos biomas mais vulneráveis às mudanças climáticas (Ganem et al., 2020; Jardim et al., 2023). Avaliar esses impactos é essencial para compreender as consequências hidrológicas de longo prazo, com ênfase no armazenamento de água nos solos, na intensificação das secas e no avanço da desertificação (Araujo et al., 2023).

O semiárido brasileiro apresenta condições climáticas específicas, com precipitação média anual inferior a 800 mm, déficit hídrico diário superior a 60% e um índice de aridez de Thornthwaite abaixo de 0,50 (Alves et al., 2024). Nesse contexto, o estudo do armazenamento de água no solo é fundamental para a compreensão dos processos eco-hidrológicos que sustentam os sistemas naturais e produtivos dessa região (França et al., 2021). Além disso, a caracterização da degradação ambiental nas áreas semiáridas é crucial para diagnosticar a qualidade do solo e fundamentar ações de recuperação, como a renaturalização por meio do reflorestamento com espécies nativas (Scarciglia et al., 2020).

A interação entre variáveis meteorológicas, fluxos de energia na superfície e evapotranspiração em diferentes paisagens da Caatinga desempenha um papel vital na dinâmica hidrológica do semiárido brasileiro, compreender esses processos é indispensável para a gestão hídrica em regiões com clima semiárido (C. A. C. Santos et al., 2020). A degradação ambiental afeta significativamente os fluxos de água e carbono, tornando essencial a modelagem e o monitoramento de áreas vulneráveis (M. L. Oliveira et al., 2022). Essas ferramentas fornecem informações valiosas para orientar os tomadores de decisão na implementação de políticas de uso sustentável da terra, mitigando os efeitos da

degradação e prevenindo desastres climáticos (Rezvani et al., 2023).

A análise de sensibilidade da umidade do solo utilizando o software Hydrus-1D tem um papel importante na compreensão dos processos hidrológicos em regiões semiáridas e no desenvolvimento de estratégias de manejo hídrico. Estudos recentes têm demonstrado a eficácia do modelo em diferentes contextos agrícolas e climáticos, evidenciando sua aplicabilidade em diversos cenários. Alguns autores, avaliaram a dinâmica da umidade do solo e o estresse hídrico em cultivos de sorgo forrageiro irrigado no semiárido pernambucano, mostrando que o Hydrus-1D foi eficiente na simulação da umidade do solo e no monitoramento do estresse hídrico ao longo do cultivo, mesmo sob condições distintas de cobertura do solo (Aires et al., 2022). Esse tipo de análise contribui para o manejo racional dos recursos hídricos, essencial em ambientes com escassez hídrica.

Em contextos internacionais, o Hydrus-1D também tem sido amplamente utilizado. Como a investigação da dinâmica de salinidade e água no solo na região árida de Hetao, China, utilizando lisímetros e modelagem com Hydrus-1D para otimizar práticas de irrigação e controle de salinização (Ramos et al., 2023). Em outro estudo, foi empregado o modelo para avaliar regimes de irrigação em cultivos como milho e algodão na Grécia, demonstrando a capacidade do Hydrus-1D em fornecer insights para um planejamento de irrigação mais eficiente (Voulanas et al., 2022). Esses trabalhos mostram que o modelo não apenas é versátil, mas também importante para analisar e otimizar o manejo da água em diferentes condições de solo, clima e cultivo.

No Brasil, esforços como na aplicação do método de Sobol para analisar a sensibilidade de parâmetros hidrodinâmicos em regiões semiáridas, reforça a importância de avaliar a influência de variáveis-chave no comportamento hidrológico (Silva et al., 2024). Esse tipo de abordagem é diretamente relevante para compreender a dinâmica da água, que busca explorar a sensibilidade da umidade do solo no semiárido brasileiro, utilizando o Hydrus-1D para calibrar e avaliar cenários locais (C. A. C. Santos et al., 2020; Silva et al., 2024). A análise de sensibilidade contribui para entender a variabilidade das respostas hidrológicas e para subsidiar ações de

Lima, E. L. L. de; Cardoso, J. F.; Santos Neto, S. M. dos; Costa, I. R. de A.; Melo, T. dos A. T. de; Coutinho, A. P.

manejo sustentável, especialmente em áreas vulneráveis como o semiárido nordestino.

A compreensão dos fluxos de água no solo é um desafio devido à sua complexidade intrínseca, mas simulações numéricas têm se mostrado ferramentas sofisticadas e confiáveis para modelar esses processos. Em particular, o *software* HYDRUS 1D destaca-se por sua ampla aplicação em estudos hidrológicos, devido à capacidade de simular com precisão a dinâmica da água no solo, replicando o movimento e o armazenamento hídrico em diferentes tipos de solo e sob variadas condições ambientais (Lazarovitch et al., 2023). Essa ferramenta permite a geração de cenários detalhados do balanço hídrico, proporcionando insights valiosos sobre processos como infiltração, percolação, armazenamento de água no solo, escoamento superficial e evapotranspiração, contribuindo significativamente para uma gestão eficiente dos recursos hídricos (Esiri et al., 2024; Thao et al., 2024).

Entretanto, a análise das incertezas associadas aos parâmetros hidrodinâmicos representa um desafio adicional. Isso decorre do elevado número de variáveis envolvidas e da complexidade das equações empregadas para descrevê-las sob diferentes condições de modelagem (Gomes et al., 2023). A equação de Richards, amplamente utilizada para descrever o movimento da água no solo não saturado, é inerentemente não linear e altamente sensível às condições iniciais e de contorno (Boujoudar et al., 2023). Além disso, a variabilidade espacial e temporal de propriedades do solo, como a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica, exige métodos avançados de calibração e validação para assegurar que as simulações reflitam com precisão os processos observados no campo (Castellini et al., 2024; Choi & Yoon, 2023).

A análise de sensibilidade do solo requer a definição de condições que amplificam o impacto de alterações ambientais, permitindo uma avaliação detalhada de como as variáveis influenciam a dinâmica do solo (Forcina et al., 2023). Uma abordagem eficaz para isso é comparar diferentes estados do solo, como a presença e ausência de vegetação, proporcionando uma compreensão clara das interações entre cobertura do solo e suas propriedades hidrológicas (Krueger et al., 2022; Rasheed et al., 2022).

O município de Garanhuns, presente na caatinga pernambucana, foi selecionado como área de estudo devido a características específicas que favorecem o desenvolvimento da pesquisa. Além de já existirem conjuntos de dados hidrometeorológicos e geotécnicos previamente coletados pelo grupo de pesquisa, a proximidade da

região permite uma logística eficiente para eventuais coletas adicionais, otimizando recursos e tempo.

Nesta pesquisa, tem como objetivo modelar a dinâmica da umidade do solo utilizando a equação de Richards implementada no *software* HYDRUS-1D. O estudo empregará dados do município de Garanhuns referentes ao ano de 2017, analisando a umidade do solo em cenários com e sem precipitação. A investigação foca na dinâmica de saturação em áreas de pastagem e de vegetação nativa da Caatinga, com ênfase na capacidade de armazenamento hídrico do solo e nos impactos hidrológicos associados às mudanças no uso da terra. Adicionalmente, serão realizadas análises de sensibilidade para avaliar os parâmetros hidrodinâmicos em solos sob vegetação nativa e em áreas convertidas para pastagem, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das interações entre solo, vegetação e manejo sustentável.

