



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DENIS DE PINHO SOUSA

BALANÇO DE ENERGIA E NECESSIDADES TÉRMO-HÍDRICAS DO AÇAIZEIRO
IRRIGADO NO NORDESTE PARAENSE

BELÉM – PA

2020

DENIS DE PINHO SOUSA

**BALANÇO DE ENERGIA E NECESSIDADES TÉRMO-HÍDRICAS DO AÇAIZEIRO
IRRIGADO NO NORDESTE PARAENSE**

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

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

Coorientador: Samuel Ortega-Farias

BELÉM – PA

2020

DENIS DE PINHO SOUSA

**BALANÇO DE ENERGIA E NECESSIDADES TÉRMO-HÍDRICAS DO AÇAIZEIRO
IRRIGADO NO NORDESTE PARAENSE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências deste para o título de Doutor.

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

BANCA EXAMINADORA

Prof^o Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza – Presidente
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

Prof^a. Dra. Vivian Dielly da Silva Farias - 1^o Examinadora
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Dr. Alessandro Carioca de Araújo -2^o Examinador
EMBRAPA AMAZONIA ORIENTAL

Prof^o Dr. Claudio Jose Reis de Carvalho - 3^o Examinador
EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL

Prof^o Dr. Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes - 4^o Examinador
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI

DEDICO

Aos meus pais,

Celina de Pinho Sousa & Mario Corrêa de Sousa,

Por todo o amor incondicional, ensinamentos, torcida, incentivos em tudo o que eu me proponha a fazer e por me proporcionarem o privilégio de poder somente me dedicar aos estudos, me guiando na contramão de uma realidade vivida por vocês e por tantas outras famílias, onde os estudos são deixados de lado ainda na adolescência para que se busque o pão de cada dia.

Ao meu irmão, cunhada e sobrinhos,

Diego de Jesus de Pinho Sousa, Renata Soares Sousa, Rayssa Sousa & Derick Sousa,

Por toda torcida, companheirismo, amor, carinho e amizade.

Ao meu avô e minha avó,

Benedito de Pinho e Lourença Corrêa,

Carinhosamente chamados de “Seu Biluca” e “Dona Güita”,

Por toda sabedoria repassada, amor e carinho.

Ao meu tio e minha tia,

Isaias Marinho de Pinho e Sandra Helena Marinho de Pinho,

Por todos os ensinamentos, amor, carinho e por serem meus segundos pais.

Família, vocês são o que tenho de mais precioso, é tudo por vocês e pra vocês.

AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus e a Nossa Senhora de Nazaré, pela força e pela fé, que faz brotar dentro de cada um de nós, em cada momento das nossas vidas;

A minha família, em especial as minhas tias Sandra, Alessandra e Katia; e aos tios Isaias, Jorge e Ailson, por todo o incentivo, que apesar dos poucos momentos que temos convivido nos últimos anos, sei que torcem incondicionalmente para meu sucesso;

A minha grande incentivadora, Surama Costa, por estar ao meu lado em vários momentos, me apoiando e me dando forças nessa gangorra que é a vida;

Aos amigos Adriano Mendes e Gheryte Alonso por se fazerem presentes na minha vida! Obrigado por toda a força, torcida, incentivo e amizade durante todos esses anos;

Aos irmãos que ganhei na Universidade Denilson Pontes, Richard de Nixon e Wagner Lopes Filho, que são fundamentais em minha vida desde o início da graduação;

Aos amigos que fiz em Capitão Poço e que foram essenciais na execução dessa pesquisa: Thiago, Mauricio, Ana Flávia, Guilherme, Fabinho, Otavio e Lucas. Sem a ajuda de vocês eu não teria conseguido;

Aos amigos Lucas Belém e Jaime Borges por toda ajuda prestada nas análises em laboratório e no campo, vocês foram demais;

Aos amigos e colegas do grupo de pesquisa Interações solo-planta-atmosfera na Amazônia: por toda a ajuda durante a elaboração dessa Tese;

Aos amigos que fiz no PGAgro: Ana Carla (in memoriam), William Aviz, Helane Aguiar, Lucas Bastos, Carol Jucá, Lana Carvalho e Josué Valente pelas discussões científicas, trocas de ideias e amizade;

Ao produtor Cid Ornela por abrir as portas de sua fazenda para a realização desta pesquisa e aos seus funcionários por todo o apoio em campo;

Ao Prof. Marcus Lima e a direção da UFRA – Capitão Poço, por me receberem de braços abertos e me ajudarem logisticamente sempre que solicitado;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza, pela oportunidade e confiança depositada em mim e pelo exemplo de ética profissional;

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho científico.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
2. TEMPERATURAS BASAIS E NECESSIDADE TÉRMICA DO AÇAIZEIRO NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.	17
RESUMO	17
ABSTRACT	18
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	20
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
2.4 CONCLUSÃO	34
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	35
3. BALANÇO DE ENERGIA EM PLANTIO DE AÇAIZEIRO IRRIGADO NO NORDESTE PARAENSE	40
RESUMO	40
3.1 INTRODUÇÃO	41
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	42
3.2.1 Área experimental	42
3.2.2 Instrumentação	44
3.2.3 Balanço de energia	45
3.2.4 Calor armazenado no dossel vegetal	46
3.2.5 Razão de Bowen, fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H).....	47
3.2.6 Critério para rejeição de dados inadequados do método da razão de Bowen	48
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
3.4 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
4. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DO AÇAIZEIRO NA AMAZÔNIA ORIENTAL (BRASIL) USANDO O SISTEMA DE RAZÃO BOWEN	67
RESUMO	67
ABSTRACT	68
4.1 INTRODUÇÃO	69
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	71
4.2.1 Descrição da área	71
4.2.2 Medições de plantas	72

