



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
MESTRADO EM AGRONOMIA

MATHEUS LIMA RUA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA EM
FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA**

BELÉM – PA

2025

MATHEUS LIMA RUA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA EM
FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

BELÉM – PA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R894e Rua, Matheus Lima
Evapotranspiração de cultura e produtividade da água em frutíferas de importância econômica na
Amazônia / Matheus Lima Rua. - 2025.
81 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia(PPGA), Campus Universitário
de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza
1. Fruticultura Amazônica. 2. Balanço hídrico do solo. 3. Irrigação. I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira
Ponte de, *orient.* II. Título

CDD

630.251509811

MATHEUS LIMA RUA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA EM
FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Agronomia da
Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências deste para o
título de Mestre. Área de concentração: Agronomia.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA**
Data: 16/07/2025 13:18:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza – Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Documento assinado digitalmente
 **SILVIA MARIA DANTAS**
Data: 05/03/2025 19:05:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Sílvia Maria Dantas – 1º Examinadora
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO NORTE – SEEC - RN

Documento assinado digitalmente
 **MIRTA TERESINHA PETRY**
Data: 14/03/2025 11:36:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Mirta Teresinha Petry – 2º Examinadora
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM

Documento assinado digitalmente
 **DAIANE DE CINQUE MARIANO**
Data: 18/03/2025 14:27:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Daiane de Cinque Mariano – 3º Examinadora
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

BELÉM – PA

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo que concedeu em minha vida até este momento, pela minha família, meus amigos, e pelas oportunidades e bênçãos proporcionadas.

Agradeço à minha família, que é minha maior base e exemplo de vida, especialmente aos meus pais, Raimundo Odmar Lima Rua e Maria de Nazaré Lima de Castro, por toda a minha criação, por serem meu suporte na caminhada e por sempre buscarem proporcionar o melhor para mim. Agradeço também às minhas irmãs, Rafaela, Kássia e Gabriela, bem como à minha tia e madrinha, Fernanda Rua, por seus conselhos, apoio e por sempre estarem torcendo por mim.

Ao Grupo de Pesquisa Interação Solo Planta Atmosfera na Amazônia – ISPAAm, expresso minha gratidão por todo aprendizado e suporte ao longo da graduação e mestrado, que me permitiram chegar até aqui. Aos amigos que esse grupo me proporcionou ao longo do mestrado, Igor Vieira, João Nóvoa, Luis Trindade, Leandro Navarro, Breno Rodrigues, Mateus Aguiar, Maryelle Nery, Tayssa Menezes, Vandeilson Belfort, Marcus Lima e Miguel Gabriel, agradeço o companheirismo, pelas missões em campo compartilhadas e pelos bons momentos no laboratório.

Aos meus chefes na pesquisa, Dra. Deborah Pires, Ma. Erika Teixeira e Dr. Gabriel Tavares, sou grato por toda a orientação, conselhos e aprendizados durante essa jornada.

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Jorge O. P. de Souza, por me proporcionar todas as oportunidades, orientação, reconhecimento e confiança ao longo da minha passagem pelo grupo ISPAAm.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, à Fazenda Reunidas Sococo, por todo suporte para o desenvolvimento deste estudo, assim como à sua equipe de colaboradores; à Fazenda Escola de Castanhal – UFRA e aos demais gestores das propriedades que também apoiaram o desenvolvimento deste estudo, e ao CNPq/Capes pela concessão de bolsa e apoio a esta pesquisa.

RESUMO

Objetivou-se determinar a evapotranspiração de cultura e a produtividade da água em frutíferas de importância econômica na Amazônia. O estudo foi conduzido em plantios comerciais de quatro frutíferas, distribuídos em quatro diferentes locais, no estado do Pará, sendo um plantio de açaizeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.), plantio de coqueiro (*Cocos nucifera* L.), de lima ácida (*Citrus latifolia* T.) e um plantio de cacaueiro (*Theobroma cacao* L.). Em todas as áreas experimentais foram instaladas torres, nas quais foram abrigados sensores meteorológicos para mensuração de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global, velocidade do vento, precipitação pluviométrica e conteúdo volumétrico de água no solo. A evapotranspiração atual de cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) foi calculada pelo método de balanço hídrico do solo. A produtividade da água (Pa) foi determinada pela razão entre a componentes de produtividade e $ET_{c \text{ atual}}$. Para as áreas de estudo foi aplicado o delineamento inteiramente casualizado com parcela subdividida, com dois tratamentos (irrigado e não irrigado) e dois períodos de acompanhamento (chuvoso e menos chuvoso). Para os dados de $ET_{c \text{ atual}}$ foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,05$). Para os dados de componentes de produtividade (Cp) e produtividade da água (Pa) (comparado apenas entre tratamentos), as médias foram comparadas pelo Teste-t de Student ($p < 0,05$). Para os dados de $ET_{c \text{ atual}}$, durante o período chuvoso (PC), todas as frutíferas estudadas não apresentaram diferença nas médias dos tratamentos. No período menos chuvoso (PMC), o tratamento irrigado apresentou maiores médias de $ET_{c \text{ atual}}$ em comparação ao tratamento não irrigado. Comparando os períodos, no tratamento irrigado, as maiores médias de $ET_{c \text{ atual}}$ para todas as frutíferas foram observadas durante o PMC em relação ao PC. No tratamento não irrigado, apenas o coqueiro-anão-verde e a lima ácida obtiveram médias de $ET_{c \text{ atual}}$ superiores no PMC, enquanto as médias de $ET_{c \text{ atual}}$ do açaizeiro e cacaueiro foram menores durante o PMC em comparação ao PC. Nos resultados de Cp e Pa, para os cultivos de açaizeiro, lima ácida e cacaueiro, observou-se maiores médias dos componentes de produtividade no tratamento irrigado em comparação ao não irrigado. As médias observadas de Pa de todos os componentes avaliados foram maiores no tratamento irrigado nos cultivos de açaizeiro e lima ácida, enquanto no cultivo de cacaueiro, as médias dos componentes avaliados de Pa não diferiram entre os tratamentos. Para o sítio experimental de coqueiro-anão-verde, não foi realizada comparação entre tratamentos devido à diferença de idade das plantas. No entanto, ao comparar os anos de 2023 e 2024, observou-se aumento na produção de frutos e água de coco no tratamento irrigado, enquanto no tratamento não irrigado, houve aumento apenas no volume de água de coco. Em termos de Pa, em 2024, houve aumento dos componentes de Pa avaliados em ambos os tratamentos em relação a 2023. Nesse sentido, observou-se que a irrigação possibilitou melhores respostas ao aumento da demanda evaporativa em períodos de menor ocorrência de chuvas. No estudo de produtividade da água a irrigação proporcionou respostas satisfatórias para os componentes de produtividade das frutíferas estudadas, garantindo maior rendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Fruticultura amazônica, Balanço hídrico do solo, Irrigação.

ABSTRACT

The aim was to determine crop evapotranspiration and water productivity in fruit trees of economic importance in the Amazon. The study was conducted in commercial plantations distributed in four municipalities in the state of Pará, being located in: Castanhal in açai plantation (*Euterpe oleraceae* Mart.), Santa Izabel do Pará in coconut plantation (*Cocos nucifera* L.), Capitão Poço in acid lime planting (*Citrus latifolia* T.) and Vitória do Xingu planting of cocoa (*Theobroma cacao* L.). Towers were installed in all experimental areas, housing meteorological sensors to measure temperature and relative humidity, global solar radiation, rainfall and volumetric water content in the soil. Current crop evapotranspiration ($ET_{c \text{ atual}}$) was calculated using the soil water balance method. Water productivity (Pa) was determined by the ratio between production and $ET_{c \text{ atual}}$. For the study areas, a completely randomized design with subdivided plots was applied, with two treatments (irrigated and non-irrigated) and two monitoring periods (rainy and less rainy). For $ET_{c \text{ atual}}$ data, the Kruskal-Wallis and Wilcoxon-Mann-Whitney tests were applied ($p < 0.05$). For productivity component data (Cp) and water productivity data (compared only between treatments), the means were compared by Student's t-test ($p < 0.05$). For $ET_{c \text{ atual}}$ data, during the rainy season (PC), none of the studied fruit trees showed any difference in the treatment averages. In the less rainy season (PMC), the irrigated treatment showed higher ET_c averages compared to the non-irrigated treatment. Comparing the periods, in the irrigated treatment, the highest $ET_{c \text{ atual}}$ averages for all fruit trees were observed during the PMC in relation to the PC. In the non-irrigated treatment, only the green dwarf coconut and acid lime obtained higher $ET_{c \text{ atual}}$ averages in the PMC, while the $ET_{c \text{ atual}}$ averages of the açai and cocoa trees were lower during the PMC compared to the PC. In the Cp and Pa results, for the açai, acid lime and cocoa crops, higher averages of the productivity components were observed in the irrigated treatment compared to the non-irrigated treatment. The observed Pa averages of all evaluated components were higher in the irrigated treatment in the açai and acid lime crops, while in the cocoa crop, the averages of the evaluated Pa components did not differ between treatments. For the green dwarf coconut experimental site, no comparison was made between treatments due to the difference in plant age. However, when comparing the years 2023 and 2024, an increase in the production of coconut fruits and water was observed in the irrigated treatment, while in the non-irrigated treatment, there was only an increase in the volume of coconut water. In terms of Pa, in 2024, there was an increase in the Pa components evaluated in both treatments compared to 2023. In this sense, it was observed that irrigation enabled better responses to the increase in evaporative demand in periods of lower rainfall. In the water productivity study, irrigation provided satisfactory responses for the productivity components of the fruit trees studied, ensuring greater yield.

KEYWORDS: Amazon fruit growing, Soil water balance, Irrigation.

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

% – Percentual;

Δh – Variação de água no solo;

Z – Espessura das camadas;

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius;

Ac – Água de coco;

AC – Ascensão capilar;

$K(\theta)$ – Condutividade hidráulica não saturada do solo;

ω – Umidade efetiva do solo;

ϕ – Potencial matricial;

ANA – Agência Nacional de Águas;

BHS – Balanço hídrico do solo;

CC – Capacidade de campo;

cm – centímetro;

cm^3 – centímetro cúbico;

D – Drenagem interna;

DIC – Delineamento inteiramente casualizado;

DPV – Déficit de pressão de vapor;

ea – Pressão de vapor de água;

ET_o – Evapotranspiração de referência;

$\text{ET}_{c \text{ atual}}$ – Evapotranspiração atual da cultura;

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura;

G – Fluxo de calor no solo;

h – Armazenamento de água no solo;

ha – Hectare;

I – Irrigação;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

K_c – Coeficiente de cultura simples;

kg – Quilograma;

Kpa – Kilopascal;

K_s – Condutividade hidráulica do solo saturado;

L – Litro;

m – Metro;

$m\ s^{-1}$ – Metros por segundo;
 m^2 – Metro quadrado;
 m^3 – Metro cúbico;
MF – Massa fresca de frutos;
MJ – MegaJoule;
mm – milímetro;
Naf – Número de amêndoas por fruto;
NF – Número de frutos;
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
Pa – Produtividade da água;
Paf – Peso de amêndoas frescas;
Pas – Peso de amêndoas secas;
PC – Período chuvoso;
Pf – Peso de frutos;
PMP – Período menos chuvoso;
PMP – Ponto de murcha permanente;
PP – Precipitação pluviométrica;
qz – Densidade de fluxo de água no solo;
Rg – Radiação global incidente;
t – Tonelada;
Tar – Temperatura do ar;
TDR – Reflectometria no domínio do tempo;
 U_2 – Velocidade do vento a 2 metros;
UR – Umidade relativa do ar;
 Δ – Declividade da curva de saturação de vapor de água;
 θ – Conteúdo volumétrico de água no solo;
 Υ – Constante psicrométrica;

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Localização dos sítios experimentais.....	26
Figura 1.2. Sítios experimentais em plantios comerciais de açazeiro (A), coqueiro-anão-verde (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D).	27
Figura 1.3. Esquema ilustrativo da disposição dos sensores nos sítios experimentais.....	30
Figura 1.4. Torres micrometeorológicas instaladas nos sítios experimentais de açazeiro (A), coqueiro-anão-verde (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D).	30
Figura 1.5. Instalação de sensores tipo TDRs em campo para obtenção de dados de conteúdo volumétrico de água no solo.....	31
Figura 1.6. Teste de infiltração no sítio experimental	32
Figura 1.7. Temperatura do ar (Tar, °C) e Umidade relativa do ar (UR, %) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.....	35
Figura 1.8. Radiação solar global (Rg, MJ m ⁻² dia ⁻¹) e Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.	36
Figura 1.9. Velocidade do vento (U, m s ⁻¹) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.	37
Figura 1.10. Precipitação pluviométrica (PP, mm) e Irrigação (I, mm) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.....	38
Figura 1.11. Conteúdo volumétrico de água no solo (θ , m ³ m ⁻³) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso. *Marcação indicando a diferença de CC, PMP e θ crítica entre os tratamentos irrigado e não irrigado do cultivo de coqueiro-anão-verde.....	40
Figura 1.12. Armazenamento de água no solo (h, mm) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.....	42
Figura 1.13. Evapotranspiração de referência (ET _o , mm dia ⁻¹) e Evapotranspiração atual da cultura (ET _c atual, mm dia ⁻¹) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.....	43
Figura 1.14. Coeficiente de cultura (K _c) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.	50

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Localização dos sítios experimentais.....	62
Figura 2.2. Instrumentos utilizados e separação dos frutos para quantificação dos componentes de produtividade dos experimentos de açaizeiro (A), coqueiro-anão-verde (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D).	67
Figura 2.3. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s ⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ , m ³ m ⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de açaizeiro, Castanhal – PA.....	68
Figura 2.4. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s ⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ , m ³ m ⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de coqueiro-anão-verde, Santa Izabel do Pará – PA.	69
Figura 2.5. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s ⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ , m ³ m ⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de lima ácida, Capitão-Poço – PA.....	70
Figura 2.6. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s ⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ , m ³ m ⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de cacaueiro, Vitória do Xingu – PA.....	71

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1. Localização e período experimental dos sítios de estudo.	25
Tabela 1.2. Distribuição dos períodos chuvoso e menos chuvoso nos sítios experimentais.	27
Tabela 1.3. Atributos granulométrico, físicos e hídricos do solo das áreas de estudo.....	27
Tabela 1.4. Tipo de sistema de irrigação, pressão de serviço, vazão e eficiência do sistema de irrigação dos sítios experimentais.....	28
Tabela 1.5. Sensores instalados nas torres micrometeorológicas presentes nos sítios experimentais.....	29
Tabela 1.6. Resultados estatísticos por meio do teste de Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,05$), das interações entre os tratamento e períodos analisados de evapotranspiração de cultura dos sítios experimentais.....	46

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1. Localização e período experimental dos sítios de estudo.	62
Tabela 2.2. Área total (ha), espaçamento (m) e idade (anos) das culturas experimentais durante a realização do estudo.....	62
Tabela 2.3. Atributos granulométrico, físicos e hídricos do solo das áreas de estudo.....	63
Tabela 2.4. Massa fresca de frutos (MF, kg planta ⁻¹), evapotranspiração atual ($ET_{c\text{ atual}}$, m ³) e produtividade da água (Pa, kg m ⁻³) do açaizeiro irrigado e não irrigado.	72
Tabela 2.5. Número de frutos (NF, frutos planta ⁻¹), volume de água de coco (Ac, L planta ⁻¹), evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c\text{ atual}}$, m ³) e produtividade da água (Pa, m ⁻³) para NF e Ac, do coqueiro-anão-verde irrigado e não irrigado.....	73
Tabela 2.6. Número de frutos (NF, frutos planta ⁻¹), peso de frutos (PF, kg planta ⁻¹), evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c\text{ atual}}$, m ³) e produtividade da água (Pa, m ⁻³) para NF e PF, da lima ácida irrigado e não irrigado.....	74
Tabela 2.7. Número de frutos (NF, frutos planta ⁻¹), número de amêndoas por planta (Nap, amêndoas planta ⁻¹), evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c\text{ atual}}$, m ³) e produtividade da água (Pa, m ⁻³) para NF e Nap, do cacaueiro irrigado e não irrigado.....	75
Tabela 2.8. Peso de amêndoas frescas (Paf, g planta ⁻¹), Peso de amêndoas secas (Pas, g planta ⁻¹), evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c\text{ atual}}$, m ³) e produtividade da água (Pa, g m ⁻³) para Paf e Pas, do cacaueiro irrigado e não irrigado.....	76

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.1. REFERÊNCIAS	17
2. CAPÍTULO 1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DE FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL	22
2.1. INTRODUÇÃO.....	23
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	25
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
2.4. CONCLUSÃO.....	52
2.5. REFERÊNCIAS	52
3. CAPÍTULO 2 – PRODUTIVIDADE DA ÁGUA EVAPOTRANSPIRADA EM FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL	59
3.1. INTRODUÇÃO.....	60
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	61
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.4. CONCLUSÃO.....	77
3.5. REFERÊNCIAS	77

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A fruticultura brasileira tem se destacado nos últimos anos. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) de 2022, dentre algumas destas frutíferas, o Brasil é o 4º maior produtor de coco (2.744.418 t/fruto), representando cerca de 4% da produção mundial. Na produção de limão e lima ácida, o Brasil é o 6º maior produtor (1.632.109 t/fruto), representando cerca de 7% desta produção mundial. Na produção de cacau, o Brasil está em 7º lugar (273.873 t/amêndoas), representando 5% da produção mundial (FAO, 2022). Outro fruto de importância brasileira é o açaí, no entanto, ressalta-se que o site da FAO ainda não dispõe de dados de produção em escala mundial.

O Brasil também possui um mercado significativo de exportação para outros países destes frutos e seus derivados. O coco in natura e seus derivados como o coco desidratado e óleo de coco, totalizaram 779 toneladas exportadas. Produtos provenientes da cacauicultura, como amêndoas, manteiga, gordura, óleo, pasta e cacau em pó, registraram cerca de 48.650,90 toneladas exportadas. O limão e a lima ácida registraram 156.253,08 toneladas exportadas (FAO, 2022).

Em escala nacional, o açaizeiro desempenha um grande papel socioeconômico na região norte do país (Sousa et al., 2021). Dentre os estados brasileiros de notoriedade na produção frutífera, o estado do Pará destaca-se nos últimos anos como líder na produção de açaí, representando 93% da produção nacional (1.576.302 t/frutos). Ademais, o Pará é o segundo maior produtor de amêndoas de cacau (138.471 t/amêndoas), representando 48% da produção nacional. Por outro lado, o estado ocupa a quarta posição na produção de coco e limão, com 9% (172.251 mil frutos) e 4% (67.275 t/frutos) da produção nacional, respectivamente (IBGE, 2023). Diante disso, há grandes perspectivas frente ao crescimento da fruticultura paraense, que se apresenta de forma promissora, tanto no segmento de frutas exóticas quanto regionais, devido à crescente demanda nacional e internacional desses frutos.

Em meio ao destaque nacional na produção, o estado do Pará também possui um mercado de exportação desses frutos e seus derivados. Entre o ano de 2023 e junho de 2024, o estado exportou 78.840 kg de polpa de açaí. No que diz respeito aos produtos da cocoicultura, como cocos frescos ou secos, dessecados, endocarpo e água de coco, o total exportado foi de 55.709 kg. Para os frutos frescos ou secos de limão e limas, o estado exportou um total de 3.941.663 kg. Quanto ao cacau, o estado exportou 301.024 toneladas de cacau inteiro ou partido, em bruto ou torrado, enquanto seu derivado, o cacau em pó, teve uma exportação de 3.932 kg (ComexStat, 2024).

Diante deste cenário, tem-se a tendência da aplicação de melhores tecnologias que busquem a modernização do cultivo destas culturas de importância econômica para a região

Amazônica, com a finalidade de promover o aumento de produtividade. Entre essas tecnologias, a irrigação é uma das principais ferramentas para complementar a disponibilidade hídricas na agricultura, proporcionando ao solo maior teor de umidade, para que assim, seja suprido a demanda hídrica das culturas durante períodos de escassez de chuvas, possibilitando o aumento de produtividade, viabilizando a produção e atendendo o mercado (Brito et al., 2016).

A irrigação agrícola está entre os maiores usos de água em todo o mundo e, de acordo com projeções, a demanda hídrica pode aumentar em até 50% até 2030 (Branquinho et al., 2024; Santos et al., 2023). Esse alto consumo hídrico é agravado pelo gasto excessivo e baixa eficiência dos sistemas de irrigação. Isso se deve a erros na determinação da quantidade adequada de água para as plantas, ao uso de métodos e sistemas de irrigação ineficientes e à falha dos irrigadores em aplicar a irrigação de forma eficaz (Santos et al., 2023).

No Brasil há cerca de 8,5 milhões de hectares irrigados, que nas últimas duas décadas culminaram no aumento de 640 para 965 m³/s, o que equivale a 50% da retirada total de água no país em 2020 entre os usos consultivos setoriais de água (ANA, 2020). Estes usos de água no país, variam de acordo com as técnicas e tecnologias empregadas em cada sistema e cultivo, que pode suprir a deficiência parcial ou total de uma cultura local, dependendo de fatores, como solo, clima, relevo e outras variações (Santos et al., 2023).

Sendo assim, é essencial a busca por técnicas que possibilitem maximizar o uso deste sistema de manejo, diante da crescente necessidade de suplementação hídrica na agricultura, de forma a promover a redução de custo operacional e impactos ao meio ambiente, visando assim, alcançar o uso da irrigação rentável e sustentável (Branquinho et al., 2024). Dentre essas técnicas, a quantidade de água a ser irrigada é uma das considerações fundamentais no manejo de irrigação (Santos et al., 2023). Sua quantificação pode ser realizada a partir da determinação da necessidade hídrica da cultura, baseando-se nas características da planta, localização, fase de desenvolvimento e condições climáticas (Santos et al., 2022).

Para garantir um alto rendimento agrícola e o fornecimento adequado de água, é fundamental compreender a necessidade hídrica ou evapotranspiração da cultura (ET_c) (Sousa et al., 2021). A demanda evaporativa da atmosférica é determinada por diversas variáveis meteorológicas, como radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento. Por outro lado, a ET_c depende de fatores adicionais, como tipo de cultura, a duração de ciclo de crescimento, o desenvolvimento do dossel, a umidade do solo na zona radicular, profundidade e a distribuição radicular (Scarpore et al., 2022). Portanto, tanto a demanda atmosférica quanto a ET_c podem variar entre diferentes regiões, épocas do ano e culturas distintas.

A evapotranspiração de cultura é uma variável primordial para o cálculo e monitoramento do uso da água em diferentes período e regiões (Sousa et al., 2021). Pode ser

calculada por diversos métodos, os quais variam em sofisticação, praticidade e custo, desde a simples correção de temperatura (Blaney Criddle) até estimativas que utilizam dados de energia da radiação e os parâmetros climáticos, como a equação de Penman (Al-Kazragy, 2020). Dentre as várias técnicas, tem-se a lisimetria (Miranda et al., 2007; Sousa et al., 2011), a covariância de vórtices (Ortega-Farias et al., 2010), o balanço energético baseado no método da razão de Bowen (Carvalho et al., 2024; Sousa et al., 2021) e o balanço hídrico do solo (Lai et al., 2023; Li et al., 2019).

Determinar a evapotranspiração em cultivos de frutíferas é um desafio significativo devido à desuniformidade das suas copas e ao fato de seus sistemas radiculares serem fortemente desenvolvidos (Silva et al., 2015). O método do balanço hídrico no solo (BHS) tem sido amplamente utilizado para estimar a evapotranspiração de diversas culturas agrícolas (Djaman et al., 2022; Silva et al., 2015; Srivastava et al., 2016; Srivastava et al., 2018). É um método simples e de grande aplicabilidade para estimar a perda de água do solo em cultivos, levando em consideração a evaporação de água do solo e a transpiração como componentes principais (Srivastava et al., 2018). Além disto, esse método é de baixo custo em comparação com outros, pois requer poucos sensores, é simples de usar e requer poucos dados (Lai et al., 2023; Srivastava et al., 2018).

O balanço hídrico do solo (BHS) é definido como a contabilização de fluxos hídricos (entrada e saída) em um determinado volume de solo, durante um certo período. Este controle de solo ou volume de controle, depende da cultura, sendo necessário englobar seu sistema radicular (Libardi, 2005). Os modelos de BHS fundamentam-se em representações teóricas de uma parcela finita do ciclo da água. Sua abordagem requer informações de entrada, tais como a taxa de esgotamento da água do solo na zona radicular, a precipitação pluviométrica, a drenagem e irrigação (Allen et al., 2015; Campos et al., 2016; Srivastava et al., 2018).

O cálculo do BHS é muito complexo, devido ao movimento da água no solo ser um processo multidirecional. Sendo assim, a precisão dos resultados depende da qualidade do sensor para medir o conteúdo de água no solo (Sharma et al., 2017). Há diversas técnicas disponíveis para medir automaticamente a dinâmica de água no solo como, tensiômetros, sondas de Reflectometria no domínio do tempo (TDR), sondas de Reflectometria no domínio da frequência (FDR), sonda Diviner 2000 e sondas de nêutrons (Sharma et al., 2017; Souza et al., 2018; Matsunaga et al., 2022). Dentre estas, a Reflectometria no domínio do tempo é a mais popular mundialmente, devido sua flexibilidade e precisão, possibilitando quantificar informações de BHS em diferentes ecossistemas (Li et al., 2019).

Os sensores do tipo TDRs constituem um método indireto para determinar o conteúdo de água no solo (Souza et al., 2018). Uma das principais vantagens desses sensores é suprir a

necessidade de análises laboratoriais, como o método gravimétrico (método direto), ao fornecer informações automáticas em tempo real (Moura et al., 2020). Esses sensores são ferramentas úteis para medição do BHS em escala de parcela e com intervalos de menos de uma hora (Srivastava et al., 2016). A medição de umidade no solo por meio desses sensores é relativamente simples, rápida, não destrutiva, causa pouca perturbação ambiental e possibilita automação da aquisição de dados (Cruz et al., 2019; Lai et al., 2023; Srivastava et al., 2018).

Os sensores baseados na técnica de Reflectometria no domínio do tempo (TDR) operam por meio da propagação de ondas eletromagnéticas através de hastes condutoras inseridas no solo (Cruz et al., 2019). Essa abordagem se fundamenta nas propriedades dielétricas do solo, sendo que o valor dielétrico da água é superior ao da matriz seca do solo e do ar, essa diferença permite uma maior polarização entre as moléculas de água e os elétrons (Moura et al., 2020). O sensor mede o tempo de propagação da onda eletromagnética desde o início da sonda até o ponto final, que é emitido no solo por meio das hastes do sensor (Souza et al., 2018). Sendo assim, a partir de informações de conteúdo de água no solo e demanda hídrica da cultura é possível compreender e potencializar o uso da água na agricultura irrigada.

