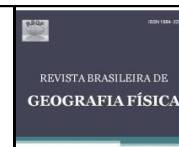




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Dinâmica espaço-temporal da umidade do solo em plantios de açaizeiro no nordeste paraense

Carmen Grasiela Dias Martins¹, Deborah Luciany Pires Costa², Igor Cristian de Oliveira Vieira³, Matheus Yan Freitas Silva⁴, João Vitor de Nóvoa Pinto⁵, Thieres George Freire da Silva⁶, Augusto José Silva Pedroso⁷, Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza⁸, Matheus Lima Rua⁹, Adrielle Carvalho Monteiro¹⁰, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza¹¹

¹ Mestre em Agronomia, Técnica em Gestão de Meio Ambiente da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS), grasi.dias95@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7854-1956

² Doutora em Agronomia, Analista Socioambiental do Instituto Internacional de Educação do Brasil (IEB), deborahpires.agro@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3513-0759

³ Doutorando em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (UNESP/FCAV), cristianigor67@gmail.com. ORCID: 0000-0002-0488-5008

⁴ Mestre em Agronomia, Analista de Desenvolvimento de Mercado na Timac Agroindústria e Comércio de Fertilizantes, matheus.yan.silva@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1235-6800

⁵ Doutor em Agronomia, Pós-doutorando em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), jvitorpinto@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5194-0834

⁶ Doutor em Meteorologia Agrícola e Professor Associado III da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), thieres.silva@ufrpe.br. ORCID: 0000-0002-8355-4935

⁷ Doutor em Agronomia e Professor EBTT do Instituto Federal do Pará (IFPA), augusto.pedroso@ifpa.edu.br. ORCID: 0000-0002-5353-5813

⁸ Doutor em Irrigação e Drenagem, Professor Titular da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), rodrigo.souza@ufra.edu.br. ORCID: 0000-0002-7099-6478

⁹ Doutorando em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), matheusrua99@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5184-0726

¹⁰ Mestranda em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), adricarvmonteiro@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0981-0002

¹¹ Doutor em Meteorologia Agrícola e Professor Associado III da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), paolo.jorge@ufra.edu.br. ORCID: 0000-0003-4748-1502

Artigo recebido em 09/11/2014 e aceito em 24/02/2015

RESUMO

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira nativa da Amazônia oriunda de áreas de várzea, que expandiu para áreas de terra firme onde pouco se conhece sobre a dinâmica de água em plantios de açaizeiros. O objetivo foi avaliar a variação espacial e temporal do teor de umidade do solo (θ_v) em dois sistemas de plantio do açaizeiro, monocultivo e consorciado com cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum.). O experimento ocorreu num plantio comercial de açaizeiro em Castanhal-PA, implantado em dois sistemas de plantio com duas lâminas de irrigação. Foram implantadas 12 baterias de tensiômetros de punção em cinco profundidades e realizado coletas diárias utilizando tensiômetro digital e régua, durante os meses de abril a dezembro. As umidades do solo foram estimadas pelo modelo de Van Genuchten, a estabilidade temporal foi analisada pela diferença relativa e pela correlação de Spearman, a análise multivariada de componentes principais foi utilizada para identificar as associações do θ_v nas diferentes profundidades com as propriedades físicas, densidade de raízes e os elementos climáticos. Os resultados de estabilidade temporal identificaram a área de consórcio como a mais representativa para as estimativas do θ_v , enquanto a correlação constatou instabilidade do θ_v em todos os pontos, mesmo nas áreas irrigadas. As variações do θ_v sofrem influência dos elementos climáticos relacionados com a evapotranspiração, principalmente no período identificado como seco e nas áreas sem irrigação.

Palavras-chave: Conteúdo de água no solo, estabilidade temporal, tensiometria, *Euterpe oleracea*.

Spatiotemporal dynamics of soil moisture in assai palm plantations in northeastern Pará

ABSTRACT

The assai palm (*Euterpe oleracea* Mart.) is a palm tree native to the Amazon, originating from floodplain areas, which has expanded into upland areas where little is known about water dynamics in assai palm plantations. The objective was to evaluate the spatial and temporal variation of soil moisture content (θ_v) in two assai palm planting systems: monoculture and intercropped with cupuassu tree (*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum.). The experiment was conducted in a commercial assai palm plantation in Castanhal-PA, established under two planting systems with two irrigation depths. Twelve sets of puncture tensiometers were installed at five depths, and daily measurements were taken using a digital tensiometer and ruler from April to December. Soil moisture levels were estimated using the Van Genuchten model, temporal stability was analyzed using relative difference and Spearman correlation, and multivariate principal component analysis was used to identify associations between θ_v at different depths and physical properties, root density, and climatic factors. The temporal stability results identified the intercropped area as the most representative for θ_v estimates, while the correlation analysis revealed θ_v instability at all points, even in irrigated areas. Variations in θ_v are influenced by climatic factors related to evapotranspiration, particularly during the dry period and in non-irrigated areas.

Keywords: soil water content, temporal stability, tensiometry, *Euterpe oleracea*.

Introdução

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira endêmica da floresta Amazônica de ocorrência natural em áreas de várzeas, onde as condições edafoclimáticas favorecem seu crescimento e produção (Laurindo et al., 2023). Com o reconhecimento do valor nutricional e econômico de seus frutos, amplamente utilizados na alimentação e em segmentos como o de cosméticos e farmacêuticos, sua demanda aumentou significativamente nos últimos anos (Silveira et al., 2023).

Como consequência, o cultivo do açaizeiro expandiu-se para áreas de terra firme, especialmente na região nordeste do Pará. No entanto, essa mudança de ambiente trouxe novos desafios, principalmente relacionados ao manejo hídrico e à redução da sazonalidade da produção (Sousa et al., 2021). Além do arranjo em monocultivo, o açaizeiro é encontrado consorciado com outras culturas no intuito de otimizar o uso da terra, diversificando a produção, conservando o solo e diminuindo a pressão no uso da terra para o cultivo agrícola (Oliveira et al., 2025). Com o consórcio é esperado que haja diferenças em diversos aspectos como microclima e o teor de umidade no solo, pois esses fatores afetam diretamente a evapotranspiração das plantas.

