



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Variação Sazonal e Interanual da Umidade do Solo e da Evapotranspiração em Caatinga

Rilbson Henrique Silva dos Santos¹, José Romualdo de Sousa Lima², Cássio Lopes de Oliveira³, Rodolfo Marcondes Silva Souza⁴, Antônio Celso Dantas Antonino⁵, Eduardo Soares de Souza⁶

¹ Mestre em Produção Agrícola, Doutorando em Agronomia (Produção Vegetal), Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, BR-104, km 85, s/n, CEP 57100-000, Rio Largo, Alagoas. (82) 3214-1317. rilbsonagro@gmail.com (autor para correspondência).

² Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Associado IV, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. romualdo.lima@ufape.edu.br.

³ Mestre em Produção Agrícola, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. cassio.agronomo@yahoo.com.

⁴ Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Titular, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, CEP 50740-540, Recife, Pernambuco. (81) 2126-7973. rsouza@lavabit.com.

⁵ Dr. em Física do Solo, Professor Titular, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, CEP 50740-540, Recife, Pernambuco. (81) 2126-7973. acda@ufpe.br.

⁶ Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Associado IV, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3026. eduardo.souza.rd@gmail.com.

Artigo recebido em 27/03/2023 e aceito em 24/04/2023

RESUMO

Na Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, a umidade do solo é a principal variável que influencia todos os processos ecohidrológicos, e devido a elevada variabilidade temporal da precipitação pluvial, é necessário que a determinação da umidade do solo e dos componentes do balanço hídrico seja realizada em experimentos de longa duração. Contudo, até o momento, há poucas pesquisas que determinaram esses fatores no longo prazo. Assim, objetivou-se investigar a variação sazonal e interanual da umidade do solo, evapotranspiração, e demais componentes do balanço hídrico numa área de Caatinga preservada, durante um período de tempo de sete anos. O experimento foi desenvolvido no município de São João, PE, durante o período de 01 de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2020. A umidade do solo foi medida com sensores automáticos, tipo TDR, instalados nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. A ET foi obtida como termo residual da equação do balanço hídrico. No decorrer dos sete anos de experimento, a precipitação pluvial foi de 5.287 mm ao longo dos anos. A umidade do solo apresentou variação sazonal, com os menores valores no período de setembro a fevereiro e os maiores nos meses de março a agosto. O fluxo de água no solo se apresentou em sua maioria com valores negativos, indicando perda de água por meio do processo de drenagem. A ET acompanhou o volume de precipitação pluvial, com uma média anual de 739 mm. O uso de água pela Caatinga foi em média de 2,02 mm d⁻¹.

Palavras-chave: Balanço hídrico; Semiárido; Precipitação pluvial; Armazenamento.

Seasonal and Interannual Variation of Soil Moisture and Evapotranspiration in Caatinga

ABSTRACT

In the Caatinga, an exclusively Brazilian biome, soil moisture is the main variable that influences all ecohydrological processes, and due to the high temporal variability of rainfall, it is necessary that the determination of soil moisture and water balance components be performed in long-term experiments. However, until this moment, there is little research that has determined these factors in the long term. Thus, the objective was to investigate the seasonal and inter-annual variation of soil moisture, evapotranspiration, and other components of the water balance in an area of preserved Caatinga, over a period of seven years. The experiment was developed in the municipality of São João, PE, during the period from January 1, 2014 to December 31, 2020. Soil moisture was measured with automatic sensors, TDR type, installed at depths of 10, 20, 30, 40 and 50 cm. ET was obtained as a residual term of the water balance equation. During the seven years of the experiment, rainfall was 5,287 mm over the years. Soil moisture showed seasonal variation, with the lowest values from September to February and the highest from March to August. The water flow in the soil presented mostly negative values, indicating water loss through the drainage process. ET followed the rainfall volume, with an annual average of 739 mm. Water use by the Caatinga averaged 2.02 mm d⁻¹.

Key words: Water balance; Semiarid; Rainfall; Storage.

Introdução

As áreas áridas e semiáridas do mundo são caracterizadas pela baixa precipitação e alta evapotranspiração potencial, resultando em pouca disponibilidade de água no solo, sendo uma limitação para o crescimento e produtividade das plantas (Kurc e Small, 2007; Nicholson, 2011; García et al., 2013; Jardim et al., 2021).

O bioma Caatinga é encontrado exclusivamente no Brasil, o qual fica localizado na região Semiárida, ocupando uma área de cerca de 750.000 km², sendo caracterizado por uma vegetação decídua (Araújo Filho et al., 2017). Nesse bioma, as variáveis meteorológicas apresentam extrema variabilidade temporal e espacial, com as chuvas apresentando valores anuais de 400-800 mm, temperaturas altas e elevada evapotranspiração potencial, causando déficit hídrico na maior parte do ano (Dombroski et al., 2011; Menezes et al., 2012; Mutti et al., 2019).

As mudanças climáticas, bem como as mudanças no uso da terra, têm um grande potencial de afetar os processos ecohidrológicos das regiões semiáridas do mundo (Andrade et al., 2021; Oliveira et al., 2021; Balist et al., 2022; Intriago et al., 2023; Lima et al., 2023; Wang et al., 2023), sendo que a região Semiárida brasileira é considerada uma área bastante vulnerável e, portanto, exposta aos riscos das mudanças climáticas de forma mais intensa (Marengo, 2008; Jardim et al., 2022), devido às projeções indicarem uma diminuição das chuvas e aumento dos eventos de seca. Assim sendo, faz-se necessário pesquisas que quantifiquem os componentes envolvidos nos processos hidrológicos da região, tendo em vista que há uma escassez de estudos aprofundados sobre variáveis presentes nos referidos processos em longo período de tempo.

A umidade do solo é um fator de extrema importância para se avaliar o desenvolvimento de diversas espécies vegetais que ocorrem na Caatinga, principalmente por se tratar de um bioma totalmente dependente de água, sendo bastante variável no espaço e no tempo; devido a influência em diversos processos estáticos e dinâmicos no solo, além da interferência das mudanças sazonais no regime de chuvas (Melo e Montenegro, 2015).

Na literatura já existem trabalhos que quantificaram a umidade e alguns dos componentes do balanço hídrico em áreas de Caatinga (Menezes et al., 2013; Melo e Montenegro, 2015; Montenegro et al., 2019; Brito et al., 2020; Queiroz

et al., 2020), contudo, até o momento, não há trabalhos que avaliaram essas variáveis em longos períodos.

Esses trabalhos analisaram dados de umidade volumétrica do solo e o balanço hídrico em curto período (2 a 3 anos) em área de Caatinga. Um período maior de análise contribuirá para a compreensão dos processos hidrológicos, essenciais para investigar o papel dos distintos processos de conservação dos recursos hídricos nos ambientes semiáridos. Nesses ambientes, os processos hidrológicos são mais complexos, requerendo medições contínuas de forma a representar eventos climatológicos não frequentes (Monte-Mor et al., 2012).

Uma análise detalhada dos eventos atmosféricos no bioma Caatinga, em longo período, ainda não foi desenvolvida, e torna-se necessário para a compreensão dos controles ambientais e biofísicos. Recentemente, estudos observacionais na Caatinga têm sido desenvolvidos para melhorar o entendimento da relação solo-planta-atmosfera nesse bioma (Marques et al., 2020).

Com pesquisas de longo prazo, pressupõe-se que haja uma grande variabilidade dos componentes referentes ao balanço hídrico e variáveis meteorológicas. Assim, esse trabalho baseia-se na hipótese de que os dados de longa duração forneçam informações acerca das necessidades hídricas essenciais para sobrevivência e manutenção de plantas do bioma Caatinga.

Com base no exposto, objetivou-se com esse trabalho avaliar a variabilidade sazonal e interanual da umidade do solo e dos componentes do balanço hídrico numa área de Caatinga preservada, na região Agreste de Pernambuco, durante um período de 07 anos.

Material e métodos

O experimento foi desenvolvido com dados coletados no período de 01 de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2020, em uma área de Caatinga que encontra-se relativamente preservada estando mais de 50 anos sem desmatamentos e/ou queimadas, localizada na fazenda Riacho do Papagaio, no município de São João-PE (8° 48' 34,9'' S, 36° 24' 20,77'' O) (Figura 1), com altitude

de 705 m, na microrregião do Agreste Meridional, bacia hidrográfica do Rio Mundaú. As médias anuais de temperatura e umidade relativa do ar são, respectivamente, 21,1 °C e 82,5%. A precipitação pluvial é de 772 mm anuais (APAC, 2019), sendo

os meses mais chuvosos de maio a agosto. O solo da área é classificado como Neossolo Regolítico eutrófico típico (Santos et al., 2012), apresentando classificação textural variando de areia franca a franco-arenosa (Tabela 1).

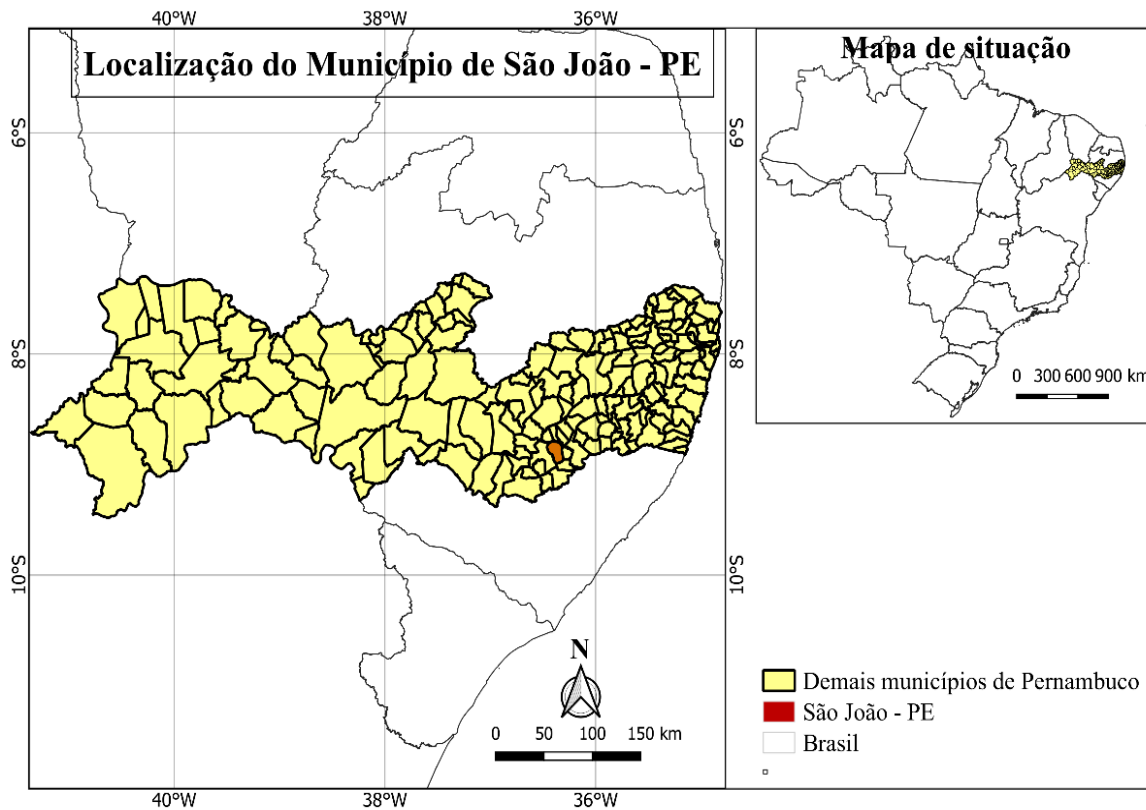


Figura 1. Localização do município de São João – PE.