4.2.3	Medições das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração da cultura.....	73
4.2.4	Critério para rejeição de dados inadequados do método de razão de Bowen	76
4.2.5	Estimativa da evapotranspiração de referência e dos coeficientes simples, dual e de evaporação.....	77
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
4.3.1	Análise da consistência dos dados pelo método da razão de Bowen	80
4.3.2	Variabilidade fenológica	81
4.3.3	Condições ambientais.....	82
4.3.4	Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo	84
4.3.5	Evapotranspiração	86
4.3.6	Coefficientes de cultivo simples e dual	91
4.4	CONCLUSÃO	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

RESUMO

A valorização econômica e a crescente demanda pelos produtos oriundos do açazeiro promove desde a década de 90 a expansão de seu cultivo para áreas de terra firme, entretanto, diversos questionamentos foram criados durante o processo de expansão da cultura, dentre os quais destacasse quais seriam as exigências térmicas e hídricas para a cultura, bem como quais seriam os possíveis impactos no balanço de energia e consequentemente no microclima local em decorrência da mudança do uso da terra pelo açazeiro. Para elucidar estes questionamentos, foi realizado um experimento no município de Capitão Poço em um plantio de açaí de 10 hectares entre os anos de 2017 e 2019, onde foi instalada e instrumentada uma torre micrometeorológica no centro da área experimental para o monitoramento de variáveis meteorológicas. Posteriormente, avaliaram-se as temperaturas basais superiores e inferiores através do método dos graus-dias, bem como as durações e as exigências térmicas para os diferentes estádios fenológicos. O balanço de energia foi obtido através do método da razão de Bowen e a energia disponível foi particionada em fluxos de calor no solo, de calor sensível, de calor latente e de fluxo armazenado no dossel vegetal. As temperaturas basais variaram ao longo do ciclo, sendo o estágio de floração o mais sensível com amplitude térmica entre T_b e T_B de 18,73 °C. A duração total do ciclo foi de 316 dias com exigência térmica total de 4545,98 graus-dias. A teoria dos graus-dias evidencia ser um método eficiente na simulação fenológica com erros de estimativa de no máximo 11,89% para o ciclo da cultura. No plantio de açaí a energia disponível particiona-se em média de 67% para evapotranspiração, 29% para aquecer o ar e 4% para aquecer o solo. O efeito do calor armazenado no dossel do açazeiro é irrelevante por representar apenas 0,16% da energia disponível. A expansão dos açazeiros para áreas de terra firme promoveu a alteração na partição dos fluxos de energia, quando comparado ao padrão já conhecido dos fluxos de uma floresta nativa. Observou-se que o açazeiro apresenta variação no consumo hídrico durante todo o ciclo, com média diária de 3,48 mm dia⁻¹ e consumo médio total de 1064,85 mm, já o K_c do açaí é máximo durante o estágio de fruto verde, quando se tem o crescimento dos frutos e mínimo durante a pré-floração. Os resultados obtidos nesta pesquisa servem para guiar a utilização dos recursos hídricos pelo açazeiro, criando condições para o manejo sustentável dos recursos naturais da água e solo.

Palavra-chave: *Euterpe Oleracea* Mart., temperaturas cardinais, graus-dia, balanço de energia, razão de Bowen, evapotranspiração.

ABSTRACT

The economic appreciation and the growing demand for products from the acai tree has promoted, since the 90's, the expansion of its cultivation to areas of upland. However, several questions were created during the process of expansion of the culture. Among which it highlighted what would be the thermal and water requirements for the culture, as well as what would be the possible impacts on the energy balance and consequently on the local microclimate due to the change in land use by the acai palm planting. To clarify these questions, an experiment was carried out in the municipality of Capitão Poço in a 10-hectare acai tree plantation over the years of 2017 and 2019. There, a micrometeorological tower was installed and instrumented in the center of the experimental area for monitoring meteorological variables. Subsequently, the upper and lower basal temperatures were evaluated using the degree-day method, as well as the durations and thermal requirements for the different phenological stages. The energy balance was obtained using the Bowen ratio method and the available energy was partitioned into flows of heat into the soil, sensitive heat, latent heat and flow stored in the plant canopy. Basal temperatures varied throughout the cycle, with the flowering stage being the most sensitive with thermal amplitude between T_b and T_B of 18.73 °C. The total duration of the cycle was 316 days with a total thermal requirement of 4,545.98 degree-days. The theory of degree-days shows to be an efficient method in the phenological simulation with estimating errors of at most 11.89% for the culture cycle. When planting acai, the available energy is divided by an average of 67% for evapotranspiration, 29% for heating the air and 4% for heating the soil. The effect of the heat stored in the acai canopy is irrelevant because it represents only 0.16% of the available energy. The expansion of the acai palms to upland areas promoted the change in the partition of energy flows compared to the already known pattern of flows in a native forest. We observed that the acai tree presents variation in water consumption throughout the cycle, with a daily average of 3.48 mm day⁻¹ and a total average consumption of 1064.85 mm. The acai K_c is maximum during the stage of green fruit, when there is the growth of the fruits, and minimum during the pre-flowering. The results obtained in this research may guide the use of water resources by the acai tree, creating conditions for the sustainable management of the natural resources of water and soil.