Metodologia

Área de estudo

Esta pesquisa foi realizada utilizando dados do município de Garanhuns, situado no Agreste Meridional de Pernambuco, no Planalto da Borborema, com coordenadas 08° 50' 0" S e 36° 40' 0" W, conforme indicado na Figura 1. O município está a altitudes entre 850 e 1.050 metros acima do nível do mar, possui uma área total de 459 km² e uma densidade populacional de 311 habitantes por km² (M. P. Santos et al., 2023). Localizado a aproximadamente 230 km de Recife, a capital pernambucana, Garanhuns apresenta um clima tropical com estação seca (classificação Köppen-Geiger: As), condições que favorecem a realização deste estudo (Paiva et al., 2022).

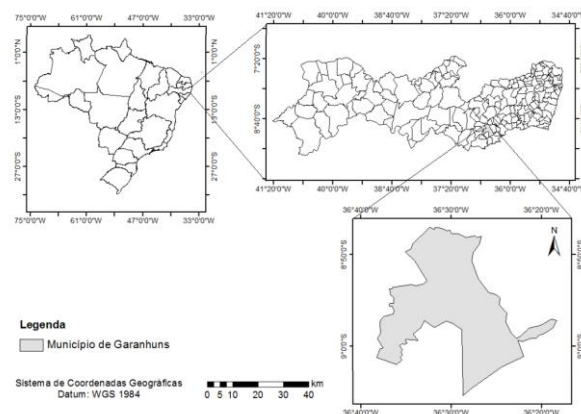


Figura 1. Localização espacial do município de Garanhuns – PE. Fonte: (V. V. Barbosa et al., 2016)

O uso intensivo de áreas de pastagem, especialmente devido ao pisoteio excessivo de rebanhos, causa compactação do solo, reduzindo

sua porosidade superficial, aumentando a densidade e a resistência à penetração (Suzuki et al., 2024). Esses processos diminuem a infiltração de água, intensificam o escoamento superficial e comprometem a recarga dos aquíferos, resultando em maior erosão do solo e possíveis degradações irreversíveis no ecossistema, como a perda de biodiversidade e o empobrecimento da vegetação nativa (Faria et al., 2023).

A Caatinga, bioma exclusivo do Brasil, é composta por florestas tropicais secas com espécies adaptadas ao clima semiárido. Sua vegetação inclui formações como caatinga florestada, arborizada, parque e gramíneo-lenhosa, com diversas espécies endêmicas (Costa et al., 2022). A baixa precipitação, combinada com altas temperaturas, favorece elevadas taxas de evaporação, criando um ambiente com baixa umidade do solo e reduzida disponibilidade hídrica, o que dificulta o crescimento de algumas espécies vegetais (Zhang et al., 2022).

Este estudo focou em áreas específicas de Garanhuns, selecionando tanto regiões de vegetação nativa da Caatinga quanto áreas convertidas em pastagens. O objetivo foi comparar a dinâmica hídrica nos dois cenários, utilizando modelagem e análises de sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos do solo.

Os dados analisados incluem precipitação diária e condições meteorológicas registradas entre 1º de janeiro e 31 de dezembro de 2017 na estação Garanhuns A322 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O período apresenta uma temperatura média mensal de 21 °C, com máximas de 26 °C e mínimas de 17 °C, umidade relativa média de 82%, velocidade média do vento de 2,2 m/s e radiação solar global máxima. A insolação total mensal variou ao longo do ano, com uma média de 190 horas por mês.

Estimativa da evapotranspiração de referência

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foi realizada utilizando o modelo Penman-Monteith, conforme recomendado pela FAO (A. de M. Barbosa & Cavalcanti, 2024). Este método é amplamente reconhecido por sua precisão e robustez em estudos relacionados à evapotranspiração, sendo representado pela Equação 1.

$$ET_{oPM} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 DPV}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (1)$$

Onde: ET_{oPM} é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d' água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($0,067 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T é a temperatura

média do ar à 2 m de altura ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (ms^{-1}); e DPV é o déficit de pressão de vapor (kPa), expresso como $e_s - e_a$, sendo e_s a pressão do vapor de saturação (kPa) e e_a a pressão de vapor atual (kPa).

Umidade do solo

O monitoramento do teor de água no solo foi realizado utilizando sondas de reflectometria no domínio do tempo (TDR) modelo CS616, fabricadas pela Campbell Scientific. Este equipamento é amplamente empregado em estudos hidrológicos devido à sua precisão e confiabilidade na medição do teor de umidade do solo em diferentes profundidades (Sheng et al., 2024). As medições foram realizadas em ambas as áreas de estudo, representando a vegetação nativa da Caatinga e áreas convertidas para pastagem, em profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. Essa abordagem permitiu obter dados detalhados sobre a dinâmica hídrica em diferentes camadas do perfil do solo.

As sondas TDR CS616 operam com base na medição do tempo de propagação de um pulso eletromagnético ao longo de hastes inseridas no solo. A saída do sensor é um período de tempo (t), medido em microssegundos (μs), que é relacionado à umidade volumétrica do solo (θ_v) por meio de uma equação específica (Chavanne & Frangi, 2024). A calibração dos sensores foi realizada com base nas recomendações descritas no manual técnico da Campbell Scientific, utilizando a Equação 2:

$$\theta_v = -0,063 - 0,0063t + 0,0007t^2 \quad (2)$$

Onde: θ_v representa a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ou %), t é o período de saída do sensor (μs).

Otimização dos dados com o software RETC

Para implementar os dados no software HYDRUS, foi necessário realizar a otimização dos parâmetros hidráulicos do solo utilizando o software RETC. Este procedimento é fundamental para assegurar a precisão na modelagem dos processos de fluxo de água e transporte de solutos no solo, uma etapa crucial para a obtenção de resultados confiáveis que subsidiam o entendimento das dinâmicas hidrológicas da região estudada.

A otimização dos parâmetros baseou-se em modelos amplamente utilizados em estudos hidrológicos, incluindo a equação de van Genuchten (Alobaidy & Hassan, 2024), a curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ de Brooks & Corey (Garg et al., 2022) e a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$. Esses modelos foram selecionados devido à sua eficácia na representação das relações

entre umidade volumétrica, potencial matricial e condutividade hidráulica, permitindo caracterizar as propriedades hidráulicas dos solos em diferentes condições.

Os parâmetros hidráulicos determinados incluem: θ_r é a umidade residual do solo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), representando o teor mínimo de água que permanece retido no solo após a drenagem; θ_s é a umidade de saturação do solo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), que reflete o teor máximo de água que o solo pode reter sob saturação; α é o parâmetro escalonador do potencial matricial do solo (cm^{-1}), relacionado à retenção de água nas menores porosidades; n é o

parâmetro que ajusta o formato da curva de retenção de água no solo, representando a distribuição do tamanho dos poros; e K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (mm/d), indicativa da facilidade com que a água se movimenta em condições de saturação.

Esses parâmetros foram determinados para três camadas do perfil do solo (0–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm), considerando áreas de pastagem (PA) e de vegetação nativa da Caatinga (CA), conforme detalhado na Tabela 1. As análises foram realizadas integrando dados de precipitação e evapotranspiração específicos da região.

Tabela 1. Tabela com valores dos parâmetros de referência.