Tabela 1. Granulometria da área experimental da Caatinga em São João, PE.

Profundidade (cm)	Granulometria (%)			Classificação textural
	Areia	Silte	Argila	
0-20	86,5	13,2	2,3	Areia franca
20-40	80,0	14,1	5,9	Areia franca
40-60	77,1	15,4	7,5	Franco-arenosa

Fonte: Adaptada de BRITO et al. (2020)

A região é caracterizada por duas estações: uma estação chuvosa, que ocorre de março a agosto, e outra seca, que ocorre de setembro a fevereiro.

A umidade volumétrica do solo foi medida com sensores tipo TDR (Time Domain Reflectometry) (modelo CS 616, Campbell Scientific), que foram instalados horizontalmente nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. Os dados desses sensores foram lidos a cada minuto e armazenados a cada 30 minutos em uma central de aquisição de dados (CR1000, Campbell Scientific).

Todos os dados coletados ao longo dos anos (2014 a 2020) foram tabulados no programa Excel, para se obter comparações de todas as variáveis propostas ao longo do tempo através de gráficos e tabela.

A evapotranspiração (ET) da Caatinga foi obtida pela metodologia do balanço hídrico no solo (equação 1), de acordo com BRITO et al. (2020):

$$\Delta A = P + I \pm Q - R - ET \quad (1)$$

Sendo ΔA a variação do armazenamento de água no solo; P a precipitação; I a irrigação, que é nula, pois o trabalho foi realizado em área de sequeiro; Q o fluxo total de drenagem ($-Q$) ou ascensão capilar ($+Q$); R o escoamento superficial, que foi considerado nulo, uma vez que a área apresentava topografia plana e o solo uma alta taxa de infiltração (SILVA et al., 2014). Todos os termos da equação (1) foram expressos em mm. Desse modo, levando-se em consideração as nulidades, a ET foi obtida da equação (2):

$$\Delta A = P \pm Q - ET \quad (2)$$

A precipitação pluvial foi medida por meio de um pluviômetro instalado numa torre micrometeorológica, localizada no centro da área de Caatinga.

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra do trapézio, considerando-se que as medidas de umidade do solo foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$).

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔA) foi determinada pela diferença dos valores do armazenamento de água do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela equação 3:

$$\Delta A = [\theta_{(f)} - \theta_{(i)}]L = A_f - A_i \quad (3)$$

Sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

O fluxo total de água (Q), ou seja, as perdas por drenagem ($-Q$) ou os ganhos por ascensão capilar ($+Q$), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume de solo estudado, respectivamente, foram determinados a partir da equação 4 (Silva et al., 2014):

$$Q = \int_0^t q dt = q \Delta t \quad (4)$$

Sendo q (mm d^{-1}), a densidade de fluxo de água no limite inferior do volume de solo, delimitado pela zona radicular e Δt o intervalo de tempo de estudo do balanço hídrico (no nosso caso, mensal).

As densidades de fluxo (q) foram estimadas com base na equação de Darcy-Buckingham (equação 5):

$$q = -K(\theta) \nabla \phi_t \quad (5)$$

Sendo $K(\theta)$ a condutividade hidráulica não saturada e $\nabla \phi_t$ o gradiente de potencial total. Esses termos foram obtidos por meio de ensaios de infiltração, realizados em campo, e do ajuste da curva de retenção proposta por Van Genuchten (1980), obtida em laboratório, de acordo com Silva et al. (2014) e Brito et al. (2020), os quais realizaram essas medidas na mesma área experimental. Essas mesmas amostras foram usadas para a determinação da porosidade total (PT) e da densidade do solo (DS).

Além da ET da Caatinga, também foi quantificada a evapotranspiração de referência (ET0), de acordo com o modelo de Penman-Montheith FAO (Allen et al., 1998) (equação 6):

$$ET0 = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (6)$$

Sendo Rn o saldo da radiação solar na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T a temperatura do ar a 2 metros de altura ($^{\circ}\text{C}$), U_2 a velocidade do vento a altura de 2 metros (m s^{-1}), e_s a pressão de saturação de vapor (kPa), e_a é a pressão real de vapor do ar (kPa), Δ a declividade da curva da pressão de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ a constante psicométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), que é de 0,067.

O Δ , a_s e e_a , foram obtidas através das equações 7, 8 e 9, respectivamente:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 273,3)^2} \quad (7)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27T}{T + 273,3}\right)} \quad (8)$$

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (9)$$

Sendo UR, a umidade relativa do ar (%).

Para a medição das variáveis meteorológicas, no centro da área foi instalada uma torre meteorológica equipada com sensores para medidas de velocidade do vento (014A, Met One, Campbell Scientific), umidade relativa e temperatura do ar (HMP45C, Vaisala), precipitação pluvial (TB4, Hydrological Services), e saldo de radiação (CNR1 Lite, Kipp & Zonen). No solo, foi instalada uma placa de fluxo de calor (HFT1, Campbell Scientific) para a medição do fluxo de calor (G). Os dados desses sensores foram lidos a cada minuto e seus valores médios e totais a cada 30 minutos foram armazenados em uma central de aquisição de dados (CR1000, Campbell Scientific).

Resultados e discussão

Na Figura 2 estão representados a variabilidade mensal da precipitação pluvial ocorrida ao longo do período estudado. É possível notar que o período mais chuvoso é composto dos

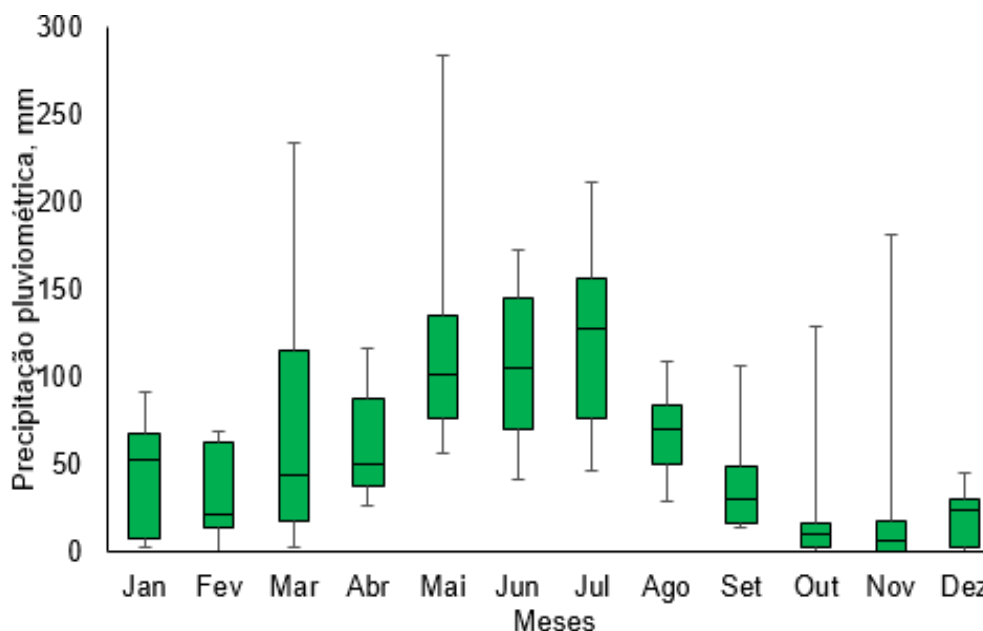


Figura 2. Variabilidade mensal da precipitação pluvial na área de Caatinga em São João, PE.

Jardin et al. (2021) determinaram as similaridades espaço-temporal entre algumas variáveis climáticas em alguns municípios do estado de Pernambuco no Brasil, entre os anos de 1993 a 2018 e relataram que a precipitação pluvial variou de 500 a 800 mm ano⁻¹ na cidade de Triunfo - AL que também está localizada em uma região semiárida. O resultado foi similar ao presente

Para identificar associações entre os valores de chuva, ET e a umidade do solo nas diferentes camadas do solo (10, 20, 30, 40 e 50 cm) foi realizada a análise multivariada (PCA). Além disso, para determinar o grau de relação entre a ET e a ET0, foi aplicada a correlação de Pearson, cuja estimativa é obtida através da equação 10:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{N}}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}\right]\left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N}\right]}} \quad (10)$$

Sendo r o coeficiente de correlação, x os valores associados a ET (mm mês⁻¹), y valores associados a ET0 (mm mês⁻¹) e N o número de observações.

meses de março a agosto, com valor máximo ocorrido no mês de maio (284 mm), enquanto o período mais seco corresponde aos meses de outubro a dezembro. O mês de novembro foi o que apresentou menores índices pluviométricos, sendo que nos anos de 2015, 2016 e 2018 não foi registrado precipitação nesse mês.

trabalho, o qual teve uma precipitação pluvial de 755 mm ano⁻¹ na área estudada.

A região é influenciada pela zona de convergência intertropical (ITCZ), a qual varia latitudinalmente, e no período de fevereiro a maio, quando a posição é mais ao sul, contribui para eventos de chuva mais intensos (Utida et al., 2019).