Keywords: *Euterpe Oleracea* Mart., cardinal temperatures, degree-day, energy budget, Bowen ration, evapotranspiration.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.), também conhecido por açai, açai-do-pará, açai-do-baixo-amazonas, açai-de-touceira, açai-de-planta, açai-da-várzea e açai-verdadeiro, é considerado a espécie mais importante do gênero *Euterpe*, dentre as dez registradas no Brasil e as sete que ocorrem na Amazônia (OLIVEIRA et al., 2007).

É uma palmeira que produz touceira com até 25 estipes, com perfilhos em diferentes estádios de desenvolvimento (OLIVEIRA et al., 2002). Em razão de seus diversos caules o açazeiro passou a ser utilizado na indústria de processamento de palmito, em substituição ao palmito (*E. edulis* Mart.), espécie que enfrentava risco de extinção (PAULA, 2007).

O açazeiro a partir da década de 90 começou a ganhar espaço no mercado nacional e mundial, se firmando como uma das mais importantes frutíferas da Amazônia devido sua grande valorização econômica, em função de sua rica composição nutricional e da ampla versatilidade na utilização do açai in natura, como bebida energética, sorvete, geleias, etc. (FALESI et al., 2010).

Em decorrência do aumento na comercialização do fruto, a oferta do produto que provinha exclusivamente das áreas de várzea em populações naturais não foi suficiente para atender o mercado interno e externo (SILVA et al., 2006). Isso despertou o interesse de diversos produtores que passaram a produzir o açai em escala comercial, passando a cultivá-lo em áreas de terra firme (HOMMA et al., 2006; CONFORTO & CONTIN, 2009).

Com o avanço dos açazais para áreas de terra firme e em razão da ausência de informações técnicas para o seu cultivo neste novo ambiente, diversos gargalos foram criados durante o processo de expansão da cultura, dentre os quais destacasse as exigências térmicas e hídricas, bem como as possíveis alterações no balanço de energia em decorrência da mudança do uso da terra pelo açazeiro.

O conhecimento das exigências térmicas do açazeiro em diferentes etapas de desenvolvimento é essencial para conhecer a variabilidade e a tolerância da cultura em condições consideradas não habituais para a espécie, levando em consideração principalmente a temperatura do ar que é o elemento climático crucial para se entender a adaptabilidade das culturas fora dos seus centros de origem (GRAY & BRADY, 2016).

Neste sentido, o método de graus dias proposto por Arnold (1959) vem sendo amplamente utilizado para estimar a duração dos estádios e ciclos de desenvolvimento para as mais diversas culturas (STRECK et al., 2008; TRENTIN et al., 2013; RENATO et al., 2013; FREITAS et al., 2017; SCHMIDT et al., 2018), permitindo programar manejos culturais e fitossanitários, além

de servir como parâmetro de entrada em pesquisas com foco em modelagem de culturas agrícolas que visam descobrir os efeitos causados pelo aumento da temperatura nas plantas (COSTA et al., 2009).

Entender a variabilidade da demanda hídrica das culturas é essencial, para criar estratégias de manejo que visem a melhoria da produção e produtividade. No caso do açaizeiro que tem sua origem natural em áreas alagadas é importante que a cultura seja instalada em locais que apresentem elevados níveis pluviométricos durante o ano, haja visto que o açaizeiro é uma cultura muito exigente em água (SOUZA et al., 2013). Entretanto, em regiões com altas concentrações de chuvas em determinados meses do ano e que apresentem período de estiagem prolongados é fundamental a realização da suplementação hídrica através da irrigação (MARQUES & FRIZZONE 2005), uma vez que a disponibilidade de água no solo é fator importante que favorece a sobrevivência do açaizeiro (SOUZA & JARDIM 2007).

Ao longo desses 30 anos de expansão dos açazais para a áreas de terra firme, os produtores que fazem o uso da irrigação aplicam lâminas empíricas, em função da ausência de estudos sobre a demanda real de água para a cultura, inclusive, alguns chegam a utilizar lâminas de irrigação baseadas no consumo hídrico de outras espécies, estudadas em outras localidades, como acontece por exemplo na utilização por alguns produtores da lâmina diária 5 mm dia^{-1} determinada por Foong (1993) que ao longo de 15 anos palma de óleo na Malásia.

A determinação da evapotranspiração do açaizeiro (ET_c) e dos coeficientes da cultura (K_c) em diferentes estádios de desenvolvimento, são imprescindíveis para que se tenha um sistema de irrigação muito bem planejado e manejado, evitando assim possíveis desvantagens econômicas com a utilização de lâminas inadequadas. Técnicas como lisimetria (PETERS et al., 2017; SILBER et al., 2019), eddy covariance (ORTEGA-FARIAS et al., 2010; PRUEGER et al., 2018), balanço da água do solo (ABDELKHALIK et al., 2019; DOMÍNGUEZ-NIÑO et al., 2020) e balanço de energia pelo método da razão de Bowen (SOUZA et al., 2016; CHEBBI et al., 2018) fazem a mensuração real da ET_c .