Posto isso, informações de produtividade da água (Pa) é uma forma que possibilita gerenciar o aumento da agricultura irrigada (Ghrab et al., 2017). Na agricultura, a produtividade da água pode ser definida como a relação entre produtividade física e a quantidade de água envolvida na produção agrícola (Miranda et al., 2019). A Pa pode ser calculada em relação à quantidade de água evapotranspirada pela cultura, ao total de água utilizada pela cultura ou à quantidade de água aplicada na irrigação (Ali e Talukder, 2008; Mbava et al., 2020).

Portanto, informações de Pa baseadas em pesquisas são fundamentais para o desenvolvimento de práticas de manejo da irrigação agrícola. Elas auxiliam na avaliação e na criação de novas técnicas de gestão hídrica, especialmente em cenários de escassez de água (Tarkalson et al., 2022). Assim, o conhecimento da Pa permite otimizar o uso da água e reduzir o déficit ou o excedente hídrico de uma cultura, garantindo uma suplementação adequada e contribuindo para a sustentabilidade no uso dos recursos hídricos (Carvalho et al., 2024).

Sendo assim, considerando a busca no entendimento da gestão eficiente do recurso hídrico na irrigação agrícola, é necessário estudos com soluções de baixo custo e informações técnicas que auxiliem no planejamento e gestão dos recursos hídricos, compatibilizando os diversos usos a níveis locais e regionais (Silva et al., 2015). Diante disso, essa pesquisa objetivou determinar a evapotranspiração de cultura e a produtividade da água em frutíferas de importância econômica na Amazônia.

Para isso a dissertação foi dividida em dois capítulos:

Capítulo 1 – Evapotranspiração e coeficiente de cultura de frutíferas de importância econômica na Amazônia Oriental

Objetivo Específico: (a) Realizar o balanço hídrico do solo nos agrossistemas em frutíferas de importância econômica na Amazônia; (b) Determinar a evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) diária e o consumo hídrico de frutíferas de importância econômica na Amazônia; (c) Determinar o coeficiente de cultura (K_c) de frutíferas de importância econômica na Amazônia.

Capítulo 2 – Produtividade da água evapotranspirada em frutíferas de importância econômica na Amazônia Oriental

Objetivo Específico: (a) Quantificar os componentes de produtividade (C_p) produtividade de frutíferas de importância econômica na Amazônia; (b) Calcular a evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) de frutíferas de importância econômica na Amazônia; (c) Calcular a produtividade da água (P_a) em frutíferas de importância econômica na Amazônia.

1.1. REFERÊNCIAS

ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production-A synthesis. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 11, p. 1201–1213, 2008.

AL-KAZRAGY, M. O. Evapotranspiration and irrigation water requirements evaluation of chinarak area using asce penman-monteith method. **Iraqi journal of agricultural sciences**, v. 51, n. 3, p. 816–828, 2020. Disponível em: <https://jcoagri.uobaghdad.edu.iq/index.php/intro/article/view/1037>.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO**, Rome, v.300, n.9, p.D05109, 1998.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura online: Uso da água**, 2020.

BRANQUINHO, R.; BRIGA-SÁ, A.; RAMOS, S.; SERÔDIO, C.; PINTO, T. Sustainable Irrigation Systems in Vineyards: A Literature Review on the Contribution of Renewable Energy Generation and Intelligent Resource Management Models. **Electronics (Switzerland)**, v. 13, n. 12, p. 1–18, 2024.

BRITO, S. Brasil está entre os países com maior área irrigada do mundo. Brasília – DF: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2016. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticia/-/noticia/12990229/brasil-esta-entre-os-paises-com-maior-area-irrigada-do-mundo> >. Acesso em: 02 abr. 2023.

CAMPOS, I.; BALBONTÍN, C.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; GONZÁLEZ-DUGO, M. P.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A. Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. **Agricultural Water Management**, v. 165, p. 141–152, 2016.

CARVALHO, E. de O. T. de; FERNANDES, G. S. T.; RUA, M. L.; MONTEIRO, A. C.; DA LUZ, D. B.; LISBOA, S. P. P.; DA SILVA, J. V. F.; PINTO, J. V. de N.; DE MIRANDA, F. R.; LINS, P. M. P.; DE SOUZA, P. J. de O. P. Net radiation partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of the green dwarf coconut in Santa Izabel do Pará, Brazilian Amazon. **Bragantia**, v. 83, e20230160, p. 1–15, 2024.

CARVALHO, E. de O. T. de; FERNANDES, G. S. T.; RUA, M. L.; MONTEIRO, A. C.; SILVA, J. V. F. da; VELAME, M. de L. A.; PINTO, J. V. de N.; LINS, P. M. P.; MIRANDA, F. R. de; SOUZA, P. J. de O. P. de. Water productivity in irrigated coconut palms in humid tropical climate conditions in eastern Brazilian Amazon. **Ciência Rural**, v. 54, n. 11, p. 1–9, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782024001100351&tlng=en.

CRUZ, R. O. da R.; OLIVEIRA, B. R. de; COELHO, E. F.; FREITAS, F. T. O. de; QUEIROZ, L. de A. Determinação Do Número Médio De Leituras Com TDR Para Estimativa Da Umidade Do Solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 3, p. 3435–3443, 2019.

Comex Stat. SISTEMA OFICIAL PARA EXTRAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS DO COMÉRCIO EXTERIOR BRASILEIRO DE BENS, **Dados por Municípios, 2024**. Disponível em: < <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/municipio> >.

DJAMAN, K.; KOUDAHE, K.; SAIBOU, A.; DARAPUNENI, M.; HIGGINS, C.; IRMAK, S. Soil Water Dynamics, Effective Rooting Zone, and Evapotranspiration of Sprinkler Irrigated Potato in a Sandy Loam Soil. **Agronomy**, v. 12, n. 4, p. 1–18, 2022.

FAO. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **Crops and livestock products**, 2022. Disponível em: < <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> >

GHRAB, M.; MASMOUDI, M. M.; MECHLIA, N. Ben. Water productivity in fruit trees orchards under water Scarcity. **Acta Horticulturae**, v. 1150, p. 317–322, 2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Produção Agrícola Municipal**, 2024. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado> >.

LAI, Y.; TIAN, J.; KANG, W.; GUO, S.; ZHOU, Y.; HE, C. Estimating evapotranspiration from soil moisture using the improved soil water balance method in cold mountainous areas. **Journal of Hydrology X**, v. 20, n. 222, p. 100154, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2023.100154>.

LI, Z.; LIU, H.; ZHAO, W.; YANG, Q.; YANG, R.; LIU, J. Quantification of soil water balance components based on continuous soil moisture measurement and the Richards equation in an irrigated agricultural field of a desert oasis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 11, p. 4685–4706, 2019.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed. Edusp, 2005.

MBAVA, N.; MUTEMA, M.; ZENGENI, R.; SHIMELIS, H.; CHAPLOT, V. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105878, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105878>.

MIRANDA, F. R. de; ROCHA, A. B. S.; GUIMARÃES, V. B.; SILVA, E. S. DA; LIMA, G. D. C. M.; SANTOS, M. M. S. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA IRRIGAÇÃO DO COQUEIRO ANÃO. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 109–124, 2019. Disponível em: <http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3567>.

MIRANDA, F. R.; GOMES, A. R. M.; OLIVEIRA, C. H. C.; MONTENEGRO, A. A. T.; BEZERRA, F. M. L. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do coqueiro-anão-verde na região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.2, p.129–135, 2007.

MATSUNAGA, W. K.; SILVA, V. D. P. D.; AMORIM, V. P.; SALES, E. S.; DANTAS, S. M.; OLIVEIRA, A. B. Evapotranspiration, crop coefficient and water use efficiency of onion cultivated under different irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 219-225, 2022.

MOURA, V. B.; SOUSA, D. de P.; NUNES, H. G. G. C.; COSTA, D. L. P.; SOUZA, P. J. de O. P. de. Calibração e estimativa da umidade no latossolo amarelo distrófico pela Time Domain

Reflectometry na Amazônia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 3, p. 3997–4009, 2020. Disponível em: <https://inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/1108>.

ORTEGA-FARIAS, S.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; BRISSON, N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 276–286, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192309002779>.

SANTOS, B. P.; SIQUEIRA, R. A. G.; VILLAR, J. A. de A.; FREITAS, M. A. V. Agricultura e Irrigação no Brasil no cenário das Mudanças Climáticas. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 1, p. 65–73, 2022.

SANTOS, M. R.; SILVEIRA, B. C. da; SEPULVEDA NETO, C. da S.; PEREIRA, L. B.; FERREIRA, N. C. S. **QIrriga**: Aplicativo para manejo de irrigação via clima. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 44, n. 5, p. 1789–1804, 2023. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/48922>.

SCARPARE, F. V.; RAJAGOPALAN, K.; LIU, M.; NELSON, R. L.; STÖCKLE, C. O. Evapotranspiration of Irrigated Crops under Warming and Elevated Atmospheric CO₂: What Is the Direction of Change. *Atmosphere*, v. 13, n. 2, p. 1-19, 2022.

SHARMA, H.; SHUKLA, M. K.; BOSLAND, P. W.; STEINER, R. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 81–91, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 1–10, 2015.

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. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5–22, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. A.; CAMPECHE, L. F. M. S.; BARROS, A. C.; SILVA, V. de P. R. da; AZEVEDO, P. V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.

15, n. 5, p. 526–532, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n5/v15n5a14.pdf>.

SOUZA, C. F.; DA SILVA, C. R.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; COELHO, E. F. monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, v. 1, n. 01, p. 26, 2018. Disponível em: <http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/1603>.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; CHAKRABORTY, A.; HALDER, D. Comparison of actual evapotranspiration of irrigated maize in a sub-humid region using four different canopy resistance-based approaches. **Agricultural Water Management**, v. 202, p. 156–165, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.021>.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; HALDER, D. Effective crop evapotranspiration measurement using time-domain reflectometry technique in a sub-humid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1211–1225, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1841-7>.

TARKALSON, D. D.; KING, B. A.; BJORNEBERG, D. L. Maize grain yield and crop water productivity functions in the arid Northwest U.S. **Agricultural Water Management**, v. 264, 2022.

2. CAPÍTULO 1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DE FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

A determinação dos coeficientes de cultura (K_c) para frutíferas amazônicas é essencial para adaptar o manejo da irrigação às demandas específicas de cada cultura e região. Com isso, é possível otimizar o uso da água, garantir maior eficiência hídrica e contribuir para a sustentabilidade agrícola. Com isso, objetivou-se determinar a evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) e o coeficiente de cultivo (K_c) de frutíferas de importância econômica na Amazônia, em condições irrigada e não irrigada. O estudo foi conduzido em plantios comerciais de açaizeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.), coqueiro-anão-verde (*Cocos nucifera* L.), lima ácida (*Citrus latifolia*, T.) e cacaueiro seminal (*Theobroma cacao* L.). Em cada sítio experimental foram instaladas torres micrometeorológicas para a obtenção dos dados meteorológicos de radiação global, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, conteúdo volumétrico de água no solo e precipitação pluviométrica. A evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) foi calculada a partir do balanço hídrico do solo seguindo a metodologia proposta por Libardi, utilizando os sensores de conteúdo de água no solo, inseridos horizontalmente nas profundidades de 10, 30 e 50 cm do solo. O coeficiente de cultura (K_c) foi calculado a partir da razão entre $ET_{c \text{ atual}}$ e a evapotranspiração de referência. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com parcela subdividida, sendo, dois tratamentos (irrigado e não irrigado) e dois períodos de acompanhamento (chuvoso e menos chuvoso), e as repetições consistiram nos dados pontuais diários, que foram submetidas aos testes de Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,05$). Durante o período chuvoso (PC), não houve diferenças nas médias de $ET_{c \text{ atual}}$ entre os tratamentos para todas as frutíferas estudadas. No entanto, no período menos chuvoso (PMC), o tratamento irrigado resultou em médias de $ET_{c \text{ atual}}$ mais elevadas em comparação ao tratamento não irrigado. Ao comparar os períodos, observou-se que, no tratamento irrigado, as médias de $ET_{c \text{ atual}}$ de todas as frutíferas foram maiores durante o PMC em relação ao PC. No tratamento não irrigado, apenas o coqueiro-anão-verde e a lima ácida apresentaram médias de $ET_{c \text{ atual}}$ superiores no PMC, enquanto as médias de $ET_{c \text{ atual}}$ do açaizeiro e do cacaueiro foram menores no PMC, em relação ao PC. A evapotranspiração obtida para todas as frutíferas estudadas foi inferior à evapotranspiração de referência. Consequentemente, todos os valores de coeficiente de culturas obtidos nas condições experimentais analisadas foram menores do que 1. A implantação do sistema de irrigação proporcionou suporte hídrico às frutíferas estudadas durante os períodos de menor ocorrência de chuva, atendendo à maior demanda atmosférica durante o período menos chuvoso.

PALAVRAS-CHAVES: Demanda hídrica, Fruticultura, Balanço de água no solo.

CHAPTER 1 – EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENT OF ECONOMICALLY IMPORTANT FRUIT TREES IN THE EASTERN AMAZON

ABSTRACT

Determining crop coefficients (K_c) for Amazonian fruit trees is essential for adapting irrigation management to the specific demands of each crop and region. This makes it possible to optimize water use, ensure greater water efficiency and contribute to agricultural sustainability. The aim

of this study was to determine the current crop evapotranspiration ($ET_{c \text{ atual}}$) and crop coefficient (K_c) of economically important fruit trees in the Amazon, in irrigated and non-irrigated conditions. The study was conducted in commercial plantations of açazeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.), dwarf-green coconut palm (*Cocos nucifera* L.), acid lime (*Citrus latifolia*, T.) and seminal cacao tree (*Theobroma cacao* L.). Micrometeorological towers were installed at each experimental site to obtain meteorological data on global radiation, air temperature and humidity, wind speed, volumetric soil water content and rainfall. Current crop evapotranspiration ($ET_{c \text{ atual}}$) was calculated from the soil water balance following the methodology proposed by Libardi, using soil water content sensors inserted horizontally at depths of 10, 30 and 50 cm in the soil. The crop coefficient (K_c) was calculated from the ratio between current $ET_{c \text{ atual}}$ and reference evapotranspiration. The design used was entirely randomized (DIC), with subdivided plots, two treatments (irrigated and non-irrigated) and two monitoring periods (rainy and less rainy), and the repetitions consisted of the daily point data, which were subjected to the Kruskal-Wallis and Wilcoxon-Mann-Whitney test ($p < 0.05$). During the rainy season (PC), there were no differences in the $ET_{c \text{ atual}}$ averages between the treatments for all the fruit trees studied. However, in the less rainy period (PMC), the irrigated treatment resulted in higher $ET_{c \text{ atual}}$ averages compared to the non-irrigated treatment. When comparing the periods, it was observed that, in the irrigated treatment, the $ET_{c \text{ atual}}$ averages of all fruit trees were higher during the PMC compared to the PC. In the non-irrigated treatment, only the green dwarf coconut palm and the acid lime had higher $ET_{c \text{ atual}}$ averages in the PMC, while the $ET_{c \text{ atual}}$ averages of the açai palm and the cacao palm were lower in the PMC compared to the PC. The evapotranspiration obtained for all the fruit trees studied was lower than the reference evapotranspiration. Consequently, all the crop coefficient values obtained in the experimental conditions analyzed were less than 1. The implementation of the irrigation system provided water support for the fruit trees studied during the periods of less rainfall, meeting the greater atmospheric demand during the less rainy period.

KEYWORDS: Water demand, Fruit growing, Soil water balance.

2.1. INTRODUÇÃO

A irrigação é uma prática essencial para a intensificação agrícola, permitindo o aumento de produtividade e complementando o cultivo em regiões com distribuição irregular de chuvas (Carvalho et al., 2024). No entanto, a agricultura intensiva é um dos principais impulsionadores da demanda global de água, sendo responsável por 70% do consumo hídrico mundial (Capellari;

Capellari, 2018; Fito e Van Hulle, 2021). No Brasil, apesar da grande disponibilidade hídrica, com 13,7% da água doce do planeta, esse recurso tem sido utilizado de forma pouco racional, resultando em degradação, desperdício e perda de qualidade (Capellari e Capellari, 2018).

Neste contexto, o entendimento das relações hídricas entre os sistemas solo-planta-atmosfera é fundamental para a quantificação das necessidades hídricas de uma cultura durante o seu desenvolvimento (Bergamaschi e Matzenauer, 2014). Informações sobre a necessidade hídrica das culturas é uma das principais referências para o uso eficiente da irrigação (Silva et al., 2015). É representado pela combinação entre dois processos, a evaporação do solo e a transpiração das culturas, que somados representam a evapotranspiração da cultura (Allen et al., 1998).

Em um sistema agrícola irrigado, é crucial dispor de informações sobre a necessidade de água ou evapotranspiração de uma determinada cultura, pois essa é uma variável fundamental para o cálculo e monitoramento do uso da água em diferentes períodos (Sousa et al., 2021). A evapotranspiração da cultura (ET_c) representa a quantidade de água consumida por uma cultura durante seu desenvolvimento, sendo um indicativo da quantidade de água que deve ser reposta ao solo, equivalente a quantidade evapotranspirada pela planta em condições ótimas de disponibilidade de água (Doorenbos e Pruitt, 1977; Pereira et al., 2013).

O balanço hídrico do solo (BHS) é uma metodologia utilizada para estimar a evapotranspiração, que tem como vantagem sua aplicabilidade em sistemas de cultivo (Srivastava et al., 2018). A ET_c pode ser calculada a partir da mensuração direta dos componentes do BHS ao longo do tempo, dentro do volume do solo, sendo o monitoramento do conteúdo de água no solo a principal variável (Libardi, 2005; Silva et al., 2015). A dinâmica da água dentro do sistema solo-planta-atmosfera varia conforme a disponibilidade hídrica, as características do solo, a demanda evaporativa do ar e a capacidade da cultura de absorver a água do solo (Allen et al., 1998).

Devido à complexidade e às dificuldades associadas à medição da ET_c , essa variável pode ser estimada utilizando o produto da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente de cultura (K_c) (Silva, 2020). O K_c é determinado pela razão entre a ET_c e a ET_o , correlacionando essas variáveis com a fase de desenvolvimento da cultura e as condições climáticas do local de estudo (Schwenck et al., 2020). No entanto, a determinação do K_c deve ser realizada para cada região e cultura específica, pois não pode ser utilizado de forma universal, devido as diferenças existentes nas características climáticas e de uma cultura para outra, os quais influenciam nos valores desse coeficiente (Alves et al., 2017).

A determinação da ET_c de uma cultura, assim como seu K_c é crucial para o manejo eficiente da irrigação. O consumo hídrico das culturas varia conforme as características

fenológicas, as condições climáticas de cada localidade, a demanda atmosférica e a disponibilidade de água no solo (Srivastava et al., 2016; Carvalho et al., 2024). Com essas informações, é possível quantificar a necessidade hídrica de uma cultura ao longo de seu ciclo de desenvolvimento, auxiliando na gestão e manejo da água no plantio.

Isso permite otimizar a gestão hídrica, reduzindo o déficit ou excesso hídrico, promovendo uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos na agricultura. O planejamento adequado ajuda o produtor maximizar sua produção com menor custo e evitar o uso excessivo da água, comprometendo a sustentabilidade do recurso hídrico (Bergamaschi e Matzenauer, 2014; Santos et al., 2022).

O objetivo desse estudo foi determinar a evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) e o coeficiente de cultivo (K_c) de frutíferas de importância econômica na Amazônia, em condições irrigada e não irrigada.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Caracterização das áreas de estudo

O estudo foi conduzido em plantios comerciais de açaizeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.), cultivar BRS – Pará, coqueiro-anão-verde (*Cocos nucifera* L.), cultivar anão-verde-do-brasil-de-jiqui (AVeBrJ), lima ácida (*Citrus latifolia*, T.), cultivar Tahiti e cacauero seminal (*Theobroma cacao* L.). Esses plantios estão distribuídos em quatro municípios do estado do Pará, conforme descrito na Tabela 1.1, juntamente com seus respectivos períodos experimentais e ilustrados na Figura 1.1.

Tabela 1.1. Localização e período experimental dos sítios de estudo.

Cultivo	Município	Coordenadas	Período experimental
Açaizeiro	Castanhal	1° 19' 24,48" S e 47° 57' 38,20" W	2018 - 2019
Coqueiro-anão-verde	Santa Izabel do Pará	1° 13' 40,35" S e 48° 02' 56,23" W	2023 – 2024
Lima ácida	Capitão Poço	1° 46' 55" S e 47° 06' 31" W	Jul/2023 – Dez/2024
Cacauero	Vitoria do Xingu	03° 09' 47,22" S e 52° 06' 58,46" W	Set/2023 – Dez/2024

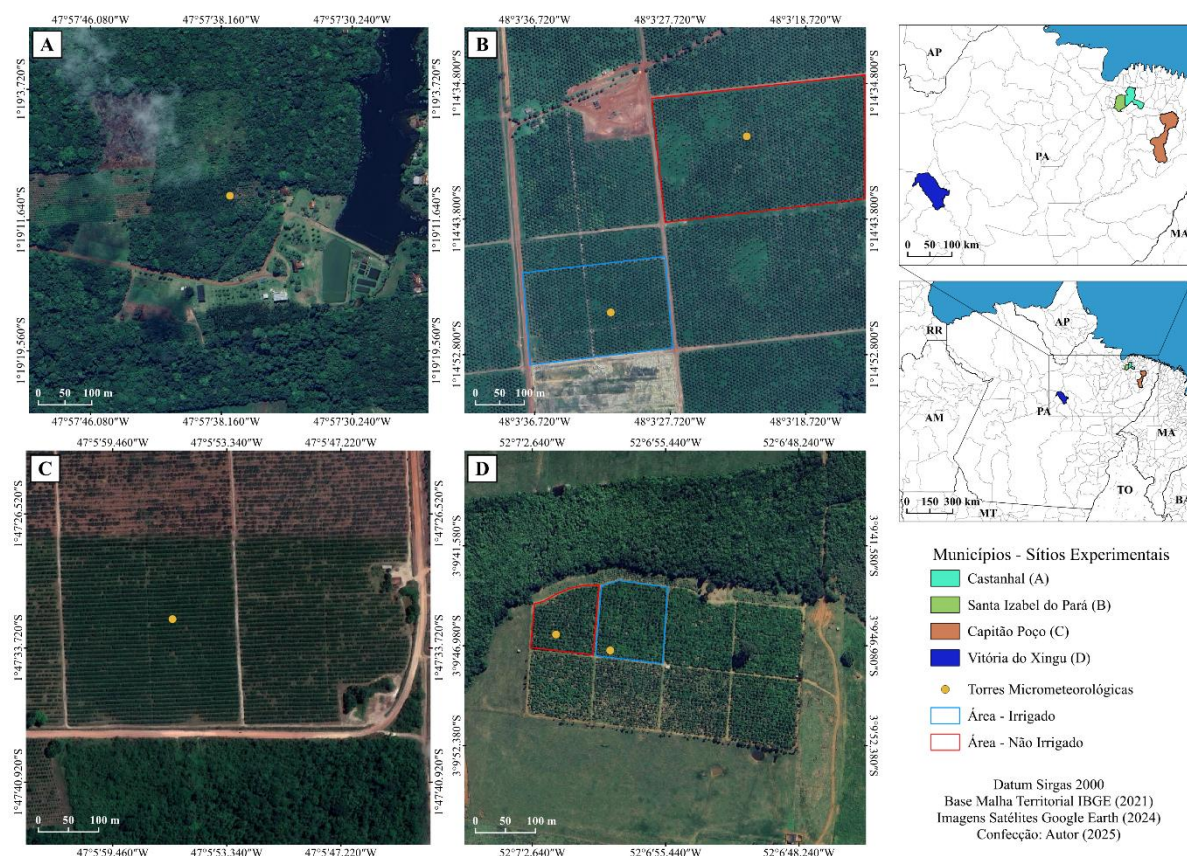


Figura 1.1. Localização dos sítios experimentais.

O cultivo de açaieiro abrangia uma área de 0,3 hectares, manejado com três estipes por touceira, em espaçamento de 4 x 4 m. Ao final do período de estudo, as plantas tinham 8 anos de idade e em média 12 m de altura. No experimento com lima ácida, as plantas de limeiras ácidas Tahiti foram enxertadas em porta-enxertos de Citrumelo swingle (*X Citroncirus spp.*). A área cultivada abrange 100 hectares, com espaçamento de 3 x 5 m, e no início do estudo, as plantas tinham 14 anos de idade e em média 4 m de altura. Quanto ao cultivo de cacauieiro, ele ocupa uma área de 10 hectares, com espaçamento de 3 x 3 m e no início do estudo, as plantas tinham 5 anos de idade e altura média de 3,84 m.

O cultivo de coqueiro-anão-verde foi dividido em duas áreas, pertencentes às mesmas classe de solo: irrigada, que abrangendo 7 hectares e com plantas de 10 anos de idade; não irrigada, abrangendo 19,47 hectares e com plantas de 12 anos de idade, tendo altura média de 7,30 m. Ambas as áreas possuem espaçamento em arranjo triangular de 7,5 m x 7,5 m x 7,5 m e foram implantadas juntamente com kudzu tropical (*Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth.), uma leguminosa herbácea perene, que auxilia na cobertura vegetal do solo. Na Figura 1.2 são ilustradas as áreas experimentais.

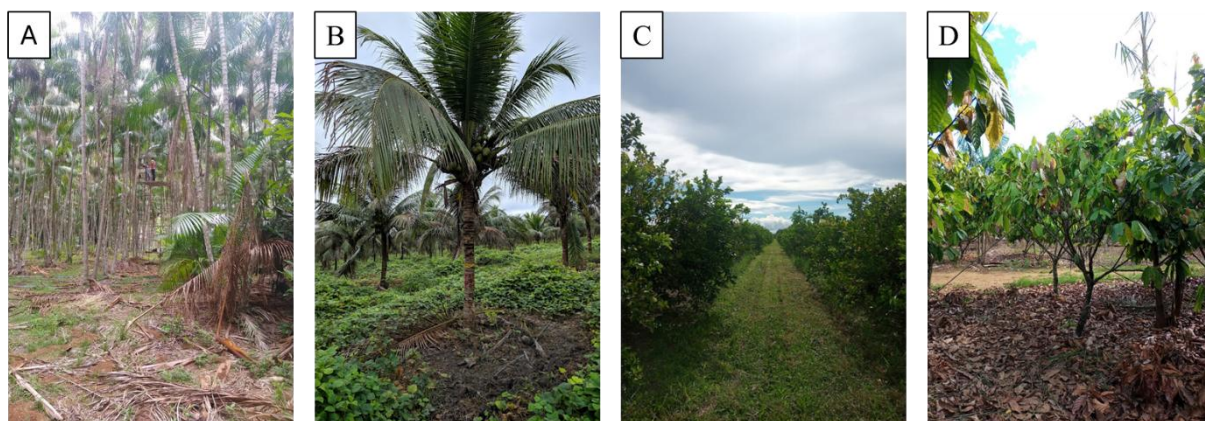


Figura 1.2. Sítios experimentais em plantios comerciais de açazeiro (A), coqueiro-anão-verde (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D).