A variação mensal, sazonal e anual da umidade relativa do ar (UR), da temperatura do ar (T) e do saldo de radiação (Rn) durante todo o período do estudo é mostrada na Figura 3. Observa-se uma elevada variabilidade nesses fatores, sendo que a T e o Rn apresentam comportamentos similares, ou seja, no período úmido (março à agosto) os valores são menores e no período seco (setembro à abril), maiores. Outros autores também destacaram essa sazonalidade (Oliveira et al., 2006; Teixeira et al., 2008; Souza et al., 2015;

Borges et al., 2016). A UR tem comportamento inverso, pois no período úmido apresenta maiores valores, devido às menores temperatura, maior nebulosidade e chuvas, enquanto no período seco, característico de maior radiação e temperatura e menor chuva, esses valores foram menores.

Marques et al. (2020) avaliaram a variabilidade sazonal da evapotranspiração entre os anos de 2014 e 2015 e também reportaram uma proporcionalidade entre temperatura e saldo de radiação.

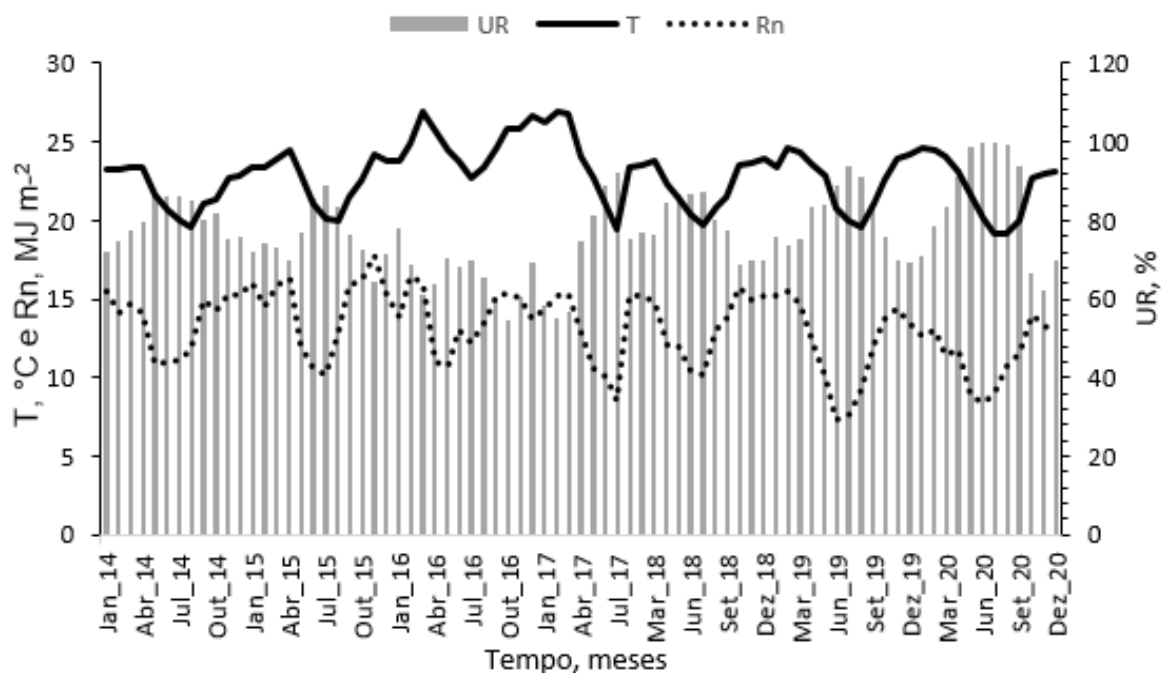


Figura 3. Variabilidade mensal da umidade relativa (UR), temperatura (T) do ar e saldo de radiação (Rn) na área de Caatinga em São João - PE, durante o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2020.

Na Tabela 2 estão representados a densidade do solo (DS), porosidade total (PT), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e os parâmetros da equação de van Guenuchten (1980), utilizados no ajuste dos dados da curva de retenção do solo. Nota-se que houve bom ajuste dos parâmetros da equação, estando todas as

profundidades com R^2 de 0,98 ou 0,99, desse modo, é possível fazer uma boa estimativa do potencial matricial da água no solo, por meio dos dados de umidade do solo.

A densidade do solo variou de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ nas diferentes profundidades do Neossolo Regolítico.

Tabela 2. Densidade do solo (DS), porosidade total (PT), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e parâmetros de ajustes (λ , ζ , n e m) da curva de retenção (equação de van Genuchten) sob diferentes usos e profundidades da área experimental da Caatinga em São João, PE.

Camada (cm)	Ds (g cm ⁻³)	PT (cm ³ cm ⁻³)	CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)	AD (cm ³ cm ⁻³)
0-10	1,32	0,501	0,124	0,051	0,073
10-20	1,44	0,457	0,119	0,038	0,081
20-30	1,43	0,462	0,126	0,044	0,082
30-40	1,38	0,479	0,142	0,042	0,100
40-50	1,42	0,463	0,125	0,052	0,073
Camada (cm)	λ (cm ³ cm ⁻³)	ζ (cm ⁻¹)	n	m	
0-10	0,428 (R ² = 0,99)	9,055 (R ² = 0,99)	2,181 (R ² = 0,99)	0,083 (R ² = 0,99)	
10-20	0,380 (R ² = 0,98)	1,475 (R ² = 0,98)	2,231 (R ² = 0,98)	0,104 (R ² = 0,98)	
20-30	0,392 (R ² = 0,99)	2,231 (R ² = 0,99)	2,209 (R ² = 0,99)	0,095 (R ² = 0,99)	
30-40	0,444 (R ² = 0,99)	1,032 (R ² = 0,99)	2,244 (R ² = 0,99)	0,109 (R ² = 0,99)	
40-50	0,317 (R ² = 0,99)	1,810 (R ² = 0,99)	2,178 (R ² = 0,99)	0,082 (R ² = 0,99)	

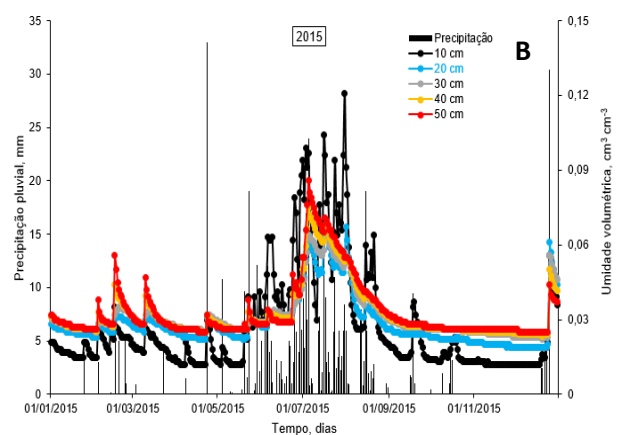
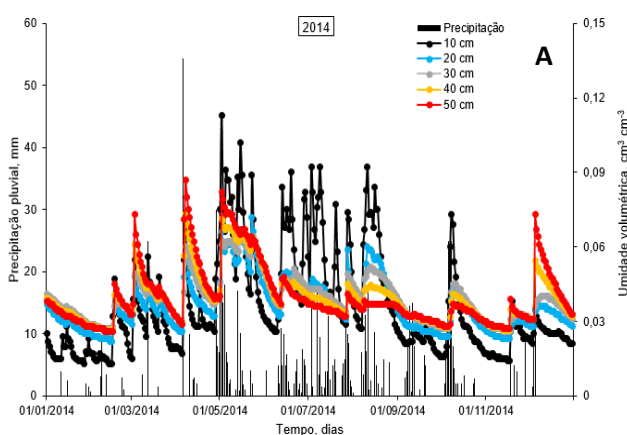
Fonte: Adaptada de BRITO et al. (2020)

A capacidade de campo variou de 0,119 cm³ cm⁻³ e 0,142 cm³ cm⁻³, enquanto o ponto de murcha variou de 0,038 cm³ cm⁻³ a 0,052 cm³ cm⁻³, ao longo de todo o perfil.

Na Figura 4, é possível notar a distribuição da precipitação pluvial e a umidade volumétrica do solo diariamente nas diferentes camadas do solo (0-50 cm), nos anos de 2014 a 2020. Na Figura 4A, encontram-se os dados referentes ao ano de 2014 e verifica-se que os maiores valores de umidade do solo são encontrados entre os meses de março à agosto, tendo seu maior valor no dia 02 de maio

(0,113 cm³ cm⁻³) na camada de 10 cm, estando próximo a capacidade de campo (Tabela 2).

Daí; Wang (2021), estudando os eventos da precipitação pluvial no conteúdo de umidade do solo, concluíram que o conteúdo de água no solo na superfície (0-10 cm) foi mais alto no final do dia do evento das chuvas, o conteúdo de umidade do solo nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm foi maior no dia após o fim do evento das chuvas e que a umidade do solo nas camadas de 30-40 cm e 40-50 cm foi mais alto 3 dias após o fim do evento das chuvas.