O método do balanço de energia pela razão de Bowen – BERB é um método indireto de determinação da ET_c (TODD et al., 2000), que contabiliza os fluxos de energia responsáveis por aquecer o ar (fluxo de calor sensível - H), o solo (fluxo de calor do solo - G) e por transformar a água líquida em gasosa (fluxo de calor latente – LE) em uma área de controle representada pela vegetação (ANDRÉ et al., 2010), constituindo-se em uma alternativa simples e prática na determinação do consumo hídrico das culturas (TEIXEIRA et al., 2003).

O BERB vem sendo amplamente utilizado para definir a curva do K_c (EUSER et al., 2014; MUNIZ et al., 2014; CONSOLI et al., 2018, NIAGHI et al., 2019), K_e (coeficiente de evaporação do solo) e K_{cb} (coeficiente de transpiração basal da cultura), em razão de requerer medições de poucas variáveis como os gradientes de temperatura e umidade do ar, saldo de radiação e fluxo de calor no solo para estimar a evapotranspiração real (HOU et al., 2010). Essa abordagem fornece uma análise do consumo hídrico de uma forma desacoplada, fornecendo ao produtor informações sobre a real necessidade da planta.

A geração de dados sobre o modelo de uso da terra para o cultivo do açaizeiro através do BERB será essencial para compreender e quantificar a variabilidade da partição dos fluxos de energia que ocorrem no sistema, verificando quais são os impactos causados com o avanço do cultivo agrícola sobre áreas de florestas nativas e suas possíveis consequências na gestão dos recursos hídricos (GRAY & BRADY, 2016), e quais medidas paliativas podem ser adotadas.

Portanto, levando em consideração a falta de informações técnicas e científicas sobre a utilização dos recursos hídricos pelo açaizeiro e buscando condições para o manejo sustentável dos recursos naturais água e solo, bem como a elucidação de possíveis alterações que a expansão do açaizeiro possa causar no clima, esta pesquisa tem por objetivo principal determinar o a variabilidade e particionamento do balanço energético, bem como as necessidades termo hídricas do açaizeiro irrigado nas condições climáticas do Nordeste paraense. Especificamente objetivou-se:

- a) Determinar o consumo de água e os coeficientes de cultura para os diferentes estádios reprodutivos do açaizeiro nas condições climáticas do Nordeste do Pará;
- b) Determinar a evapotranspiração diária do açaizeiro pelo método Razão de Bowen;
- c) Determinar as exigências térmicas do açaizeiro em diferentes estádios fenológicos;
- d) Determinar os graus-dias acumulados para cada estágio reprodutivo do açaizeiro;
- e) Determinar a partição de energia nos fluxos de calor latente, sensível, do solo e o calor armazenado no dossel em um plantio de açaizeiro;
- f) Determinar os coeficientes da cultura simples (K_c) e dual (K_e e K_{cb}).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKHALIK, A.; PASCUAL, B.; NÁJERA, I.; DOMENE, M. A.; BAIXAULI, C.; PASCUAL-SEVA, N. Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions. **Irrigation Science**, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00655-1>

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, V. S.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 2: balanço de energia e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, 535 - 542, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000400012>

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, p. 430-445, 1959.

CHEBBI, W.; BOULET, G.; DANTEC, V. L.; CHABAANE, Z. L.; FANISE, P.; MOUGENOT, B.; AYARI, H. Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive orchard during three contrasting years in a semi-arid climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256, p. 159 – 178, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.020>

CONFORTO, E. C.; CONTIN, D. R. Desenvolvimento do açaizeiro de terra firme, cultivar Pará, sob atenuação da radiação solar em fase de viveiro. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 979-983, 2009. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052009000400018>

CONSOLI, S.; MILANI, M.; CIRELLI, G.; BARBAGALLO, S.; MARZO, A.; VANELLA, D.; TOSCANO, A. Energy and water balance of a treatment wetland under mediterranean climatic conditions. **Ecological Engineering**, v. 116, p. 52 – 60, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.029>

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 4, n. 1, p. 1 - 10, 2009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>

DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105880, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105880>

EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BASTIAANSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2021 - 2032, 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2021-2014>

FALESI, L. A.; SANTANA, A. C.; HOMMA, A. K. O.; GOMES, S. C. Evolução e interação entre a produção e o preço das frutas no Estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 53, n. 1, p. 69 - 77, 2010.

FOONG, S. F. Potential evapotranspiration, potential yield and leaching losses of oil palm. In Proceedings of 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Module-Agriculture. **Palm Oil Research Institute**, Malaysia, Kuala Lumpur, p. 105–119, 1993.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 5, p. 283 - 292, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000500001>

GRAY, S. B.; BRADY, S. M. Plant developmental responses to climate change. **Developmental Biology**, v. 419, p. 64–77, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>

HOMMA, A. K. O.; NOGUEIRA, O. L.; MENEZES, A. J. E. A. Açaí: novos desafios e tendências. **Amazônia: Ciência e desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 7 - 23, 2006.