O teor de umidade no solo corresponde a quantidade de água em um determinado volume ou massa de solo, contido nos espaços porosos do solo, variando conforme a densidade, estrutura e textura do solo (González-Zamora; Benito-Verdugo; Martínez-Fernández, 2024). O teor de umidade no solo sofre variação temporal e espacial, e dependendo do tipo de cobertura vegetal, essa variação pode afetar o

desenvolvimento da planta, pois influencia diretamente no armazenamento de água no solo (Meng et al., 2021; Cao et al., 2022).

Alguns estudos enfatizam que áreas com composição florestal e sistemas agroflorestais (SAFs) apresentam uma maior estabilidade temporal da umidade do solo, mesmo em períodos secos (Hernández-Guzmán et al., 2021). Enquanto áreas degradadas ou com manejo inadequado, possuem uma maior instabilidade apresentando quedas bruscas na umidade no período seco (Rasheed et al., 2022).

Diante disso, a dinâmica hídrica do solo em cultivos de açaizeiros, especialmente em sistemas consorciados, permanece pouco compreendida pela ciência. Essa lacuna de conhecimento reveste-se de especial importância considerando a elevada exigência hídrica da espécie, fator que constitui um dos principais entraves à sua expansão sustentável em áreas de terra firme.

Portanto, o objetivo foi avaliar a variação espacial e temporal da umidade do solo em dois sistemas de plantio do açaizeiro, um monocultivo e outro consorciado com cupuazeiro, para subsidiar a implantação destes cultivos em áreas de terra firme e para melhoria do manejo de água no nordeste paraense.

Material e métodos

Descrição da área de estudo - O experimento foi conduzido em uma propriedade privada na cidade de Castanhal-PA, Brasil, sob as coordenadas 1° 17' 50 S e 47° 55' 20" W. A classificação climática da região, segundo Köppen-Geiger, é do tipo Am, definido como monção tropical (Alvares et al., 2014). A região é caracterizada por temperatura entre 23 e 31°C com média anual de

26,5° C e precipitação média anual de 2432 mm, sendo o mês mais chuvoso em março (410 mm) e o mês mais seco em novembro (63 mm). O solo da área é classificado como Latossolo amarelo distrófico de textura franco-arenosa (Santos et al., 2018).

A área total apresenta extensões de 203,8 x 57,7 m (aproximadamente 1,17 ha), sendo que a área experimental corresponde a 51% da área total com dimensões de 104,4 x 57,7 m. Na área experimental (Figura 1), está implantada a cultura

do açaizeiro (*E. oleracea* Mart.) cultivar BRS-Pará, em uma área denominada como monocultivo com dimensões de 52,2 x 57,7 m, e o açaizeiro em consórcio com o cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum.) cultivar Carimbó, localizado na área denominada como consórcio de 52,2 x 57,7 m. Ambos os plantios têm oito anos, com espaçamento de 4 x 4 m no monocultivo, e no consórcio 8 x 8 m entre cupuaçuzeiro e 8 x 4 m entre plantas com açaizeiro.

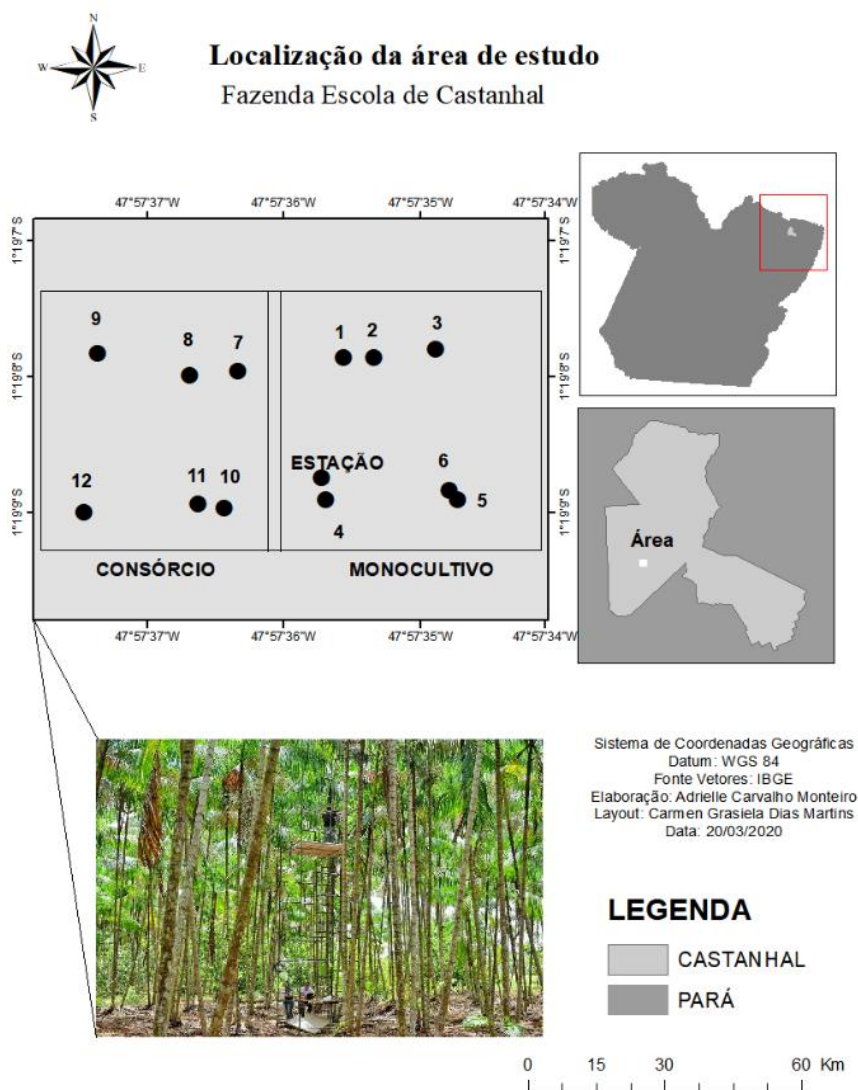


Figura 1. Mapa de localização da área experimental de açaizeiro irrigado e consorciado com cupuaçuzeiro, e das baterias de tensiômetros (onde os pontos: 1, 2 e 3 correspondem ao monocultivo em sequeiro; 4, 5 e 6 ao monocultivo irrigado; 7, 8 e 9 ao consórcio sequeiro; 10, 11 e 12 ao consórcio irrigado) em Castanhal, Pará.