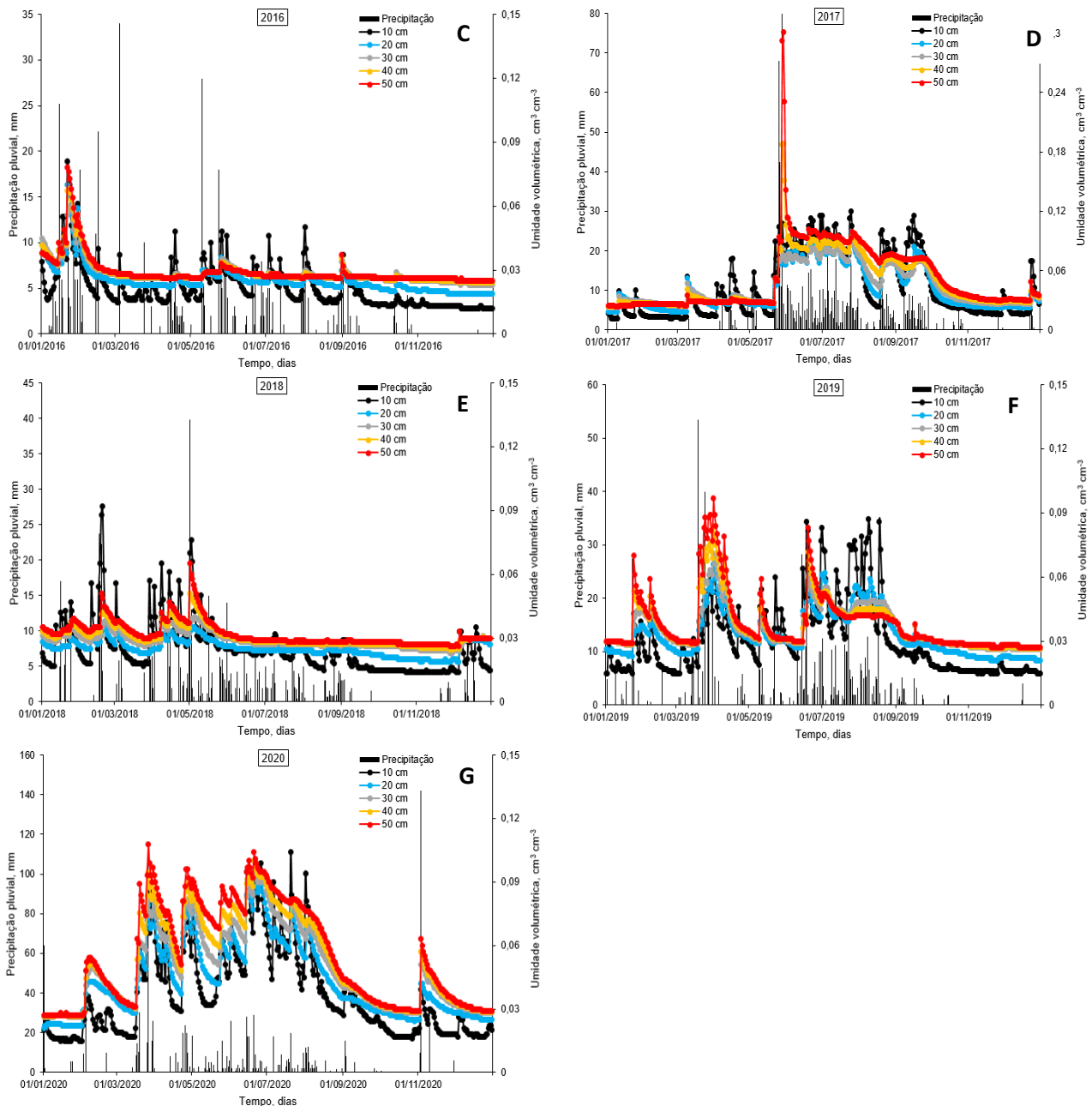


Figura 4. Variação diária da precipitação pluviométrica e da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, durante os anos de 2014 a 2020, em São João – PE.

No ano de 2015, os maiores valores de umidade do solo ficaram concentrados entre junho e agosto, tendo após esse período valores baixos até final de dezembro, onde após uma precipitação pluviométrica de 30,4 mm no dia 25 de dezembro, voltou a ter altos valores de umidade do solo em todas as camadas (Figura 4B). Já os anos de 2016 (Figura 4C) e 2018 (Figura 4E), apresentaram-se como anos mais secos e os maiores valores diários médios foram encontrados na profundidade de 50 cm, que está menos sujeita a perda de água do solo por meio da evaporação.

Os anos de 2017, 2019 e 2020 (Figura 4D, 4F e 4G, respectivamente) foram bastante chuvosos, e consequentemente, foram os que apresentaram maiores valores de umidade volumétrica do solo, nota-se também que quanto maior a profundidade, maior o valor de umidade. A água nessa região é um fator limitante e é ecologicamente mais importante, devido ao seu papel no crescimento e desenvolvimento de diversas espécies vegetativas da Caatinga. Estudos têm evidenciado que a ocorrência de chuvas intensas resulta em uma diminuição na quantidade

de água interceptada pelas copas das árvores em relação ao volume total de precipitação, o que pode potencialmente aumentar a entrada da umidade no solo (Lian et al., 2022). Por outro lado, chuvas de baixa intensidade são interceptadas pelas copas das árvores ou atingem apenas as camadas superficiais do solo, promovendo a evaporação das superfícies foliares e do solo

A umidade do solo é um fator chave no sistema solo-planta-atmosfera, é também um dos principais componentes do ciclo da água e um fator ambiental que é altamente sensível às mudanças climáticas (Bemdtsson; Chen, 1994; Feng, 1999; Li et al., 2013).

No entanto, a resposta da umidade do solo aos eventos pluviais é um processo bastante complicado, que não é apenas afetado pela magnitude, intensidade e distribuição dos eventos pluviais, mas também está intimamente relacionado com o conteúdo básico de umidade do solo, seca meteorológica, textura do solo, status de vegetação, e assim por diante (Dai; Wang, 2021).

A Figura 5 apresenta a variação sazonal (meses seco e úmido) e interanual no perfil de umidade do solo, no período estudado (2014-2020). Para essas avaliações usou-se o mês mais seco e mais úmido de cada ano, bem como a comparação com a média de todo o período estudado. Em 2014 e 2015, verificou-se que a maior variação na umidade do solo ocorreu na primeira camada do solo (Figura 5A e Figura 5B).

Queiroz (2020) estudando a variação espaço-temporal de umidade do solo em função das mudanças de uso da terra em região semiárida também verificaram uma maior variação sazonal na umidade do solo perto da superfície do solo. Esses resultados mostram o quanto a alta variabilidade nos índices de precipitação pluvial (Figura 2) e a alta quantidade de areia do perfil do solo (Tabela 1) influenciam na umidade do solo, o que irá influenciar no armazenamento de água no solo e, provavelmente, nas perdas de água por drenagem ou por evapotranspiração.

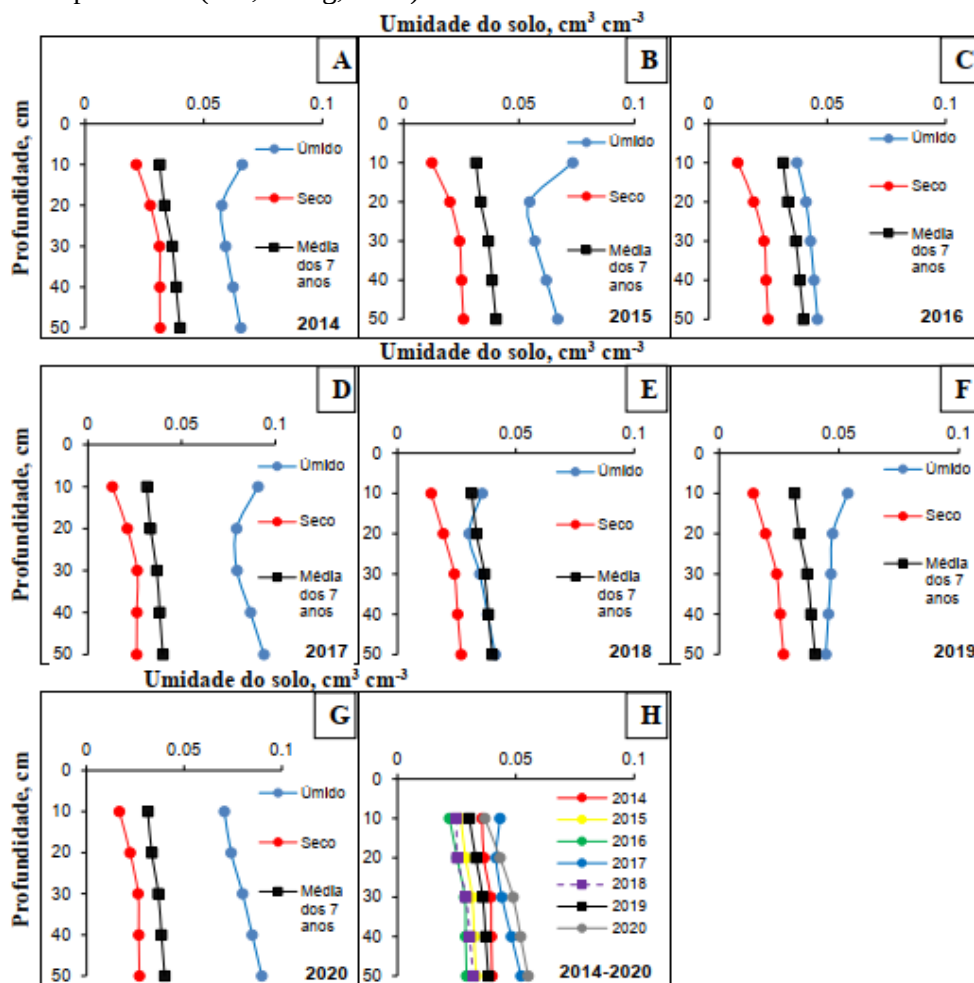


Figura 5. Variação sazonal e interanual do perfil de umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, durante o período de 2014 a 2020.

Os anos de 2017 e 2020, foram caracterizados como anos úmidos, com altos valores de umidade em todas as profundidades. Em 2017, o mês mais úmido (julho) foi superior cerca de 58,13% a média de todos os anos e 73,26% em relação ao mês mais seco (fevereiro) (Figura 5D), e em 2020, verifica-se que o mês mais seco (janeiro) foi inferior 70% quando comparado com a umidade do solo do mês mais úmido deste ano (junho) (Figura 5G).

Esses resultados demonstram que a variabilidade sazonal das condições climáticas (em especial a precipitação pluvial) influenciam na mudança temporal na umidade do solo, como observado em outros biomas por diversos autores (Heathman et al., 2012; Wang et al., 2013; Biudes et al., 2015; Wang et al., 2015; Huang et al., 2016).

Comparando-se as médias interanuais da umidade volumétrica do solo, verifica-se uma grande variabilidade (Figura 5H), sendo que os anos de 2016 e 2018 foram os mais secos com valores muito próximos. Os anos de 2014, 2015 e 2019 apresentaram valores de umidade do solo intermediários entre os anos mais secos e mais úmidos. Avaliando-se os anos mais úmidos (2017 e 2020), verifica-se, com exceção da primeira camada do solo, que o ano de 2017 apresentou $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de umidade e 2020 apenas $0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de umidade, nas demais camadas o ano de 2020 foi superior.

Em todos os anos verificou-se que independente do mês, as camadas mais profundas pouco variaram e apresentam um padrão sazonal estável. Valores mais estáveis nas camadas mais profundas podem ser explicadas pelo aumento no conteúdo de argila em profundidade (Tabela 1), aumentando a retenção de água, bem como pela menor influência das variáveis climáticas, como radiação solar e temperatura, as quais afetam as camadas mais superficiais do solo. Silva et al., (2014) com estudo também em Neossolo Regolítico mas em área de pastagem, obtiveram conclusões semelhantes, explicando que as oscilações de umidade volumétrica do solo nas camadas mais superficiais é responsável pelo sistema radicular da pastagem e da atuação conjunta dos componentes atmosféricos, bem como a efetividade da recarga hídrica nessas camadas.