De acordo com a classificação de Köppen, o tipo climático dos sítios experimentais é Am, sendo considerado tropical úmido. Nos sítios de estudo, a temperatura média anual é em torno de 26°C. Nos cultivos localizadas em Castanhal e Santa Izabel do Pará, a precipitação pluviométrica média anual é acima de 2.000 mm, enquanto que, em Capitão Poço e Vitória do Xingu, a precipitação pluviométrica média anual é de 1.848 e 1.914 mm, respectivamente (Alvares et al., 2013). Os períodos mais e menos chuvosos para cada sítio experimental são destacados na Tabela 1.2, de acordo com Souza et al., 2017.

Tabela 1.2. Distribuição dos períodos chuvoso e menos chuvoso nos sítios experimentais.

Cultivo	Período	
	Chuvoso	Menos chuvoso
Açazeiro	Dezembro - Maio	Junho - Novembro
Coqueiro-anão-verde	Dezembro - Julho	Agosto - Novembro
Lima ácida	Dezembro - Maio	Junho - Novembro
Cacaueiro	Dezembro - Maio	Junho - Novembro

O solo das áreas experimentais é classificado como Latossolo Amarelo franco arenoso no cultivo de açazeiro, Latossolo Amarelo Distrófico Argissólico para os cultivos de coqueiro e lima ácida e Argissolo fraco argiloso, para o cacaueiro (EMBRAPA, 2018, IBGE, 2023). Nas áreas experimentais, foram coletadas amostras de solo indeformadas nas profundidades de 00-20 cm e 20-40 cm para análise dos atributos granulométricos, físicos e hídricos. Os atributos hídricos das áreas experimentais de coqueiro, lima ácida e cacaueiro foram estimados com base nos dados granulométricos do solo, conforme adaptações na metodologia de Assad et al. (2001). Os atributos granulométrico, físicos e hídricos podem ser observados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3. Atributos granulométrico, físicos e hídricos do solo das áreas de estudo.

Atributos Físicos e Hídricos	Açazeiro	Coqueiro-anão-verde		Lima ácida	Cacaueiro
		Irrigado	Não irrigado		

	0 – 40 cm	0 – 40 cm	0 – 40 cm	0 – 40 cm	0 – 40 cm
Areia (%)	81	68	75	68	40
Silte (%)	10	19	17	11	7
Argila (%)	9	13	8	21	53
θ Ds ¹ (g cm ⁻³)	1,59	1,59	1,43	1,58	1,47
θ CC ² (cm ³ cm ⁻³)	0,28	0,19	0,15	0,20	0,30
θ PMP ³ (cm ³ cm ⁻³)	0,08	0,10	0,07	0,11	0,18
θ crítica ⁴ (cm ³ cm ⁻³)	0,17	0,13	0,11	0,12	0,18

¹Densidade do solo; ²Umidade na capacidade de campo, ³Umidade no ponto de murcha permanente, ⁴Umidade crítica do solo.

2.2.2. Tratamentos e Irrigação

Os tratamentos foram definidos com base na disponibilidade hídrica do solo, diferenciando entre plantas irrigadas e não irrigadas. A lâmina de irrigação foi calculada a partir da evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO 56) (Allen et al., 1998). Os cultivos de açaizeiro e cacaueiro foram irrigados diariamente, aplicando-se 100% da ET_o diária. Enquanto os cultivos de coqueiro e lima ácida, a irrigação foi realizada de segunda a sábado. No coqueiro, a lâmina de irrigação foi calculada pelo produto entre a ET_o e o K_c de 1,06 para o ciclo de produção obtido por Carvalho et al. (2024). No cultivo de lima ácida, a lâmina aplicada foi de 3,57 mm por planta, definida com base no estudo de Pinto et al. (2023), que apontou que tal lâmina é adequada para alcançar a capacidade de campo na região, considerando 100% da ET_o. O tipo de sistema de irrigação, pressão de serviço, vazão e eficiência do sistema podem ser observados na Tabela 1.4.

Tabela 1.4. Tipo de sistema de irrigação, pressão de serviço, vazão e eficiência do sistema de irrigação dos sítios experimentais.

Cultivo	Sistema de irrigação	Pressão de serviço	Vazão	Eficiência
Açaizeiro	Microaspersão	5,5 mca	34 L h ⁻¹	94%
Coqueiro-anão-verde	Microaspersão	-	96 L h ⁻¹	86%
Lima ácida	Gotejamento	-	3 L h ⁻¹	85%
Cacaueiro	Microaspersão	10 mca	10 L h ⁻¹	86%

Para os cultivos de açaizeiro e coqueiro, utilizou-se 1 emissor por planta, posicionado a 40 cm do açaizeiro e 100 cm do coqueiro. No cultivo de lima ácida, cada planta possuía 6 gotejadores, enquanto no cacaueiro foi utilizado 1 emissor por planta, com linha de irrigação disposta a 3 metros da linha de plantio. Os cultivos de açaizeiro, coqueiro-anão-verde e lima ácida foram irrigados durante o período menos chuvoso, enquanto no cultivo de cacaueiro, a irrigação foi realizada ao longo do ano, mantendo a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

2.2.3. Obtenção de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir de torres micrometeorológicas instaladas em cada sítio experimental. No cultivo de açaizeiro e lima ácida, uma torre foi utilizada para todos os tratamentos, com alturas respectivas de 17 e 10 metros. No cultivo de coqueiro-anão-verde e cacaueiro, uma torre foi instalada para cada tratamento, com alturas respectivas de 12 e 6 metros. Os sensores utilizados em todas as torres de estudo estão descritos na Tabela 1.5 e ilustrados na Figura 1.3 e 1.4.

Tabela 1.5. Sensores instalados nas torres micrometeorológicas presentes nos sítios experimentais.

Variável meteorológica	Instrumento/Fabricante/Modelo	Nível dos sensores (m)
Temperatura (Tar) e Umidade relativa do ar (UR)	Termohigrômetro (HMP155A, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,1 acima do dossel
Radiação solar global (Rg)	Piranômetro (CMP6, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,1 acima do dossel
Precipitação Pluviométrica (PP)	Pluviômetro (TB4, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,1 acima do dossel
Conteúdo volumétrico de água no solo (θ) – Para o cultivo com açaizeiro	Reflectômetro do conteúdo de água (CS616, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,2 e 0,4 horizontalmente e 0,3 verticalmente abaixo da superfície do solo
Conteúdo volumétrico de água no solo (θ)	Reflectômetro do conteúdo de água (CS615, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,1; 0,3 e 0,5 horizontalmente abaixo da superfície do solo
Velocidade do Vento	Anemômetro de Cúpula (03002, R. M. YOUNG, Traverse City, MI, USA)	2,1 acima do dossel

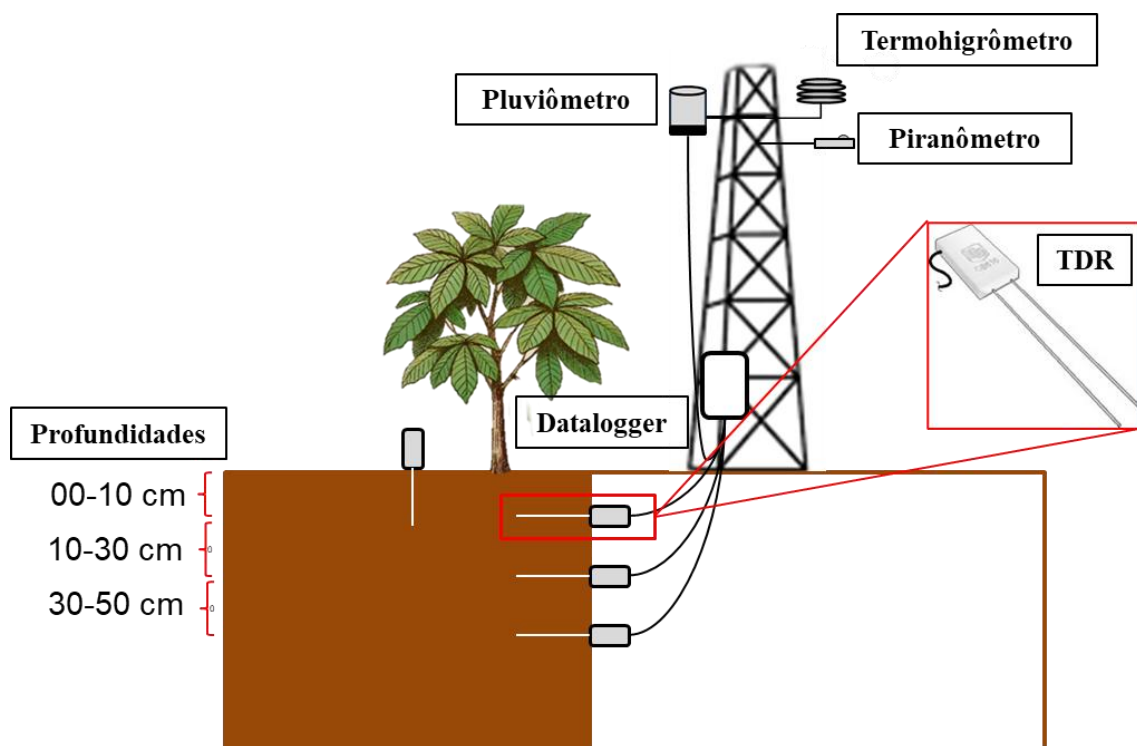


Figura 1.3. Esquema ilustrativo da disposição dos sensores nos sítios experimentais.

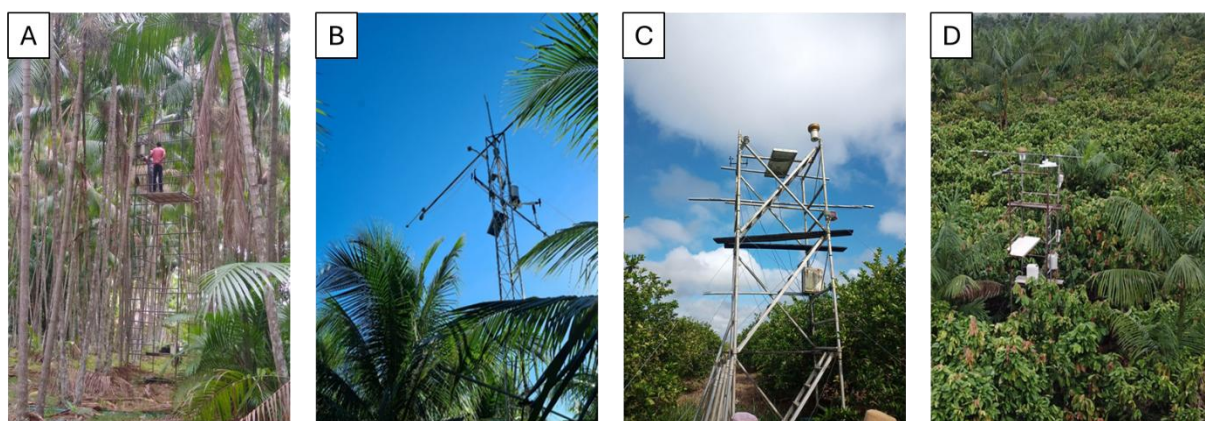


Figura 1.4. Torres micrometeorológicas instaladas nos sítios experimentais de açaizeiro (A), coqueiro-anão-verde (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D).

Os dados de conteúdo volumétrico de água foram obtidos por sensores tipo TDR, inseridos horizontalmente no solo nas profundidades de 10, 30 e 50 cm, a 1 m de distância da planta de monitoramento, conforme a Figura 1.2 e ilustração de instalação em campo da Figura 1.5. Ressalta-se que, no experimento com açaizeiro, os sensores foram inseridos horizontalmente no solo nas profundidades de 20 e 40 cm no tratamento irrigado e verticalmente em profundidade de 30 cm no tratamento não irrigado por questões técnicas e limitação instrumental.



Figura 1.5. Instalação de sensores tipo TDRs em campo para obtenção de dados de conteúdo volumétrico de água no solo.

Todos os sensores foram conectados a um sistema de armazenamento de dados datalogger, sendo o modelo CR10x (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) utilizado para o cultivo de coqueiro-anão-verde e o modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) para os cultivos de açaizeiro, lima ácida e cacaueiro. A programação dos datalogger foi configurada para realizar leituras instantâneas a cada 10 segundos e registrar de médias e totais a cada 20 minutos.

2.2.4. Armazenamento de água do solo (h)

O armazenamento de água do solo (h) foi calculado pela Regra do Trapézio (Libardi, 2005) (Eq. 1.1).

$$h_L = \int_0^L \theta(Z) dZ \cong [0,5 * \theta(Z_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta(Z_i) + 0,5 * \theta(Z_n)] * \Delta Z \quad (1.1)$$

Em que: h_L representa o armazenamento de água para uma determinada profundidade (mm), $\theta(Z)$ é o conteúdo volumétrico do solo de cada camada e ΔZ é a espessura das camadas do solo.

A variação do armazenamento de água no solo (Δh) foi calculada pela diferença entre os valores de armazenamento obtidos nos tempos inicial e final do período de monitoramento (Libardi, 2005) (Eq. 1.2).

$$\Delta h = h(\text{final}) - h(\text{inicial}) \quad (1.2)$$

Em que: Δh é a variação de água no solo (mm) e h é o armazenamento de água do solo (mm).

2.2.5. Condutividade hidráulica do solo saturado (K_s)

Para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) foi realizado ensaios de infiltração com Infiltrômetro de anel duplo em cada sítio experimental (Figura 1.6) próximo a planta em que estava sendo monitorado com os sensores tipo TDR sem influência da cobertura

vegetal, seguindo a metodologia proposta por Brandão et al. (2006). Feito isto, os valores provenientes do teste foram aplicados a equação proposta por Soto et al. (2017) (Eq. 1.3).



Figura 1.6. Teste de infiltração no sítio experimental

$$K_s = \left(Z_w * \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \right) \quad (1.3)$$

Em que: K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado; Z_w é a profundidade de frente de saturação (cm); H_1 e H_2 são a profundidade inicial da água no anel e no tempo zero, respectivamente; t é o tempo entre duas leituras.

2.2.6. Drenagem interna (D) e ascensão capilar (AC)

A drenagem interna (D) e ascensão capilar (AC) no perfil do solo monitorado foi estimada com base na equação de Darcy – Buckingham (Eq. 1.4).

$$q_z = -K(\theta) * \nabla \phi_t \quad (1.4)$$

Em que: q_z é a densidade de fluxo de água no solo na profundidade Z (mm); $\nabla \phi_t$ é o gradiente de potencial total na direção vertical (cm cm^{-1}); $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica não saturada do solo (mm), obtida pela equação proposta por Van Genuchten (1980) (Eq. 1.5), sendo $m = 1-1/n$ (Mualem, 1976):

$$K(\theta) = K_s \omega^\ell \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (1.5)$$

na qual

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1.6)$$

Em que: $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica não saturada do solo (mm); K_s é a condutividade hidráulica do solo saturada (mm); ω é a umidade efetiva do solo; ℓ é um parâmetro empírico que foi estimado por Mualem (1976) como sendo aproximadamente igual

a 0,5 para a maioria dos solos; θ é o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s é o conteúdo de água no solo na saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r é o conteúdo residual de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Para a obtenção do gradiente potencial total na direção vertical ($\nabla\phi_t$), foram instalados tensiômetros próximo a planta monitorada, nas profundidades de 40 e 50 cm no cultivo de açaizeiro, 30 e 60 cm no cultivo de coqueiro e 20 e 40 cm no cultivo de lima ácida e cacaueiro. Os sensores de tensiometria foram instalados com o auxílio de um trado tipo parafuso, cujo diâmetro era de 20 mm. As leituras de tensão foram realizadas diariamente com tensímetro digital. O potencial matricial foi calculado a partir da Equação 1.7.

$$\phi = (Z + h_1 - L) * 0,0981 \quad (1.7)$$

Em que: ϕ é o potencial matricial (kPa); Z é a distância entre a cápsula porosa e a superfície do solo (m); h_1 é a altura de água acima da superfície no tensiômetro (m) e L é a leitura do tensímetro (mca).

2.2.7. Evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$)

A evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) foi calculada a partir do balanço hídrico do solo, de acordo com a metodologia proposta por Libardi (2005) (Eq. 1.8).

$$ET_{c \text{ atual}} = \Delta h - P - I - D - AC \quad (1.8)$$

Em que: $ET_{c \text{ atual}}$ é a evapotranspiração atual da cultura (mm dia^{-1}); Δh é a variação de água no solo (mm); P é a precipitação pluviométrica (mm); I é a lâmina de irrigação (mm); D é a drenagem interna (mm) e AC é a ascensão capilar (mm).

2.2.8. Déficit de pressão de vapor (DPV)

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado pela equação proposta por Tetens (1930), a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar (Eq. 1.9, 1.10 e 1.11).

$$es = 0,611 * 10^{\frac{7,5*Tar}{237,3+Tar}} \quad (1.9)$$

$$ea = \frac{es*UR}{100} \quad (1.10)$$

$$DPV = es - ea \quad (1.11)$$

Em que: es é a pressão de saturação de vapor de água (kPa); ea é a pressão parcial do vapor d'água (kPa), Tar é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e UR é a umidade relativa do ar (%).

2.2.9. Evapotranspiração de referência (ET_o)

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada a partir da metodologia de Penman-Monteith (FAO 56) (Allen et al., 1998) (Eq. 1.12). Os dados utilizados para estimar a ET_o foram obtidos de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET), localizadas no município de cada experimento. A exceção foi para os dados calculados para o cultivo de coqueiro-anão-verde, que foram obtidos a partir de uma estação meteorológica automática de superfície localizada na sede da empresa Sococo, a cerca de 2 km da área experimental.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1.12)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 é a velocidade do vento (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor do ar (kPa); Δ é a declinação da curva de saturação do vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

2.2.10. Coeficiente de cultura (K_c)

O coeficiente de cultura (K_c) foi calculado a partir da determinação da $ET_{c \text{ atual}}$ e ET_o , conforme a Eq. 1.13.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1.13)$$

Em que: K_c é o coeficiente de cultura; $ET_{c \text{ atual}}$ é a evapotranspiração atual da cultura e ET_o é a evapotranspiração de referência.

2.2.11. Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com parcela subdividida, sendo, dois tratamentos de manejo de água (irrigado e não irrigado) e dois períodos de acompanhamento (chuvoso e menos chuvoso), e as repetições consistiram nos dados pontuais diários de $ET_{c \text{ atual}}$. Os dados de $ET_{c \text{ atual}}$ coletados foram submetidos a teste de normalidade e homoscedasticidade, e caso não atendido os pressupostos da ANOVA, será aplicado os testes não-paramétricos de Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados monitorados nas torres micrometeorológicas da área experimental a média de temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR) durante o período experimental no cultivo de açazeiro foram de $28,2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,6$) e $87,9\%$ ($\pm 5,7$), respectivamente (Figura 1.7A). No sítio experimental de coqueiro-anão-verde, a média de T e UR foram respectivamente de $28,5^{\circ}\text{C}$ e $89,5\%$ ($\pm 4,3$) no tratamento irrigado, enquanto no tratamento não irrigado foi de $26,1$

°C ($\pm 0,9$) e 88,1% ($\pm 5,1$) (Figura 1.7B). Para a lima ácida, a Tar média foi de 27,3 °C ($\pm 0,8$) e a UR foi de 80,1% ($\pm 9,1$) (Figura 1.7C). No cacaueiro, a Tar média foi de 27,9 °C ($\pm 1,3$) e a UR foi de 82,3% ($\pm 6,7$) (Figura 1.7D).

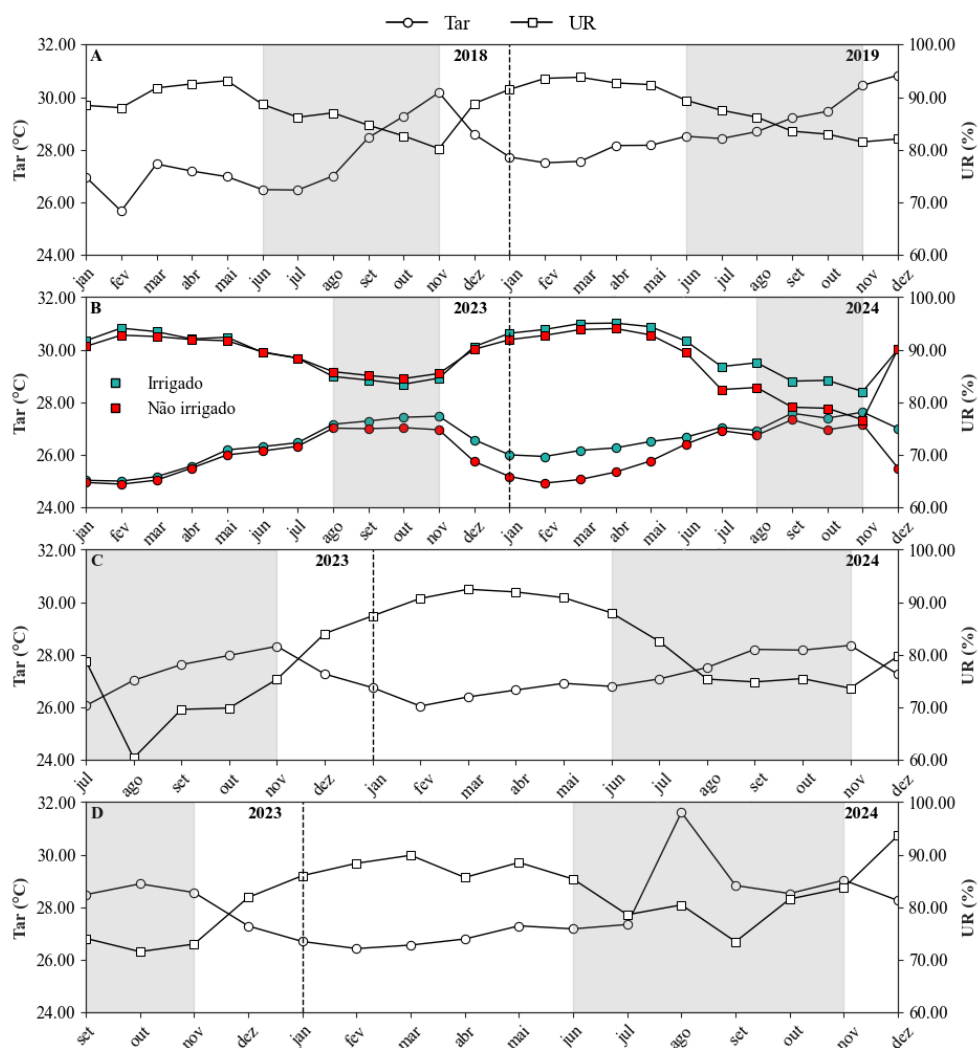


Figura 1.7. Temperatura do ar (Tar, °C) e Umidade relativa do ar (UR, %) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

As médias de temperatura do ar mostraram-se mais elevadas durante o período menos chuvoso (PMC) em relação ao período chuvoso (PC). Os aumentos registrados foram de 3,0% no açazeiro, 4,8% no coqueiro irrigado, 5,5% no coqueiro não irrigado, 2,9% na lima ácida e 6,2% no cacaueiro. (Figura 1.7). Em contrapartida, as médias de umidade relativa do ar foram menores no PMC, em comparação ao PC. As reduções observadas foram de 6,3% no açazeiro, 8,2% no coqueiro irrigado, 9,5% no coqueiro não irrigado, 15,0% na lima ácida e 11,1% no cacaueiro. (Figura 1.7)

No cultivo de açazeiro, a média de radiação global (Rg) foi de 16,8 MJ m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,3$) e o déficit de pressão de vapor d'água (DPV) obtido teve média de 0,5 kPa ($\pm 0,2$) (Figura 1.8A). A média do Rg no sítio experimental de coqueiro-anão-verde foi de 15,5 MJ m⁻² dia⁻¹

($\pm 2,5$) no tratamento irrigado e $17,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 2,2$) no tratamento não irrigado (Figura 1.8B). A média obtida de DPV do coqueiro irrigado foi de $0,4 \text{ kPa}$ ($\pm 0,2$), enquanto no não irrigado foi de $0,5 \text{ kPa}$ ($\pm 0,2$) (Figura 1.8B).

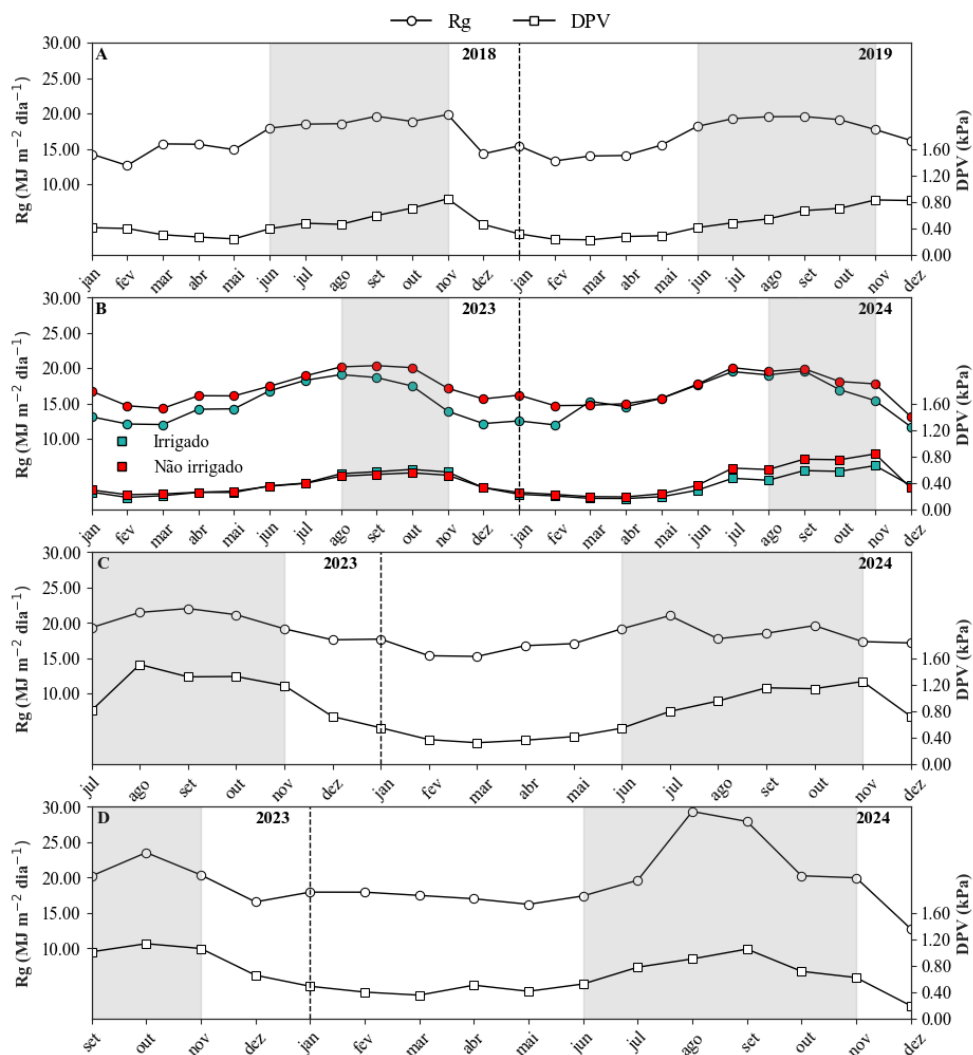


Figura 1.8. Radiação solar global (R_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) no cultivo de açaizeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

No plantio de lima ácida a média registrada de R_g foi de $15,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 3,9$), enquanto a média de DPV foi de $0,9 \text{ kPa}$ ($\pm 0,4$) (Figura 1.8C). No cacaueiro, a R_g média foi de $18,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 2,0$) e o DPV foi de $0,7 \text{ kPa}$ ($\pm 0,3$) (Figura 1.8D). O R_g durante o PMC apresentou médias que foram 28,9%, 20,9%, 19,0%, 17,9% e 33,3% superiores ao PC, nos respectivos cultivos de açaizeiro, coqueiro (no tratamento irrigado e não irrigado), lima ácida e cacaueiro (Figura 1.8).