Cada área, tanto de consórcio como de monocultivo, está dividida em quatro blocos de 52 x 14,5 e em cada bloco está configurado um tipo de lâmina de irrigação calculados em função da evapotranspiração de referência (ET₀). Os tratamentos monitorados estão identificados por T0 e T100, onde o T0 corresponde ao bloco sem irrigação e o T100 é o bloco com lâmina de 100% da ET₀.

O sistema de irrigação implantado é do tipo localizado por microaspersão, constituído de um microaspersor por planta com vazão de 34 L h⁻¹ com uma pressão de serviço de 5,5 mca. O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) do sistema foi de 93,12% (±0,84), classificado como excelente pela metodologia de Merriam e Keller (1978), com uma eficiência do sistema de 94%. A irrigação foi acionada no período menos chuvoso da região, que coincide

entre os meses de setembro a novembro, sendo a lâmina aplicada conforme a ET0 calculada.

Para o cálculo da lâmina de irrigação, a ET0 foi calculada com base nos dados adquiridos da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do município de Castanhal, distante 2,6 km da área experimental. Para o cálculo da ET0 foi utilizado a equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO 56 (Allen et al., 1998).

Monitoramento das variáveis meteorológicas - No centro da área foi implantada uma torre micrometeorológica de 17 metros de altura, a qual foi instrumentada acima e abaixo do dossel com sensores para monitoramento da temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, umidade do solo e velocidade do vento. Estes sensores foram conectados a um datalogger (CR1000, *Campbell Scientific*) que realizava leituras a cada 10 segundos e gravação das médias e totais a cada 20 minutos.

As variáveis meteorológicas utilizadas para relacionar com o teor de umidade no solo (θ) foram a velocidade do vento, a temperatura do ar e umidade relativa abaixo do dossel e a precipitação efetiva. A precipitação efetiva foi determinada pela coleta da precipitação abaixo do dossel do açazeiro utilizando calhas de policloreto de vinila (PVC), com comprimento de aproximadamente 2 m. Além das variáveis descritas acima, foi utilizado o déficit de pressão de vapor (DPV) para relacionar com o θ , sendo

$$\psi_m = (Z + h_1 - L) * 0,0981$$

Em que, ψ_m corresponde ao potencial matricial, em kPa; o Z é a distância entre a cápsula e a superfície do solo, em cm; o h_1 é a altura da água no tensiômetro acima da superfície do solo, em cm; enquanto o L corresponde a leitura do tensiômetro, em centímetro de coluna d'água (cca).

Para a determinação do teor de umidade do solo a partir dos valores de tensão é preciso determinar a curva de retenção de água no solo. Com os resultados da curva, foi realizado o ajuste da equação proposta por Van Genuchten (1980) para obtenção dos parâmetros característicos do solo em estudo. Após a realização dos ajustes da equação, com base nas curvas de retenção para as camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm para cada sistema de cultivo, foi utilizado os parâmetros ajustados para a obtenção da umidade volumétrica com base nas tensões coletadas em campo.

essa variável estimada pela metodologia de Tetens (1980).

Monitoramento da umidade do solo - Para o monitoramento da tensão de água no solo foi utilizado tensiômetros de punção de diferentes tamanhos, adequados para diferentes profundidades. Foram implantadas 12 baterias de tensiômetros de punção em cinco profundidades (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 m) totalizando 60 tensiômetros na área, sendo seis baterias em cada sistema de cultivo e três baterias em cada tratamento de lâmina (Figura 1). Os tensiômetros numa bateria foram implantados com a distância de 0,1 m entre eles e 0,2 m da touceira de açazeiro, para melhor acompanhar a dinâmica do θ no cultivo da cultura (Coelho; Silva; Miranda, 2010).

Os dados foram coletados, diariamente, utilizando tensiômetro digital e régua milimetrada, sendo o primeiro utilizado para a coleta da tensão no tensiômetro e o segundo para mensurar a altura de água dentro do tensiômetro acima do solo. As leituras foram feitas no intervalo de 7 às 8h, e no período de acionamento da irrigação, o sistema era acionado após a realização das leituras matutinas.

O tensiômetro digital fornece leituras de tensão em Quilopascal (kPa), enquanto a régua em centímetros (cm). Os dados foram anotados e transferidos para uma planilha eletrônica para realizar o cálculo do potencial matricial (ψ_m), segundo a equação 1 (Azevedo et al., 2017).

$$Eq. (1)$$

Análise da estabilidade temporal da umidade do solo - Para a análise da estabilidade espaço-temporal do teor de umidade no solo (θ) foi adotado o procedimento recomendado por Vachaud et al. (1985) que compreende duas técnicas. A primeira técnica verifica a variabilidade espacial dos processos pela técnica das diferenças médias relativas, onde é identificado quais e quantos locais são adequados para o monitoramento do θ com melhor precisão. O resultado é apresentado em percentual, organizado do menor para o maior, permitindo identificar as posições que representam a média e onde subestimam ou superestimam os dados avaliados, sendo que os pontos que apresentam menor desvio padrão são os mais indicados para a representação da média geral (Vachaud et al., 1985; Heathman et al., 2012).

Para o cálculo da estabilidade espacial foi utilizado a diferença relativa (δ_{ij}) entre as medições individuais do θ na posição i e no

instante j (θ_{ij}) e o valor médio em cada posição i no mesmo tempo j , demonstrado na equação 2.

$$\delta_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \underline{\theta_j}}{\underline{\theta_j}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Com esse resultado foi calculada a média das diferenças relativas para cada posição i no tempo j , dada pela equação 3, além de ser

$$\underline{\delta i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta_{ij}) \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\sigma(\delta i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \underline{\delta i})^2} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde N corresponde ao número de pontos observados.

Na segunda técnica de Vachaud et al. (1985) é utilizado o teste não-paramétrico de Spearman (Equação 5) onde é verificada a

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (\theta_{ij} - \theta_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde r_s é a correlação de Spearman; θ_{ij} é o teor de umidade no solo medido no local i e no tempo j ; $\theta_{ij'}$ é o teor de umidade no solo medido no local i na mesma posição, mas no tempo j' ; e n corresponde ao número de observações.