Algumas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de correlacionar a umidade do solo com os eventos de chuva, e assim poder determinar quantidades de precipitação efetiva, ou seja, a quantidade de chuva precipitada capaz de aumentar a umidade do solo em superfície. De acordo com Chen et al. (2016), 1,5 mm de precipitação pode aumentar a umidade do solo em superfície em Nei Mongol, China. Outros autores acreditam que uma precipitação maior do que 3 mm nas terras semiáridas do interior da Mongólia é a precipitação efetiva (Hao, 2006; Miao, 2008).

No entanto, a resposta da umidade do solo para os eventos de chuva é um processo muito complicado que não é apenas afetado pela magnitude, intensidade e o tempo de distribuição dos eventos de chuva mas também está intimamente relacionados ao conteúdo básico de água no solo, estiagem meteorológicas, textura do solo, status de vegetação, entre outros (Haiyan; Haimei, 2021).

O fluxo de água no solo (Q) e a precipitação pluvial são apresentadas na Figura 6. Observa-se que nos períodos que ocorreram maiores precipitações, maior foi o volume de água perdido por drenagem (-Q). O maior valor de drenagem ocorreu em março de 2019, com -46,73 mm. Durante todo o período analisado, foram poucas as vezes que ocorreram ascensão capilar (+Q), com o maior valor ocorrendo no mês de abril de 2020 (84,8 mm). O fluxo de água no solo varia em volume, velocidade, direção e profundidade, em função de fatores como topografia, condições prévias de umidade, condições atmosféricas (temperatura, umidade, radiação, vento), cobertura vegetal e sistema radicular (Chen et al., 2007; Nogueira et al., 2013). A umidade do solo pode influenciar o fluxo em várias direções, o que vai depender de vários fatores, principalmente o fator ligado a topografia do terreno. O local de estudo apresenta-se com topografia com baixa declividade, o que favorece com que o fluxo ocorra verticalmente.

O entendimento dos fluxos de água no bioma Caatinga, torna-se importante pelo fato de compreender os processos ecohidrológicos que estão ocorrendo, para assim poder tomar medidas que mantenha a preservação, e visem melhorar o aproveitamento de água pelas espécies do local

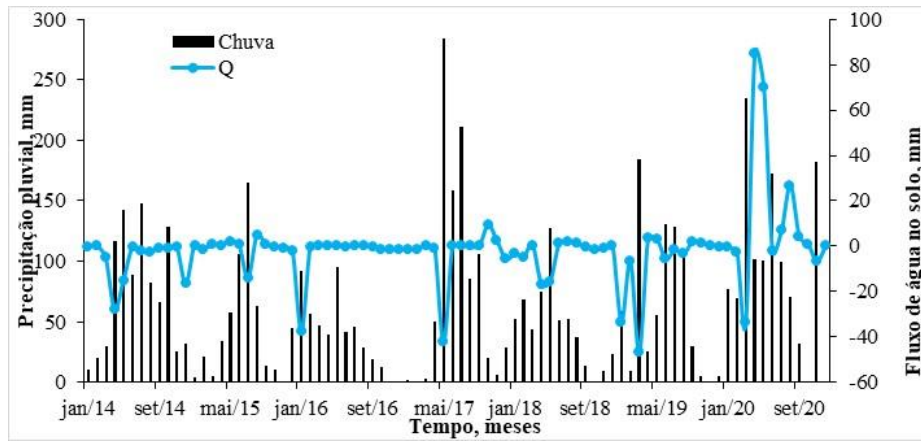


Figura 6. Variação mensal da precipitação pluvial e do fluxo de água no solo (Q), em área de Caatinga, no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2020, em São João – PE.

A variação mensal do armazenamento de água no solo (0-50 cm) e da precipitação pluvial está descrita na Figura 7. Observa-se que o menor valor de armazenamento de água no solo (10,4 mm) ocorreu em dezembro de 2016, período esse

que se apresentou também com baixa precipitação pluvial. Por outro lado, em julho de 2017, que foi o mês mais chuvoso, verificou-se o maior valor associado ao armazenamento de água no solo (44,1 mm).

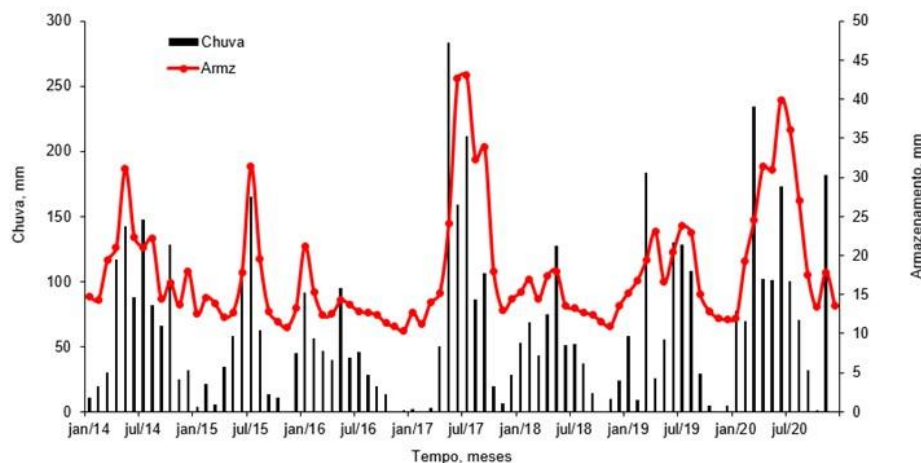


Figura 7. Variação mensal da precipitação pluvial e armazenamento da água no solo (0-50 cm), em área de Caatinga, no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2020, em São João – PE.

O armazenamento de água no solo varia em função da quantidade de água que entra no perfil e dos fatores que contribuem para que esta permaneça armazenada (Gonzalez; Alves, 2005). No geral, observa-se que nesse ambiente de Caatinga o regime hídrico se apresenta como fator limitante para o desenvolvimento desse ecossistema e que o baixo valor do armazenamento de água no solo está ligado ao tipo de solo, por apresentar baixo teor de matéria orgânica e por consequência, baixa capacidade de retenção hídrica.

A variação do armazenamento de água no solo (ΔA) corresponde ao saldo de entrada e saída de água no volume de solo, durante um determinado período de tempo. Desse modo, observa-se que o ΔA seguiu as variações de precipitação pluvial ao longo dos anos (Figura 8).

Durante o período, o maior saldo de variação ocorreu em maio de 2017 com 32,3 mm, e o menor em abril de 2019 com valor de -23,9 mm. O saldo geral na variação do armazenamento nos anos de 2014 a 2020 foi negativo, com déficit de 25,1 mm. Esses resultados mostram equivalência

entre menor e maior variação do armazenamento em comparação com a precipitação pluvial. Com isso, percebe-se que nesse ambiente, as espécies

presentes passam por períodos em que sofrem estresse hídrico e limitam seu desenvolvimento.

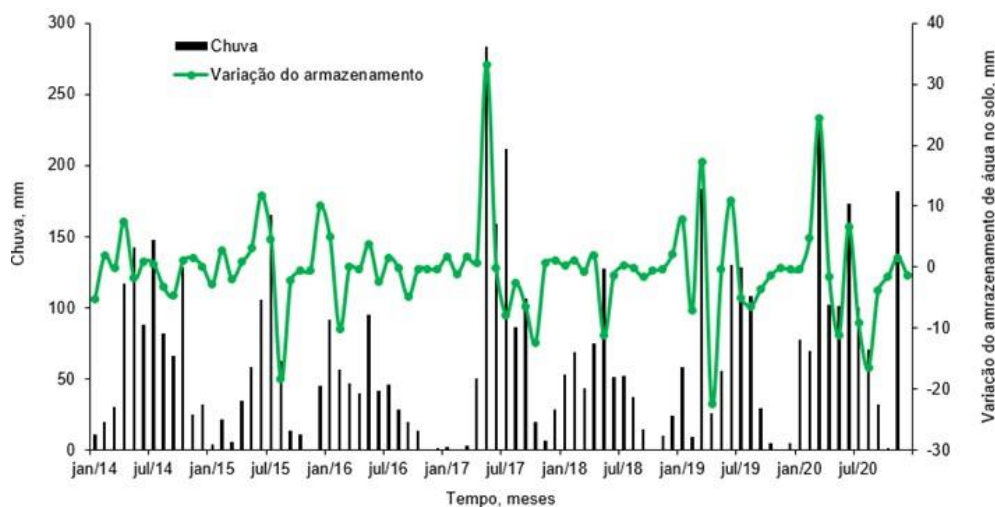


Figura 8. Variação mensal da precipitação pluvial e variação de armazenamento de água no solo (0-50 cm), em área de Caatinga, no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2020, em São João – PE.

Com base na Figura 9, nota-se que a precipitação pluvial e a ET na Caatinga tiveram comportamentos semelhantes, ou seja, as respostas entre essas variáveis ocorreram de forma linear. Durante todo o experimento, os valores de precipitação pluvial e de ET foram de 5287,0 mm e 5173,04 mm, respectivamente, com distribuição

variada ao longo do tempo. A maior evapotranspiração ocorreu no ano de 2020 que apresentou uma média de 3,55 mm d⁻¹, 65,63 % maior em comparação com o ano de 2016 que apresentou menor ET, com valor médio de 1,22 mmd⁻¹.

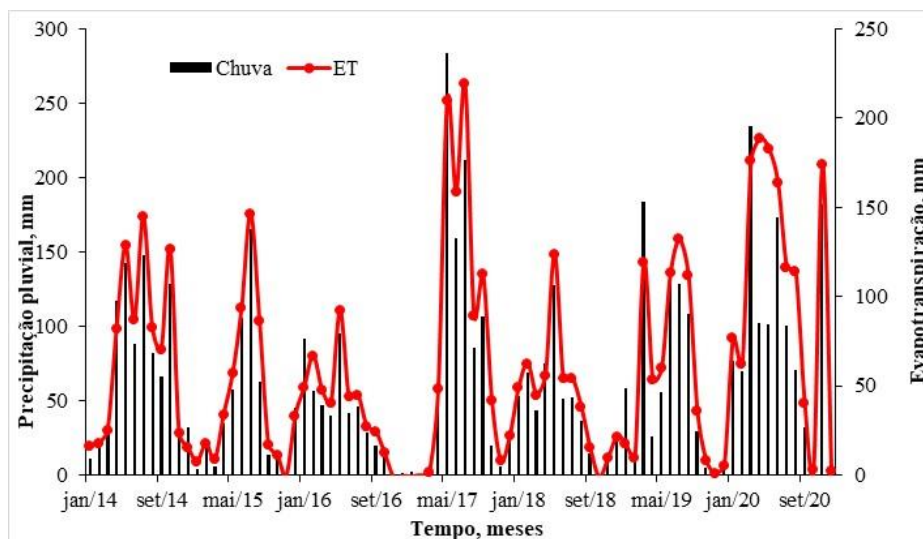


Figura 9. Variação mensal da precipitação pluvial e evapotranspiração, em área de Caatinga, no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2020, em São João – PE.