Solo	ΔZ (cm) ¹	θ_r (m^3m^{-3})	θ_s (m^3m^{-3})	α (cm^{-1})	n	K_s (mmd^{-1})
Pasto	0-20	0,0647	0,35976	0,00858	1,32392	984,96
	20-40	0,04788	0,32853	0,00823	1,29266	682,5
	40-60	0,05802	0,32711	0,00607	1,28684	216
Caatinga	0-20	0,02013	0,37934	0,03935	1,31841	7034,7
	20-40	0,03201	0,34759	0,01645	1,30492	2151,6
	40-60	0,02219	0,30751	0,0081	1,26957	552,7

¹ Camadas de perfil do solo.

Para avaliar a sensibilidade dos parâmetros, foram realizadas variações graduais de 10%, tanto positivas quanto negativas, atingindo um máximo de $\pm 50\%$. Assim, as análises consideraram os seguintes valores: -50%, -40%, -30%, -20%, -10%, valor de referência, +10%, +20%, +30%, +40% e +50%. Embora a Tabela 2

destaque apenas as variações do parâmetro θ_s nas três camadas de solo da Caatinga, essas variações foram aplicadas a todos os parâmetros hidráulicos em ambas as regiões. O parâmetro θ_r não foi trabalhado devido à sua irrelevância nas condições avaliadas, enquanto o parâmetro n foi limitado a uma variação mínima de -30%, devido a restrições operacionais do HYDRUS.

Tabela 2. Variações do parâmetro θ_s para o solo da Caatinga do município de Garanhuns-PE.

0 - 20 cm										
-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	θ_s	10%	20%	30%	40%	50%
0,1896	0,2276	0,2655	0,3034	0,3414	0,3793	0,4172	0,4552	0,4931	0,5310	0,5690
20 - 40 cm										
-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	θ_s	10%	20%	30%	40%	50%
0,1737	0,2085	0,2433	0,2780	0,3128	0,3475	0,3823	0,4171	0,4518	0,4866	0,5213
40 - 60 cm										
-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	θ_s	10%	20%	30%	40%	50%
0,1537	0,1845	0,2152	0,2460	0,2767	0,3075	0,3382	0,3690	0,3997	0,4305	0,4612

Como resultado desse procedimento, o software HYDRUS-1D gerou um total de 242 planilhas de dados, cada uma representando um cenário hidrológico específico com variações nos parâmetros hidráulicos em relação ao valor de referência. As planilhas contêm informações detalhadas, incluindo métricas como velocidade de infiltração no topo do solo (v_{Top}), velocidade de percolação no fundo do perfil (v_{Bot}), escoamento superficial (RunOff) e volume de água. Esses resultados possibilitaram uma análise aprofundada das dinâmicas hidrológicas sob diferentes condições de solo e uso da terra, oferecendo uma

base robusta para avaliar o impacto das práticas de manejo e mudanças no uso do solo na região.

Resultados

A Figura 2 ilustra o comportamento da precipitação pluviométrica em 2017 no município de Garanhuns, evidenciando dois períodos distintos. O primeiro, correspondente à estação chuvosa (de maio a setembro), é caracterizado por alturas pluviométricas superiores a 120 mm mensais, com picos que ultrapassam 200 mm. O segundo, referente à estação seca, apresenta volumes de chuva inferiores a 50 mm mensais, com

registros frequentes de ausência de precipitação, evidenciando o período de estiagem típico da região. Este padrão sazonal reflete as características climáticas da região inserida no Planalto da Borborema e alinhada ao clima tropical com estação seca, ou As, segundo a classificação de Köppen-Geiger assim como confirmado por Barbosa et al. (V. V. Barbosa et al., 2016).

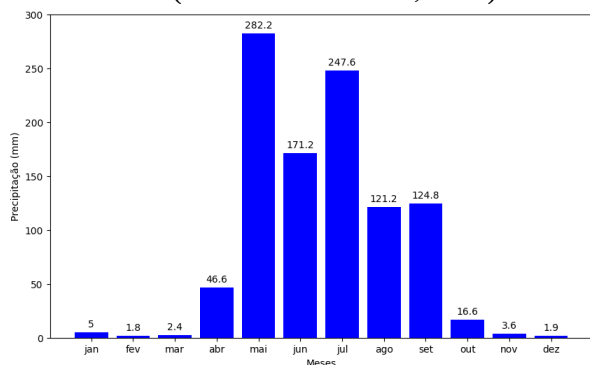


Figura 2. Precipitação pluviométrica mensal do município de Garanhuns-PE.

Com base nesses dados pluviométricos mensais, foi calculada a evapotranspiração de referência (ET_o) para as áreas de pastagem e vegetação nativa da Caatinga utilizando o método de Penman-Monteith (Figura 3). Os resultados indicaram um comportamento inverso entre a precipitação e a evapotranspiração ao longo do ano, assim como encontrado por outros estudos considerando métodos diferentes (C. L. de Oliveira et al., 2023; R. B. Santos et al., 2022). Durante a estação chuvosa, a evapotranspiração apresentou valores reduzidos, enquanto na estação seca, a evapotranspiração aumentou consideravelmente.

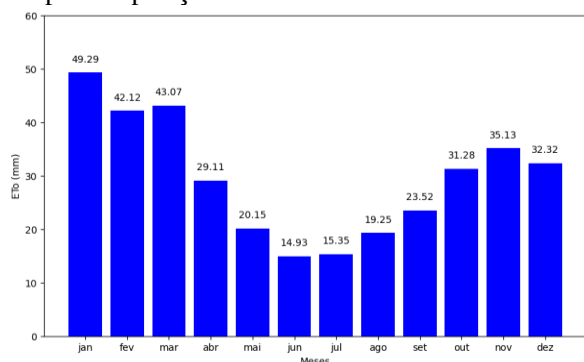


Figura 3. Evapotranspiração de referência mensal do município de Garanhuns-PE.

Por exemplo, em julho de 2017, período de maior precipitação registrado (247,60 mm), a evapotranspiração atingiu 15,35 mm. Este comportamento reflete as condições ambientais da Caatinga, onde a baixa precipitação é acompanhada por uma alta taxa de evaporação e temperaturas elevadas, características de um bioma inserido em um contexto semiárido. Esses resultados corroboram estudos recentes (Medeiros et al., 2022; Moraes et al., 2023), que destacam a

influência do balanço hídrico e das condições climáticas na dinâmica da evapotranspiração da Caatinga, um bioma altamente adaptado às adversidades hídricas.

Ao comparar os valores da ET_o entre as áreas de pastagem e vegetação nativa, foram observadas diferenças, influenciadas pela cobertura do solo e pela capacidade de retenção hídrica. A vegetação da Caatinga, com sua estrutura adaptada ao clima seco, tende a apresentar uma menor demanda hídrica em relação às áreas de pastagem, onde o solo exposto favorece maior perda de água por evaporação.

O software HYDRUS gerou um total de 242 planilhas de dados, abrangendo os dois sítios experimentais localizados no município de Garanhuns. A partir desses dados, foram elaborados manualmente 312 gráficos, com o objetivo de identificar os parâmetros hidráulicos com maior ou menor sensibilidade às alterações aplicadas. Esse processo foi realizado para compreender como as diferentes variações dos parâmetros impactam as variáveis hidrológicas modeladas e possibilitar uma análise detalhada dos comportamentos hidrológicos em cada cenário.