Análise estatística - Os dados foram analisados utilizando o software Microsoft Office Excel e a extensão XLSTAT (Addinsoft, 2020). Foi utilizado a estatística não paramétrica de coeficiente de correlação de Spearman para relacionar o teor de umidade do solo com os meses de monitoramento do experimento. Enquanto as propriedades físicas, densidade de raízes foram submetidas a análise multivariada de componentes principais (ACP) com os teores de umidade do solo em cada profundidade, além disso foi utilizado a ACP relacionando os teores de umidade do solo em cada mês com os elementos

calculado o desvio padrão de cada diferença relativa dado pela equação 4.

variabilidade temporal dos pontos monitorados. Valores de r igual a 1 indicam estabilidade perfeita entre dois períodos, sendo assim quanto mais próximo de 1 for o r mais estável é o processo do θ .

climáticos para identificar associações entre esses fatores.

Resultados

Estabilidade temporal - Os valores de diferença relativa média (δi) considerando as 12 baterias de tensiometria nas cinco profundidades nos dois sistemas de cultivo de açaizeiro monitorados entre os meses de abril a dezembro estão apresentados na Figura 2. Os dados foram plotados em ordem crescente, do menor para o maior, para identificar os locais onde os valores do θ foram superestimados e subestimados, e por fim identificar os pontos mais representativos para o valor médio do θ nas diferentes profundidades com os valores mais baixos de δi e com o menor desvio padrão.

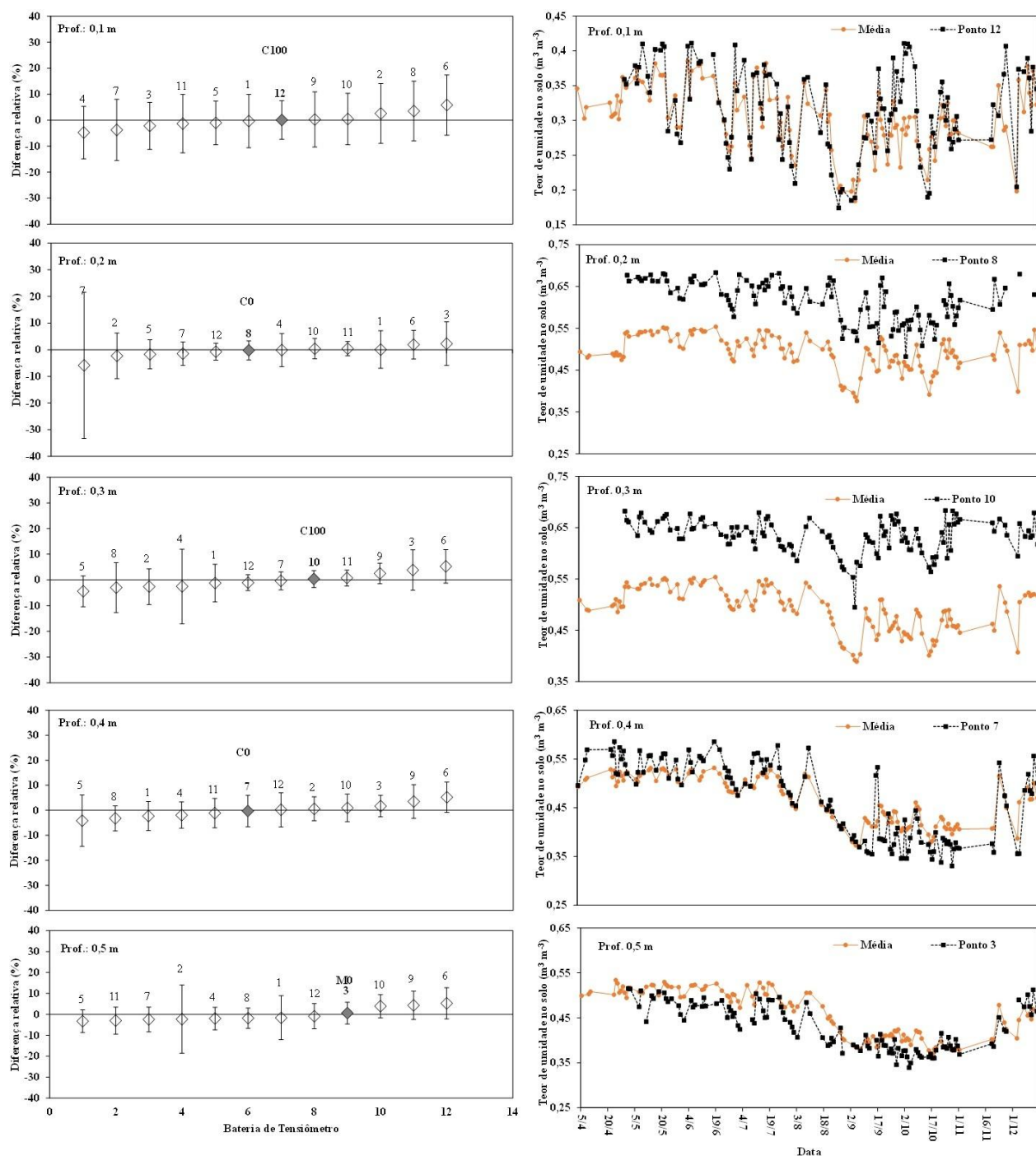


Figura 2. Diferença relativa média classificada por profundidade do perfil do solo nas áreas de monocultivo sem irrigação (M0, correspondendo aos pontos de 1 a 3), monocultivo com irrigação (M100, pontos de 4 a 6), consórcio sem irrigação (C0, pontos de 7 a 9) e consórcio com irrigação (C100, pontos de 10 a 12) (na esquerda); e comparação entre o teor de umidade médio das áreas de açaizeiro em monocultivo e consórcio, com irrigação e sem irrigação e os pontos de teor de umidade com estabilidade temporal, durante o mesmo período, nas profundidades de 0,1 a 0,5m (na direita).

De maneira geral, os pontos mais representativos foram identificados no cultivo do açaizeiro em consórcio, com exceção da camada de 0,5 que foi melhor representada no cultivo em monocultivo. Apesar da maioria dos pontos estarem distribuídos no cultivo consorciado, a localização dos pontos foi diferente em cada profundidade, sendo os pontos para as camadas de 0,1 e 0,3 m localizados no cultivo irrigado e os

pontos para as camadas de 0,1 e 0,4 situados no cultivo em sequeiro. Enquanto para a camada de 0,5 m, o ponto mais representativo está localizado no monocultivo em sequeiro.