Da mesma forma, nestes mesmos cultivos, o DPV, apresentou médias durante o PMC que foram, respectivamente, 66,7%, 103,8%, 113,3%, 118,0% e 97,7% superior ao PC (Figura 1.8). Os menores valores de radiação global registrados no período chuvoso estão associados à

elevada ocorrência de nebulosidade, a qual promove a dispersão da radiação solar, resultando em uma redução significativa de sua intensidade na superfície terrestre (Souza et al., 2018).

As médias de velocidade do vento (U) foram de $0,6 \text{ m s}^{-1} (\pm 0,2)$, $0,9 \text{ m s}^{-1} (\pm 0,4)$, $1,5 \text{ m s}^{-1} (\pm 0,5)$ e $1,0 \text{ m s}^{-1} (\pm 0,8)$, nos sítios experimentais de açaizeiro, coqueiro (sensor apenas na torre do tratamento não irrigado), lima ácida e cacaueiro, respectivamente (Figura 1.9). As médias de velocidade do vento (U) nos sítios experimentais durante o PMC foram 37,0%, 57,5%, 63,6% e 23,3% superiores ao PC, nos respectivos cultivos de açaizeiro, coqueiro, lima ácida e cacaueiro (Figura 1.9).

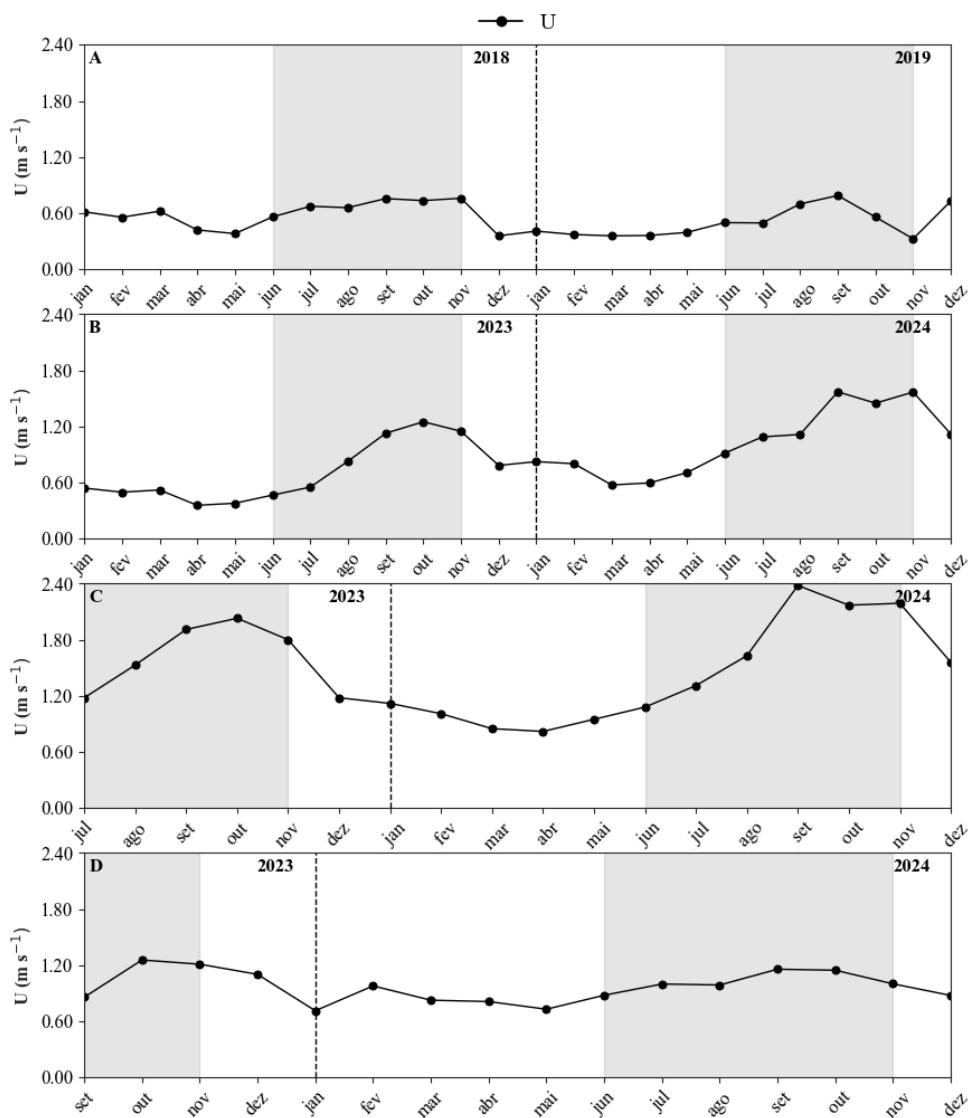


Figura 1.9. Velocidade do vento (U , m s^{-1}) no cultivo de açaizeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

De modo geral, nos diferentes cultivos analisados, observou-se que as variáveis meteorológicas Temperatura do ar, Radiação global, Déficit de pressão de vapor e velocidade do vento apresentaram padrões semelhantes. Durante o período menos chuvoso, todas essas

variáveis foram consistentemente superiores em relação ao período chuvoso (Figura 1.7, 1.8 e 1.9) com exceção da umidade relativa do ar, que apresenta um padrão contrário em todas as áreas experimentais (Figura 1.7).

No cultivo de açaizeiro a precipitação pluviométrica (PP) total durante o período experimental foi de 4.724,5 mm, dos quais 74,8% ocorreram durante o PC (3.527,8 mm) e 25,3% ocorreram durante o PMC (1.196,7 mm), representando uma redução de 66,1% no volume de chuva quando comparado ao período chuvoso. O total de lâmina de irrigação aplicada durante o experimento no tratamento irrigado foi de 396,6 mm (Figura 1.10A).

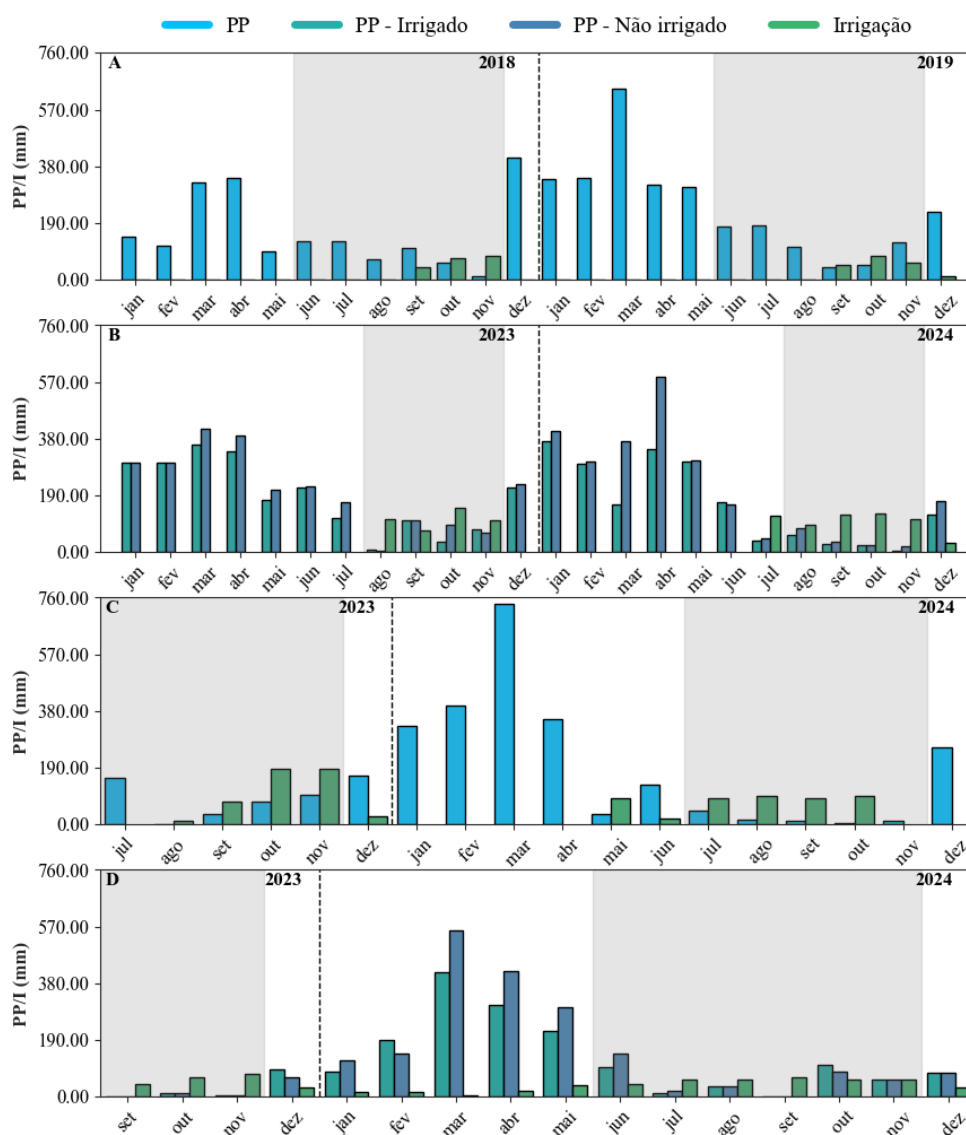


Figura 1.10. Precipitação pluviométrica (PP, mm) e Irrigação (I, mm) no cultivo de açaizeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

No cultivo de coqueiro irrigado, a PP totalizou 4.172,9 mm, sendo 91,9% registrado durante o PC (3.834,7 mm) e 8,1% durante o PMC (338,2 mm), representando uma redução de 91,2% entre os períodos. Enquanto no tratamento não irrigado, a PP total durante o período de

estudo foi de 5.015,6 dos quais, 91,4% (4.585,3 mm) ocorreram durante o PC e 8,6% (430,3 mm) durante o PMC, sendo equivalente a uma redução de 90,6% do volume de chuva entre os períodos. Na área com irrigação, a lâmina total de irrigação foi de 1.049,0 mm (Figura 1.10B).

Na área experimental cultivada com lima ácida, a PP total foi de 2.874,4 mm, sendo 79,4% ocorrido durante o PC (2.281,8 mm) e 20,6% durante o PMC (592,6 mm), correspondendo uma redução de 74,0% entre os períodos. No tratamento com irrigação, a lâmina total aplicada foi de 973,8 mm (Figura 1.10C). No cultivo de cacauzeiro com tratamento irrigado, o total de PP foi de 1.728,6 mm, sendo 80,6% registrado durante o PC (1.393,3 mm) e 19,4% durante o PMC (335,3 mm), representando uma redução de 75,9%. A lâmina total de irrigação foi de 687,7 mm. Enquanto, no tratamento não irrigado a PP total foi de 2.060,0 mm, sendo 78,3% deste total registrado no PC (1.692,5 mm) e 17,8% no PMC (367,5 mm) (Figura 1.10D).

Para o experimento com açazeiro entre os meses de janeiro a março de 2018, o fenômeno global El Niño-Oscilação Sul (ENOS) estava em sua fase fria (La Niña). Após esse período, houve uma fase de neutralidade no ENOS até agosto, quando se iniciou a fase quente do ENOS (El Niño), que predominou até o mês de julho de 2019 (NOAA, 2025). Após esse período, a neutralidade se manteve até o fim do experimento em dezembro de 2019. Para os demais cultivos, cujo período experimental compreendeu os anos de 2023 a 2024, o fenômeno predominante foi o El Niño, que teve início em junho de 2023 e se estendeu até abril de 2024. A partir de então, o ENOS entrou novamente em fase de neutralidade até dezembro de 2024 (NOAA, 2025).

De modo geral, durante o período estudado (junho de 2023 a abril de 2024), a Amazônia esteve sob a influência do El Niño (2023-24) de intensidade moderada a forte, causando um aumento nas áreas de seca extrema na região Norte (INMET, 2024). O fenômeno El Niño impacta significativamente os padrões climáticos da Bacia amazônica, que experimenta anomalias no ciclo sazonal das chuvas, com episódios de seca intensa e persistente (Jiménez-Muñoz et al., 2016). Portanto, os impactos desse fenômeno foram evidentes durante o período menos chuvoso, quando houve reduções nos índices pluviométricos superiores a 65% nos locais dos cultivos estudados (Figura 10).

No cultivo de açazeiro irrigado, o conteúdo volumétrico de água (θ) na camada de 0-30 cm obteve média de $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) durante o PC e $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) durante o PMC, correspondendo a uma redução de 25,00%. No tratamento não irrigado, a média de θ na camada de 0-30 cm foi de $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) durante o PC e $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,06$) durante o PMC, reduzindo 32,14% (Figura 1.11A).

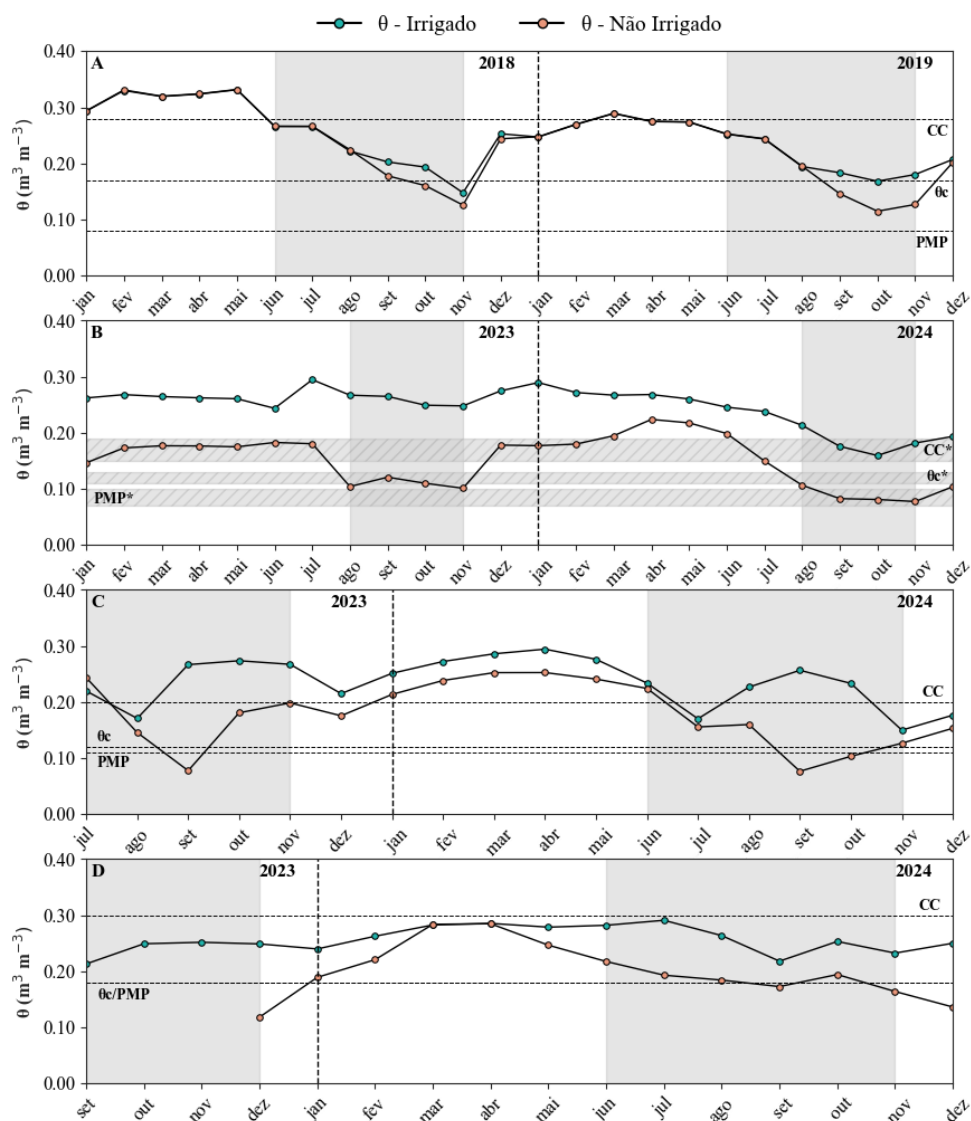


Figura 1.11. Conteúdo volumétrico de água no solo (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no cultivo de açaizeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso. *Marcação indicando a diferença de CC, PMP e θ_c entre os tratamentos irrigado e não irrigado do cultivo de coqueiro-anão-verde.

Na área experimental de coqueiro irrigado, a média de θ entre as três profundidades de solo monitorada (Tabela 1.5), foi de $0,26 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,02$) durante o PC e $0,22 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) no PMC, correspondendo a uma redução de 15,38% (Figura 1.11B). No tratamento não irrigado, a média de θ entre as profundidades foi de $0,18 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,03$) durante o PC e $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,02$) durante o PMC, representando uma redução de 44,44% no θ (Figura 1.11B).

No cultivo de lima ácida, com irrigação, a média de θ entre as profundidades, foi de $0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) durante o PC e $0,22 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) durante o PMC, representando uma redução de 12,00% (Figura 1.11C). No tratamento não irrigado a média de θ foi $0,22 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,04$) durante o PC e $0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ($\pm 0,06$) durante o PMC, correspondendo a uma redução de 31,82% (Figura 1.11C).

No cultivo experimental de cacaueteiro sob tratamento irrigado a média de θ entre as profundidades durante o PC, foi de $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,02$) e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,03$) durante o PMC, resultando em uma redução no θ de 3,85% (Figura 1.11D). No tratamento não irrigado, os sensores TDR foram instalados em dezembro de 2023, quando começou o monitoramento. A média de θ entre as camadas durante o PC foi de $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,07$) e $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,02$) durante o PMC, correspondendo a uma redução no θ de 9,52% (Figura 1.11D).

A variação do armazenamento de água no solo (h) do cultivo de açaizeiro irrigado durante o PC apresentou uma média de $93,63 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 9,14$), enquanto no PMC a média foi de $62,13 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 21,45$), correspondendo a uma redução de 33,64% (Figura 1.12A). No tratamento não irrigado durante o PC, a média de h foi de $93,78 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 9,14$), enquanto no PMC a média foi de $62,28 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 21,45$), sendo 33,58% menor em comparação ao PC. Devido os resultados apresentarem proximidade entre os tratamentos, houve pouca distinção no gráfico de área (Figura 1.12A).

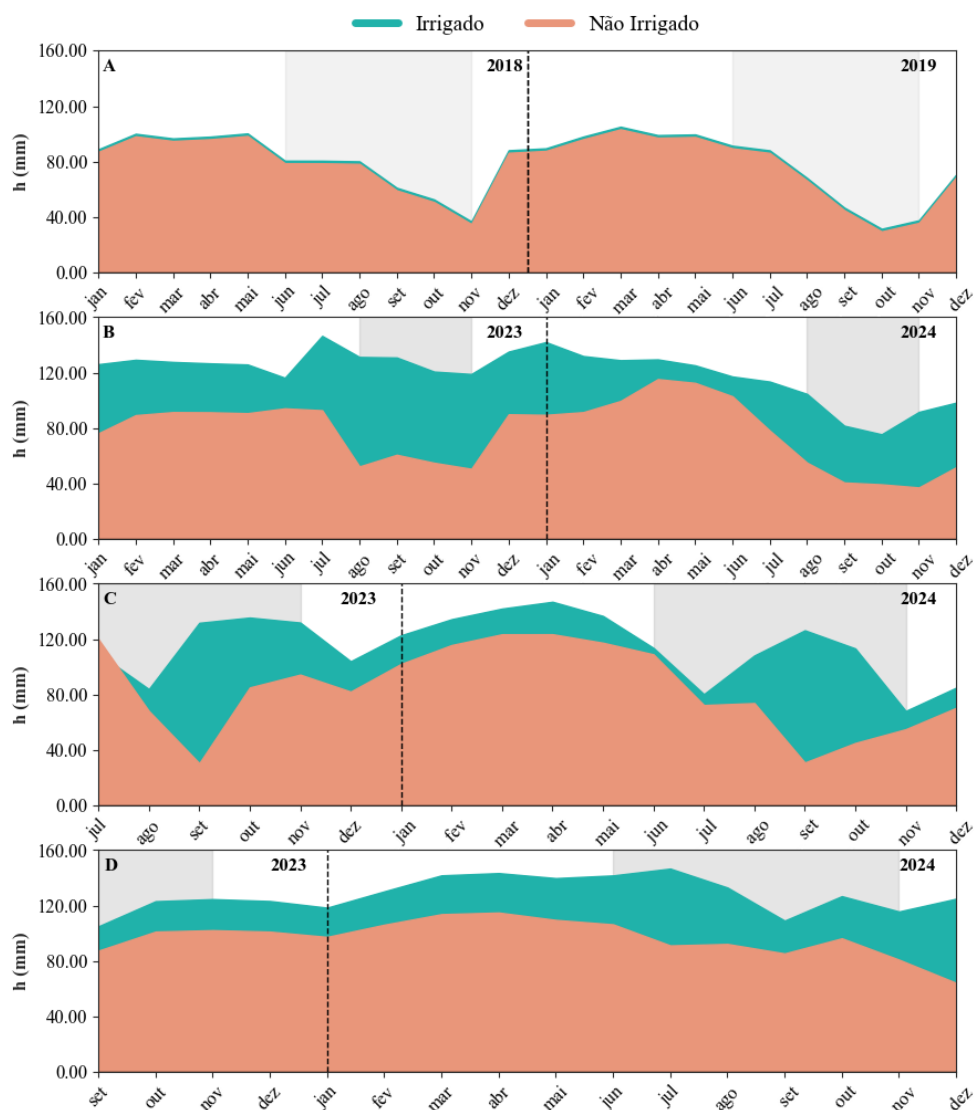


Figura 1.12. Armazenamento de água no solo (h, mm) no cultivo de açaizeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

No cultivo de coqueiro irrigado, a média de h foi de $126,38 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 11,30)$ durante o PC e $107,04 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 21,91)$, representando uma redução de 15,30% entre os períodos (Figura 1.12B). No tratamento não irrigado a média de h foi de $91,24 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 14,62)$ durante o PC e $49,08 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 8,64)$ durante o PMC, representando uma redução de 46,21% no armazenamento de água no solo (Figura 1.12B).

No plantio experimental de lima ácida irrigada, a média de h durante o PC foi de $124,63 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 22,49)$ e $109,46 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 22,79)$ durante o PMC, sendo esta diferença o equivalente a uma redução de 12,17% (Figura 1.12C). Enquanto o tratamento não irrigado, a média foi de $105,10 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 21,11)$ durante o PC e $71,49 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 29,59)$ durante o PMC, resultando em uma redução de 31,98% no h entre os períodos (Figura 1.12C).

A variação de h no cultivo de cacaueiro sob tratamento irrigado durante o PC apresentou média de $132,82 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 9,97)$ e durante o PMC obteve média de $125,21 \text{ mm dia}^{-1} (\pm 13,93)$,

resultando em uma redução de 5,01% entre os períodos (Figura 1.12D). No tratamento não irrigado a média de h durante o PC foi de 101,22 mm dia⁻¹ ($\pm 17,43$) e durante o PMC de 93,93 mm dia⁻¹ ($\pm 8,47$), correspondendo a uma redução de 7,50% no h (Figura 1.12D).

Para os resultados de Evapotranspiração de referência (ET_o) no experimento com açazeiro, durante o período chuvoso a ET_o foi maior durante o PMC, com média de 3,24 mm dia⁻¹ ($\pm 0,25$), sendo 19,56% superior ao PC, que obteve média de 2,71 mm dia⁻¹ ($\pm 0,21$) (Figura 1.13A). Enquanto a evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) acumulada do açazeiro irrigado durante o PC foi de 833,84 mm e de 1.064,34 mm durante o PMC. Enquanto no açazeiro não irrigado, a $ET_{c \text{ atual}}$ acumulada foi de 808,13 mm durante o PC e 729,43 mm durante o PMC (Figura 1.13A).