A análise de sensibilidade foi conduzida com base em variáveis hidrológicas críticas para o entendimento do comportamento do solo em relação ao fluxo de água. As variáveis analisadas incluíram: velocidade de infiltração (vTop), velocidade de percolação (vBot), potencial de fluxo superficial acumulado (sum.rtop), velocidade de infiltração acumulada (sum.vTop), velocidade de percolação acumulada (sum.vBot), potencial matricial na superfície de infiltração (hTop), potencial matricial na zona de raízes (hRoot), potencial matricial da percolação (hBot), escoamento superficial (RunOff), escoamento superficial acumulado (sum.RunOff), volume, infiltração acumulada (sum.infil) e evapotranspiração acumulada (sum.evap). Essas métricas oferecem uma visão abrangente das dinâmicas de infiltração, percolação, escoamento e evapotranspiração nas diferentes condições de solo e clima modeladas.

Os gráficos produzidos permitiram categorizar os parâmetros hidráulicos quanto à sua sensibilidade, demonstrando que algumas variáveis apresentaram alta responsividade às variações, enquanto outras mostraram-se insensíveis. Para sistematizar essa análise, foram elaboradas tabelas de sensibilidade, indicando se os parâmetros eram sensíveis (S) ou insensíveis (I) em cada camada do solo (0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm). Essas tabelas foram produzidas separadamente para as regiões de pastagem (Tabela 3) e Caatinga (Tabela 4), destacando as

diferenças nos comportamentos hidrológicos entre os dois tipos de cobertura do solo.

Na camada superficial (0-20 cm), as variáveis associadas à infiltração e dinâmica hídrica, como sum.vTop , hTop , hRoot e hBot , foram altamente sensíveis aos parâmetros α , θ_s e K_s , tanto na pastagem quanto na Caatinga. Isso se deve ao impacto direto das condições climáticas, especialmente da precipitação, sobre a superfície do solo. Além disso, a evapotranspiração acumulada (sum.evap) também mostrou elevada sensibilidade, indicando que o manejo do solo e a cobertura vegetal têm influência significativa no balanço hídrico.

Nas camadas intermediárias (20-40 cm) (Tabela 3 e 4), a sensibilidade geral diminui em ambas as regiões. Na pastagem, apenas o potencial matricial (hTop) apresenta alguma sensibilidade, sugerindo que, a partir dessa profundidade, os efeitos diretos das condições climáticas e da cobertura superficial são reduzidos, comportamento também presente em estudos semelhantes sobre a umidade do solo (Aires et al., 2022; Ramos et al., 2023; Silva et al., 2024). Na Caatinga, o padrão é semelhante, mas com destaque para a influência da vegetação nativa, que

Tabela 3. Sensibilidade das variáveis hidrológicas aos parâmetros hidrodinâmicos de um perfil de solo para região de pasto no sítio experimental de Garanhuns-PE.

0 - 20 cm	vTo p	vBo t	sum .rT op	sum .vT op	sum .vB ot	hTo p	hRo ot	hBo t	Run Off	sum (Ru nOf f)	Vol ume	sum (Inf il)	sum (Ev ap)
n	I	S	I	I	S	S	I	S	I	I	S	S	S
α	I	S	I	S	I	S	I	S	I	I	S	I	S
K_s	I	S	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	S
θ_s	I	S	I	S	S	S	I	S	I	I	S	I	S
20 - 40 cm	vTo p	vBo t	sum .rT op	sum .vT op	sum .vB ot	hTo p	hRo ot	hBo t	Run Off	sum (Ru nOf f)	Vol ume	sum (Inf il)	sum (Ev ap)
n	I	I	I	I	I	S	I	I	I	S	I	I	I
α	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
K_s	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
θ_s	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
40 - 60 cm	vTo p	vBo t	sum .rT op	sum .vT op	sum .vB ot	hTo p	hRo ot	hBo t	Run Off	sum (Ru nOf f)	Vol ume	sum (Inf il)	sum (Ev ap)
n	I	I	I	I	I	S	I	S	I	S	S	I	I
α	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
K_s	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
θ_s	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

mantém alguma sensibilidade em variáveis como hTop e hRoot , devido à capacidade de suas raízes de penetrar em profundidades moderadas.

Na camada mais profunda (40-60 cm), as variáveis sensíveis se restringem quase exclusivamente ao potencial matricial (hTop e hBot) e ao volume de água no solo. Na pastagem, as variáveis relacionadas à infiltração e ao escoamento superficial perdem sensibilidade, enquanto na Caatinga, a presença de raízes profundas garante alguma estabilidade na dinâmica hídrica. Em ambas as regiões, os parâmetros α , θ_s e K_s são menos influentes em profundidades maiores.

Ao comparar as duas regiões, observa-se que a pastagem apresenta maior sensibilidade às alterações nos parâmetros hidráulicos nas camadas superficiais, devido à menor cobertura vegetal em relação à Caatinga. Por outro lado, a Caatinga demonstra maior estabilidade e adaptação, refletindo a resiliência do bioma ao clima semiárido. Em termos práticos, as estratégias de manejo hídrico devem priorizar as camadas superficiais, onde a sensibilidade é maior, adotando práticas de conservação do solo e controle de erosão.

Tabela 4. Sensibilidade das variáveis hidrológicas aos parâmetros hidrodinâmicos de um perfil de solo para região de Caatinga no sítio experimental Garanhuns-PE.

0 - 20 cm	vTo p	vBot	sum. rTo p	sum. vTo p	Sum .vBo t	hTo p	hRo ot	hBot	Run Off	sum (Ru nOff)	Volu me	sum (Infi l)	sum (Eva p)
n	I	I	I	S	I	S	I	S	I	I	S	I	S
<i>a</i>	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	S
K_s	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	S
θ_s	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	S

20 - 40 cm	vTo p	vBot	sum. rTo p	sum. vTo p	Sum .vBo t	hTo p	hRo ot	hBot	Run Off	sum (Ru nOff)	Volu me	sum (Infi l)	sum (Eva p)
n	S	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	S
<i>a</i>	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I
K_s	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I
θ_s	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I

40 - 60 cm	vTo p	vBot	sum. rTo p	sum. vTo p	Sum .vBo t	hTo p	hRo ot	hBot	Run Off	sum (Ru nOff)	Volu me	sum (Infi l)	sum (Eva p)
n	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I
<i>a</i>	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I
K_s	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I
θ_s	I	I	I	I	I	S	I	S	I	I	S	I	I

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, referentes à análise de sensibilidade das variáveis hidrológicas do solo, constatou-se que os parâmetros hidrodinâmicos, tanto para a região de Caatinga quanto para a região de pastagem, não apresentaram diferenciação significativa para as variáveis: potencial de fluxo superficial acumulado (sum.rTop), potencial matricial na zona de raízes (hRoot), escoamento superficial (RunOff), escoamento superficial acumulado (sum.RunOff) e infiltração acumulada (sum.infil). Essa ausência de sensibilidade também é evidenciada nas Figuras 4, 5 e 6.