Ao avaliar os pontos que superestimam o θ nas camadas monitoradas, o ponto 6 foi identificado em todas as camadas com valores de superestimativa de 5% nas camadas de 0,1, 0,3, 0,4 e 0,5 m, enquanto na camada de 0,2 m a

superestimativa foi de 2% (± 5) caracterizando esse ponto entre os mais úmidos. Outros pontos que apresentaram superestimativa foram o ponto 8 na camada de 0,1 m com 3,5% (± 11); o ponto 3 nas camadas de 0,2 e 0,3 m com 2,3% (± 8) e 3,9% (± 8), respectivamente; e o ponto 9 nas profundidades de 0,4 e 0,5 com 3,5% (± 7) e 4,3% (± 7), respectivamente.

Com relação aos pontos de subestimativa do θ que caracterizam os pontos mais secos dos cultivos, o ponto 7 subestimou o teor para as camadas superficiais de 0,1 e 0,2 m com -3,8% (± 12) e -5,9 % (± 27), respectivamente, sendo o último o maior valor de desvio padrão de δi observado entre os pontos analisados. Para as profundidades de 0,3 a 0,5m, o ponto 5 foi o que mais subestimou em até -4% os valores de θ .

Ao identificar os pontos que apresentam o teor de umidade mais representativos para as camadas monitoradas, os dados desses pontos foram comparados com os valores médios do θ de todos os pontos para cada profundidade no intuito de validar os resultados (Figura 10). Os pontos nas

camadas 0,1, 0,4 e 0,5 m ficaram bem próximo dos valores médios de θ em toda a área avaliada, com valores médios de 0,31, 0,4 e 0,4 $m^3 m^{-3}$, respectivamente. Enquanto nas camadas de 0,2 e 0,3 m, os valores médios observados foram de 0,58 e 0,63 $m^3 m^{-3}$, apesar de serem os pontos mais representativos pela δi para essas camadas, apresentam valores acima da média nessas camadas.

Para finalizar a avaliação da estabilidade espaço-temporal do teor de umidade no solo, foi calculado os coeficientes de correlação de Spearman entre os nove meses de monitoramento do θ nos diferentes tratamentos (Tabela 1). De maneira geral, os coeficientes foram baixos e em alguns períodos foram significativos ($p < 0,5$), demonstrando que o teor de umidade no solo apresenta instabilidade nos diferentes sistemas, mesmo com a presença de irrigação. É interessante notar que as altas correlações e significativas foram comuns entre os sistemas no mês de setembro e outubro, mês com menor volume de chuva e quando se iniciou a irrigação na área.

Tabela 1. Matriz de coeficientes de correlação de Spearman para teor de umidade no solo, durante o período de nove meses (abril a dezembro) nos sistemas de cultivo de açaizeiro em monocultivo (M) e consorciado (C), com (100) e sem irrigação (0) em Castanhal-PA, Brasil.

Cultivo	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
M0	P4	1,00								
	P5	0,41	1,00							
	P6	0,24	-0,09	1,00						
	P7	0,10	0,66	-0,43	1,00					
	P8	0,56	0,65	0,66	0,07	1,00				
	P9	0,29	-0,62	0,10	-0,52	-0,22	1,00			
	P10	0,27	-0,69	0,28	-0,44	-0,20	0,93	1,00		
	P11	0,45	0,31	0,49	0,44	0,46	-0,25	0,06	1,00	
	P12	-0,11	0,12	0,43	0,44	0,30	-0,17	0,10	0,63	1,00
	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
M100	P4	1,00								
	P5	0,88	1,00							
	P6	0,11	-0,10	1,00						
	P7	-0,36	-0,19	0,02	1,00					
	P8	-0,26	-0,20	0,80	0,13	1,00				
	P9	0,71	0,59	0,04	-0,82	-0,15	1,00			
	P10	0,41	0,49	-0,44	-0,16	-0,48	0,05	1,00		
	P11	0,40	0,52	0,25	0,62	0,17	-0,30	0,33	1,00	
	P12	-0,25	-0,26	0,53	0,27	0,57	-0,03	-0,95	-0,07	1,00
C0	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12

	P4	1,00	0,20							
	P5	0,20	1,00							
	P6	0,58	-0,13	1,00						
	P7	-0,13	-0,67	0,65	1,00					
	P8	0,09	-0,43	0,73	0,77	1,00				
	P9	0,38	0,35	-0,04	-0,52	-0,12	1,00			
	P10	0,41	0,21	0,25	-0,20	0,08	0,92	1,00		
	P11	0,20	-0,76	0,52	0,75	0,34	-0,40	-0,12	1,00	0,59
	P12	-0,23	-0,44	0,63	0,92	0,68	-0,35	0,01	0,59	1,00
C100	Período	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
	P4	1,00								
	P5	0,48	1,00							
	P6	-0,50	-0,60	1,00						
	P7	-0,30	-0,81	0,06	1,00					
	P8	-0,07	-0,72	0,76	0,30	1,00				
	P9	-0,07	0,58	0,06	-0,65	-0,22	1,00			
	P10	0,22	0,85	-0,21	-0,82	-0,47	0,91	1,00		
	P11	-0,20	-0,51	0,23	0,66	0,21	-0,10	-0,27	1,00	
	P12	-0,85	-0,72	0,67	0,51	0,44	0,08	-0,31	0,56	1,00

Valores em negrito mostram correlações significativas a 5% de probabilidade.

Relação entre a umidade do solo e as propriedades físicas, densidade de raízes e os elementos climáticos - Na análise multivariada de componentes principais (ACP) do teor de umidade no solo com as propriedades físicas do solo e a densidade de raízes, os dois primeiros componentes principais (CPs) responderam por 83,61% de toda variação dos dados, sendo 70,53% explicado pelo primeiro CP e 13,07% pelo

segundo (Figura 3). Os teores de argila e silte e a densidade do solo apresentaram peso negativo no CP1, enquanto a areia e a densidade de raízes apresentaram peso positivo nesse componente (Figura 3a). Por outro lado, no CP2, o teor de umidade no solo apresentou peso positivo e foi o maior nesse componente, não apresentando associações com as propriedades físicas do solo e densidade de raízes (Figura 3b).