A estação úmida que corresponde aos meses de março a agosto, obteve coerentemente

maiores valores tanto de precipitação pluvial quanto de ET, quando comparados com a estação

seca que corresponde aos meses de setembro a fevereiro, nos anos de 2014 a 2020. Durante esse período, o ano de 2016 foi o mais seco, com poucas chuvas (479,8 mm), esse resultado refletiu diretamente numa menor ET, uma vez que tinha menos água disponível no sistema. Devido à escassez ou a alta variabilidade dos recursos hídricos na região semiárida do município de São João-PE, é indispensável o entendimento acerca das condições edafoclimáticas, para um melhor aproveitamento da água com manejos para diminuição das taxas evaporativas.

Em regiões áridas e semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é fator limitante da produção agrícola e, em situações menos favoráveis, chega mesmo a pôr em risco a sobrevivência de populações inteiras, o

conhecimento da distribuição espacial e temporal da transferência de vapor d'água para a atmosfera facilita bastante o estabelecimento de políticas visando ao uso racional da água (Silva, 2006).

Conforme apresentado na equação de regressão da Figura 10, quando foi avaliado o grau de interação entre chuva e ET, verificou-se que o R^2 foi de 0,93, ou seja, a equação de regressão explica 93% da variação encontrada nos dados observados. O comportamento entre ambas as variáveis aconteceu de forma linear, onde, à medida que aumenta a disponibilidade hídrica, a ET também aumenta. Com base nesse resultado, pode-se afirmar que nessa região de Caatinga, a ET pode ser estimada mensalmente somente utilizando os dados de chuva.

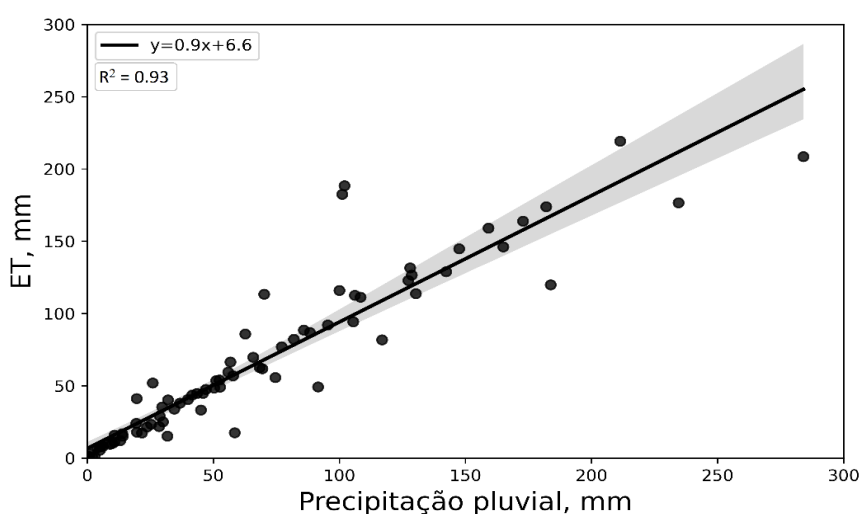


Figura 10. Relação entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração no período de 84 meses de avaliação em área de Caatinga em São João – PE.

No bioma Caatinga há elevada taxa de evapotranspiração potencial, a entrada de água acontece exclusivamente com as precipitações pluviais que se apresenta com distribuição muito irregular no tempo e no espaço (Sousa, 2006). Estudos anteriores evidenciaram que o equilíbrio hídrico dos ecossistemas é influenciado de forma significativa pela disponibilidade de água, sendo fortemente regulado pela quantidade de precipitação pluvial, especialmente em áreas caracterizadas por um clima seco (Scott et al., 2021; Mu et al., 2022). A quantidade de água evaporada depende de vários fatores, como a temperatura, pressão atmosférica, taxa de radiação solar, umidade relativa do ar e a transpiração que ocorre nas plantas, onde absorve água pelas

raízes e elimina para a atmosfera através dos estômatos.

Analisando-se o armazenamento de água no solo ao longo dos anos, verificou-se grande variação sazonal com os maiores valores advindo dos meses de março à agosto, coincidindo com a estação úmida (Tabela 3). O maior valor médio de armazenamento ocorreu no mês de julho com 25,92 mm. Os menores valores de armazenamento ocorreram na estação seca, nos meses de outubro à fevereiro, sendo que o menor valor médio foi de 12,76 mm, no mês de novembro. A umidade do solo é um parâmetro hidrológico chave, pois tem relações próximas com a infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e reposição de águas subterrâneas (Zhao et al., 2020).

Tabela 3. Armazenamento (Armz), variação do armazenamento de água no solo (ΔA), precipitação, fluxo de água no solo (Q) e evapotranspiração (ET), nas estações úmida e seca de 2014 a 2020 em área de Caatinga no município de São João – PE.

Mês	Estação	Armz	ΔA	Precipitação	Q	ET
Jan	Seca	18,81	0,90	42,37	-10,75	30,72
Fev	Seca	15,51	-1,12	35,00	-2,48	33,64
Mar	Úmida	16,86	5,80	78,17	-11,86	60,51
Abr	Úmida	18,95	-1,94	63,46	6,16	71,55
Mai	Úmida	21,13	2,26	123,40	0,47	121,61
Jun	Úmida	24,35	3,79	106,96	-0,99	102,18
Jul	Úmida	25,92	-2,16	121,47	-1,29	122,35
Ago	Úmida	21,32	-6,79	67,80	3,78	78,38
Set	Seca	16,95	-3,96	40,14	0,77	44,87
Out	Seca	13,61	-2,28	25,39	1,00	28,67
Nov	Seca	12,76	0,34	31,90	-1,02	30,53
Dez	Seca	13,57	1,58	19,23	-3,65	14,00
Média		17,98	-0,30	62,94	-1,65	61,58

Investigando-se a variação sazonal ocorrida no armazenamento de água no solo (Tabela 3), que compreende as entradas e saídas de água, verifica-se que os valores se apresentaram de forma bastante variável ao longo dos meses. O maior valor (5,80 mm) ocorreu no mês de março, mostrando que entre os anos de 2014 a 2020, neste mês, as entradas de água foram maiores que as saídas, sendo superior aos outros meses. Nesse mesmo período, o mês que teve o menor valor foi o mês de agosto (-6,79 mm), nele as entradas de água foram inferiores as saídas.

Entender a variação da umidade do solo é de interesse global, tendo em vista a variabilidade referente às mudanças climáticas (Gumindoga et al., 2020). A distribuição espacial e temporal da umidade do solo tem enormes implicações no planejamento hidrológico, agrícola, econômico e social em desenvolvimento (Vicent et al., 2004; Western et al., 2002).

Coerentemente, os valores médios de chuva seguiram as variações de acordo com a estação, e em média, os meses mais chuvosos foram maio e julho com precipitações pluviais de 123,40 e 121,47 mm, respectivamente. O mês de dezembro foi o mais seco no período avaliado com valor médio de 19,23 mm. A região semiárida tem como característica a variabilidade nas precipitações e uma forte sazonalidade. O Semiárido brasileiro é caracterizado por uma série de peculiaridades, tais como: variabilidade das precipitações, alto potencial evapotranspirativo, concentração do período chuvoso em três a quatro meses, curtos períodos de precipitação e alta

intensidade, sendo comum, em um único mês, o total precipitado ser superior a 70% da média da região (Andrade et al., 2016).

Os resultados mostraram que na maioria dos meses, independente da sazonalidade, o fluxo de água no solo foi descendente, ou seja, ocorreu drenagem, tendo ascensão capilar ocorrendo nos meses de abril, maio, agosto, setembro e outubro.

A evapotranspiração apresentou sazonalidade característica, as estações úmidas apresentaram os maiores valores, estando em destaque os meses de maio e julho (121,61 e 122,35 mm, respectivamente), valores esses que foram acompanhados das maiores precipitações pluviais (Tabela 3). Com isso, nota-se que quanto maior a precipitação pluvial, maior é a taxa evapotranspirativa na região. O mês de dezembro, apresentou uma menor precipitação e evapotranspiração (14 mm), e quase toda água que precipitou foi evapotranspirada.

Foram observados os períodos de tempo na redistribuição de água no solo na área estudada, tanto em mês úmido quanto em mês seco, a fim de averiguar se há diferença na velocidade da água redistribuída no perfil do solo. Ao avaliar um período úmido, notou-se que a água drenada durou 60 minutos para sair da camada de 10 cm e chegar na camada de 50 cm. Esse parâmetro foi verificado após uma precipitação pluvial de 28 mm, ocorrida em maio de 2020, sendo este um dos meses com maior valor de umidade.

Ao analisar um período seco, verificou-se que a água drenada durou cerca de 30 minutos apenas, para sair da camada de 10 cm para 50 cm,

este período ocorreu em agosto de 2016 após uma precipitação de 7 mm, sendo um dos meses com menores valores referentes a umidade do solo. como a diferença de potencial total da água no solo entre a camada de 10 cm que está úmida e a de 50 cm que está seca é grande, ou seja, elevado gradiente de potencial total, fazendo com que a drenagem ou a redistribuição de água no perfil do solo, no sentido descendente, seja mais rápida em comparação com o período úmido. Além disso, a quantidade de precipitação pluviométrica necessária para a água se deslocar até a profundidade de 50 cm foi 4 vezes maior no período úmido, que no período seco.

Esse resultado nos mostra que, como um solo úmido conta com bastante água presente nos poros do solo, ao entrar mais água no sistema a velocidade ocorre de forma reduzida. Já em um solo seco, quando entra água no sistema, ela rapidamente percorre o perfil ocupando os pequenos espaços porosos, antes ocupado maioritariamente por ar.