HOU, L. G.; XIAO, H. L.; Si, J. H.; ZHOU, M. X.; YANG, Y. G. Evapotranspiration and crop coefficient of *Populus euphratica* Oliv forest during the grow in season in the extreme arid region northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 2, p. 351 - 356, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.022>

MARQUES, P. A. A.; FRIZZONE, J. A. Modelo computacional para determinação do risco econômico em culturas irrigadas. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringa, v. 27, n. 4, p. 719 - 727, 2005. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v27i4.1347>

MUNIZ, R. A.; SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; ESTEVES, B. S.; LOUSADA, L. L. Balanço de energia e evapotranspiração do capim Mombaça sob sistema de pastejo rotacionado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 29, n. 1, p. 47-54, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000100005>

NIAGHI, A. R.; JIA, X.; STEELE, D. D.; SCHERER, T. F. Drainage water management effects on energy flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. **Agricultural Water Management** v. 225, p. 105760, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760>

OLIVEIRA, M. S. P.; CARVALHO, J. E. U.; NASCIMENTO, W. M. O.; MÜLLER, C. H. Cultivo do açaizeiro para produção de frutos. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. **Circular técnica** 26, 2002. 17 p.

OLIVEIRA, M. S. P.; NETO, J. T. F.; PENA, R. S. P. Açaí: técnicas de cultivo e processamento, **Belém instituto Frutal**, 2007. 104 p.

ORTEGA-FARIAS, S.; POBLETE-ECHEVERRIA, C.; BRISSON, N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 276 – 286, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.012>

PAULA, G. A. de. Caracterização físico-química e estudo do escurecimento enzimático em produtos derivados de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Dissertação Mestrado**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. Ano 2007.

PETERS, A.; GROH, J.; SCHRADER, F.; DURNER, W.; VERECKEN, H.; PÜTZ, T. Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 731 - 740, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.015>

PRUEGER, J. H.; PARRY, C. K.; KUSTAS, W. P.; ALFIERI, J. G.; ALSINA, M.M.; NIETO, H.; WILSON, T. G.; HIPPS, L. E.; ANDERSON, M. C.; HATFIELD, J. L.; GAO, F.; LYNN, G.; MCKEE, L. G.; MCELRONE, A.; AGAM, N.; LOS, S. A. Crop Water Stress Index of an irrigated vineyard in the Central Valley of California. **Irrigation Science**, v. 37, p. 297–313, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0598-4>

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA1, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 382 - 388, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>.

SCHMIDT, D; CARON, B. O.; VALERA, O.; MEIRA, D.; FONTANA, D. C.; ZANATTA, T. P.; WERNER, C. J.; BREZOLIN, P. Base temperature, thermal time and phyllochron of escarole cultivation. **Horticultura Brasileira**, v. 36, p. 466 – 472, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180407>

SILBER, A.; NAOR, A.; COHEN, H.; BAR-NOY, Y.; YECHIELI, N.; LEVI, M.; NOY, M.; PERES, D.; DUARI, K.; NARKIS, S.; ASSOULINE, S. Irrigation of “Hass” avocado: effects of constant vs. temporary water stress. **Irrigation Science**, v. 37, p. 451 – 460, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>

SILVA, I.M.; SANTANA, A.C.; REIS, M.S. Análise dos retornos sociais oriundos de adoção tecnológica na cultura do açaí no Estado do Pará. Amazônia: **Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v.2, n.3, p.25-37, 2006.

SOUZA, L. A. S.; JARDIM, M. A. G. Produção foliar de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) em área de vegetação secundária no Nordeste Paraense. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 1, n. 2, p. 225 - 227, 2007.

SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L.; LIMA, R. T.; ROCHA, E. J. P.; ORTEGA-FARIAS, S. Water requirement estimate for the reproductive period of mango orchards in the Northeast of the state of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 3, e311, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016311>

SOUZA, R. O. R. M.; AMARAL, M. A. C. M.; SILVESTRE, W. V. D.; SACRAMENTA, T. M. Avaliação econômica da irrigação em pomares de açaí. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.7, nº. 1, p. 54 - 65, 2013. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v7n100004>

STRECK, N. A.; LAGO, I.; GABRIEL, L. F.; SAMBORANHA, F. K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a non linear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 449 - 455, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400002>

TEIXEIRA, A. H. C.; BASSOI, L. H. B.; REIS, V. C. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, M. N. L.; MAIA, J. L. T. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações meteorológicas: automáticas e convencional. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 457 - 460, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452003000300024>.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 335 - 348, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00139-8)

TRENTIN, R.; HELDWEIN, A. B.; STRECK, N. A.; TRENTIN, G.; SILVA, J. C. Subperíodos fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 703 – 713, 2013. doi:10.1590/s0100-204x2013000700002

1 **2. TEMPERATURAS BASAIS E NECESSIDADE TÉRMICA DO AÇAIZEIRO NA**
2 **AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.**

3
4 **RESUMO**

5 Objetivou-se determinar as temperaturas basais, as necessidades térmicas e a duração dos
6 principais estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro no Nordeste do estado do Pará,
7 Amazônia Oriental, Brasil. O experimento foi realizado em um plantio de açaizeiro de 10
8 hectares, entre os anos de 2017 e 2019, acompanhando diariamente a fenologia e as condições
9 meteorológicas nos municípios de Capitão Poço e Castanhal. Verificou-se que as temperaturas
10 basais inferiores e superiores variaram, respectivamente, de 12,92 °C e 32,46 °C para o estágio
11 de pré-floração; 13,50 °C e 32,23 °C para floração; 12,14 °C e 32,55 °C para o estágio de frutos
12 verdes; 11,64 °C e 32,78 °C para o estágio de mudança de cor dos frutos e 11,23 °C e 32,94 °C
13 para o estágio de maturação. A exigência térmica e a duração média encontrada para o ponto
14 ideal de colheita do açaí foi de 4545,94 graus-dias e duração de 316 dias. A simulação da
15 fenologia reprodutiva do açaizeiro pela teoria dos graus dias provou ser um método eficiente
16 para as condições de estudo, com erros máximos de 11,89% para o ciclo da cultura.