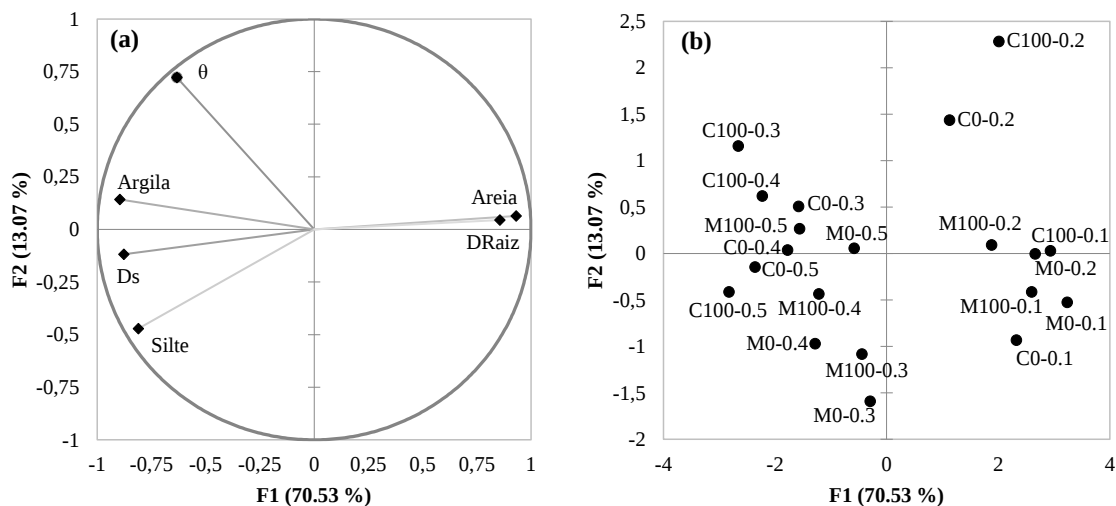


Figura 3. Análise multivariada de componentes principais (ACP) do teor de umidade do solo (θ) e as propriedades físicas do solo e a densidade de raízes em cinco profundidades (0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5 m) nos

diferentes sistemas de cultivo de açaizeiro (M100 – monocultivo irrigado, M0 – monocultivo sequeiro, C100 – consórcio irrigado, C0 – consórcio sequeiro) em Castanhal-PA, Brasil.

Em relação a ACP do teor de umidade no solo entre os meses de abril a dezembro com as variáveis meteorológicas, as duas primeiras CP explicam 90,31% da variabilidade dos dados originais, sendo que a CP1 responde por 81,16%, a qual é suficiente para explicar a maioria da variabilidade dos valores (Figura 4).

Todos os vetores foram longos e, portanto, possuem dominância na análise, apresentando peso positivo para as variáveis de teor de umidade no solo em todos os tratamentos (θ M0, θ M100, θ C0 e θ C100), precipitação efetiva (PPef) no monocultivo (M) e consórcio (C) e a umidade relativa (UR) (Figura 4a). Com peso negativo para as variáveis de evapotranspiração de referência (ET0), irrigação (Irrig.), velocidade do vento (U2),

temperatura do ar (Tar) e déficit de pressão de vapor (DPV).

Durante os meses de abril a julho, a variabilidade do θ é explicada pela precipitação efetiva nas áreas e pela umidade relativa, uma vez que a precipitação é a principal entrada de água e o período é denominado como o mais chuvoso da região (Figura 4b). Enquanto no período de setembro a novembro, a irrigação, Tar, DPV, ET0 e U2 foram as variáveis que afetam a variabilidade do θ , sendo o período que essas variáveis são acionadas, com o caso da irrigação, e que apresentam acréscimo, como é o caso das demais. Com relação aos meses de agosto e dezembro, não houve associação com as variáveis abordadas.

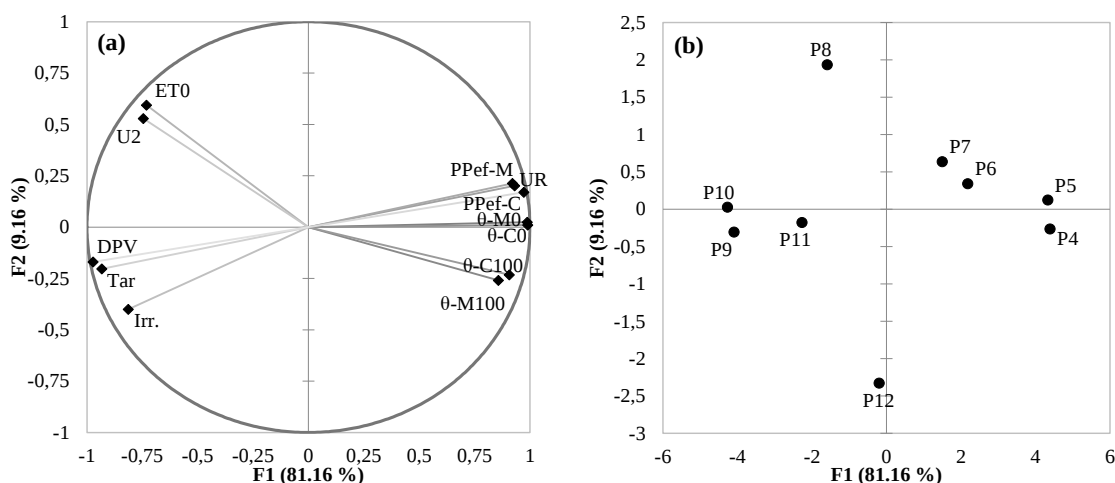


Figura 4. Análise multivariada de componentes principais (ACP) do teor de umidade no solo (θ) durante os meses de abril a dezembro (P4 a P12) e os elementos climáticos em cultivo de açaizeiro em monocultivo e consorciado, com e sem irrigação em Castanhal-PA, Brasil.

Discussão

Estabilidade temporal - A estabilidade tanto espacial como temporal do teor de umidade no solo é influenciada por diversos fatores, provocando sua variabilidade numa área tanto na superfície em decorrência de fenômenos relacionados a micrometeorologia, à cobertura do solo ou topografia, como em profundidade, em virtude da textura e estrutura do solo e a disposição das raízes (Queiroz et al., 2020; Rasheed et al., 2022). Na avaliação das áreas, a maioria dos pontos representativos estão distribuídos no sistema consorciado, principalmente nas camadas de 0,1 a 0,4 m, sendo o monocultivo mais representativo para o teor de umidade na profundidade de 0,5 m.