No caso do parâmetro de forma θ_s na segunda camada (20-40 cm) para a região de Caatinga, conforme ilustrado na Figura 4, verificou-se ausência de sensibilidade do potencial de fluxo superficial acumulado (sum.rTop) em função do tempo. Independentemente das variações nos valores de referência, incluindo o valor padrão, o gráfico apresentou comportamento uniforme, sem qualquer variação significativa. Inicialmente, observa-se um aumento no fluxo acumulado a partir do dia 0, atribuível à quase total ausência de precipitações até o dia 90. Após esse período, precipitações mais intensas resultaram em uma redução do fluxo acumulado, com uma queda acentuada na curva até o dia 270, acompanhando

eventos pluviométricos que, em alguns casos, ultrapassaram 60 mm/dia.

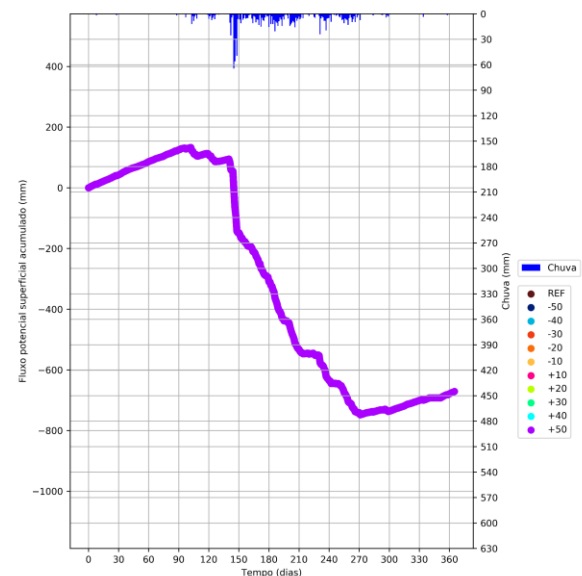


Figura 4. Sensibilidade Fluxo potencial superficial acumulado em função do tempo, quando da variação o parâmetro de forma θ_s na 2ª camada do solo de Caatinga.

Ainda em relação aos gráficos que indicaram ausência de sensibilidade, as variáveis escoamento superficial (RunOff) e escoamento superficial acumulado (sum.RunOff), representadas na Figura 5 e Figura 6,

respectivamente, também não demonstraram sensibilidade ao parâmetro α na região de Caatinga para a camada superficial (0-20 cm). Em ambas as análises, os gráficos mantiveram um comportamento uniforme para todas as variações do valor de referência, incluindo o valor padrão. Esse mesmo padrão foi observado para os demais parâmetros analisados (n , θ_s e K_s) em ambas as regiões e profundidades.

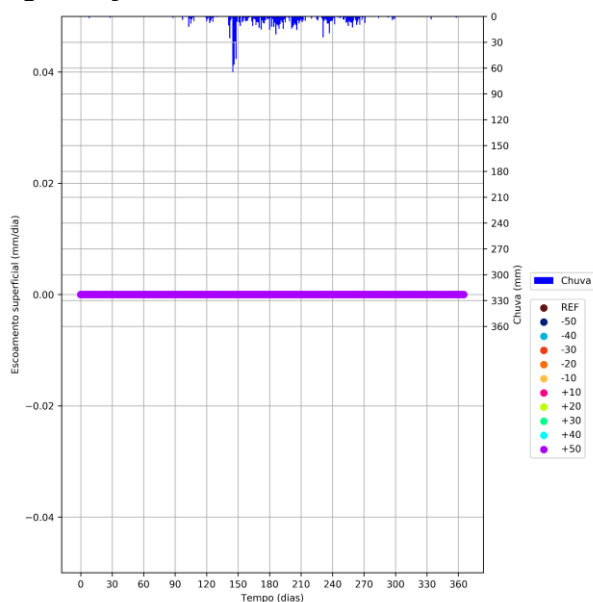


Figura 5. Sensibilidade Escoamento superficial em função do tempo, quando da variação o parâmetro de forma α na 1ª camada do solo de Caatinga.

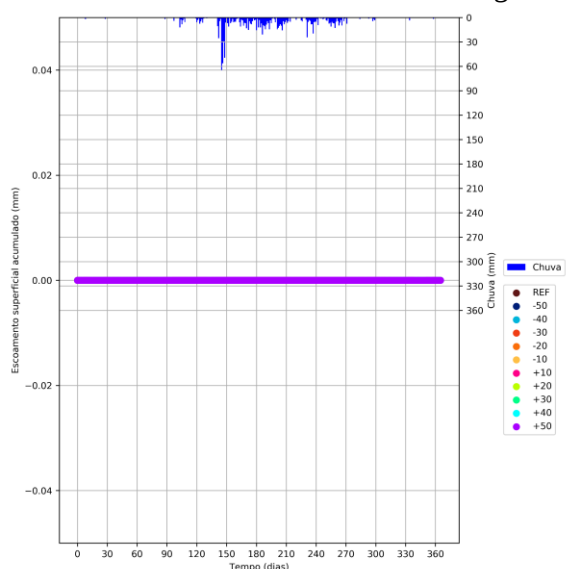


Figura 6. Sensibilidade Escoamento superficial acumulado em função do tempo, quando da variação o parâmetro de forma α na 1ª camada do solo de Caatinga.

Os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6 mostram claramente a ausência de sensibilidade nas variáveis escoamento superficial e escoamento superficial acumulado ao longo do tempo, independentemente da ocorrência ou ausência de precipitações. Durante todo o período de estudo, os

valores dessas variáveis permaneceram nulos, indicando a inexistência de escoamento superficial nas condições analisadas. Esse comportamento reforça a baixa influência dos parâmetros hidrodinâmicos avaliados sobre o escoamento superficial, possivelmente devido às características do solo ou ao regime pluviométrico da região.

Em contraste, a Figura 7 destaca um comportamento com elevada sensibilidade e variações significativas no gráfico, evidenciando a influência do parâmetro α na evapotranspiração acumulada em função do tempo, especialmente na camada mais superficial do solo (0-20 cm). A análise revela que as variações do parâmetro α resultaram em mudanças consideráveis nos valores de evapotranspiração acumulada ao longo do período avaliado, indicando que esse parâmetro desempenha um papel crucial na dinâmica hídrica do solo superficial, especialmente na interface solo-atmosfera.

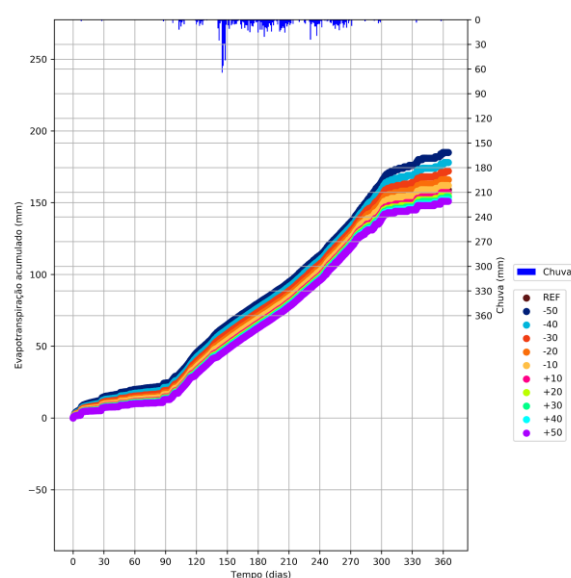


Figura 7. Sensibilidade evapotranspiração acumulada em função do tempo, quando da variação do parâmetro de forma α na 1ª camada do solo do Caatinga.