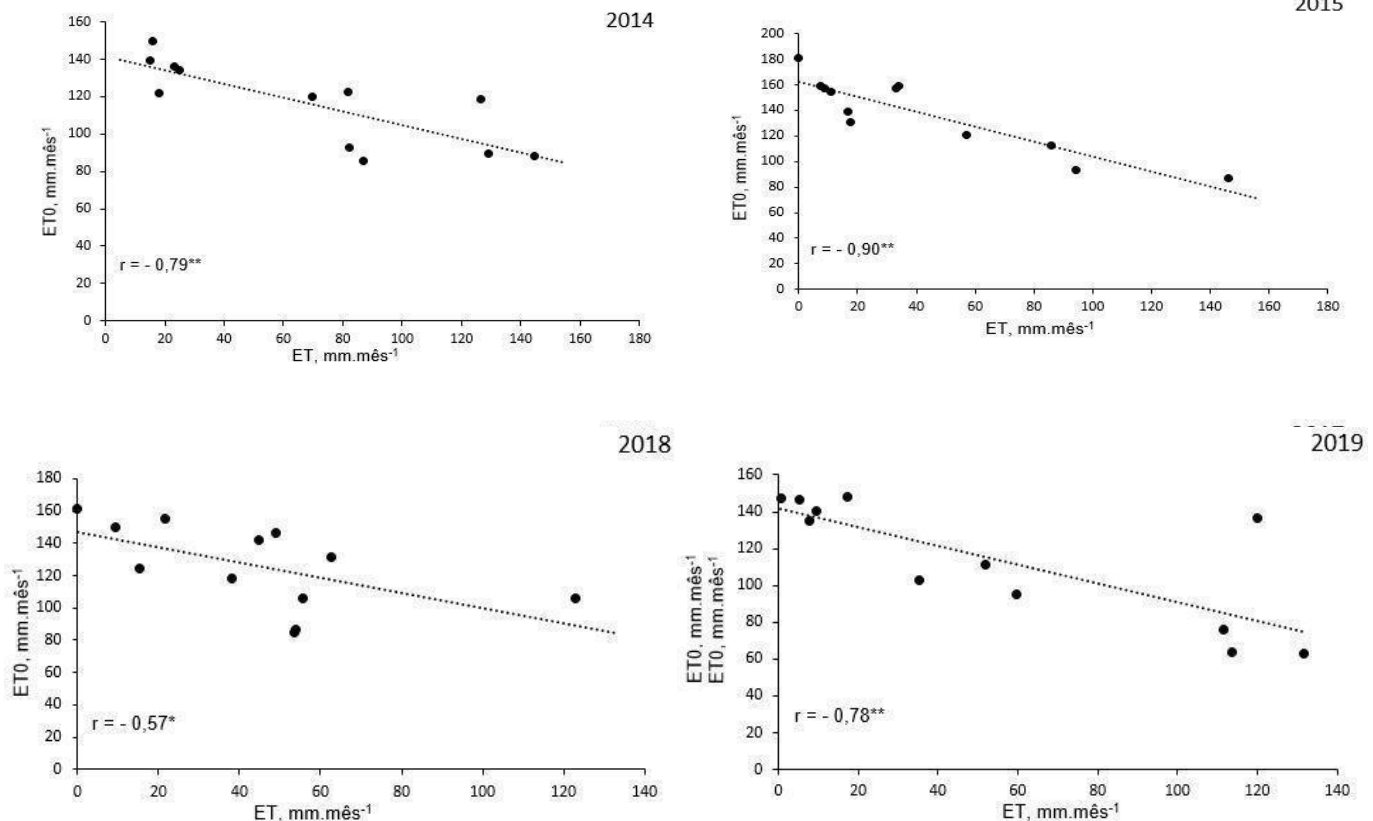
A ET₀ foi comparada com a ET mensalmente entre os anos de 2014 à 2020 (Figura 11). Essa comparação mostrou uma boa correlação entre as duas variáveis nos anos de 2014, 2015, 2017 e 2019 com coeficientes de correlação de -0,79; -0,90; -0,93 e -0,78, respectivamente com

significância no nível de 1% de probabilidade, pelo teste t. Os anos de 2016 e 2018 também apresentaram boa correlação (-0,63 e -0,57, respectivamente) ($P < 0,05$).

Já no ano de 2020, os dados foram mais dispersos e a correlação entre a ET e ET₀ foi baixa (-0,52), e o coeficiente de correlação não apresentou significância pelo teste t.

De maneira geral, os dados entre ambas as variáveis foram inversamente proporcionais, quanto maior a evapotranspiração de referência, menor é a evapotranspiração. Essa grande variabilidade pode ser explicada pela diferença no total de precipitação pluvial ao longo dos meses, com os meses mais secos, maior será a ET₀ e menos precipitação ocorre, logo, não tem água para evapotranspirar.

Para a evapotranspiração de referência, são considerados os fatores climatológicos, com isso, quando apresenta valores altos, significa dizer que a radiação solar está maior, a temperatura está mais alta e a umidade relativa do ar baixa. Do contrário, na estação úmida que tem um volume de chuva maior, tem uma menor incidência de radiação solar, provocada pelo maior acúmulo de nuvens, temperaturas mais baixas, umidade relativa menor, consequentemente menor valor associado a evapotranspiração de referência.



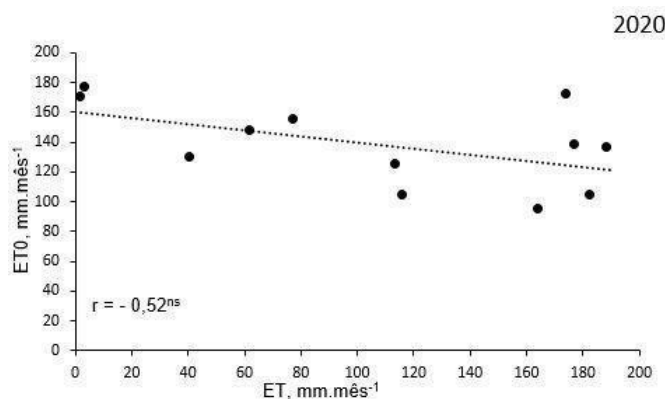


Figura 11. Correlação entre a evapotranspiração de referência (ET0) e evapotranspiração real (ET) nos meses referentes aos anos de 2014 a 2020 em área de Caatinga em São João – PE.

Conclusões

A umidade do solo na camada de 0-50 cm no Neossolo Regolítico teve uma média anual, entre os anos de 2014 e 2020, na estação seca de $0,029 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, na estação úmida de $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tendo como mínimo o ano de 2016 com $0,026 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e máximo no ano de 2020 com $0,047 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

O maior volume de água drenada (-46,73 mm) ocorreu em março de 2019 e o maior volume de água que ocorreu ascensão capilar (84,8 mm) ocorreu em abril de 2020, enquanto o saldo de variação do armazenamento de água no solo durante o período foi de -25,1 mm.

A precipitação pluvial foi em média 755 mm ano^{-1} entre 2014 e 2020, enquanto o uso de água (evapotranspiração) pela Caatinga foi em média de 739 mm ano^{-1} e de $2,0 \text{ mm d}^{-1}$.

A evapotranspiração de referência (ET0), no período de 2014 a 2020, apresentou média de $4,35 \text{ mm d}^{-1}$, com o ano de 2016 apresentando uma maior demanda atmosférica, com $5,13 \text{ mm d}^{-1}$, e o ano de 2019 com uma menor demanda atmosférica, de $3,74 \text{ mm d}^{-1}$.

A ET e ET0 apresentaram correlações negativas, ou seja, nos períodos de maior demanda atmosférica, o uso de água pela Caatinga foi menor, e vice-versa.

A precipitação pluvial, a umidade volumétrica, e consequentemente, o uso de água pela Caatinga (ET) apresentaram elevada variabilidade sazonal e interanual, indicando que estudos de longo prazo (como esta pesquisa) são necessários para melhor entendimentos dos processos hidrológicos que ocorrem em áreas de Caatinga.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Observatório Nacional da Dinâmica da Água e de Carbono no Bioma Caatinga (INCT-ONDACBC). Os autores também agradecem ao proprietário da fazenda Riacho do Papagaio (Prof. Antônio de Pádua Montenegro), pela cessão da área experimental.

Referências

- 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. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Andrade, C.W.L., Montenegro, S.M.G.L., Montenegro, A.A.A., Lima, J.R.S., Srinivasan, R., Jones, C.A., 2021. Climate change impact assessment on water resources under scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology* [Online] 41, E1045-E1061. <https://doi.org/10.1002/joc.6751>
- Andrade, E.M., Sena, M.G.T., Silva, A.G.R., Pereira, F.J.S., Lopes, F. B., 2016. Uncertainties of the rainfall regime in a tropical semi-arid region: the case of the State of Ceará. *Revista Agroambiente* [Online] 10, 88-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/19828470ragro.v10i2.3500>.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2019. Monitoramento pluviométrico. Disponível:

- <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso: 05 jul. 2019.
- Araújo Filho, R., Freire, M.B., Wilcox, B., West, J., Freire, F., Marques, F., 2017. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. *Forest Ecology and Management* 407, 210-220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002>.
- Balist, J., Malekmohammadi, B., Jafari, H.R., Nohegar, A., Genelett, D., 2022. Detecting land use and climate impacts on water yield ecosystem service in arid and semi-arid areas. A study in Sirvan River Basin-Iran. *Applied Water Science* 12, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01545-8>.
- Bemdtsson, R., Chen, H., 1994. Variability of soil water content along a transect in a desert area. *Journal of Arid Environments* 27, 127-139. <https://doi.org/10.1006/jare.1994.1053>.
- Biudes, M.S., Vourlitis, G.L., Machado, N.G., Arruda, P.H.Z., Neves, G.A.R., Lobo, F.A., Neale, C.M.U., Nogueira, J. S., 2015. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. *Agric. For. Meteorol.* 202, 112-124, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.008>.
- Borges, C.K., Santos, C.A.C., Silva, L.L., Carneiro, R.G., Andrade, A.M.D., 2016. Variação sazonal dos fluxos de energia em áreas de caatinga preservada e degradada no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 1313-1321. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160089>.
- Brito, T.C., Lima, J.R.S., Oliveira, C.L., Souza, R.M.S., Antonino, A.C.D., Medeiros, E.V., Souza, E.S., Alves, E.M., 2020. Mudanças no uso da terra e efeito nos componentes do balanço hídrico no agreste pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 870-886. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p870-886>.
- Chen, M.L., Zhang, B.W., Ren, T.T., Wang S., Chen, S., 2016. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslands in Nei Mongol, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 40, 658-668. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2015.0155>.
- Chen, L., Huang, Z.; Gong, J., Fu, B., Huang, Y., 2007. The effect of landcover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena* 70, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.007>.
- Dai, H., Wang, H., 2021. Influence of rainfall events on soil moisture in a typical steppe of Xilingol. *Physics and Chemistry of the Earth* 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102964>.
- Dombroski, J.L.D., Praxedes, S.C., Freitas, R.M.O., Pontes, F.M., 2011. Water relations of Caatinga trees in the dry season. *South African Journal of Botany* 77, 430-434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.11.001>.
- Feng, Q., Cheng, G., 1999. Moisture distribution and movement in sandy lands of China. *Acta Pedologica Sinica* 36, 225-236. <https://doi.org/10.11766/trxb199707220210>.
- García, M., Sandholt, I., Ceccato, P., Ridler, M.; Mougin, E., Kergoat, L., Morillas, L., Timouk, F., Fensholt, R., Domingo, F., 2013. Actual evapotranspiration in drylands derived from in-situ and satellite data: assessing biophysical constraints. *Rem. Sens. Environ* 131, 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.016>.
- Gonzalez, A.P., Alves, M.C., 2005. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha. *Rev. bras. eng. agríc. Ambiente* 9, 45-50. DOI: <https://doi.org/10.1590/S141543662005000100007>.
- Gumindoga, W., Murwira, A., Rwasoka, D.T., Jahure, F.B., Chikwiramakomo, L., 2020. The spatio-temporal soil moisture variation along the major tributaries of Zambezi River in the Mbire District, Zimbabwe. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 32, 100753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100753>.
- Haiyan, D.A.I., Haimei, W.A.N.G., 2021. Influence of rainfall events on soil moisture in a typical steppe of Xilingol. *Physics and Chemistry of the Earth* 121, 102964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102964>.
- Hao, Y.B., 2006. Characteristics of Net Ecosystem Exchange of Carbon Dioxide and Their Driving Factors over a Fenced Leymus Chinensis Steppe in Inner Mongolia. PhD dissertation, Institute of Botany [J]. Chinese Academy of Sciences, Beijing, 115-117.
- Heathman, G.C., Cosh, M.H, Han, E., Jackson, T.J., Mckee, L., Mcafee, S., 2012. Field scale spatio temporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks. *Geoderma* 170, 195-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.004>.