Ainda que os pontos padrões estejam no consórcio, os pontos que representam o teor de umidade nas camadas de 0,2 e 0,3, quando

plotados, são superiores ao que é observado na média, nesses casos poderiam ser avaliados outros pontos para essas profundidades. A maioria dos trabalhos sobre a estabilidade do teor de umidade pela técnica de diferença relativa caracterizam os pontos mais próximos de zero e com menor desvio padrão como preconizado por Vachaud et al. (1985). No entanto, há autores que escolhem os pontos representativos com base apenas na diferença relativa média próxima de zero, mesmo que esses pontos apresentem grande desvio padrão (Martínez-Fernández; Ceballos, 2005).

Já os pontos localizados no monocultivo, principalmente no tratamento irrigado, apresentaram os pontos de superestimativa e subestimativa do teor de umidade, o que se deve a grande facilidade na variabilidade nesse sistema que é observada na maioria das camadas ao longo do tempo, como foi observado por Queiroz et al (2020) que associaram os grandes desvios padrões

as constantes flutuações no teor de umidade no solo nas camadas monitoradas.

Na análise de estabilidade temporal dos pontos amostrados, observa-se instabilidade em todos os sistemas, até mesmo nos que recebem irrigação, com baixos coeficientes de correlação. Nesse cenário, é importante observar que dentro do perfil do solo, o sistema é dinâmico tanto na superfície quanto nas camadas subsuperficiais pelos processos de entrada e saída de água no solo que variam bastante.

As correlações moderadas e baixas, que configuram instabilidade do teor de umidade no solo, são descritas tanto com relação ao tipo de cobertura do solo quanto em relação às profundidades monitoradas, e sua instabilidade geralmente está relacionada aos processos de umedecimento e secagem do solo porque após eventos de chuva o coeficiente de Spearman diminui (Hui et al., 2025). Há estudos que encontram alto coeficiente de correlação de Spearman em períodos mais secos e de transição, e em zonas mais áridas (Hernández-Guzmán et al., 2021; Zhou et al., 2024).

Apesar da variabilidade espacial, foram identificados pontos de estabilidade do teor de umidade do solo para essas áreas de cultivo em diferentes profundidades, em especial na profundidade designada como raiz efetiva do açaizeiro que corresponde a 0,4 m, com o ponto localizado mais ao centro da área de estudo. Quanto à variabilidade temporal, durante todo o período avaliado não houve estabilidade do teor de umidade o que chama atenção para o monitoramento frequente para evitar que a cultura sofra com déficit hídrico.

Relação entre a umidade do solo e as propriedades físicas do solo e o clima - Apesar de não haver associações das propriedades do solo e da densidade de raízes com o teor de umidade no solo (θ) para explicar toda a variabilidade do teor nas áreas amostradas, esses fatores são marcantes nas diferentes profundidades independente do sistema. Nas camadas superficiais o teor de areia e de densidade de raízes são inversamente proporcionais ao θ , enquanto o aumento do θ nas camadas mais profundas (0,3 a 0,5 m) é também verificado o incremento de argila, silte e a densidade do solo nessas camadas.

Camadas de solos de texturas mais arenosas perdem água mais facilmente por evaporação ou infiltração, devido à menor capacidade de retenção hídrica proporcionada pelo reduzido teor de partículas finas e pela maior macroporosidade desses solos. Essa limitação hídrica é ainda mais evidente em períodos de

estiagem, quando solos arenosos demonstram maior susceptibilidade ao estresse hídrico e à redução do teor de umidade em comparação com solos de textura mais fina, como silto-argilosos (Li et al., 2022).

Por outro lado, o aumento nos teores de argila e silte eleva significativamente a capacidade de retenção de água no solo, uma vez que essas partículas apresentam maior área superficial e promovem maior adsorção de água nas superfícies minerais, além de reduzirem a velocidade de percolação da água (Pérez-de-los-Reyes et al., 2021).

Resultados encontrados por Yang et al., (2023) e Queiroz et al. (2020) evidenciam que o teor de água atua como fator limitante do teor de umidade do solo (θ) em diferentes camadas do perfil, ao promover perdas mais rápidas de águas. Outro ponto observado foi uma correlação positiva entre o teor de argila e o θ , que demonstra que à medida que o conteúdo de argila aumenta com a profundidade, há também um incremento na capacidade de retenção de água no solo.

Com relação às associações com as variáveis meteorológicas, o teor de umidade no solo foi dominado pela precipitação efetiva e umidade relativa nos meses do período chuvoso da região, enquanto no período seco os elementos ligados a evapotranspiração foram dominantes. Dessa forma, com as variações ocorridas na velocidade do vento (U_2), evapotranspiração de referência (ET_0), déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura do ar (Tar) no período seco, essas variáveis podem ser importantes indicadores para começar o acionamento dos sistemas de irrigação na região.

Essa relação alta e positiva entre o θ e a precipitação efetiva é devido ao fato de a pluviosidade configurar a principal entrada de água no sistema solo-planta-atmosfera e ser mais frequente e com maiores volumes no período chuvoso da região (abril a junho), além disso nesse período é notado os maiores valores de umidade relativa do ar. Enquanto que nos meses de setembro a novembro, período que foi acionado a irrigação, por isso essa variável obteve associação com θ , é marcado pelo aumento significativo da U_2 , DPV, Tar e ET_0 , com valores médios de 0,65 m s⁻¹, 0,64 kPa, 26,74 °C e 3,29 mm, respectivamente.

Com tudo, as variáveis meteorológicas afetam mais a variabilidade do θ do que as variáveis relacionadas ao solo nessas áreas de cultivo de açaizeiro. Dessa forma, buscar um monitoramento do teor de umidade relacionado às

condições atmosféricas podem auxiliar a tomada de decisão do produtor no campo

Conclusão

Pela diferença relativa, os pontos mais representativos e estáveis para toda área nas diferentes camadas estão localizados no cultivo consorciado, com exceção da profundidade de 0,5 m que está situada no monocultivo. Quanto à estabilidade temporal, de acordo com o coeficiente de Spearman, observa-se que todos os sistemas apresentam instabilidade pela dinâmica de água que ocorre espacialmente e temporamente ao longo do período.

Baseado nas associações analisadas, notou-se que as propriedades físicas do solo e a densidade de raízes não foram suficientes para explicar toda a variabilidade do teor de umidade no solo nas diferentes profundidades. Por outro lado, os elementos climáticos U2, DPV, Tar e ET0 foram importantes para explicar a variabilidade do teor de umidade no período seco, sendo esses fatores importantes indicadores para o começo da irrigação na região.