A Figura 7 apresenta a evapotranspiração acumulada ao longo de 360 dias, juntamente com os registros de precipitação diária, ilustrando a interação entre esses processos hidrológicos em diferentes cenários de variação do parâmetro avaliado. O eixo horizontal superior (X) indica o tempo em dias, enquanto o eixo horizontal inferior também representa o tempo, com detalhes mais granulares. No eixo vertical esquerdo (Y), encontram-se os valores de evapotranspiração acumulada em milímetros (mm), e no eixo vertical direito (Y), são representados os valores diários de precipitação em milímetros (mm). As linhas coloridas no gráfico correspondem aos cenários simulados, variando de -50% a +50% em relação ao cenário de referência (REF), que é destacado na

cor marrom. Essas variações refletem alterações significativas nos padrões hidrológicos, conforme indicado na legenda da figura.

Analisando a Figura 7, observa-se que o aumento do parâmetro em questão ocasiona um incremento na evapotranspiração acumulada, especialmente em períodos de precipitação mais intensa. Esse comportamento torna-se mais evidente a partir do dia 90, quando os eventos pluviométricos atingem valores superiores a 60 mm/dia, gerando um aumento acentuado nas curvas de evapotranspiração acumulada para todos os cenários avaliados. O impacto dos eventos de chuva é progressivo, alcançando o pico por volta do dia 330.

Ao final do período avaliado, após 365 dias, a análise evidencia variações substanciais na evapotranspiração acumulada entre os diferentes cenários. No cenário de +50%, os valores de evapotranspiração acumulada superam o cenário de referência em aproximadamente 50 mm, enquanto no cenário de -50%, os valores são cerca de 50 mm inferiores ao de referência. As demais variações apresentam-se em padrões intermediários, indicando uma relação proporcional entre o parâmetro avaliado e a evapotranspiração acumulada.

Complementando a análise para a região da Caatinga no município de Garanhuns, a Figura 8 destaca a sensibilidade do potencial matricial de percolação — localizado no contorno inferior do perfil do solo — ao longo do tempo. Essa avaliação foca na Camada 1 (0-20 cm) e explora as variações do parâmetro α , evidenciando como mudanças no parâmetro afetam os processos de infiltração e movimentação de água no perfil do solo, especialmente em condições de variação climática e uso do solo.

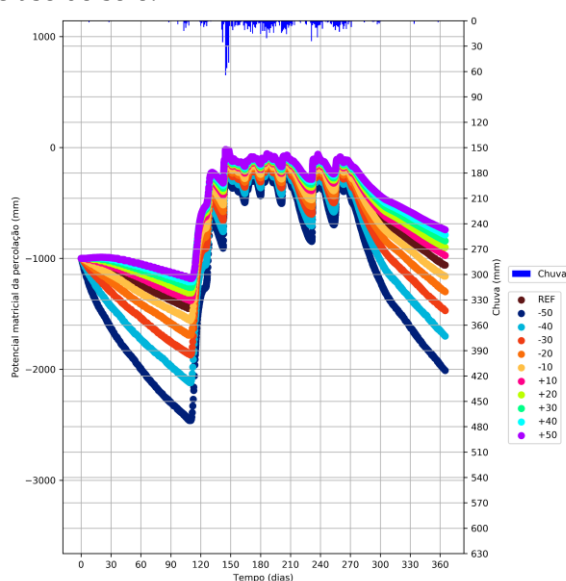


Figura 8. Sensibilidade do potencial matricial do contorno inferior em função do tempo, quando da

variação do parâmetro de forma α na 3ª camada do solo do Caatinga.

Ao avaliar o comportamento do parâmetro α na 3ª camada do solo em área de Caatinga, observa-se uma redução gradual desse parâmetro até aproximadamente o dia 120, período marcado pela ausência de precipitações significativas. A partir desse ponto, com o início das chuvas, ocorre um aumento brusco no potencial matricial, que se aproxima de zero, indicando condições de umidade próximas à saturação. Durante uma precipitação intensa de 60 mm, próxima ao dia 150, o potencial matricial atinge valores próximos a zero, representando saturação hídrica no perfil do solo. Após esse evento, as curvas do potencial matricial passam a apresentar gradientes mais acentuados, evidenciando um processo de secagem acelerada na base do perfil do solo. A partir do dia 300, com a redução quase total das precipitações, os valores de potencial matricial voltam a cair de forma pronunciada.

As variações do parâmetro α influenciam diretamente o comportamento do potencial matricial. Valores positivos de α , com variações de até +50%, resultam em potenciais matriciais mais próximos de zero, indicando maior saturação hídrica na base do perfil do solo. Em contrapartida, variações negativas de até -50% estão associadas a potenciais matriciais mais baixos, próximos à capacidade de campo, acelerando o processo de secagem.

Para a região de pastagem no município de Garanhuns, a Figura 9 ilustra a análise de sensibilidade do volume de armazenamento de água no solo em função do tempo, considerando a Camada 1 (0-20 cm) e a variação do parâmetro de condutividade hidráulica saturada (Ks).

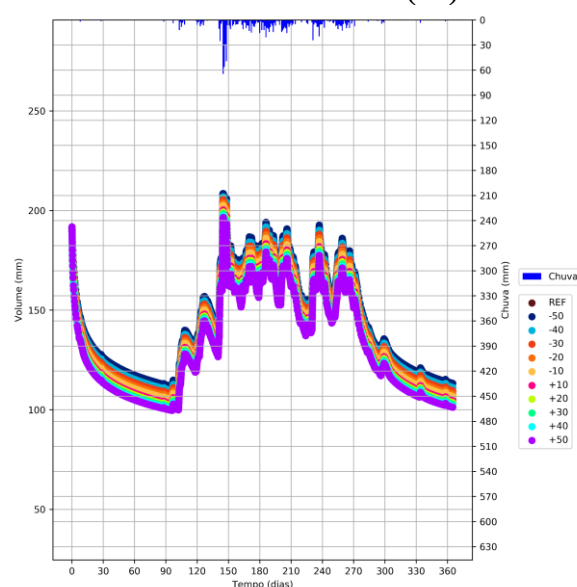


Figura 9. Sensibilidade volume do armazenamento de água em função do tempo, do parâmetro K_s na 1ª camada do solo do Pasto.

Na Figura 9, observa-se que o aumento do parâmetro K_s promove um incremento no volume de água armazenado no solo, com as curvas de armazenamento apresentando um comportamento paralelo ao longo do tempo. Este comportamento é teoricamente esperado, já que a umidade volumétrica de saturação é diretamente proporcional à porosidade aparente do solo. Além disso, o aumento de K_s também influencia positivamente a evapotranspiração real, dado que a maior disponibilidade de água no solo contribui para atender à demanda atmosférica.

Os resultados evidenciam um aumento gradual no volume de armazenamento de água durante os períodos de precipitação. O armazenamento atinge seu valor máximo durante a chuva mais intensa, de 60 mm, próxima ao dia 150. Após esse evento, o gráfico revela variações no volume armazenado conforme a ocorrência de precipitações até o dia 270. A partir desse ponto, com a ausência quase total de chuvas, o volume armazenado no solo diminui de forma consistente, refletindo a redução na disponibilidade hídrica no perfil do solo.