17
18 **Palavras-chave:** *Euterpe Oleracae* Mart., Simulação fenológica. Temperaturas cardinais.
19 Graus-dia.

1 **ABSTRACT**

2 The objective was to determine the base temperatures, the thermal time requirements and the
3 length of the main reproductive growth stages of the açai palm in the Northeast of the state of
4 Pará, Eastern Amazon, Brazil. The research was carried out in a 10 hectare açai plantations in
5 Capitão Poço and Castanhal where the plant phenology and the meteorological conditions were
6 daily monitored between 2017 and 2019. Lower and upper base temperatures were found,
7 respectively, to be 12.92 °C and 32.46 °C for the pre-flowering stage; 13.50 °C and 32.23 °C
8 for flowering; 12.14 °C and 32.55 °C for the stage of green fruit; 11.64 °C and 32.78 °C for the
9 stage of fruit color changing and 11.23 °C and 32.94 °C for the maturation stage. The thermal
10 time requirement and the average cycle length found for the açai's ideal harvest time was
11 4545.94 degree days and 316 days with an average. The simulation of the reproductive
12 phenology of the açai palm by the degree day's theory proved to be an efficient method for the
13 study conditions, with maximum errors of 11.89% for the crop cycle.

14

15 **Keywords:** *Euterpe oleracea* Mart., simulation of phenological development, cardinal
16 temperatures, degree days

1 2.1 INTRODUÇÃO

2 O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira de origem amazônica que produz
3 touceiras, que se constituem pela planta mãe e por perfilhos (TREVISAN et al., 2015), com
4 diferentes estádios de desenvolvimento. A espécie é considerada a mais importante do gênero
5 *Euterpe* dentre as dez registradas no Brasil e entre as sete que ocorrem na Amazônia (QUEIROZ
6 & MELÉM JUNIOR, 2001).

7 O açazeiro nos últimos anos ganhou grande expressão econômica no mercado,
8 expandindo sua comercialização para além das fronteiras da Amazônia, muito em função da
9 sua composição nutricional, rica em fibras, lipídeos, fenóis e a antocianina que podem estar
10 relacionados à prevenção de doenças cardiovasculares (YAMAGUCHI et al., 2015). Em
11 virtude da amplificação comercial do açaí, produtores brasileiros vêm expandindo o seu cultivo
12 em áreas de terra firme (RUFINO et al., 2011), com o uso de tecnologias como o manejo de
13 irrigação (MARTINOT et al., 2017). Entretanto, para o sucesso da expansão desta cultura para
14 outras regiões, precisa-se conhecer como a cultura se comporta em condições ambientais
15 diferentes daquelas que são consideradas habituais para a espécie, haja vista que o açazeiro é
16 natural das áreas de várzea.

17 Diversos elementos climáticos são considerados quando se analisa a adaptabilidade e o
18 desenvolvimento das culturas fora dos seus centros de origem (GRAY & BRADY, 2016),
19 dentre os quais se destaca a temperatura do ar que é a principal variável meteorológica que afeta
20 e melhor explica, de forma estatística, o crescimento e desenvolvimento (GRAMIG &
21 STOLTENBERG, 2007) das espécies anuais e perenes (Lisboa et al., 2012).

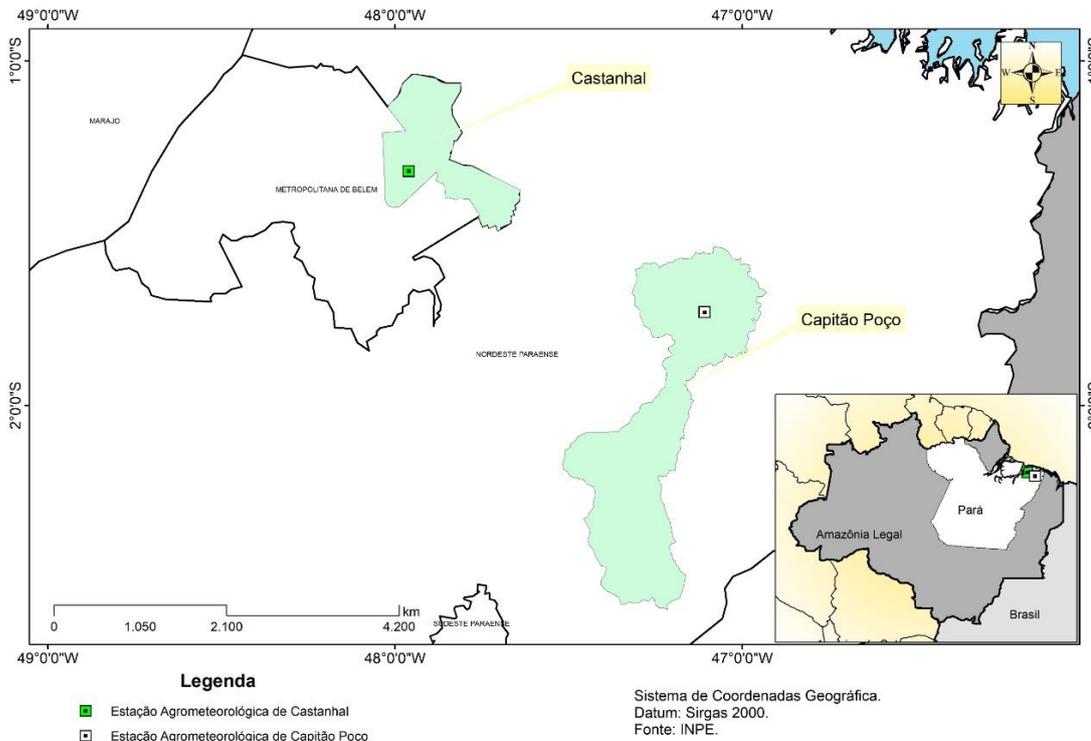
22 O aumento da temperatura pode provocar danos ao crescimento das plantas uma vez
23 que reduz a taxa fotossintética, incrementa a fotorrespiração e diminui o ganho líquido de
24 carbono pela planta, reduzindo o ciclo das culturas, ocasionando perda de produção e
25 produtividade (HATFIELD & PRUEGER, 2015). Para que se possa mitigar os efeitos causados
26 pelo aumento da temperatura nas plantas, diversos pesquisadores tem realizados pesquisas
27 focadas na modelagem de culturas agrícolas (Costa et al., 2009).