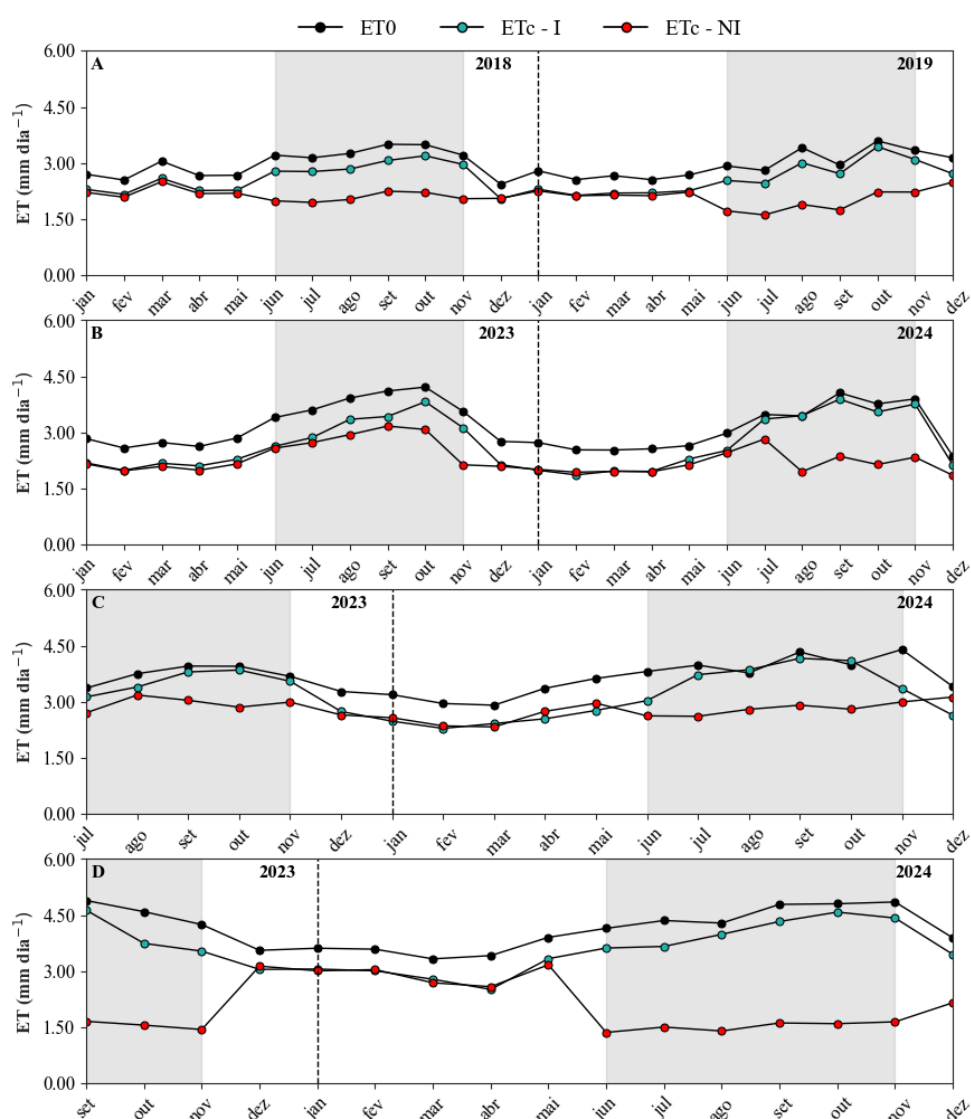


Figura 1.13. Evapotranspiração de referência (ET_o , mm dia⁻¹) e Evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$, mm dia⁻¹) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

Para os resultados de evapotranspiração atual da cultura do açaizeiro, no tratamento irrigado, obteve-se média de $2,29 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,19$) ($36,65 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PC e $2,91 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,28$) ($46,53 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PMC (Figura 1.13A). Nos resultados de $ET_{c \text{ atual}}$ no tratamento não irrigado, obteve-se média de $2,22 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,14$) ($35,52 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PC e $1,99 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,22$) ($31,89 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PMC (Figura 1.13A).

Os valores obtidos de $ET_{c \text{ atual}}$ neste estudo para o açaizeiro irrigado, foram inferiores ao estimado por Sousa et al. (2021) que obtiveram uma média de $3,49 \text{ mm dia}^{-1}$ com consumo diário de $83,76 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ entre as duas safras monitoradas em experimento com açaizeiro de 8 anos de idade no nordeste paraense, utilizando o método da Razão de Bowen. Vale ressaltar que a metodologia da razão de Bowen generaliza os fluxos que ocorrem no agroecossistema, contabilizando o efeito tanto da linha quanto da entrelinha do cultivo na evapotranspiração.

Nessas condições experimentais, o efeito que garante a maior evapotranspiração encontrada por Sousa et al. (2021) pode estar associado a evaporação com à contribuição da entrelinha de plantio. Em contrapartida, o balanço de água no solo é um método de mensuração localizada que desconsidera a contribuição da entrelinha, o que garante maior precisão na determinação da evapotranspiração da cultura principal e justifica os resultados apresentados no presente trabalho (Azevedo et al., 2006; Ortega-Farias et al., 2010).

A média de ET_o obtida a partir da estação automática de superfície localizada na fazenda com coqueiro durante o PC foi de $2,83 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,36$) e $3,87 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,27$) durante o PMC, correspondendo a um aumento de 36,75% (Figura 1.13B). Durante o PC a $ET_{c \text{ atual}}$ acumulada do coqueiro foi de $1.111,73 \text{ mm}$, enquanto durante o PMC foi de $865,42 \text{ mm}$ (Figura 1.13B). No tratamento não irrigado, a $ET_{c \text{ atual}}$ acumulada do coqueiro foi de $1.064,09 \text{ mm}$ durante o PC e $614,02 \text{ mm}$ durante o PMC (Figura 1.13B).

No tratamento com irrigação, a média de $ET_{c \text{ atual}}$ do coqueiro obtida foi $2,28 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,65$) ($111,40 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PC e $3,55 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,73$) ($173,08 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PMC (Figura 1.13B). No tratamento sem irrigação, a média de $ET_{c \text{ atual}}$ foi $2,18 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,58$) ($106,63 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PC e $2,52 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,64$) ($122,80 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) durante o PMC (Figura 1.13B). De modo geral, para o coqueiro-anão-verde foi observado valores de evapotranspiração que variaram de $2,18 \text{ mm dia}^{-1}$ a $3,55 \text{ mm dia}^{-1}$.

Na região nordeste do Brasil utilizando métodos de determinação localizados (lisímetros de pesagem) Sousa et al. (2011) obtiveram $ET_{c \text{ atual}}$ média de $3,90 \text{ mm dia}^{-1}$ com consumo aproximado de $122,19 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ em Sergipe, e Miranda et al. (2007), em estudo no Ceará, obtiveram média de $3,86 \text{ mm dia}^{-1}$ com consumo diário de $94,11 \text{ L planta}^{-1}$ a partir do balanço hídrico do solo. Essas distinções podem estar associadas as próprias características

experimentais, como idade das plantas, condições de clima e de solo, assim como condições meteorológicas.

Para a área experimental com lima ácida a média obtida de ET_o durante o PC foi de 3,25 mm dia⁻¹ ($\pm 0,62$) e durante o PMC foi de 3,91 mm dia⁻¹ ($\pm 0,47$), representando um aumento de 20,31% (Figura 1.13C). No tratamento irrigado a $ET_{c\text{ atual}}$ acumulada da lima ácida foi de 548,02 mm durante o PC e 1.221,60 mm durante o PMC, enquanto no tratamento não irrigado a $ET_{c\text{ atual}}$ acumulada foi de 574,18 mm no PC e 963,53 mm no PMC (Figura 1.13C).

Os valores médios de $ET_{c\text{ atual}}$ da lima ácida obtidos no tratamento irrigado foram 2,56 mm dia⁻¹ ($\pm 0,49$) (38,41 L planta⁻¹ dia⁻¹) durante o PC e 3,67 mm dia⁻¹ ($\pm 0,76$) (54,54 L planta⁻¹ dia⁻¹) durante o PMC (Figura 1.13C). No tratamento não irrigado de lima ácida a média obtida de $ET_{c\text{ atual}}$ foi de 2,68 mm dia⁻¹ ($\pm 0,62$) (40,25 L planta⁻¹ dia⁻¹) durante o PC e 2,87 mm dia⁻¹ ($\pm 0,61$) (43,01 L planta⁻¹ dia⁻¹) durante o PMC (Figura 1.13C). Corroborando os resultados encontrados, Marin et al. (2016) que encontraram valores de evapotranspiração variando entre 0,90 mm dia⁻¹ e 2,80 mm dia⁻¹ para a lima ácida Tahiti, nas condições climática de Piracicaba, São Paulo.

No cultivo de cacaueiro durante o PC a média da ET_o foi 3,62 mm dia⁻¹ ($\pm 0,71$), enquanto no PMC a média foi de 4,53 mm dia⁻¹ ($\pm 0,53$), representando um aumento de 25,14% (Figura 1.13D). Os valores acumulados de $ET_{c\text{ atual}}$ no tratamento irrigado foi de 649,31 mm durante o PC e 1.050,50 mm durante o PMC (Figura 1.13D). No tratamento não irrigado, a $ET_{c\text{ atual}}$ acumulada foi de 605,59 mm durante o PC e de 398,89 mm durante o PMC (Figura 1.13D).

A $ET_{c\text{ atual}}$ do tratamento irrigado apresentou uma média de 3,03 mm dia⁻¹ ($\pm 0,79$) (27,31 L planta⁻¹ dia⁻¹) no PC, e de 4,02 mm dia⁻¹ ($\pm 0,84$) (36,22 L planta⁻¹ dia⁻¹) no PMC (Figura 1.13D). No tratamento não irrigado, a $ET_{c\text{ atual}}$ apresentou média de 2,83 mm dia⁻¹ ($\pm 0,71$) (25,47 L planta⁻¹ dia⁻¹) no PC, enquanto, no PMC a média foi de 1,53 mm dia⁻¹ ($\pm 0,23$) (13,75 L planta⁻¹ dia⁻¹) (Figura 1.13D).

A evapotranspiração para o cacaueiro obtidos neste estudo são superiores ao encontrado por Almeida et al. (2004), que obtiveram uma ET_c de 2,20 mm e um consumo diário de 20,2 L planta dia⁻¹ em um cacaueiro de 12 anos na Bahia, utilizando a metodologia de Thornthwaite & Mather (1955). Essa diferença pode ser atribuída aos métodos distintos de determinação de ET_c e às condições experimentais do trabalho desses autores, como a ausência de irrigação e a irregularidade das chuvas no início do experimento, que resultaram em períodos de redução de água no solo e acentuada redução no armazenamento de água.

Estudos de determinação de ET_c para o cacaueiro foram realizadas por Leite (2013), com cacaueiro irrigado por gotejamento em consórcio, onde o autor obteve lâmina média de ET_c de 3,50 mm dia⁻¹. Silva (2020) em pesquisa desenvolvida com lisímetro de pesagem na

Bahia, obteve média diária de 3,80 mm dia⁻¹ com consumo diário de 34,20 L plnata⁻¹, sendo este resultado semelhante ao encontrado no presente estudo para o cacauzeiro irrigado durante o PMC, onde tais valores de condições atmosféricas como UR e Rg são próximos entre os estudos.

Os dados diários de evapotranspiração de todas as frutíferas estudadas não atenderam aos pressupostos da ANOVA. Assim, realizou-se os testes de Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,05$) para avaliar a significância das diferenças observadas. Durante o PC, não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos irrigado e não irrigado. No entanto, no PMC, a $ET_{c \text{ atual}}$ foi significativamente maior no tratamento irrigado em comparação ao não irrigado ($p < 0,05$). A interação dentro de cada tratamento com os períodos analisados, constatou-se que em ambos os tratamentos, a $ET_{c \text{ atual}}$ foi significativamente maior durante o PMC em relação ao PC, com exceção do cultivo de açaizeiro e cacauzeiro não irrigado, onde, a $ET_{c \text{ atual}}$ foi maior durante o PC em relação ao PMC (Tabela 1.6).

Tabela 1.6. Resultados estatísticos por meio do teste de Kruskal-Wallis e Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,05$), das interações entre os tratamento e períodos analisados de evapotranspiração de cultura dos sítios experimentais.

Evapotranspiração atual da cultura (mm dia ⁻¹)			
Cultivos	Períodos	Tratamentos	
		Irrigado	Não irrigado
Açaizeiro	Chuvoso	2,29 Ab	2,22 Aa
	Menos chuvoso	2,91 Aa	1,99 Bb
Coqueiro	Chuvoso	2,28 Ab	2,18 Ab
	Menos chuvoso	3,55 Aa	2,52 Ba
Lima ácida	Chuvoso	2,56 Ab	2,68 Ab
	Menos chuvoso	3,67 Aa	2,87 Ba
Cacauzeiro	Chuvoso	3,03 Ab	2,83 Aa
	Menos chuvoso	4,02 Aa	1,53 Bb

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e, minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os menores valores de evapotranspiração das frutíferas estudadas durante o PC comparados ao PMC estão relacionados a menor demanda atmosférica durante este período. Apesar do grande volume de chuva manter a umidade do solo o suficiente para suprir a necessidade hídrica da cultura, neste período a condição atmosférica limita as altas taxas de evapotranspiração pela menor demanda por vapor d'água. Isso se dá pela diminuição na intensidade das variáveis como Radiação global (Rg), Temperatura (Tar) e déficit de pressão de vapor (DPV), assim como pelo aumento da umidade relativa do ar (UR), sendo essas condições limitantes para o processo de evapotranspiração (Figura 7 e 8) (Silva, 2020). Além disso, em

condições atmosféricas com essas características ocorrem limitações das trocas gasosas, reduzindo, assim, a evapotranspiração (Sousa et al., 2021).

Os cultivos de açaizeiro e cacaueiro em tratamento não irrigado foram exceções ao padrão discutido anteriormente, apresentando maior média de evapotranspiração durante o período chuvoso, em função do maior suprimento de água proporcionado pelas chuvas. Porém, durante o PMC, com a redução do volume pluviométrico e por se tratar do tratamento não irrigado, a menor média de evapotranspiração durante o PMC pode estar relacionado a possível limitação hídrica impostas a estas plantas, que é evidenciado pela redução na evapotranspiração. Logo, com a redução da água no solo nestes cultivos (Figura 1.11A e D), não foi possível atender parte da demanda atmosférica, impondo limitação na ET_c atual.

Em complemento a isso, o solo da área experimental com açaizeiro é franco-arenoso, com elevado teor de areia (Tabela 1.3). Esse tipo de solo possui alta permeabilidade, favorecendo maior infiltração de água, mas resultando em baixa capacidade de retenção hídrica (Khanh, Pramanik e Ngoc, 2024). Em períodos prolongados sem chuva, verificou-se uma acentuada redução no conteúdo volumétrico de água no solo (Figura 1.11A). No tratamento irrigado, embora a irrigação tenha suprido a demanda hídrica da planta, não foi suficiente para elevar a umidade do solo, possivelmente devido às características de alta permeabilidade desse tipo de solo (Figura 1.11A).

Ressalta-se que o açaizeiro é uma palmeira com alta exigência hídrica (Sousa et al., 2021), logo, como observado nas Figuras 11A e 12A, houve uma redução de mais de 30% no conteúdo volumétrico e no armazenamento de água no solo durante o período menos chuvoso. Nesse período, o conteúdo de água chegou a ficar abaixo da umidade crítica do solo, o que pode resultar em menor suprimento hídrico para o açaizeiro não irrigado. Isso faz com que parte dessa demanda atmosférica do PMC não seja atendida. Ressalta-se que, em situações prolongadas de déficit hídrico, a eficiência dos processos de trocas gasosas do açaizeiro é reduzida (Navegantes et al., 2024).

No sítio experimental com cacaueiro, não houve grande redução na umidade e no armazenamento de água no solo entre os períodos chuvoso e menos chuvoso no tratamento irrigado (Figura 11D e 12D), mantendo a umidade entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Esse resultado pode ser atribuído à elevada presença de argila no solo (Tabela 1.3), característica que aumenta a retenção de água no solo (Araujo Neto et al., 2022). Por outro lado, no tratamento não irrigado, observou-se maior perda de umidade do solo (Figura 11D), com valores próximos ao ponto de murcha permanente. Apesar da capacidade do solo de manter o armazenamento de água com pouca variação no início do período menos chuvoso,

períodos prolongados sem chuvas, especialmente a partir de outubro, resultaram em redução acentuada no armazenamento hídrico do solo (Figura 12D).

Nestas condições, o menor desempenho observado no cacaueiro durante o PMC pode estar relacionado à senescência das folhas em períodos de estiagem. Essa resposta fisiológica é uma estratégia realizada por esta cultura como forma de aclimação, contra efeitos de déficit hídrico assim como ocorre em períodos de maior temperatura do ar e de déficit de pressão de vapor, condições observadas neste experimento (Figura 1.7D) (Fraga Junior et al., 2020). Ainda, segundo os autores, esta resposta fisiológica é provocada pela sensibilidade do sistema radicular do cultivo, o qual tem grande capacidade de identificar e responder a variações nos parâmetros físico-químicos do solo, especialmente a limitação hídrica e às acentuadas reduções na umidade do solo.

Os resultados de maior ET_c atual obtidos em todos os cultivos em tratamento irrigado durante o PMC em comparação ao PC, podem ser justificados pela maior demanda atmosférica por vapor d'água que ocorre durante este período em comparação ao PC (Figura 1.7, 1.8 e 1.9), sendo essas condições favoráveis para o processo de evapotranspiração (Carvalho et al., 2024). Conciliado a isso, por se tratar do tratamento irrigado, as plantas podem atingir todo seu potencial evapotranspirativo durante o PMC.

Os maiores valores de evapotranspiração obtidos durante o PMC no tratamento não irrigado dos cultivos de coqueiro e lima ácida, em comparação ao PC, podem estar relacionados ao conteúdo de água no solo. Apesar da ausência de irrigação, essa umidade pode ter sido suficiente para atender parte da demanda atmosférica durante esse período. Essa justificada está relacionada aos valores de conteúdo volumétrico de água no solo (θ) observada em ambos os sítios experimentais.

Para o cultivo de coqueiro, apesar da redução de 44,44% no θ de um período para o outro, a umidade permaneceu próxima do teor crítico do solo durante o PMC de 2023, enquanto em 2024, a umidade ficou próxima do ponto de murcha permanente (Figura 1.11B). De forma semelhante, no cultivo de lima ácida, houve uma redução de 31,82% no θ do período chuvoso para o menos chuvoso, mas na maioria dos meses do PMC, a umidade manteve-se acima do teor crítico do solo, exceto em setembro de 2023, e em setembro e outubro de 2024, quando ficou abaixo do ponto de murcha permanente (Figura 1.11C).

Ressalta-se que os resultados de conteúdo volumétrico de água no solo apresentados na Figura 1.11 representam uma média das três profundidades monitoradas no solo (10, 30 e 50 cm). Avaliando os dados de forma individual, observou-se que, nas condições e períodos mencionados, as profundidades de 10 e 30 cm apresentaram uma média de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com possível influência da perda de água por evaporação na camada inicial do solo e, portanto,

abaixo das médias das três profundidades. Em contrapartida, a profundidade de 50 cm registrou médias de $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mantendo a umidade acima do teor de umidade crítica nesta camada e, possivelmente, garantindo níveis adequados de hidratação para essas culturas.

Outro fator que pode justificar os resultados de evapotranspiração obtidos está relacionado às características do solo nos dois sítios experimentais, classificados como Latossolo Amarelo Distrófico Argissólico. Este tipo de solo possui um horizonte B textural, que apresenta textura franco arenosa ou mais fina e um incremento de argila. O horizonte B textural possui mais argila do que os horizontes A ou E, e pode ou não ter mais do que o horizonte C (EMBRAPA, 2018). Assim, a presença de argila nesse horizonte pode indicar uma maior retenção de água, conforme os valores de conteúdo volumétrico identificados, e inclusive além das profundidades monitoradas neste estudo, proporcionando consistência nos vários estágios de umedecimento do solo.

Além disso, o coqueiro possui a maior concentração de raízes até uma profundidade de 60 cm (Benassi, 2013), enquanto a lima ácida, a partir do quinto ano, desenvolve raízes até 110 cm (EMBRAPA et al., 2022), permitindo a exploração de zonas mais úmidas do solo. Essas condições abordadas podem ter contribuído para que, mesmo sem irrigação e com umidade insuficiente nas camadas superiores do solo, os cultivos de açaizeiro e lima ácida mantivessem elevados valores de evapotranspiração, respondendo à maior disponibilidade de energia solar.

A partir da razão entre $ET_{c \text{ atual}}$ e ET_o , obteve-se os valores de coeficiente de cultura (K_c) para as condições dos cultivos experimentais. Para o sítio experimental com açaizeiro, no tratamento irrigado o K_c médios foi de 0,85 e 0,90 durante o PC e PMC, respectivamente (Figura 1.14A). Enquanto no tratamento não irrigado, os K_c médios obtido por meio da $ET_{c \text{ atual}}$ foram de 0,82 e 0,62 durante o PC e PMC, respectivamente (Figura 1.14A). Sousa et al. (2021) encontraram K_c de 1,08 para o açaizeiro na mesma região. No entanto, salienta-se que os maiores totais de ET_c encontrados pelos autores, em consequência do método utilizado, conforme mencionado anteriormente podem causar uma superestimativa do K_c . Visto que, a ET_o obtida pelos autores (3,24 mm) durante o experimento, foram próximas ao do presente estudo, que foi de 3,18 mm dia⁻¹ durante o período experimental.

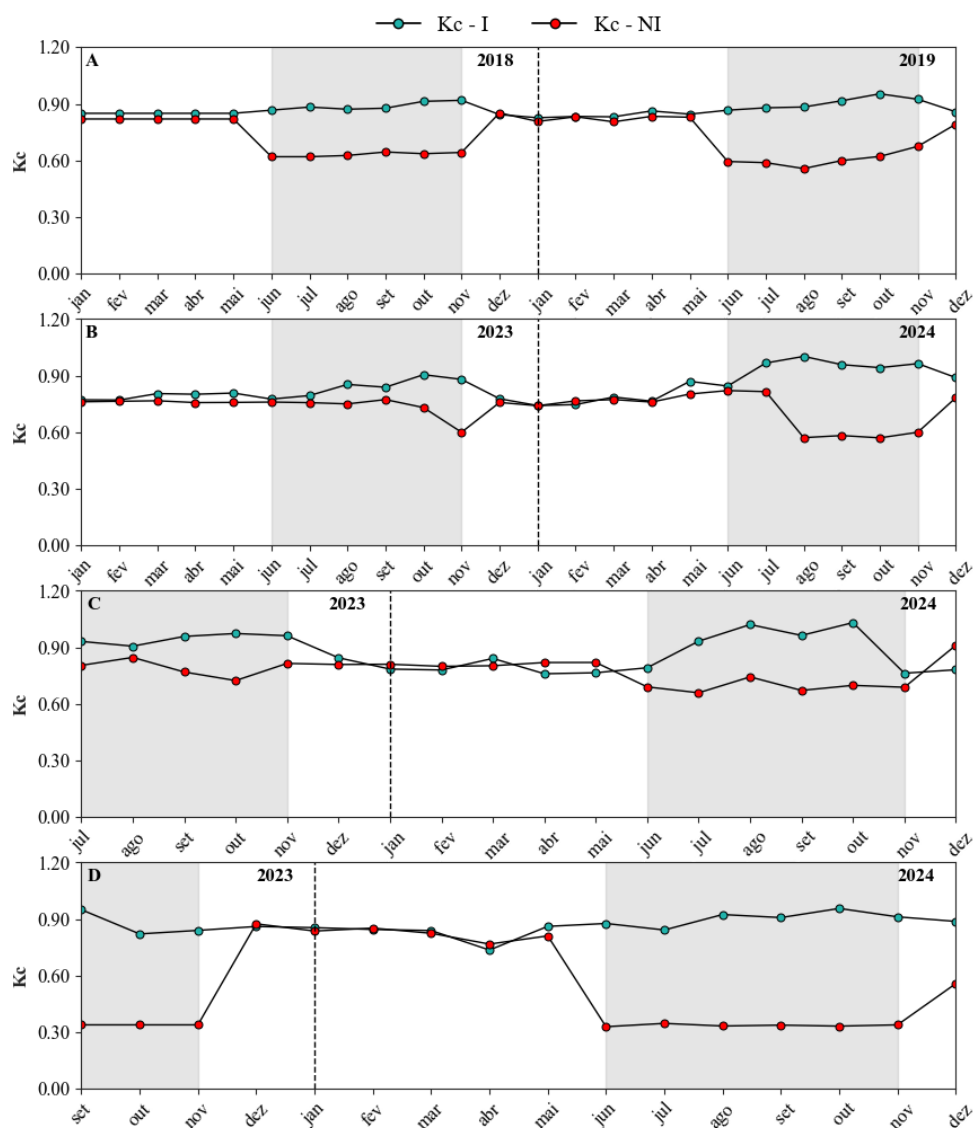


Figura 1.14. Coeficiente de cultura (K_c) no cultivo de açazeiro (A), coqueiro (B), lima ácida (C) e cacaueiro (D). Área sombreada é referente ao período menos chuvoso.

No cultivo de coqueiro-anão-verde irrigado a média obtida dos K_c variou de 0,81 a 0,92, para o PC e PMC, respectivamente (Figura 1.14B). No tratamento não irrigado, as médias de K_c médios obtido pela $ET_{c \text{ atual}}$ foram de 0,77 e 0,65, para o PC e PMC, respectivamente (Figura 1.14B). Carvalho et al. (2024), encontraram o K_c de 1,06 nas mesmas condições deste estudo, porém calculado pelo método da Razão de Bowen. Miranda et al. (2007) e Teixeira et al. (2019) encontraram valores de K_c que variaram entre 0,63 até 1,02 na região litorânea do estado do Ceará. Além do K_c de 1,0 recomendado pela FAO (Allen et al., 1998).

A utilização de um K_c próximo a 1 pode levar a um excesso de água pela irrigação em algumas épocas do ano, conforme enfatizado por Araújo et al. (2022). Essa situação foi observada no presente estudo, uma vez que, durante o período de irrigação houve registro da umidade do solo acima da capacidade de campo no período de irrigação utilizando o K_c de 1,06

(Carvalho et al., 2024) (Figura 1.11B). O estabelecimento de um K_c geral para a cultura do coqueiro irrigado na região de 0,84 ($PC = 0,81$ e $PMC = 0,92$) é fundamental para o manejo da irrigação e dos recursos hídricos, uma vez que, a reposição de água pode ser reduzida em até 20,75% para plantas nas mesmas condições da região estudada.

Os menores valores de K_c obtidos neste estudo, quando comparados ao utilizado por Carvalho et al. (2024) na área experimental, podem estar relacionados ao fato de que o método de balanço de água no solo está relacionado a uma irrigação localizada, considerando especificamente a zona radicular da planta. Por outro lado, o método da razão de Bowen abrange uma área mais ampla na contabilização dos fluxos de energia. Apesar do sistema de irrigação ser localizado (microaspersão), também houve molhamento da entrelinha de plantio, o que possibilitou a evaporação nessa área, sendo contabilizada pelo método. Isso resultou em um aumento na evapotranspiração e, consequentemente, em um K_c maior.

No cultivo de lima ácida irrigada, a média de K_c obtido foram de 0,79 durante o PC e 0,93 durante o PMC (Figura 1.14C). Para esse mesmo cultivo no tratamento não irrigado, o K_c obtido por meio da $ET_{c\text{ atual}}$ foi de 0,83 durante o PC e 0,74 durante o PMC (Figura 1.14C). Para este cultivo, os valores obtidos se assemelharam ao determinado por Pinto et al. (2022), que obteve K_c que variaram entre 0,74 e 0,84, em cultivo de lima ácida Tahiti, no município de Capitão Poço - PA, próximo à área do presente estudo. Além deste, trabalhos desenvolvidos no estado de São Paulo encontraram K_c que variaram entre 0,67 e 0,97 para citrus (Marin et al., 2016; Jamshidi et al., 2020).