- Huang, X., Shi, Z.H.; Zhu, H.D., Zhang, H.Y., Ai, L., Yin, W., 2016. Soil moisture dynamics within soil profiles and associated environmental controls. *Catena* 136, 189–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.014>.
- Intriago, A., Galvao, P., Conicelli, B., 2023. Use of GIS and R to estimate climate change impacts on groundwater recharge in Portoviejo River watershed, Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 124, 104288. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104288>.
- Jardim, A.M.R.F., Silva, M.V., Silva, A.R., Santos, A., Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J.F., Lima, J.L.M.P., Souza, L.S.B., Júnior, G.N.A., Lopes, P.M.O., Moura, G.B.A., Silva, T.G.F., 2021. Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics* 223, 105733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105733>.
- Jardim, A.M.R.F., Araújo Júnior, G.N., Silva, M.V., Santos, A., Silva, J.L.B., Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J.F., Teixeira, A.H.C., Teodoro, P.E., de Lima, J.L.M.P., Silva Junior, C.A., Souza, L.S.B., Silva, E.A., Silva, T.G.F., 2022. Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the caatinga biome of northeast Brazilian. *Remote Sensing* 14, 1911. <https://doi.org/10.3390/RS14081911>.
- Kurc, S.A., Small, E.E., 2007. Soil moisture variations and ecosystem-scale fluxes of water and carbon in semiarid grassland and shrubland. *Water Resources Research* 43. DOI: <http://doi.org/10.1029/2006WR005011>.
- Lian, X., Zhao, W., Gentine, P., 2022. Recent global decline in rainfall interception loss due to altered rainfall regimes. *Nat. Commun* 13, 7642. <https://doi.org/10.1038/s41467-02235414-y>.
- Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Sampaio, E.V.S.B., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., Valente, E.V., Duda, G.P., Ferreira, C.R.P.C., Menezes, R.S.C., Hammecker, C., 2023. Moisture, temperature and respiration of two soil classes under pasture and tropical dry forest in the semiarid Brazilian region. *Journal of Arid Environments* 214, 104981. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104981>.
- Marengo, J. A., 2021. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. *Parcerias Estratégicas* 13, 149-176.
- Disponível em: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/329. Acesso em: 19 novembro 2021.
- Marques, T. V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A. A., Oliveira, M., Lúcio, P. S., Lima, K.; Reis, J., Ramos, T. M., Silva, D. F., Oliveira, C. P., Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Silva, C. S., M., Bezerra, B., 2020. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (*Caatinga*) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and forest Meteorology* 287, 107957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>.
- Melo, R.O, Montenegro, A.A.A., 2015. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 430-441.
- Menezes, J.A.L., Santos, T.E.M., Montenegro, A.A.A., Silva, J.R.L., 2013. Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto na Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco. *Walter Resources and Irrigation Management* 2, 45-51.
- Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., Giongo, V., Pérez-Marin, A.M., 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. *Brazilian Journal of Biology* 72, 643–653. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.
- Miao, H.X., 2008, Effects of Cultivation and Grazing on Evapotranspiration of Steppe Ecosystems in Inner Mongolia, China. PhD Dissertation. Institute of Botany Chinese Academy of Sciences, Beijing 62–74.
- Monte-mor, R.C.A., Palmier, L.R., Pinto, E.J.A., Lima, J.E.S., 2012. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em uma bacia intermitente no Semiárido de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 17, 101-113.
- Montenegro, A.A.A., Lopes, I., Carvalho, A.A., Lima, J.L.M.P., Souza, T.E.M.S., Araújo, H.L., Lins, F.A.C., Almeida, T.A.B., Montenegro, H.G.L., 2019. Spatio Temporal Soil Moisture Dynamics and Runoff under Different Soil Cover Conditions in a Semiarid Representative Basin in Brazil. *Advances in Geosciences* 48, 19-30. DOI: <http://doi.org/10.5194/adgeo-48-19-2019>.

- Mutti, P.R., Silva, L.L., Medeiros, S.S., Dubreuil, V., Mendes, K.R., Marques, T.V.; Lúcio, P.S.; Silva, C.M.S., BEZERRA, B.G., 2019. Basin scale rainfall-evapotranspiration dynamics in a tropical semiarid environment during dry and wet years. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 75, 29–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.007>.
- Mu, Y., Yuan, Y., Jia, X., Zha, T., Qin, S., Ye, Z., Liu, P., Yang, R., Tian, Y., 2022. Hydrological losses and soil moisture carryover affected the relationship between evapotranspiration and rainfall in a temperate semiarid shrubland. *Agric. For. Meteorol.* 315, 108831 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108831>.
- Nicholson, S.H., 2011. *Dryland Climatology*. Cambridge University Press, Cambridge. DOI:10.1017/CBO9780511973840.
- M.L., Aranha, P.R.A., Augustin, C.H.R. R., 2013. Estudo da dinâmica da água infiltrada com o auxílio de método geofísico-Gouveia, Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil. *Revista Geografias* 9, 21-37.
- Oliveira, M.B.L., Santos, A.J.B., Manzi, A.O., Alvalá, R.C.S., Correia, M.F., Moura, M.S.B., 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 159-165.
- Oliveira, M.L., Santos, C.A.C., Oliveira, G., Perez-Marin, A.M., Santos, C.A.G., 2021. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of the Total Environment* 792, 148458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>.
- Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Jardim, A.M.R.F., Souza, C.A.A.; Júnior, G.N.A., Morais, J.E.F., Souza, L.S.B., 2020. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *Catena* 188, 104457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457>.
- Santos, J.C.B., Souza Júnior, V.S., Corrêa, M.M., Ribeiro, M.R., Almeida, M.C., Borges, L.E.P., 2012. Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36, 683-695. <https://doi.org/10.1590/S01000683201200030001>.
- Scott, R.L., Knowles, J.F., Nelson, J.A., Gentine, P., Li, X., Barron-Gafford, G., Bryant, R., Biederman, J.A., 2021. Water availability impacts on evapotranspiration partitioning. *Agric. For. Meteorol.* 297, 108251. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108251>.
- Silva, M.A.V., 2006. *Meteorologia e Climatologia*. 2. ed. atual. Recife - PE.
- Silva, R.A.B, Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Gondim, P.S.S., Souza, E.S., Barros Júnior, G., 2014. Balanço hídrico em neossolo regolítico cultivado com braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 147-157. DOI: <https://doi.org/10.1590/S010006832014000100014>.
- Sousa, S.M.S.C., 2006. Relações entre vegetação, relevo, fertilidade do solo e matéria orgânica em bacia hidrográfica de região semi-árida. 64 f. Dissertação (Mestre em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal da Paraíba, Areia – PB.. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18100/1/Tese_2006.pdf. Acesso em: 4 jan. 2021.
- Souza, L.S.B., Moura, M.S.B., Sediya, G.C., Silva, T.G.F., 2015. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília 50, 627-636.
- Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M, Ahmad, M.D., Moura, M.S.B., Bos, M.G., 2008. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology* 362, 110-127.
- Utida, G., Cruz, F.W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V.F., Prado, L.F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J.C.C., Turcq, B., 2019. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports* 9, 1698. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>.
- Van Genuchten, M.T.H., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

- Vicente-Serrano, S.M., Pons-Fernández, X., Cuadrat-Prats, J.M., 2004. Mapping soil moisture in the central Ebro river valley (northeast Spain) with Landsat and NOAA satellite imagery: a comparison with meteorological data. *International Journal of Remote Sensing* 25, 4325–4350. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160410001712990>.
- Wang, T., Wedin, D.A., Franz, T.E., Hiller, J., 2015. Effect of vegetation on the temporal stability of soil moisture in grass-stabilized semi-arid sand dunes. *J. Hydrol.* 521, 447–459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.037>.
- Wang, X., Lei, H., Jiai Li, J., Qu, Y., Kong, D., Huo, Z., 2023. Climate and management impacts on the spatiotemporal dynamics of water-carbon fluxes in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 343, 108270. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108270>.
- Wang, X.P., Pan, Y.X., Zhang, Y.F., Dou, D., Hu, R., Zhang, H., 2013. Temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture for a transect in artificial revegetation desert area, China. *Hydrol.* 507, 100–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.021>.
- Western, A.W., Grayson, R.B., Blöschl, G., 2002. Scaling of Soil Moisture: A Hydrologic Perspective. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 30, 149–180. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.30.091201.140434>.
- Zhao, Z.M., Shen, Y.X., Wang, Q.H., Jiang, R.H., 2020. The temporal stability of soil moisture spatial pattern and its influencing factors in rocky environments. *Catena* 187, 104418. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104418>.