Apesar dos resultados obtidos, ainda precisa de análises complementares para o melhor direcionamento do manejo do teor de umidade do solo para essa cultura nos diferentes sistemas de cultivo, o que será buscado em pesquisas futuras.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a FAPESPA pela concessão da bolsa de estudos e demais recursos financeiros (FAPESPA/ICAAF 009/2017). À UFRA e a FEC pelo apoio logístico, ao proprietário do plantio comercial pela concessão da área de estudo e ao Grupo de Pesquisa Interação Solo-Planta-Atmosfera na Amazônia (ISPAAm).

Referências

- Addinsoft. (2020). XLSTAT statistical and data analysis solution. New York. <https://www.xlstat.com>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome, IT: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Alvares, C. A., Stape, J.L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2014). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Azevedo, J. De, Freire, A. G., Alencar, T. L. de, Santos, C. L. A. dos, Assis Júnior, R. N. de, Bezerra, F. M. L., & Mota, J. C. A. (2017). Desempenho de sistemas de leitura de tensiômetro em condições de temperatura controlada. *IRRIGA*, 22(4), 735–756. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n4p735-756>
- Cao, Y., Zhu, H., Bi, R., & Jin, Y. (2022). Spatial and temporal characteristics of surface soil moisture in a disturbed coal mining area of Chinese Loess Plateau. *PLOS ONE*, 17(5), e0265837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265837>
- Coelho, E. F., Silva, A. J. P. Da, & Miranda, J. H. De. (2010). Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. *Engenharia Agrícola*, 30(4), 608–618. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000400005>
- Oliveira, E. P., Ximenes, L. C., Gama, J. R. V., & Vieira, T. A. (2025). Non-Wood Forest Product Extractivism: A Case Study of Euterpe oleracea Martius in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, 17(2), 464. <https://doi.org/10.3390/su17020464>
- González-Zamora, Á., Benito-Verdugo, P., & Martínez-Fernández, J. (2024). On the Variability in the Temporal Stability Pattern of Soil Moisture Under Mediterranean Conditions. *Spanish Journal of Soil Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/sjss.2024.12839>
- Heathman, G. C., Cosh, M. H., Han, E., Jackson, T. J., McKee, L., & McFee, S. (2012). Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks. *Geoderma*, 170, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.004>
- Hernández-Guzmán, F. J., Cleves-Leguizamo, J.-A., & Díaz-Almanza, E. D. (2021). Characterization of soil moisture dynamics in Colombian agricultural areas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(3). <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i3.12840>
- Hui, S., Guo, L., Liu, H., Wu, X., Lan, P., Boyer, E. W., Mello, C. R., & Li, H. (2025). Spatiotemporal dynamics of soil moisture and the occurrence of hysteresis during seasonal transitions in a headwater catchment. *Geoderma*, 454, 117169.

- <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117169>
- Laurindo, L. F., Barbalho, S. M., Araújo, A. C., Guiguer, E. L., Mondal, A., Bachtel, G., & Bishayee, A. (2023). Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) in Health and Disease: A Critical Review. *Nutrients*, 15(4), 989. <https://doi.org/10.3390/nu15040989>
- Li, H., Van den Bulcke, J., Mendoza, O., Deroo, H., Haesaert, G., Dewitte, K., De Neve, S., & Sleutel, S. (2022). Soil texture controls added organic matter mineralization by regulating soil moisture—evidence from a field experiment in a maritime climate. *Geoderma*, 410, 115690. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115690>
- Martínez-Fernández, J., & Ceballos, A. (2005). Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *Journal of Hydrology*, 312(1–4), 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.007>
- Meng, F., Luo, M., Sa, C., Wang, M., & Bao, Y. (2022). Quantitative assessment of the effects of climate, vegetation, soil and groundwater on soil moisture spatiotemporal variability in the Mongolian Plateau. *Science of The Total Environment*, 809, 152198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152198>
- Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Utah State University.
- Pérez-de-los-Reyes, C., Sánchez-Ormeño, M., Bravo Martín-Consuegra, S., García-Pradas, J., Pérez-de-los-Reyes, M. L., Ramírez, A., Ortiz-Villajos, J. Á. A., García Navarro, F. J., & Jiménez-Ballesta, R. (2022). The influence of depth on the water retention properties of vineyard soils. *Agricultural Water Management*, 261, 107384. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107384>
- Queiroz, M. G. de, Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., Souza, C. A. A. de, Araújo Júnior, G. do N., Morais, J. E. F. de, & Souza, L. S. B. de. (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. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457>
- 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), 11538. <https://doi.org/10.3390/su141811538>
- Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., dos Anjos, L. H. C., Oliveira, V. Á. de, Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Araújo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (5o ed, Vol. 1). Embrapa Solos.
- Silveira, J. T. da, Rosa, A. P. C. da, Morais, M. G. de, Victoria, F. N., & Costa, J. A. V. (2023). An integrative review of Açaí (*Euterpe oleracea* and *Euterpe precatoria*): Traditional uses, phytochemical composition, market trends, and emerging applications. *Food Research International*, 173, 113304. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113304>
- Sousa, D. de P., Fernandes, T. F. S., Tavares, L. B., Farias, V. D. da S., de Lima, M. J. A., Nunes, H. G. G. C., Costa, D. L. P., Ortega-Farias, S., & Souza, P. J. de O. P. (2021). Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. *Irrigation Science*, 39(1), 5–22. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>
- Tetens, V. O. (1930). Über einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift Geophysic*, 6(1), 297–309.
- Vachaud, G., Passerat De Silans, A., Balabanis, P., & Vauclin, M. (1985). Temporal Stability of Spatially Measured Soil Water Probability Density Function. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 822–828. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040006x>
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Yang, C., Wu, J., Li, P., Wang, Y., & Yang, N. (2023). Evaluation of Soil-Water Characteristic Curves for Different Textural Soils Using Fractal Analysis. *Water*, 15(4), 772. <https://doi.org/10.3390/w15040772>
- Zhou, X., Hu, K., Xiao, H., Yang, Y., Chen, J., & Cheng, Y. (2024). Effects of vegetation on the spatiotemporal distribution of soil water content in re-vegetated slopes using temporal stability analysis. *CATENA*, 234, 107570. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107570>