Conclusões

A análise de sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos revelou diferenças marcantes entre as regiões e camadas do solo estudadas. Na camada superficial (0-20 cm), os parâmetros α , θ_s e K_s destacaram-se pela maior sensibilidade, influenciando variáveis como a velocidade de infiltração acumulada (sum.vTop), os potenciais matriciais (hTop, hRoot e hBot) e a evapotranspiração acumulada (sum.evap). Esses resultados evidenciam o impacto direto das condições climáticas e da cobertura do solo sobre a dinâmica hídrica nessa camada. Em contraste, nas camadas mais profundas (20-40 cm e 40-60 cm), a sensibilidade foi significativamente reduzida, indicando que os efeitos diretos da precipitação e da vegetação superficial se dissipam com a profundidade.

Ao comparar as regiões, observou-se que a pastagem apresentou maior sensibilidade nas camadas superficiais, devido à menor cobertura vegetal e à maior exposição do solo, o que favorece o escoamento superficial e a perda de água por evaporação. Por outro lado, a Caatinga demonstrou maior estabilidade hídrica e resiliência, refletindo a adaptação de sua vegetação às condições climáticas adversas do semiárido.

Os gráficos e tabelas apresentados reforçam essas observações, destacando a ausência

de sensibilidade de variáveis como o escoamento superficial (RunOff), o escoamento superficial acumulado (sum.RunOff) e a infiltração acumulada (sum.infil) em determinadas profundidades e regiões. Esse comportamento sublinha a importância de práticas de manejo hídrico focadas nas camadas superficiais do solo, onde os impactos são mais pronunciados, e ressalta a necessidade de conservar a vegetação nativa para garantir a estabilidade do balanço hídrico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela concessão da bolsa de pós-graduação, por meio do Processo Nº IBPG-1083-3.01/21 e ao apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, via PRH 48.1/UFPE (Processos ANP/FINEP Nº48610.201019/2019-38 e FAPESP Nº2024/12259-3 e Nº 2024/12290-8), suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

Referências

- Aires, G. da C., Montenegro, A. A. de A., Carvalho, A. A. de, Monteiro, A. L. N., & Almeida, G. da C. de. (2022). Umidade do solo e estresse hídrico simulado com Hydrus-1D em área com sorgo forrageiro irrigado. *Agrometeoros*, 30(0), Artigo 0. <https://doi.org/10.31062/agrom.v30.e026992>
- Alobaidy, T., & Hassan, H. (2024). Prediction Of Soil Moisture Charactric Curve By Using Van Genuchten Model (1980) And Soilpar2 For Some Soil At Nineveh Governorate. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 52(2), 46.0-57.0. <https://doi.org/10.33899/mja.2024.146131.134018>
- Alves, V. C., Carvalho, B. L., Júnior, J. R. de A., & Frota, P. V. (2024). A Study Of The Average Annual Precipitation And The Reflexes On The Stored Volume And Trophic State Index In The Acaraú Mirim Reservoir In The Municipality Of Massapê, Ceará. *International Journal Semiarid*, 7(7), Artigo 7. <https://doi.org/10.56346/ijsa.v7i7.214>
- Araujo, H. F. P., Canassa, N. F., Machado, C. C. C., & Tabarelli, M. (2023). Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry

- forest region. *Scientific Reports*, 13(1), 18440. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45571-9>
- Barbosa, A. de M., & Cavalcanti, A. R. (2024). Estimativa da evapotranspiração de referência para Presidente Prudente, SP. *Agrometeoros*, 32(0), Artigo 0. <https://doi.org/10.31062/agrom.v32.e027620>
- Barbosa, V. V., Souza, W. M., Galvêncio, J. D., & Costa, V. S. O. (2016). Análise da variabilidade climática do município de Garanhuns, Pernambuco–Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(2), 353–367. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/233698/27275>
- Boujoudar, M., Beljadid, A., & Taik, A. (2023). Localized RBF methods for modeling infiltration using the Kirchhoff-transformed Richards equation. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 152, 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.03.034>
- Castellini, M., Prima, S. D., Giglio, L., Leogrande, R., Alagna, V., Autovino, D., Rinaldi, M., & Iovino, M. (2024). Applying a Comprehensive Model for Single-Ring Infiltration: Assessment of Temporal Changes in Saturated Hydraulic Conductivity and Physical Soil Properties. *Water*, 16(20), Artigo 20. <https://doi.org/10.3390/w16202950>
- Chavanne, X., & Frangi, J.-P. (2024). A Sensor to Monitor Soil Moisture, Salinity, and Temperature Profiles for Wireless Networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(3), Artigo 3. <https://doi.org/10.3390/jsan13030032>
- Choi, Y., & Yoon, S. (2023). Surrogate-assisted high-accuracy observation modeling in building digital twins: In situ nonintrusive modeling without sensor observation (Y). *Building and Environment*, 242, 110584. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110584>
- Costa, E. J. P., Holanda, A. C., Costa, M. P., Câmara, Y. B., & Lopes-Nunes, A. L. da S. (2022). Floristic and Structure of Woody Vegetation in a Caatinga Area Between 2015 and 2019, in ASSÚ/RN. *Floresta e Ambiente*, 29, e20210001. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0001>
- Esiri, A. E., Sofoluwe, O. O., & Ukato, A. (2024). Hydrogeological modeling for safeguarding underground water sources during energy extraction. *Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies*, 7(2), 148–158. <https://doi.org/10.53022/oarjms.2024.7.2.0036>
- Faria, D., Morante-Filho, J. C., Baumgarten, J., Bovendorp, R. S., Cazetta, E., Gaiotto, F. A., Mariano-Neto, E., Mielke, M. S., Pessoa, M. S., Rocha-Santos, L., Santos, A. S., Soares, L. A. S. S., Talora, D. C., Vieira, E. M., & Benchimol, M. (2023). The breakdown of ecosystem functionality driven by deforestation in a global biodiversity hotspot. *Biological Conservation*, 283, 110126. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110126>
- Forcina, A., Petrillo, A., Travagliani, M., di Chiara, S., & De Felice, F. (2023). A comparative life cycle assessment of different spent coffee ground reuse strategies and a sensitivity analysis for verifying the environmental convenience based on the location of sites. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135727>
- França, J. M. B. de, Capelo Neto, J., Lima Neto, I. E., Paulino, W. D., & Souza Filho, F. de A. de. (2021). *Simulação da compartimentação em reservatório no semiárido brasileiro uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta de gestão*. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69324>
- Ganem, K. A., Dutra, A. C., Oliveira, M. T. de, Freitas, R. M. de, Grecchi, R. C., Vieira, R. M. da S. P., Arai, E., Silva, F. B., Sampaio, C. B. V., Duarte, V., & Shimabukuro, Y. E. (2020). Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra – Oportunidades e Desafios. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72, 829–854. <https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56543>
- Garg, A., Xing, X., & Bordoloi, S. (2022). Water retention models for soils mixed with waste residues: Application of the modified van-Genuchten and Brooks-Corey models. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(11), 5059–5066. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00957-x>
- Gomes, M. N., do Lago, C. A. F., Rápalo, L. M.