28 Os estudos sobre modelagem de culturas levam em consideração as fases de
29 desenvolvimento e o ciclo total da cultura, pois são aspectos fundamentais para definição dos
30 estádios fenológicos (Renato et al., 2013). O método dos graus-dia é uma técnica muito usada
31 para definir o estágio de desenvolvimento das culturas, que representa a necessidade térmica
32 em função das temperaturas basais que a planta suporta e utiliza em seus processos fisio-
33 metabólicos durante o dia (STRECK, et al., 2008; Souza et al., 2013)

1 Portanto, tendo em vista a carência de informações técnicas e científicas sobre a produção de
2 açaí e visando contribuir para o desenvolvimento e expansão da cultura no estado, se faz necessário
3 conhecer as necessidades térmicas do desenvolvimento reprodutivo do açaizeiro, desde a pré-
4 floração até a maturação dos frutos para que se possa otimizar estratégias de manejo que auxilie
5 a tomada de decisão em função das condições climáticas a qual a cultura possa ser submetida.
6 Neste sentido, o trabalho teve como objetivo determinar as temperaturas basais, a necessidade
7 térmica e a duração dos principais estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro no Nordeste
8 do estado do Pará.

9 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

10 O experimento foi realizado na região Nordeste do estado do Pará, entre os anos de 2017
11 e 2019 em duas áreas, sendo uma de dez hectares localizada nas dependências da fazenda
12 Ornela no município de Capitão Poço (01°43'44,4"S latitude, 47°06'39,3"W longitude e
13 altitude de 71 m), e outra de meio hectare no município de Castanhal, nas dependências da
14 fazenda experimental da Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA (1°19'24,48"S
15 latitude, 47°57'38,20"W longitude e altitude de 41 m) (Figura 1).



16
17 **Figura 1.** Área experimental no plantio de açaí irrigado em Capitão Poço e Castanhal - PA.

18 Os solos das áreas experimentais foram classificados como latossolo amarelo distrófico,
19 com textura arenosa com 4% de argila na camada de 0-20 cm e de textura franco arenosa na

camada de 20-40 cm com 15% de argila em Castanhal, já em Capitão Poço a textura na camada de 0-20 cm foi franco arenosa com 14% de argila e de textura franco argilo arenosa na camada de 20-40 com 28% de argila (Tabela 1). O clima local para as duas cidades é caracterizado como Am, clima tropical, apresentando moderada estação seca com precipitação pluvial média anual de 2500 a 3000 mm, onde o trimestre mais seco do ano em Castanhal ocorre entre julho e setembro (FARIAS et al., 2017) e entre setembro e novembro em Capitão Poço (OLIVEIRA et al., 2016).

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental.

Cidade	Profundidade (cm)	pH (H ₂ O)	P	K ⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Al ³⁺
			-- mg·dm ⁻³ --			-----cmol _c ·dm ⁻³ -----	
Castanhal	00-20	5,925	11	21	0,85	1,35	0,40
	20-40	5,69	1	15	0,35	0,45	1,10
Capitão Poço	0-20	4,07	45	65	0,90	1,30	0,20
	20-40	4,82	51	10	0,50	0,90	0,50