No plantio de cacauzeiro em tratamento irrigado, o K_c obtido foi de 0,84 durante o PC e 0,89 durante o PMC (Figura 1.14C). No tratamento não irrigado o K_c obtido por meio da $ET_{c\text{ atual}}$ durante o PC foi de 0,79, enquanto durante o PMC foi de 0,34 (Figura 1.14D). O presente resultado de K_c obtido neste trabalho para o cacauzeiro irrigado em ambos os períodos (0,84 e 0,89), está no intervalo de valores encontrado na literatura, como o determinado por Almeida et al. (2004) na Bahia, com K_c de 0,85. Paredes et al. (2024) referem-se a estudos realizados com cacauzeiro que identificaram coeficientes de cultivo que variaram entre 0,7 e 1,04, conforme os distintos estágios fenológicos da cultura, sendo esse intervalo próximo ao obtido no presente estudo em condições de suporte hídrico.

Hafif (2017) obteve na Indonésia valores de K_c no intervalo de 0,83 a 0,93. E Leite (2013) obteve um K_c que variou entre 0,83 e 0,92 em diferentes fases de desenvolvimento de plantas jovens de cacau irrigado. Silva (2020), por meio de lisímetria, obteve K_c que variaram entre três fases de desenvolvimentos do cacauzeiro irrigado: crescimento da planta (0,88), floração e desenvolvimento do fruto (0,94) e maturação fisiológica e colheita (0,93), sendo o menor valor encontrado de 0,82.

De modo geral, constatou-se que, em todas as frutíferas estudadas, os valores de K_c no tratamento não irrigado foram inferiores aos do tratamento irrigado durante o período menos chuvoso. Essa redução pode estar relacionada ao coeficiente de estresse hídrico (K_s). Nas Figuras 11 e 12, observa-se uma redução no conteúdo de água do solo durante o período menos chuvoso no tratamento não irrigado, o que pode resultar em uma possível condição de estresse hídrico para as plantas submetidas a esse tratamento. Assim, sob essas condições, há um efeito de redução na evapotranspiração (Figura 13), evidenciado pela diminuição do K_c devido à influência do K_s como fator redutor (Allen et al., 1998).

2.4. CONCLUSÃO

Durante o período menos chuvoso, a irrigação proporcionou suporte hídrico suficiente para todas as frutíferas estudadas, atendendo à maior demanda atmosférica.

O açaizeiro e o cacaueiro não irrigados demonstraram uma redução nos valores de evapotranspiração durante o período menos chuvoso, indicando maior sensibilidade a períodos de redução de chuvas.

O coqueiro e a lima ácida conseguiram atender parte da demanda atmosférica, aumentando sua evapotranspiração, durante o período menos chuvoso.

A evapotranspiração das frutíferas estudadas foi menor do que a evapotranspiração de referência, resultando em coeficientes de cultura (K_c) inferiores a 1.

2.5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO**, Rome, v.300, n.9, p.D05109, 1998.

ALMEIDA, H. A.; VILA NOVA, N. A.; KLAR, A. E. Estimativa da demanda hídrica do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 22, n.3, p. 402-406, 2004.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L. de; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref.

ALVES, E. D. S.; LIMA, D. F.; BARRETO, J. A. S.; DOS SANTOS, D. P.; DOS SANTOS, M. A. L. Determinação do coeficiente de cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. **Irriga**, v. 22, n. 1, p. 194–203, 2017.

ARAÚJO, B. D. A.; MIRANDA, F. R. D.; BEZERRA, M. A.; RODRIGUES, A. J. O.; CALVET, A. S. F.; SILVA, E. S. D.; LIMA, G. C. M.; SANTOS, M. M. S. Sustained deficit irrigation on yield and fruit water quality of dwarf green coconut. **Ciência Rural**, v. 52, p. e20200674. 2022. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200674>

ARAUJO NETO, R. A.; MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; MAIA, S. M. F.; LYRA, G. B. Physical and hydrological characteristics and modelling of the soil water retention curve in the brazilian semi-arid region. **Bioscience Journal**, v. 38, e38031, 2022. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-54195>

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO, J. R. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

AZEVEDO, P. V.; SOUSA, I. F.; SILVA, B. B.; SILVA, V. de P. R. Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 84, n. 3, p. 259–264, 2006.

BENASSI, A. C.; FANTON, C. J.; SANTANA, E. N. de. **O Cultivo do Coqueiro-Anão-Verde: Tecnologias de Produção**. Vitória, ES: Incaper, 2013. Disponível em: <<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/2711/1/BRT-cultivodocoqueiroanao-benassi.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2025.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS; Ascar, 84 p, 2014.

BRANDÃO, V. dos S.; CECILIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da. **Infiltração da Água no Solo**. 3. ed. São Paulo: 2006.

CAPELLARI, A.; CAPELLARI, M. B. A água como bem jurídico, econômico e social. **Cidades Comunidades e Territórios**, n. 36, p. 1–16, 2018. Disponível em: <https://journals.openedition.org/cidades/657>.

CARVALHO, E. de O. T. de; FERNANDES, G. S. T.; RUA, M. L.; MONTEIRO, A. C.; LUZ, D. B., LISBOA, S. P. P.; SILVA, J. V. F. da; PINTO, J. V. de N.; MIRANDA, F. R. de; LINS, P.

M. P.; SOUZA, P. J. de O. P. de. Net radiation partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of the green dwarf coconut in Santa Izabel do Pará, Brazilian Amazon. **Bragantia**, v. 83, n. e20230160, p. 1–15, 2024.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **Rome: Estudio FAO**, 179 p, 1977.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Recomendações para a Produção de Lima Ácida 'Tahiti'**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1145897/1/Recomendacoes-producao-lima-acida-Tahiti-Citros.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2025.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, 2018

FITO, J.; VAN HULLE, S. W. H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 3, p. 2949–2972, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y>.

FRAGA JUNIOR, L. S.; VELLAME, L. M.; OLIVEIRA, A. S. de; SILVA PAZ, V. P.da. Transpiration of young cocoa trees under soil water restriction. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 2, 2021.

HAFIF, B. Analisis agroekologi dan kebutuhan irigasi suplemen untuk tanaman kakao di Provinsi Lampung. **Journal of Industrial and Beverage Crops**, v. 4, n. 1, 2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pedologia**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>>. Acesso em: 05 fev. 2025.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Painel El Niño: Boletim Mensal Nº 08**. Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Painel-El-Ni%C3%B1o-Boletim-Mensal-No-08.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

JAMSHIDI, S.; ZAND-PARSA, S.; SHAHSAVAR, R.; NIYOGI, D. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 227, 105838, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J. A.; SCHRIER, G. Van Der. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 33130, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep33130>.

KHANH, P. T.; PRAMANIK, S.; NGOC, T. T. H. Soil Permeability of Sandy Loam and Clay Loam Soil in the Paddy Fields in An Giang Province in Vietnam. **Environmental Challenges**, v. 15, p. 100907, 2024.

LEITE, M. S. B. **Consumo hídrico do cacaueiro jovem irrigado por gotejamento em consórcio com bananeira e pau-brasil - BA**. 68 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus Bahia, 2013.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed: Edusp, 2005.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; COSTA, L. G.; VIANNA, M. S.; CARVALHO, K. S. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 139–145, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.010>.

MIRANDA, F. R.; GOMES, A. R. M.; OLIVEIRA, C. H. C.; MONTENEGRO, A. A. T.; BEZERRA, F. M. L. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do coqueiro-anão-verde na região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.2, p.129–135, 2007.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NAVEGANTES, P. C. A.; LOPES FILHO, W. R. L.; RODRIGUES, F. H. S.; MONTEIRO, G. G. T. N.; CHAVES, R. P. F.; OLIVEIRA NETO, C. F.; CUNHA, R. L.; PINHEIRO, H. A. Leaf gas exchange and water relations in two assai cultivars submitted to water-deficit. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 46, p. 1–14, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010029452024000100303&tlng=en.

NOAA. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **El Niño and La Niña: Related Resources**. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 29 jan. 2025.

ORTEGA-FARIAS, S.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; BRISSON, N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 276–286, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192309002779>.

PAREDES, P.; PETRY, M. T.; OLIVEIRA, C. M.; MONTOYA, F.; LÓPEZ-URREA, R.; PEREIRA, L. S. Single and basal crop coefficients for estimation of water requirements of subtropical and tropical orchards and plantations with consideration of fraction of ground cover, height, and training system. **Irrigation Science**, v. 42, n. 6, p. 1059-1097, 2024.

PEREIRA, A. R.; SEDYMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 323p, 2013.

PINTO, J. V. de N.; COSTA, D. L. P.; NUNES, H. G. G. C.; SILVA JUNIOR, A. C. da; SOUSA, A. M. L. de; SOUZA, P. J. de O. P. de; ORTEGA-FARIAS, S. Radiation Balance and Partitioning of Latent and Sensible Heat Fluxes Over a Lime Orchard in Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 4, p. 491–502, 2022. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010277862022000400491&tlng=pt.

PYTHON. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Disponível em: <<https://www.python.org/downloads/>>.

SANTOS, B. P.; SIQUEIRA, R. A. G.; VILLAR, J. A. de A.; FREITAS, M. A. V. Agricultura e Irrigação no Brasil no cenário das Mudanças Climáticas. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 1, p. 65–73, 2022.

SCHWENCK, V. A. X.; QUEIROZ, L. da S.; GARCIA, A. D. B.; LEITE, K. de J.; ARNDT, S.; OLIVEIRA, E. M. de. Coeficiente de cultura por lisímetria da variedade de sorgo forrageiro SF – 15 (*Sorghum Bicolor* L. Moench). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 2, p. 3960–3967, 2020.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 1–10, 2015.

SILVA, G. S. **Demanda hídrica de cacauete irrigado e conduzido a pleno sol em Tabuleiro Costeiro do Recôncavo da Bahia**, p. 1–108, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas-Bahia 2020.

SOTO, M. A. A.; KIANG, C. H. Avaliação da condutividade hidráulica em dois usos do solo na região central do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 47, p. 1–11, 2018.

SOUSA, D. de P.; FERNANDES, T. F. S.; TAVARES, L. B.; FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; NUNES, H. G. G. C.; COSTA, D. L. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P. J. de O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5–22, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O.; CAMPECHE, L. F.; BARROS, A. C.; SILVA, V. D. P.; AZEVEDO, P. V. D. Large-scale weighing lysimeter. Part II: Water requirements of the irrigated dwarf-green coconut. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 526–532, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500014>.

SOUZA, E. B. de; FERREIRA, D. B. da S.; GUIMARÃES, J. T. F.; FRANCO, V. D. S.; AZEVEDO, F. T. M. de; MORAES, B. C. de; SOUZA, P. J. D. O. P. de. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 81–93, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/41232>.

SOUZA, P. J. D. O. P. D.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L. D.; SOUZA, E. B. D. Diurnal Energy Balance in a Mango Orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.33, n.3, p.537–546, 2018.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; CHAKRABORTY, A.; HALDER, D. Comparison of actual evapotranspiration of irrigated maize in a sub-humid region using four different canopy resistance-based approaches. **Agricultural Water Management**, v. 202, p. 156–165, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.021>.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; HALDER, D. Effective crop evapotranspiration measurement using time-domain reflectometry technique in a sub-humid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1211–1225, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1841-7>.

TEIXEIRA, A. H. de C.; MIRANDA, F. R. de; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; GARÇON, E. A. M. Water productivity assessments for dwarf coconut by using Landsat 8 images and

agrometeorological data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 155, p. 150-158, 2019.

TETENS, V. O. **Über einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift Geophysic**, v. 6, n.1, p. 297-309, 1930.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

3. CAPÍTULO 2 – PRODUTIVIDADE DA ÁGUA EVAPOTRANSPIRADA EM FRUTÍFERAS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

Objetivou-se quantificar os componentes de produtividade e determinar a produtividade da água em frutíferas de importância econômica na Amazônia, em condições de cultivo irrigado e não irrigado. O estudo foi conduzido em plantios comerciais de quatro espécies: açaizeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.), coqueiro-anão-verde (*Cocos nucifera* L.), lima ácida (*Citrus latifolia* T.) e cacaueteiro seminal (*Theobroma cacao* L.). A evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ atual}}$) foi calculada a partir da metodologia do balanço hídrico do solo. A avaliação dos componentes de produtividade (C_p) para cada cultivo foram: do açaizeiro: massa fresca dos cachos; coqueiro-anão-verde: número de frutos e volume de água; lima ácida: número e peso de frutos total; cacaueteiro: número de frutos, número de amêndoas por planta e peso de amêndoas frescas e secas. A produtividade da água (Pa) foi calculada em função dos componentes de produtividade em relação a evapotranspiração atual da cultura. O delineamento foi o inteiramente casualizado (DIC), sendo, dois tratamentos irrigado e não irrigado. Os dados de C_p e Pa foram comparados pelo Teste-t de Student ($p < 0,05$). Para os cultivos de açaizeiro, lima ácida e cacaueteiro, os resultados indicaram que a média dos componentes de produtividade foi superior no tratamento irrigado em comparação ao não irrigado. No açaizeiro e na lima ácida, todas as médias de Pa avaliadas foram maiores sob irrigação, enquanto no cacaueteiro, não houve diferença significativa entre os tratamentos. No experimento com coqueiro-anão-verde, a comparação direta entre tratamentos não foi possível devido à idade das plantas. Porém, ao comparar os anos de 2023 e 2024, o tratamento irrigado demonstrou um aumento na produção de frutos e no volume de água de coco, enquanto no tratamento não irrigado, observou-se aumento apenas no volume de água de coco. Em 2024, houve um incremento nos componentes de Pa avaliados em ambos os tratamentos, em relação ao ano anterior. A prática da irrigação mostrou-se vantajosa, promovendo um aumento significativo nos componentes de produtividade observados, além de incrementar a produtividade no uso da água, evidenciando um gerenciamento eficaz dos recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVES: Fruticultura, Componentes de produção, Irrigação.

CHAPTER 2 – EVAPOTRANSPIRED WATER PRODUCTIVITY IN ECONOMICLY IMPORTANT FRUIT TREES IN THE EASTERN AMAZON

ABSTRACT

The aim was to quantify the productivity components and determine water productivity in fruit trees of economic importance in the Amazon, under irrigated and non-irrigated cultivation conditions. The study was conducted in commercial plantations of four species: açai (*Euterpe oleraceae* Mart.), green dwarf coconut (*Cocos nucifera* L.), acid lime (*Citrus latifolia* T.) and seminal cacao (*Theobroma cacao* L.). Current crop evapotranspiration ($ET_{c \text{ atual}}$) was calculated using the soil water balance methodology. The evaluation of productivity components (C_p) for each crop were: açai: fresh mass of bunches; green dwarf coconut: number of fructose volume of water; acid lime: number and total weight of fruits; cocoa: number of fruits, number of almonds per plant and weight of fresh and dry almonds. Water productivity (Pa) was calculated as a function of productivity components in relation to current crop evapotranspiration. The design was completely randomized (DIC), with two treatments: irrigated and non-irrigated. The

Cp and Pa data was compared by Student's t-test ($p < 0.05$). For the açaí, acid lime and cocoa crops, the results indicated that the average of the productivity components was higher in the irrigated treatment compared to the non-irrigated one. In the açaí and acid lime, all the Pa averages evaluated were higher under irrigation, while in the cocoa tree, there was no significant difference between the treatments. In the experiment with green dwarf coconut, direct comparison between treatments was not possible due to the age of the plants. However, when comparing the years 2023 and 2024, the irrigated treatment demonstrated an increase in fruit production and in the volume of coconut water, while in the non-irrigated treatment, an increase was observed only in the volume of coconut water. In 2024, there was an increase in the Pa components evaluated in both treatments, compared to the previous year. The practice of irrigation proved to be advantageous, promoting a significant increase in the observed productivity components, in addition to increasing the efficiency in water use, evidencing effective management of water resources.

KEYWORDS: Fruit growing, Production components, Irrigation.

3.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estado do Pará destaca-se no cenário nacional da fruticultura, no qual é líder na produção de açaí com produção de 1.576,302 t/frutos e segundo maior produtor de amêndoas de cacau, com 138.471 t/amêndoas produzidos. Além destas, o estado ocupa a quarta posição na produção de coco e limão, com produção de 172.251 mil frutos e 67.275 t/frutos, respectivamente (IBGE, 2023). Neste contexto, há uma tendência de adotar tecnologias de manejo mais avançadas, como a irrigação, nos cultivos destas culturas de relevância na região amazônica, com o objetivo de modernizar as práticas agrícolas e aumentar a produtividade

Entre estas tecnologias, a irrigação se destaca como o principal método para fornecer suplementação hídrica durante períodos de escassez de chuvas. Dessa forma, é possível reduzir perdas e, simultaneamente, aumentar a produtividade nas culturas agrícolas (Santos et al., 2023). Dada a relevância econômica dessas culturas, é fundamental dedicar maior atenção ao manejo da irrigação, uma vez que estas culturas dependem desse recurso para manter níveis satisfatórios de produção, mesmo em momentos de escassez hídrica (Sousa et al., 2021; Bouix et al., 2022; Carvalho et al., 2024).

O estado do Pará apresenta climas do tipo Am e Aw, caracterizados por altos índices pluviométricos. No entanto, períodos com baixa ocorrência de chuvas ao longo do ano também não são atípicos (Alvares et al., 2013). Essas condições tornam essencial o uso da irrigação como forma de suplementação hídrica para garantir o desenvolvimento e produtividade adequado das culturas (Carvalho et al., 2024). Entretanto, surge uma problemática relacionada ao uso inadequado dessa ferramenta, resultando tanto em excesso quanto em baixa aplicação

de água no cultivo. Essas situações podem comprometer o rendimento e aumentar os custos de produção (Miranda et al., 2019).

Para um uso adequado e a sustentabilidade da irrigação é indispensável compreender a produtividade da água (Costa, 2021). A Produtividade da água (PA) pode ser entendida como a relação entre a produção de frutos frescos e a quantidade real de água utilizada, considerando tanto a evapotranspiração real quanto a transpiração real durante o ciclo da cultura (Carvalho et al., 2024). Esta variável depende de fatores que afetam a relação solo-planta-atmosfera, como condições atmosféricas, irrigação, cultivar, fertilidade, preparo do solo entre outras práticas de manejo (Tarkalson et al., 2022)

Dadas as complexas interações entre clima, solo e manejo de cultivo, específicas de cada região onde a cultura é presente, torna-se essencial conduzir estudos sobre a produtividade da água em outras áreas onde essas culturas são cultivadas (Carvalho et al., 2024). Por conseguinte, a partir dessas informações é possível compreender e potencializar o uso da água na agricultura irrigada. Portanto, a determinação da produtividade da água é uma estratégia que possibilita reduzir o déficit ou excedente hídrico, de forma a se obter uma suplementação satisfatória em um sistema de cultivo irrigado (Oliveira et al., 2011).

Sendo assim, tendo em vista a busca no entendimento da gestão eficiente do recurso hídrico na irrigação agrícola, é necessário estudos com informações técnicas que auxiliem no planejamento e gestão dos recursos hídricos, compatibilizando os diversos usos a níveis locais e regionais (Silva et al., 2015). Dessa forma, a produtividade da água, otimiza o recurso hídrico empregado, desempenhando um papel fundamental na gestão sustentável dos sistemas de irrigação e na mitigação de impactos ambientais (Carvalho et al., 2024). Diante disso, este estudo objetivou quantificar os componentes de produtividade e determinar a produtividade da água em frutíferas de importância econômica na Amazônia, em condições de cultivo irrigado e não irrigado.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Caracterização das áreas de estudo

O presente estudo foi conduzido em plantios comerciais de quatro espécies: açaizeiro (*Euterpe oleraceae* Mart.) cultivar BRS – Pará, coqueiro-anão-verde (*Cocos nucifera* L.) cultivar anão-verde-do-brasil-de-jiqui (AVEBrJ), lima ácida (*Citrus latifolia* T.) cultivar Tahiti e cacaueiro seminal (*Theobroma cacao* L.). Esses plantios se encontram distribuídos em quatro municípios do estado do Pará, conforme detalhado na Tabela 2.1, juntamente com seus respectivos períodos experimentais e ilustrado na Figura 2.1.

Tabela 2.1. Localização e período experimental dos sítios de estudo.

Cultivo	Município	Coordenadas	Período experimental
Açaizeiro	Castanhal	1° 19' 24,48" S e 47° 57' 38,20" W	2018 - 2019
Coqueiro-anão-verde	Santa Izabel do Pará	1° 13' 40,35" S e 48° 02' 56,23" W	2023 – 2024
Lima ácida	Capitão Poço	1° 46' 55" S e 47° 06' 31" W	Jul/2023 – Dez/2024
Cacaueiro	Vitoria do Xingu	03° 09' 47,22" S e 52° 06' 58,46" W	Set/2023 – Dez/2024

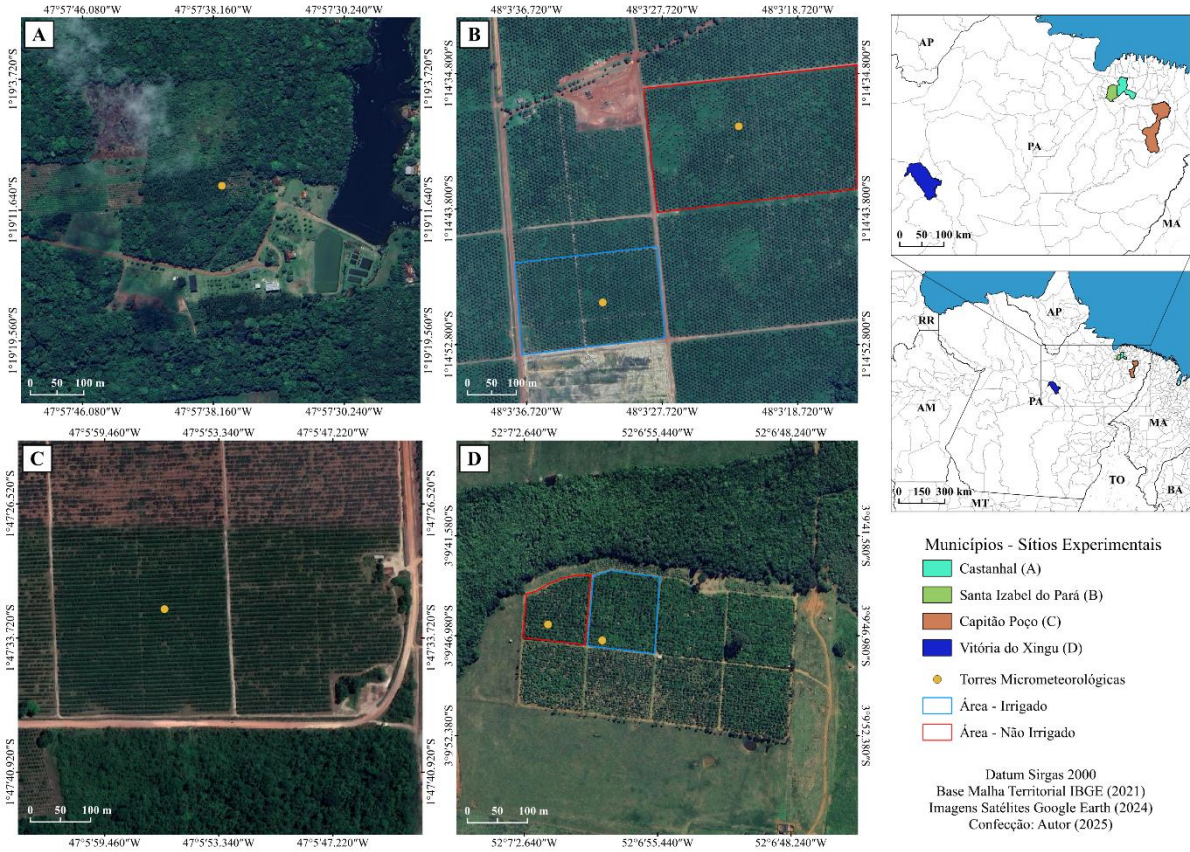


Figura 2.1. Localização dos sítios experimentais.

As características de cada área experimental, incluindo a área total cultivada, o espaçamento e a idade das plantas, estão descritas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Área total (ha), espaçamento (m) e idade (anos) das culturas experimentais durante a realização do estudo.

Cultivo	Área total (ha)	Espaçamento (m)	Idade (anos)
Açaizeiro	0,3	4 x 4	8 (final do experimento)
Coqueiro (Irigado)	7	7,5 x 7,5 x 7,5	10 (atualmente)
Coqueiro (Não irrigado)	19,47	7,5 x 7,5 x 7,5	12 (atualmente)
Lima ácida	100	3 x 5	14 (atualmente)
Cacaueiro	10	3 x 3	5 (atualmente)

Os sítios experimentais estão inseridos na classificação climática de Köppen como tipo Am, caracterizando um clima tropical úmido. A temperatura média nessa zona climática é em torno de 26°C. Nos municípios de Castanhal e Santa Izabel do Pará a precipitação pluviométrica anual é acima de 2.000 mm, enquanto Capitão Poço é 1.848 e Vitória do Xingu é 1.914 (Alvares et al., 2013).

Nos sítios experimentais, o solo apresentou classificações distintas entre eles. No cultivo de açaizeiro, o solo foi classificado como Latossolo Amarelo franco arenoso. Para o coqueiro-anão-verde e lima ácida, o solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico Argissólico. Enquanto no cultivo de cacaueiro o solo foi classificado como Argissolo franco argiloso (EMBRAPA, 2018, IBGE, 2023). Nos sítios experimentais, foram coletadas amostras de solo indeformadas nas profundidades de 00-20 cm e 20-40 cm para análise dos atributos granulométricos, físicos e hídricos. Os atributos hídricos das áreas experimentais de coqueiro, lima ácida e cacaueiro, foram inferidos com base nos dados granulométricos do solo, seguindo adaptações na metodologia de Assad et al. (2001). Os atributos granulométrico, físicos e hídricos podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Atributos granulométrico, físicos e hídricos do solo das áreas de estudo.