- C., Oliveira, P. T. S., Giacomoni, M. H., & Mendiando, E. M. (2023). HydroPol2D — Distributed hydrodynamic and water quality model: Challenges and opportunities in poorly-gauged catchments. *Journal of Hydrology*, 625, 129982.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129982>
- Jardim, A. M. da R. F., Morais, J. E. F. de, Souza, L. S. B. de, Lopes, D. de C., Silva, M. V. da, Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, Silva, J. L. B. da, Steidle Neto, A. J., Morellato, L. P. C., de Lima, J. L. M. P., & Silva, T. G. F. da. (2023). A systematic review of energy and mass fluxes, and biogeochemical processes in seasonally dry tropical forests and cactus ecosystems. *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 104330.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104330>
- Krueger, E. S., Levi, M. R., Achieng, K. O., Bolten, J. D., Carlson, J. D., Coops, N. C., Holden, Z. A., Magi, B. I., Rigden, A. J., & Ochsner, T. E. (2022). Using soil moisture information to better understand and predict wildfire danger: A review of recent developments and outstanding questions. *International Journal of Wildland Fire*, 32(2), 111–132.
<https://doi.org/10.1071/WF22056>
- Lazarovitch, N., Kisekka, I., Oker, T. E., Brunetti, G., Wöhling, T., Xianyue, L., Yong, L., Skaggs, T. H., Furman, A., Sasidharan, S., Rajj-Hoffman, I., & Šimůnek, J. (2023). Chapter Two—Modeling of irrigation and related processes with HYDRUS. Em D. L. Sparks (Org.), *Advances in Agronomy* (Vol. 181, p. 79–181). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.05.002>
- Medeiros, R., Andrade, J., Ramos, D., Moura, M., Pérez-Marin, A. M., dos Santos, C. A. C., da Silva, B. B., & Cunha, J. (2022). Remote Sensing Phenology of the Brazilian Caatinga and Its Environmental Drivers. *Remote Sensing*, 14(11), Artigo 11. <https://doi.org/10.3390/rs14112637>
- Morais, L. F., Cavalcante, A. C. R., Furtado, R. N., Gorayeb, A., Aquino, D. D. N., Nogueira, F. H. M., & Cândido, M. J. D. (2023). Spatial and Temporal analysis (2008-2017) of droughts and their effects on livestock in the Brazilian semi-arid region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 95, e20220890.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765202320220890>
- Oliveira, C. L. de, Lima, J. R. de S., Souza, R. M. S., Antonino, A. C. D., Alves, M. F. de A. T., Silva, V. P. da, Lopes, M. H. L., Souza, E. S. de, & Ferreira, R. C. (2023). A Caatinga Emite ou Sequestra Carbono? *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(2), Artigo 2.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p791-804>
- Oliveira, M. L., dos Santos, C. A. C., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, B. B., Cunha, J. E. de B. L., Ruhoff, A., & Santos, C. A. G. (2022). Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 835, 155490.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>
- Paiva, I. M. M., Andrade, L. P. de, & Andrade, H. M. L. da S. (2022). Percepção dos frequentadores dos parques urbanos de Garanhuns – PE durante a pandemia COVID-19. *Research, Society and Development*, 11(14), Artigo 14.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36187>
- Ramos, T. B., Liu, M., Paredes, P., Shi, H., Feng, Z., Lei, H., & Pereira, L. S. (2023). Salts dynamics in maize irrigation in the Hetao plateau using static water table lysimeters and HYDRUS-1D with focus on the autumn leaching irrigation. *Agricultural Water Management*, 283, 108306.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108306>
- Rasheed, M. W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Khan, M. U., Imran Khan, M., Nawaz, S., Shamshiri, R. R., Aziz, M., & Sultan, M. (2022). Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 14(18), Artigo 18.
<https://doi.org/10.3390/su141811538>
- Refati, D. C., Silva, J. L. B. da, Macedo, R. S., Lima, R. da C. C., Silva, M. V. da, Pandorfi, H., Silva, P. C., & Oliveira-Júnior, J. F. de. (2023). Influence of drought and anthropogenic pressures on land use and land cover change in the Brazilian semiarid region. *Journal of South American Earth Sciences*, 126,

104362.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104362>
- Rezvani, S. M., Falcão, M. J., Komljenovic, D., & de Almeida, N. M. (2023). A Systematic Literature Review on Urban Resilience Enabled with Asset and Disaster Risk Management Approaches and GIS-Based Decision Support Tools. *Applied Sciences*, 13(4), Artigo 4.
<https://doi.org/10.3390/app13042223>
- Santos, C. A. C., Mariano, D. A., das Chagas A. do Nascimento, F., da C. Dantas, F. R., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, L. L., da Silva, B. B., Bezerra, B. G., Safa, B., de S. Medeiros, S., & Neale, C. M. U. (2020). Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101982.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101982>
- Santos, M. P., Amazonas, I. B. do, & Goldfarb, M. C. (2023). Análise Da Evolução Da Qualidade Ambiental No Município De Garanhuns/Pe: Uma Aplicação De Indicadores De Salubridade Ambiental. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218*, 4(4), Artigo 4.
<https://doi.org/10.47820/recima21.v4i4.3028>
- Santos, R. B., Santos, B. S., Souza, R. T. de A., Ricarte, T. L., & Júnior, J. J. F. C. (2022). Estimativas da evapotranspiração de referência por equações empíricas para o município de Nossa Senhora da Glória – SE. *Revista de Geociências do Nordeste*, 8(2), Artigo 2.
<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID30338>
- Scarciglia, F., Nicolaci, A., Del Bianco, S., Pelle, T., Soligo, M., Tuccimei, P., Marzaioli, F., Passariello, I., & Iovino, F. (2020). Reforestation and soil recovery in a Mediterranean mountain environment: Insights into historical geomorphic and vegetation dynamics in the Sila Massif, Calabria, southern Italy. *CATENA*, 194, 104707.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104707>
- Sheng, W., Wu, Y., Chang, C.-Y., González-Teruel, J. D., Jones, S. B., & Meng, F. (2024). Sampling volume evaluation of seven electromagnetic soil moisture sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 358, 110240.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110240>
- Silva, M. E. R. da, Santos Neto, S. M. dos, Peronico, R. L., Alcântara, L. R. P. de, Costa, I. R. de A., Antonino, A. C. D., & Coutinho, A. P. (2024). Sobol method for sensitivity analysis of the hydrus model in the simulation of water infiltration in alluvial deposit in the brazilian semiarid. *RBRH*, 29, e34.
<https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230108>
- Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Pillon, C. N., & Reichert, J. M. (2024). Mechanical Resistance to Penetration for Improved Diagnosis of Soil Compaction at Grazing and Forest Sites. *Forests*, 15(8), Artigo 8.
<https://doi.org/10.3390/f15081369>
- Thao, T., Culumber, C. M., Poret-Peterson, A. T., Zuber, C. A., Holtz, B. A., & Gao, S. (2024). Evaluating the seasonal effects of whole orchard recycling on water movement and nitrogen retention for a newly established almond orchard: Simulation using HYDRUS-1D. *Agricultural Water Management*, 299, 108882.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108882>
- Voulanas, D., Hatzigiannakis, E., & Arampatzis, G. (2022). HYDRUS-1D modelling of soil water regime in a rational irrigation pilot application (Nigrita, Greece). *Desalination and Water Treatment*, 264, 307–317.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28584>
- Zhang, S., Bai, X., Zhao, C., Tan, Q., Luo, G., Cao, Y., Deng, Y., Li, Q., Li, C., Wu, L., Wang, J., Chen, F., Xi, H., Ran, C., & Liu, M. (2022). Limitations of soil moisture and formation rate on vegetation growth in karst areas. *Science of The Total Environment*, 810, 151209.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151209>