Atributos Físicos e Hídricos	Açaizeiro	Coqueiro-anão-verde		Lima ácida	Cacaueiro
		Irrigado	Não irrigado		
	0 – 40 cm	0 – 40 cm	0 – 40 cm	0 – 40 cm	0 – 40 cm
Areia (%)	81	68	75	68	40
Silte (%)	10	19	17	11	7
Argila (%)	9	13	8	21	53
θ Ds ¹	1,59	1,59	1,43	1,58	1,47
θ FC ² (cm ³ cm ⁻³)	0,28	0,19	0,15	0,20	0,30
θ PWP ³ (cm ³ cm ⁻³)	0,08	0,10	0,07	0,11	0,18
θ crítica ⁴ (cm ³ cm ⁻³)	0,17	0,13	0,11	0,12	0,18

¹Densidade do solo; ²Umidade na capacidade de campo, ³Umidade no ponto de murcha permanente, ⁴Umidade crítica do solo.

3.2.2. Sistema de irrigação e Tratamentos

Os tratamentos foram estabelecidos considerando a disponibilidade de água, com distinção entre plantas que receberam irrigação e aquelas que não foram irrigadas. A quantidade de água aplicada durante a irrigação foi determinada com base na evapotranspiração de referência (ET_o), estimada utilizando o método de Penman-Monteith (conforme descrito pela FAO 56) (Allen et al., 1998). Sendo aplicado diariamente 100% da ET_o no plantio de açaizeiro e cacaueiro. No sítio experimental com coqueiro-anão-verde, a lâmina de irrigação aplicada de segunda a sábado foi determinada pelo ajuste da ET_o a partir do K_c de 1,06 (Carvalho et al., 2024). No cultivo de lima ácida, a lâmina aplicada de segunda a sábado foi de 3,57 mm, definida

com base no estudo de Pinto et al. (2023), que indicou ser suficiente para atingir a capacidade de campo considerando 100% da ET_0 na região.

No sítio experimental de açaizeiro, o sistema utilizado foi de microaspersão, utilizando 1 emissor por planta localizado a 40 cm de cada touceira, com pressão de serviço de 5,5 mca, vazão de 34 L h^{-1} e eficiência de 94%. No plantio de coqueiro, o sistema de irrigação foi de microaspersão, com 1 emissor por planta, posicionado a 1 m de cada planta, com vazão de 96 L h^{-1} e eficiência de 86%.

No cultivo de lima ácida, o sistema utilizado foi de gotejamento, onde cada planta possuía 6 gotejadores, com vazão de 3 L h^{-1} e eficiência de irrigação de 85%. Enquanto no cultivo de cacaueiro o sistema utilizado foi microaspersão por microjet com 1 emissor por planta, com linha de irrigação disposta a 3 metros da linha de plantio, com pressão de serviço de 10 mca, vazão de 10 L h^{-1} e eficiência de 86%. Durante o período menos chuvoso, os cultivos de açaizeiro, coqueiro-anão-verde e lima ácida receberam irrigação. Por outro lado, a irrigação do cultivo de cacaueiro foi contínua ao longo do ano, garantindo que a umidade do solo permanecesse próxima à capacidade de campo.

3.2.3. Coleta de dados micro meteorológicos

Os dados meteorológicos foram coletados por meio de torres micrometeorológicas instaladas nos sítios experimentais. No cultivo de açaizeiro e lima ácida uma única torre foi utilizada para monitorar todos os tratamentos, com alturas correspondentes de 17 e 10 metros, respectivamente. Por outro lado, no cultivo de coqueiro-anão-verde e cacaueiro, cada tratamento contou com sua própria torre, cujas alturas foram de 12 e 6 metros, respectivamente.

Nas torres micrometeorológicas, instaladas em todos os sítios experimentais, foram abrigado uma estação meteorológica automática equipada com um Termohigrômetro (modelo HMP155A, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA) para registrar a temperatura do ar (Tar) e umidade relativa do ar (UR), localizado a 2,1 m acima da copa. Anemômetro (modelo 03002, R. M. YOUNG, Traverse City, MI, USA) para medir a velocidade do vento (U), localizado a 2,1 m acima da copa. Além disso, um Pluviômetro (modelo TB4, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA) para mensuração da precipitação pluviométrica (PP), também localizado a 2,1 metros acima da copa das plantas.

Adicionalmente, foi instalado sensores de Reflectometria no Domínio do Tempo - TDR (CS615, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA), para medir o conteúdo volumétrico de água no solo (θ). Esses sensores foram inseridos horizontalmente em três camadas distintas do solo: 0 – 10 cm, 10 – 30 cm e 30 – 50 cm.

Todos os sensores foram integrados a um sistema de armazenamento de dados datalogger. No cultivo de coqueiro-anão-verde, foi utilizado o modelo CR10x (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). Nos cultivos de açaizeiro, lima ácida e cacauzeiro utilizou-se o modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). A configuração dos dataloggers foi programada para realizar leituras instantâneas a cada 10 segundos e registrar de médias e totais a cada 20 minutos.

3.2.4. Evapotranspiração de referência (ET_o)

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada a partir da metodologia de Penman-Monteith (FAO 56) (Allen et al., 1998) (Eq. 2.1). Os dados necessários para essa estimativa foram coletados de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas no município de cada experimento. No entanto, para o cultivo de coqueiro-anão-verde, utilizou-se dados de uma estação meteorológica automática de superfície localizada na sede da empresa Sococo, a cerca de 2 km da área experimental.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (2.1)$$

Em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); T_{ar} é a temperatura média do ar (°C); U₂ é a velocidade do vento (m s⁻¹); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor do ar (kPa); Δ é a declinação da curva de saturação do vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); γ é a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

3.2.5. Evapotranspiração atual da cultura (ET_{c atual})

A evapotranspiração atual da cultura (ET_{c atual}) foi calculada a partir da metodologia do balanço hídrico do solo de acordo com o proposto por Libardi (2005) (Eq. 2.2).

$$ET_c = \Delta h - P - I - D - AC \quad (2.2)$$

Em que, ET_{c atual} é a evapotranspiração atual da cultura (mm dia⁻¹); Δh é a variação de água no solo (mm); P é a precipitação pluviométrica (mm); I é a lâmina de irrigação (mm); D é a drenagem interna (mm) e AC é a ascensão capilar (mm).

3.2.6. Componentes de produtividade (Cp)

Para avaliar a produtividade de frutos de açaí, colheitas foram realizadas em diferentes períodos: de julho a dezembro de 2018, de janeiro a maio de 2019 e de junho a dezembro de 2019. Cada tratamento envolveu 24 plantas. Durante as coletas, registrou-se a massa fresca dos cachos utilizando uma balança digital com capacidade de 40,00 kg, sensibilidade de 4,00 g e

precisão de 5,00 dígitos. No período de menor produtividade, realizou-se colheitas mensais, enquanto no período de maior produtividade, foram feitas colheitas duas vezes por mês.

No cultivo de coqueiro-anão-verde, a produtividade de frutos foi realizada a cada 21 dias desde o início do período experimental. Em cada tratamento foram monitoradas vinte plantas, das quais foram quantificado o total de frutos colhidos e selecionados dois frutos de cada cacho colhido. O procedimento de tratamento dos frutos selecionados antes da avaliação seguiu a metodologia descrita por Carvalho et al. (2024). Foram medidos a massa de fruto utilizando uma balança digital com capacidade de 40,00 kg, sensibilidade de 2,00 g e precisão de 5,00 dígitos. Após a pesagem, os frutos foram perfurados, para retirar o albúmen líquido (água de coco). Para quantificar a quantidade de água de coco, utilizou-se uma proveta graduada de plástico transparente, com capacidade total de 1.000 ml e graduação a cada 10 ml.

Para o plantio de lima ácida, foram selecionadas 12 plantas aleatórias em cada tratamento, das quais foram realizadas colheitas mensalmente, desde o início do experimento. Para esta cultura, foram contabilizados o número e a peso total de frutos por planta. Para quantificar a massa de frutos, foi utilizada uma balança digital com capacidade de 30,00 kg, sensibilidade de 5,00 g e precisão de 5,00 dígitos.

No sítio experimental de cacau, a avaliação de produtividade foi realizada mensalmente em 12 plantas selecionadas aleatoriamente para cada tratamento. Essas plantas foram monitoradas desde o início do período experimental. As variáveis avaliadas para os frutos desta cultura incluíram o número e massa de frutos e sementes frescas por planta. Após essas medições, as sementes (amêndoas) foram colocadas em estufas, até atingir massa constante, permitindo a obtenção da massa seca de amêndoas de cacau. Todas as medidas foram realizadas utilizando uma balança digital, com capacidade máxima de 40,00 kg, sensibilidade de 4,00 g e precisão de 2,00 dígitos. Na Figura 1.2 é ilustrado alguns dos instrumentos utilizados e separação dos frutos para quantificação dos componentes de produtividade.



Figura 2.2. Instrumentos utilizados e separação dos frutos para quantificação dos componentes de produtividade dos experimentos de açaizeiro (A), coqueiro-anão-verde (B), lima ácida (C) e cacauzeiro (D).

3.2.7. Produtividade da água (Pa)

A produtividade da água foi calculada em função dos componentes de produtividade em relação a evapotranspiração da cultura, utilizando as equações propostas por Carvalho et al. (2024) (Eq. 2.3):

$$Pa = \frac{Cp}{ET_c} \quad (2.3)$$

Em que, Pa é a produtividade da água, representada pela variável de produtividade em função de 1 metro cúbico evapotranspirado; Cp é a componente de produtividade e ET_c atual é a evapotranspiração atual da cultura (mm).

3.2.8. Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento foi o inteiramente casualizado (DIC), sendo, dois tratamentos irrigado e não irrigado e as repetições consistiram do número de plantas. Os dados de componentes de produtividade e produtividade da água foram comparados pelo Teste-t de Student ($p < 0,05$). Ressalta-se que, devido à diferença na idade das plantas de coqueiro, os dois tratamentos foram analisados separadamente, sem qualquer inter-relação entre eles. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados coletados nas torres dos sítios experimentais, no cultivo de açaizeiro durante o período experimental a média de Temperatura (T_{ar}) e Umidade relativa do ar (UR)

foram, respectivamente, $28,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,6$) e $87,9\%$ ($\pm 5,7$) (Figura 2.3A). A velocidade do vento (U) obteve média de $0,6\text{ m s}^{-1}$ ($\pm 0,2$) e o déficit de pressão de vapor d'água (DPV) obteve média de $0,5\text{ kPa}$ ($\pm 0,2$) (Figura 2.3B).

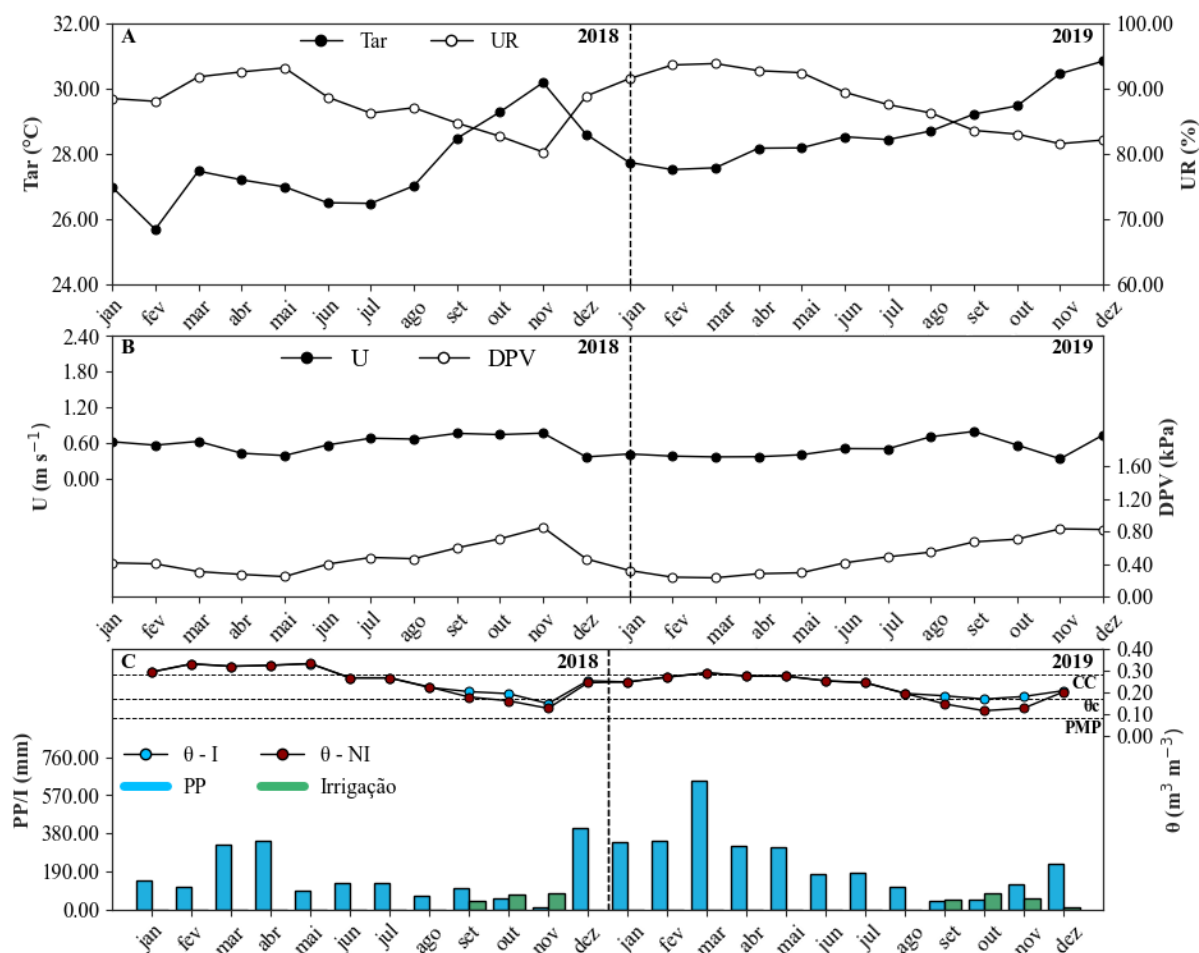


Figura 2.3. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ, m³ m⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de açaizeiro, Castanhal – PA.

No tratamento irrigado a média do conteúdo volumétrico de água no solo (θ) de 0 a 30 cm foi de $0,25\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,05$). No tratamento não irrigado, a média de θ para a camada monitorada de 0 a 30 cm, foi de $0,24\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,07$) (Figura 2.3C). A Precipitação pluviométrica (PP) total durante o período de estudo foi de 4.724,5 mm. O total de lâmina de água aplicado pela irrigação durante os meses de setembro a novembro foram de 396,6 mm (Figura 2.3C).

Para os dados registrados no tratamento irrigado do cultivo de coqueiro-anão-verde, a média de Tar e UR, foram respectivamente, $28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,8$) e $89,5\%$ ($\pm 4,3$) (Figura 2.4A). A média obtida de DPV foi de $0,4\text{ kPa}$ ($\pm 0,2$) (Figura 2.4B), enquanto o θ médio entre as três profundidades monitoradas foi de $0,25\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ ($\pm 0,04$). O total de PP para o período monitorado

foi de 4.172,9 mm, enquanto o total de água aplicada por irrigação entre os meses agosto a novembro, foi de 1.048,9 mm (Figura 2.4C).

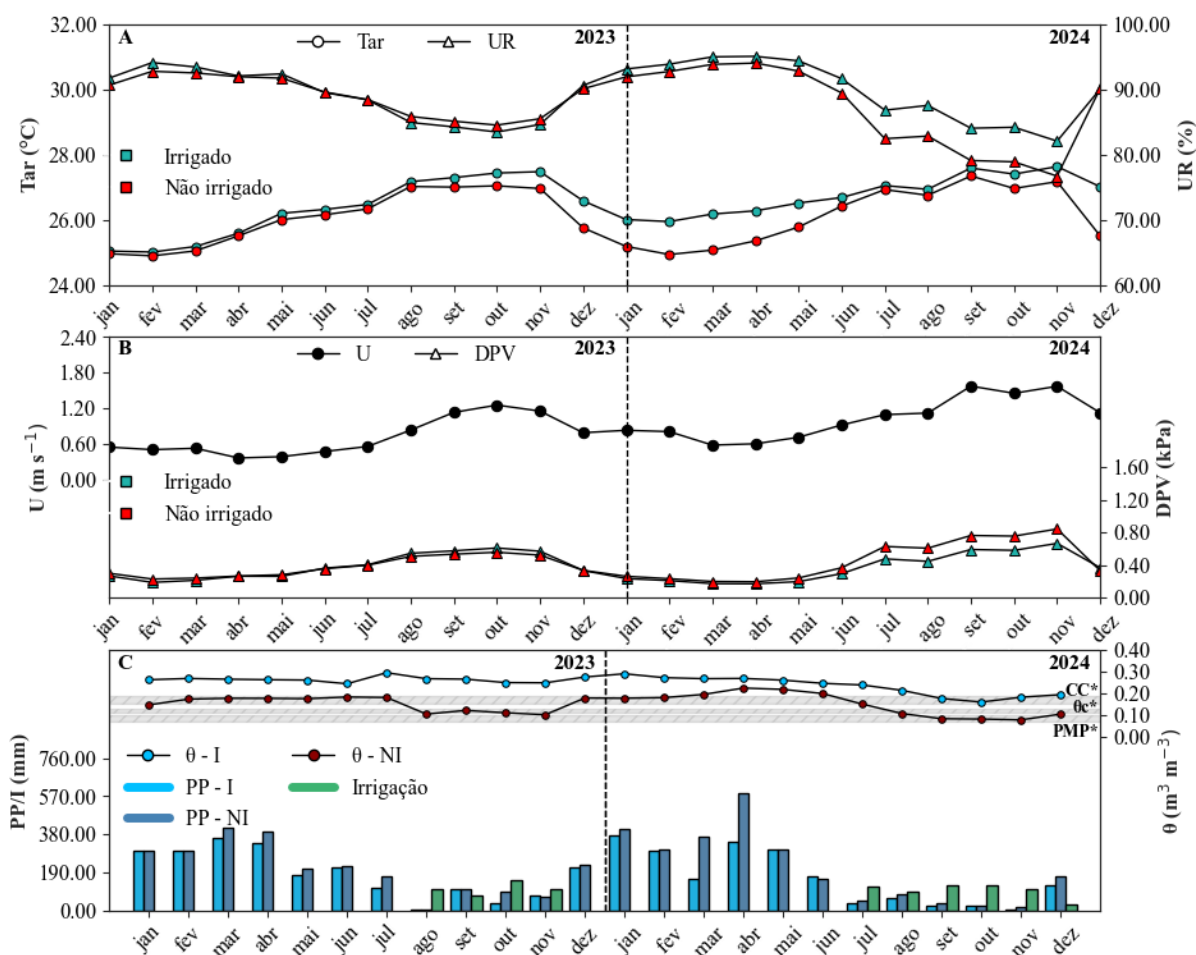


Figura 2.4. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ, m³ m⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de coqueiro-anão-verde, Santa Izabel do Pará – PA.

Os dados registrados no tratamento não irrigado do cultivo de coqueiro-anão-verde, obteve média de Tar e UR, respectivamente de 26,1 °C (± 0,9) e 88,1% (± 5,1) (Figura 2.3A). A média de U durante o experimento foi de 0,9 m s⁻¹ (± 0,4), enquanto o DPV obteve média de 0,5 kPa (± 0,2) (Figura 2.3B). O θ médio entre as três profundidades monitoradas foi de 0,15 m³ m⁻³ (± 0,05), enquanto o total de PP para o período monitorado foi de 4.937,6 mm (Figura 2.3C).

No plantio experimental com lima ácida, registrou-se média de 27,3 °C (± 0,8) e 80,1% (± 9,1), para Tar e UR, respectivamente (Figura 2.5A). A média de U obtida durante o experimento foi de 1,5 m s⁻¹ (± 0,5) e a média de DPV foi de 0,9 kPa (± 0,4) (Figura 2.5B). A média obtida do θ nas três profundidades, foram 0,24 m³ m⁻³ (± 0,04) e 0,18 m³ m⁻³ (± 0,06), para os tratamentos irrigados e não irrigados, respectivamente. O total de PP para o período

experimental, foi de 2.874,4 mm e o total de irrigação aplicado entre os meses de agosto a dezembro foi de 973,8 mm (Figura 2.5C).

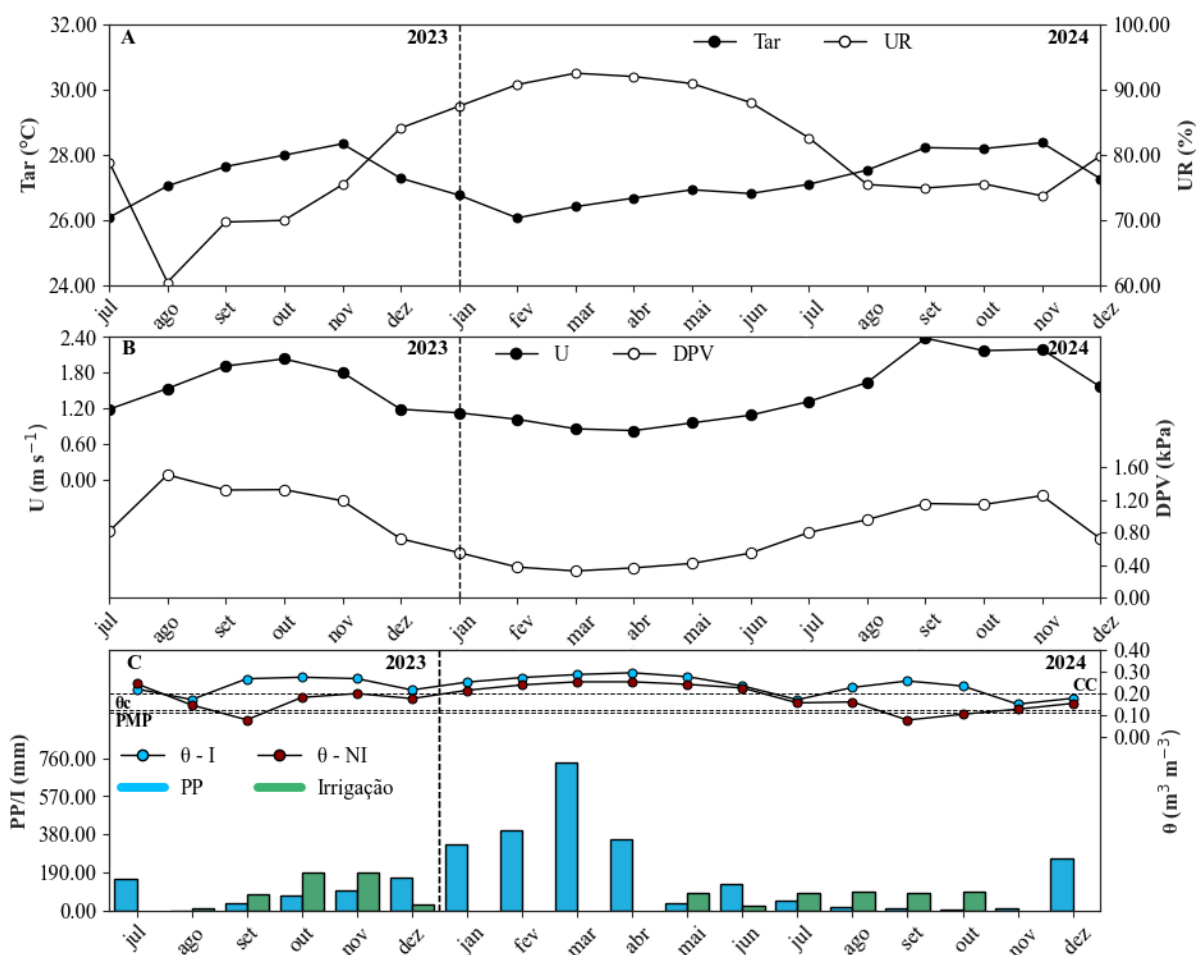


Figura 2.5. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ, m³ m⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de lima ácida, Capitão-Poço – PA.

No sítio experimental com cacauzeiro, a média de Tar e UR foi de 27,9 °C ($\pm 1,3$) e 82,3% ($\pm 6,7$), respectivamente (Figura 2.6A). As médias de U e DPV foram respectivamente 1,0 m s⁻¹ ($\pm 0,8$) e 0,7 kPa ($\pm 0,3$) (Figura 2.6B). A média do θ entre as três profundidades para o período experimental no tratamento irrigado foi de 0,26 m³ m⁻³ ($\pm 0,02$) e 0,20 m³ m⁻³ ($\pm 0,05$) para o tratamento não irrigado. No tratamento irrigado e não irrigado, a PP total foi de 1.728,6 mm e 2.060,0 mm, respectivamente. O total irrigado durante o período analisado, foi 687,7 mm (Figura 2.6C).

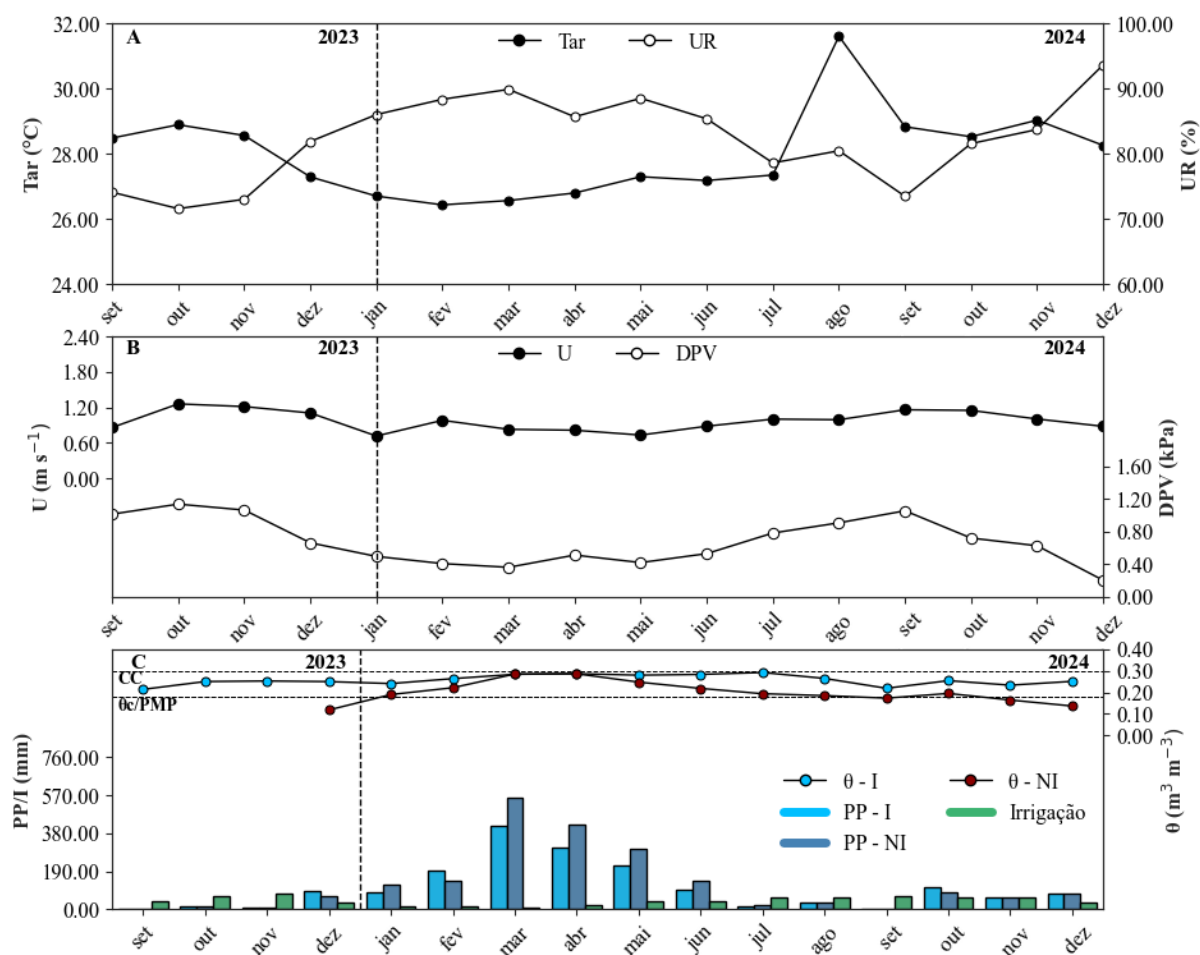


Figura 2.6. Temperatura do ar (Tar, °C) (A), Umidade relativa do ar (UR, %) (A), Velocidade do vento (U, m s⁻¹) (B), Déficit de pressão de vapor d'água (DPV, kPa) (B), Conteúdo volumétrico de água no solo (θ, m³ m⁻³) (C), Precipitação pluviométrica (PP, mm) (C) e Lâmina de irrigação (Irrigação, mm) (C) no cultivo de cacaueteiro, Vitória do Xingu – PA.

Durante o período experimental, os cultivos estudados foram fortemente influenciados pelo fenômeno global El Niño-Oscilação Sul (ENOS) fase quente (El Niño). Para os experimentos desenvolvidos entre os anos de 2023 a 2024, o El Niño esteve presente de junho de 2023 até abril de 2024, sendo classificado como de intensidade moderada a forte. Esse fenômeno causou um aumento nas áreas de seca extrema na região Norte (INMET, 2024).

Durante o período experimental no cultivo de açaizeiros, observou-se que o tratamento irrigado apresentou uma produtividade superior, sendo 59,28% maior em relação ao tratamento não irrigado. No total das três safras analisadas, a produtividade do tratamento irrigado alcançou 11.991,29 kg/ha, correspondendo a 19,19 kg por planta. Em contrapartida, no tratamento não irrigado, a produtividade totalizou 7.528,23 kg/ha, correspondendo a 12,05 kg por planta ao longo do período estudado.

A partir das três safras colhidas no cultivo de açaizeiro irrigado, a média da massa fresca (MF) de açaí obtida foi de 6,40 kg planta⁻¹, sendo a maior quantidade colhida na primeira safra

(7,92 kg planta⁻¹), que compreendeu ao volume evapotranspirado de 15,23 m³ (Tabela 2.4). O menor quantitativo colhido, foi na segunda safra (5,33 kg planta⁻¹), que, compreendeu ao volume evapotranspirado de 16,20 m³ (Tabela 2.4). Dessa forma, para cada m³ de água consumido pelo açaizeiro irrigado, foram produzidos em média 0,41 kg de frutos (Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Massa fresca de frutos (MF, kg planta⁻¹), evapotranspiração atual (ET_{c atual}, m³) e produtividade da água (Pa, kg m⁻³) do açaizeiro irrigado e não irrigado.

Safras	Irigado			Não irrigado		
	MF (kg planta ⁻¹)	ET _{c atual} (m ³)	Pa (kg m ³)	MF (kg planta ⁻¹)	ET _{c atual} (m ³)	Pa (kg m ³)
1°	7,92	15,23	0,52	4,94	12,52	0,39
2°	5,33	16,20	0,33	3,29	14,00	0,23
3°	5,94	15,14	0,39	3,82	12,08	0,32
Média	6,40 a	15,52	0,41 A	4,02 b	12,60	0,32 B

Médias do componente de produtividade MF seguidas pela mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; médias da produtividade da água seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

No tratamento não irrigado de açaizeiro, a média da MF de açaí obtida foi de 4,02 kg planta⁻¹, sendo a maior quantidade colhido na primeira safra (4,94 kg planta⁻¹), com volume evapotranspirado de 12,52 m³ (Tabela 2.4). O menor valor colhido, foi na segunda safra (3,29 kg planta⁻¹), correspondendo ao volume evapotranspirado de 14,00 m³ (Tabela 2.4). Dessa forma, para cada m³ de água evapotranspirado pelo açaizeiro não irrigado, foram produzidos em média 0,32 kg (Tabela 2.4).

Com base nos resultados estatísticos do Teste-t de Student ($p < 0,05$), houve uma diferença significativa entre os tratamentos em relação à massa fresca dos frutos (MF) e à produtividade da água em termos de massa fresca de frutos de açaí (Pa_{MF}). Observou-se que o tratamento irrigado apresentou maior MF e Pa_{MF}, resultando em um aumento de 28,13% na produtividade do açaizeiro quando comparado ao tratamento não irrigado. Com base no resultado encontrado entre os tratamentos, Costa (2021), para o açaizeiro, na mesma região, também obteve maiores médias de produtividade da água de frutos em sistemas irrigados em comparação com plantas não irrigadas.

No experimento com coqueiro-anão-verde, não foi possível comparar a produtividade entre os tratamentos devido à diferença de idade entre as plantas irrigadas e não irrigadas. Em 2023, o tratamento irrigado registrou produtividade de 13.718,60 frutos/ha, aumentando para 15.785,00 frutos/ha em 2024, um incremento de 15,06%. O volume de água de coco produzido passou de 4.307,05 L/ha em 2023 para 6.883,90 L/ha em 2024, representando um aumento de 59,83%. Esses ganhos podem estar associados à suplementação hídrica pela irrigação realizada nos períodos de menor ocorrência de chuvas. Na área de coqueiro não irrigado, a produtividade observada no ano de 2023 foi de 14.231,10 frutos/ha, enquanto em 2024 alcançou 14.149,10

frutos/ha, representando uma redução de 0,58%. Quanto ao volume de água de coco, a produção foi de 4.307,05 L/ha em 2023, aumentando para 6.004,45 L/ha em 2024, um incremento de 38,95%.

No cultivo de coqueiro-anão-verde irrigado, a produção total de frutos por planta (NF) nos anos de 2023 e 2024 foi de 66,92 frutos planta⁻¹ e 77,00 frutos planta⁻¹, respectivamente. Durante esses anos, o volume de água de coco (Ac) produzido foi de 21,01 L planta⁻¹ em 2023 e 33,58 L planta⁻¹ em 2024 (Tabela 2.5). O total evapotranspirado foi de 47,74 m³ em 2023 e 48,75 m³ em 2024. Com isso, a partir de cada metro cúbico (m³) evapotranspirado, o coqueiro irrigado produziu em 2023 1,40 frutos e 0,44 litros de água de coco, enquanto em 2024 produziu 1,58 frutos por m³ e 0,69 litros de água de coco por m³ (Tabela 2.5).

Tabela 2.5. Número de frutos (NF, frutos planta⁻¹), volume de água de coco (Ac, L planta⁻¹), evapotranspiração atual da cultura (ET_c atual, m³) e produtividade da água (Pa, m⁻³) para NF e Ac, do coqueiro-anão-verde irrigado e não irrigado.

Tratamentos	Anos	NF (frutos planta ⁻¹ ano ⁻¹)	Ac (L planta ⁻¹ ano ⁻¹)	ET _c atual (m ³)	Pa _{NF} (frutos m ³)	Pa _{Ac} (L m ³)
Irrigado	2023	66,92	21,01	47,74	1,40	0,44
	2024	77,00	33,58	48,75	1,58	0,69
	Média	71,96	27,30	48,25	1,49	0,56
Não irrigado	2023	69,42	21,08	43,29	1,60	0,49
	2024	69,02	29,29	38,60	1,79	0,76
	Média	69,22	25,19	40,95	1,70	0,62

Em 2024, o tratamento com coqueiro irrigado obteve um aumento de 22,38% no número de frutos planta⁻¹ ano⁻¹ e 59,83% no volume de água de coco planta⁻¹ ano⁻¹, em comparação a 2023 (Tabela 2.5). No mesmo ano, houve uma redução de 14,56% no volume total de chuva em relação a 2023, possivelmente devido à predominância do fenômeno El Niño no primeiro semestre de 2024 (NOAA, 2025). Entretanto, durante o período de irrigação de 2024, foi aplicado um volume de água 38,20% superior ao total irrigado em 2023 (Figura 2.3C).

Estudos sobre o coqueiro relatam um aumento na produção de frutos e no volume de água do coqueiro devido ao aumento da quantidade de água utilizada durante a produção (Carvalho et al., 2024). Araújo et al. (2022) observaram um aumento de 32,45% na produtividade de frutos e 50,18% no rendimento de água de coco com o incremento no fornecimento de água para o coqueiro. Em 2024, a produtividade da água aumentou 12,56% para Pa_{NF} e 56,82% para Pa_{Ac}, em comparação a 2023 (Tabela 2.5). Esse aumento está relacionado ao aumento na produção mencionado anteriormente, que contribuiu para maiores valores em produtividade da água, resultados semelhantes ao obtido por Carvalho et al. (2024).

No tratamento não irrigado de coqueiro-anão-verde, a produção total de frutos por planta nos anos de 2023 e 2024 foi de 69,42 e 69,02 frutos plantas⁻¹, respectivamente (Tabela 2.5). Nos mesmos anos, o volume de água de coco obtido foi de 21,08 L planta⁻¹ em 2023 e 29,29 L

planta⁻¹ em 2024 (Tabela 2.5). A partir de cada m³ evapotranspirado, as plantas de coqueiro não irrigadas produziram 1,60 frutos e 0,49 litros de água de coco em 2023, e 1,79 frutos e 0,69 litros de água de coco por m³ em 2024 (Tabela 2.5).

Em 2024, houve uma redução de 10,83% na evapotranspiração total do coqueiro não irrigado em comparação a 2023 (Tabela 2.5). Este resultado pode estar relacionado ao período de agosto a novembro (menos chuvoso), quando se observou uma diminuição de 18,18% no conteúdo volumétrico de água no solo em relação ao mesmo período de 2023 (Figura 2.3C). Embora tenha havido um aumento de 38,29% no volume de água de coco planta⁻¹ ano⁻¹, o número de frutos planta⁻¹ ano⁻¹ manteve a média entre os anos (Tabela 2.5). Isso pode estar associado à menor suplementação hídrica durante o período mencionado, levando a processos metabólicos e fisiológicos menos eficientes (Yadav et al., 2020).

No sítio experimental com lima ácida, o tratamento irrigado obteve maior produtividade tanto no número de frutos quanto no peso de frutos, em comparação ao tratamento não irrigado. No total produzido entre outubro de 2023 e dezembro de 2024, a área irrigada produziu um total de 531.943,70 frutos/ha e 40.625,14 kg de frutos/ha, enquanto a área não irrigada a produção foi de 252.620,10 frutos/ha e 19.477,23 kg de frutos /ha.

Para o cultivo de lima ácida foram avaliados o número de frutos (NF) e o peso de frutos (PF) por planta. A partir das colheitas realizadas entre outubro de 2023 a dezembro de 2024, foram colhidos no tratamento irrigado o total de 798,71 frutos planta⁻¹, correspondendo ao total de 61,00 kg planta⁻¹ (Tabela 2.6). Enquanto no tratamento não irrigado, o total colhido foi de 379,31 frutos planta⁻¹, totalizando 29,25 kg planta⁻¹ (Tabela 2.6).

Tabela 2.6. Número de frutos (NF, frutos planta⁻¹), peso de frutos (PF, kg planta⁻¹), evapotranspiração atual da cultura (ET_{c atual}, m³) e produtividade da água (Pa, m⁻³) para NF e PF, da lima ácida irrigado e não irrigado.

Tratamentos	NF (frutos planta ⁻¹)	PF (kg planta ⁻¹)	ET _{c atual} (m ³)	Pa _{NF} (frutos m ³)	Pa _{PF} (kg m ³)
Irigado	798,71 a	61,00 a	21,78	36,67 a	2,80 a
Não irrigado	379,31 b	29,25 b	18,96	20,01 b	1,54 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Durante os meses de colheita, a evapotranspiração total foi de 21,78 m³ no tratamento irrigado e 18,96 m³ no não irrigado (Tabela 2.6). Com isso, a cada m³ evapotranspirado pela lima ácida irrigada, foram produzidos 36,67 frutos e 2,80 kg de frutos (Tabela 2.6). Enquanto a lima ácida sem irrigação, a cada milímetro cúbico (m³) evapotranspirado, foram produzidos 20,01 frutos e 1,54 kg de frutos (Tabela 2.6).

Os resultados estatísticos do Teste-t de Student ($p < 0,05$) indicaram diferença significativa entre os tratamentos para todos os componentes de produtividade (NF e PF) e para os valores de produtividade da água (Pa_{NF} e Pa_{PF}). No tratamento irrigado, os valores de NF e

PF foram 108% superiores em comparação ao tratamento não irrigado (Tabela 2.6). Em termos de produtividade da água, a irrigação aumentou em 83,26% a Pa_{NF} e em 81,82% a Pa_{PF} , em relação às plantas não irrigadas (Tabela 2.6). Pinto et al. (2023), observaram, na mesma região, que a profundidade de irrigação aumenta a produção e o peso dos frutos da lima ácida Tahiti. Segundo os autores, o aumento da irrigação melhora os processos fisiológicos da lima ácida, resultando em maior produtividade da água devido à suplementação hídrica.

Entre setembro de 2023 e dezembro de 2024, a produtividade no sítio experimental de cacaueteiro foi superior no tratamento irrigado em comparação ao tratamento não irrigado. No tratamento irrigado, obteve-se 53.227,00 frutos/ha e 327.602,02 amêndoas/ha, enquanto no não irrigado, os valores foram de 25.654,00 frutos/ha e 219.428,50 amêndoas/ha. No cacaueteiro irrigado durante o período monitorado, foram colhidos o total de 47,91 frutos plantas⁻¹ (NF), enquanto na área não irrigada foram colhidos 23,09 frutos planta⁻¹ (Tabela 2.7). Outro componente de produção monitorado foi o número de amêndoas totais por planta (Nap), o qual foram registrado uma produção de 294,87 amêndoas planta⁻¹ e 197,51 amêndoas planta⁻¹, no tratamento irrigado e não irrigado, respectivamente (Tabela 2.7).

Tabela 2.7. Número de frutos (NF, frutos planta⁻¹), número de amêndoas por planta (Nap, amêndoas planta⁻¹), evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c\text{ atual}}$, m³) e produtividade da água (Pa , m⁻³) para NF e Nap, do cacaueteiro irrigado e não irrigado.

Tratamentos	NF (frutos planta ⁻¹)	Nap (amêndoas planta ⁻¹)	$ET_{c\text{ atual}}$ (m ³)	Pa_{NF} (frutos m ³)	Pa_{Nap} (amêndoas m ³)
Irigado	47,91 a	294,87 a	15,30	3,13 a	19,27 a
Não irrigado	23,09 b	197,51 b	9,04	2,55 a	21,85 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Neste período para o tratamento irrigado e não irrigado o total evapotranspirado foi de 15,30 m³ e 9,04 m³, respectivamente (Tabela 2.7). Sendo assim, a produtividade da água no tratamento irrigado foi de 3,13 frutos por plantas e 19,27 amêndoas por planta para cada um m³ evapotranspirado (Tabela 2.7). Enquanto no tratamento não irrigado, a produtividade da água obtida foi de 2,55 frutos por planta e 21,85 amêndoas por planta para cada m³ (Tabela 2.7).

A produtividade de amêndoas frescas e secas foi superior no tratamento irrigado em comparação ao não irrigado. Na área irrigada, registrou-se uma produção de 5.013,03 kg/ha de amêndoas frescas e 2.046,06 kg/ha de amêndoas secas. Na área não irrigada, a produção foi de 2.395,01 kg/ha de amêndoas frescas e 1.037,07 kg/ha de amêndoas secas. Para o peso de amêndoas frescas (Paf), foram quantificados o total de 4.512,10 g planta⁻¹ no tratamento irrigado e 2.155,73 g planta⁻¹ no tratamento não irrigado (Tabela 2.8). Para o componente de

produtividade de peso de amêndoas secas (Pas) no tratamento irrigado foram coletados o total de 1.841,64 g planta⁻¹ e no tratamento não irrigado 933,45 g planta⁻¹ (Tabela 2.8).

Com isso, a produtividade da água no tratamento irrigado para a Paf foi de 294,91 g m³ e 120,37 g m³ para o Pas para cada m³ evapotranspirado (Tabela 2.8). Enquanto no tratamento não irrigado a Pa em termos de Paf e Pas foram, respectivamente, 238,47 g m³ e 103,26 g m³ para cada m³ evapotranspirado (Tabela 2.8). Durante as coletas, observou-se a ocorrência de amêndoas germinadas em frutos do tratamento sem irrigação. Logo, quantificaram-se apenas amêndoas viáveis (não germinadas).

Tabela 2.8. Peso de amêndoas frescas (Paf, g planta⁻¹), Peso de amêndoas secas (Pas, g planta⁻¹), evapotranspiração atual da cultura (ET_c atual, m³) e produtividade da água (Pa, g m⁻³) para Paf e Pas, do cacaueiro irrigado e não irrigado.

Tratamentos	Paf (g planta ⁻¹)	Pas (g planta ⁻¹)	ET _c atual (m ³)	Pa _{Paf} (gramas m ³)	Pa _{Pas} (gramas m ³)
Irigado	4.512,18 a	1.841,64 a	15,30	294,91 a	120,37 a
Não irrigado	2.155,73 b	933,45 b	9,04	238,47 a	103,26 a

Segundo o Teste-t de Student ($p < 0,05$), houve diferenças significativas entre os tratamentos para todos os componentes de produtividade do cacaueiro (Tabelas 2.7 e 2.8). No tratamento irrigado, observou-se um aumento de 70,56% no número de frutos por planta, 49,29% no número de amêndoas por planta, 109,31% no peso de amêndoas frescas por planta e 97,29% no peso de amêndoas secas por planta (Tabelas 2.7 e 2.8). Os maiores valores observado nos componentes de produtividade no tratamento irrigado podem ser atribuídos à maior eficiência fisiológica das plantas sob condições de hidratação.

Fraga Junior et al. (2021) observaram uma redução linear na transpiração do cacaueiro conforme a umidade do solo diminui. Carr e Lockwood (2011) também apontaram que o cacaueiro sofre inibição na floração sob estresse hídrico. De acordo com Adet et al. (2024), os períodos de seca, associados a outros fatores ambientais, aumentam a variabilidade na produtividade do cacau. Esses autores, destacam a importância da irrigação durante períodos de seca, com efeitos positivos na produção do cacaueiro.

Os resultados estatísticos (Teste-t de Student, $p < 0,05$) indicaram que não houve diferença significativa entre os tratamentos em termos de produtividade da água para todos os parâmetros analisados (Pa_{NF}, Pa_{Nap}, Pa_{Paf} e Pa_{Pas}) (Tabelas 2.7 e 2.8). Esse resultado pode ser atribuído às características intrínsecas do cultivo estudado e à sua interação no sistema solo-planta-atmosfera (Hatfield et al. 2001). Portanto, a irrigação não afetou a produtividade da água, e a conversão de água em produção do cacaueiro foi proporcional à quantidade de água aplicada.

Riaz et al. (2020) apontam que diversos fatores combinados envolvendo o solo e a planta podem afetar a produtividade da água em um sistema de cultivo. Mbava et al. (2021)

identificaram efeitos significativos de precipitação pluviométrica e temperatura do ar sobre a produtividade da água de culturas agrícolas, assim como fatores relacionados à textura do solo.

Diante dos diversos fatores bióticos e abióticos, associados às mudanças climáticas (Riaz et al., 2020) e à crescente preocupação sobre a disponibilidade dos recursos hídricos na agricultura (Hatfield et al., 2001), o presente estudo possibilita auxiliar na tomada de decisões, no planejamento e na gestão eficiente do manejo de irrigação, otimizando a produção agrícola e a eficiência no uso dos recursos hídricos.

3.4. CONCLUSÃO

A irrigação demonstrou ser um fator positivo, aumentando significativamente os componentes de produtividade avaliados no cultivo de açaizeiro, de lima ácida e de cacaueteiro.

A irrigação elevou a produtividade da água do açaizeiro e da lima ácida, evidenciando uma gestão eficiente do recurso hídrico. No entanto, para o cacaueteiro, o aumento não foi significativo.

No coqueiro, apesar da idade das plantas não permitir uma comparação direta entre tratamentos irrigado e não irrigado, observou-se que, ao comparar os anos de 2023 e 2024, a irrigação resultou em um aumento no número de frutos, no volume de água de coco e nos valores respectivos de produtividade da água.

3.5. REFERÊNCIAS

ADET, L.; ROZENDAAL, D. M. A.; TAPI, A.; ZUIDEMA, P. A.; VAAST, P.; ANTEN, N. P. R. Negative effects of water deficit on cocoa tree yield are partially mitigated by irrigation and potassium application. **Agricultural Water Management**, v. 296, p. 108789, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377424001240>.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO**, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALVARES, C. A. STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L. de; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref.

ARAÚJO, B. de A.; MIRANDA, F. R. de; BEZERRA, M. A.; RODRIGUES, A. J. O.; CALVET, A. S. F.; SILVA, E. S. da; LIMA, G. de C. M.; SANTOS, M. M. S. Sustained deficit irrigation on yield and fruit water quality of dwarf green coconut. **Ciência Rural**, v. 52, n. 11, p. 1–8, 2022. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782022001100202&tlng=en.

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO, J. R. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

BOUIX, C. P. S.; BRAGA, L. G. da S.; RAMOS, A. Brazilian Journal of Development Manejo da irrigação em cacauzeiros na região sul da Bahia Irrigation management on cocoa trees in the south of Bahia. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 22820–22877, 2022.

CARR, M. K. V.; LOCKWOOD, G. **The water relations and irrigation requirements of cocoa (Theobroma cacao L.): A review**, v. 47, n. 4, p. 653-676, 2011.

CARVALHO, E. de O. T. de; FERNANDES, G. S. T.; RUA, M. L.; MONTEIRO, A. C.; SILVA, J. V. F. da; VELAME, M. de L. A.; PINTO, J. V. de N.; LINS, P. M. P.; MIRANDA, F. R. de; SOUZA, P. J. de O. P. de. Water productivity in irrigated coconut palms in humid tropical climate conditions in eastern Brazilian Amazon. **Ciência Rural**, v. 54, n. 11, p. 1–9, 2024. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782024001100351&tlng=en.

COSTA, D. L. P. **Produção e viabilidade econômica de açaizeiro (*Euterpe Oleracea* Mart.) irrigado em monocultivo e consorciado com cupuaçuzeiro sob diferentes disponibilidades hídricas em Castanhal-PA, leste da Amazônia brasileira**, p. 96, Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém-Pará, 2021.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, 2018

FRAGA JUNIOR, L. S.; VELLAME, L. M.; OLIVEIRA, A. S. de; SILVA PAZ, V. P. da; Transpiration of young cocoa trees under soil water restriction. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 2, 2021.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J.; H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy journal**, v. 93, n. 2, p. 271-280, 2001.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pedologia**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>>. Acesso em: 05 fev. 2025.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Produção Agrícola Municipal**, 2024. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado> >.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Painel El Niño: Boletim Mensal** Nº 08. Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Painel-El-Ni%C3%B1o-Boletim-Mensal-No-08.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed: Edusp, p. 261–269, 2005.

MBAVA, N.; MUTEMA, M.; ZENGNI, R.; SHIMELIS, H.; CHAPLOT, V. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105878, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105878>.

MIRANDA, F. R. de; ROCHA, A. B. S.; GUIMARÃES, V. B.; SILVA, E. S. da; LIMA, G. D. C. M.; SANTOS, M. M. S. Eficiência do uso da água na irrigação do coqueiro anão. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 109–124, 2019. Disponível em: <http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3567>.

NOAA. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **El Niño and La Niña: Related Resources**. Disponível em: <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>. Acesso em: 29 jan. 2025.

OLIVEIRA, E. C. de A.; FREIRE, F. J.; DE OLIVEIRA, A. C.; NETO, D. E. S.; ROCHA, A. T. da; CARVALHO, L. A. de. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 6, p. 617–625, 2011.

PINTO, J. V. de N.; COSTA, D. L. P.; NUNES, H. G. G. C.; SILVA JUNIOR, A. C. da; SOUSA, A. M. L. de; SOUZA, P. J. de O. P. de; ORTEGA-FARIAS, S. Radiation Balance and Partitioning of Latent and Sensible Heat Fluxes Over a Lime Orchard in Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 4, p. 491–502, 2022. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010277862022000400491&tlng=pt.

PYTHON. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Disponível em:
<<https://www.python.org/downloads/>>.

RIAZ, F.; RIAZ, M.; ARIF, M. S.; YASMEEN, T.; ASHRAF, M. A.; ADIL, M.; ALI, S.; MAHMOOD, R.; RIZWAN, M.; HUSSAIN, Q.; ZIA, A.; ALI, M. A.; ARIF, M.; FAHAD, S. Estratégias alternativas e não convencionais de manejo de solo e cultivo para aumentar a eficiência do uso da água. **Environment, climate, plant and vegetation growth** , p. 323-338, 2020.

SANTOS, M. R.; SILVEIRA, B. C. da; SEPULVEDA NETO, C. da S.; PEREIRA, L. B.; FERREIRA, N. C. S. **QIrriga**: Aplicativo para manejo de irrigação via clima. Semina: Ciências Agrárias, v. 44, n. 5, p. 1789–1804, 2023. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/48922>.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 1–10, 2015.

SOUSA, D. de P.; FERNANDES, T. F. S.; TAVARES, L. B.; FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; NUNES, H. G. G. C.; COSTA, D. L. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P. J. de O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5–22, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>.

TARKALSON, D. D.; KING, B. A.; BJORNEBERG, D. L. Maize grain yield and crop water productivity functions in the arid Northwest U.S. **Agricultural Water Management**, v. 264, p. 107513, 2022.

YADAV, A.; JAYASWAL, P. K.; VENKAT RAMAN, K.; SINGH, B.; SINGH, N. K.; USHA, K. Transcriptome analysis of flowering genes in mango (*Mangifera indica* L.) in relation to floral malformation. **Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology**, v. 29, n. 2, p. 193–212, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13562-019-00541-z>.