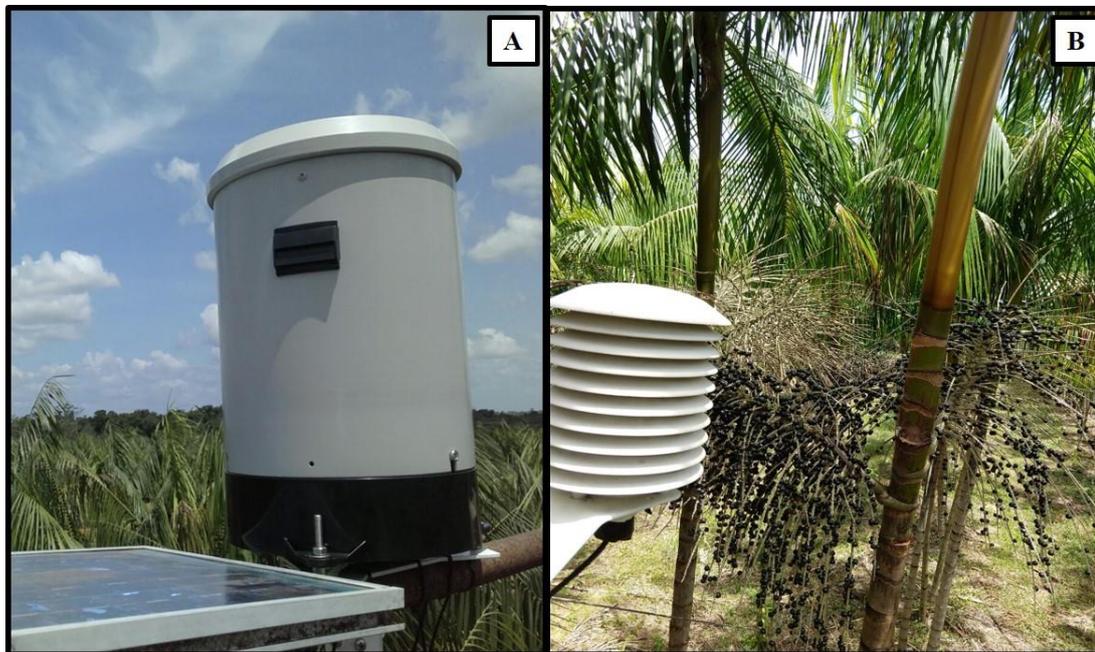
Cidade	Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Ds ¹	CC ²	PMP ³
		----(g·kg ⁻¹)----			(g·cm ⁻³)	-- (m ³ ·m ⁻³) --	
Castanhal	0-20	865	94	41	1,54	0,24	0,07
	20-40	740	111	149	1,62	0,32	0,08
Capitão Poço	0-20	792	68	140	1,43	0,37	0,23
	20-40	633	87	280	1,68	0,32	0,21

¹Densidade do solo, ²Capacidade de campo, ³Ponto de murcha permanente.

O plantio foi implantado para fins comerciais em 2011 em Castanhal e 2012 em Capitão Poço, utilizando a cultivar BRS-Pará e o ecotipo chumbinho, em espaçamento de 4,0 x 4,0 e 6,0 x 4,0 m, respectivamente, com o manejo de três estipes/plantas por touceira, cultivado em terra firme com irrigação diária por meio de um sistema de microaspersão, com uma lâmina bruta média de 2,81 mm (Castanhal) e 3,64 mm (Capitão Poço) durante o período seco.

Dentro da área total foi demarcado um hectare que correspondeu a área monitorada para o estudo, onde foi instalada no centro da área experimental uma torre metálica de 16 m de altura e nela acoplada uma estação meteorológica automática, onde foram conectados um pluviômetro (TB4 L) acima do dossel vegetal (Figura 2a) e um Termoigrômetro (HMP45, Vaisala) ao nível das inflorescências e infrutescências do açajeiro (Figura 2b). Os sensores foram conectados a um Datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc.), com programação de leitura a cada dez segundos, e médias totais a cada 20 minutos. A localização da torre obedeceu às exigências

1 mínimas de bordadura da área, apresentando “fetch” disponível (superior a razão 1:100), a fim
2 de que as medidas obtidas fossem representativas da área experimental, não sofrendo influência
3 do calor advectivo (RANA & KATERJI, 2000).



4
5 **Figura 2.** Sensores de precipitação e de temperatura e umidade do ar instalados na área experimental.

6 Os dados meteorológicos e fenológicos foram coletados entre os meses de setembro de
7 2017 e janeiro de 2019. O desenvolvimento fenológico reprodutivo do açaizeiro foi analisado
8 adaptando a escala proposta por Garcia & Barbedo (2016), que apresenta quatro fenofases
9 reprodutivas que são: pré-floração (Figura 3a), floração (Figura 3b), frutos verdes (Figura 3c)
10 e frutos pretos (Figura 3d), acrescentando a fenofase de maturação (Figura 3e) que é descrita
11 por Homma et al (2005) conforme tabela 2.



1

2

Figura 3. Fenologia reprodutiva do açazeiro em Capitão Poço-PA.

3

Tabela 2. Estádios fenológicos reprodutivos do açazeiro.

Estádio fenológico	Descrição dos estádios
Pré-floração	Aparecimento da espata floral, considerou-se o período em que a inflorescência se manteve coberta por brácteas
Floração	Considera-se desde a abertura da espata, presença dos botões florais, até a queda das flores.
Fruto verde	Estádio de fruto imaturo considerado a partir da visualização dos primeiros e pequenos frutos em formação, até o início do seu amadurecimento
Fruto preto	Aparecimento dos primeiros frutos com coloração roxo escuro
Maturação	Frutos com coloração roxo-escuro intenso e brilho na superfície da casca, mas não estando no ponto exato de colheita (açai parau) até ele apresentar uma casca de coloração roxo escuro intenso, recoberta por uma camada de pó com tonalidade branco-acinzentada, estando no ponto ideal de colheita (açai tuíra)

4

5

6

O acompanhamento da fenológico foi realizado a cada sete dias, onde foram previamente demarcadas 300 plantas (correspondente a 24% dos indivíduos de um hectare),

1 que foram observadas a olho nu com a finalidade de registrar a presença ou ausência dos eventos
2 de florescimento (espata e floração) e de eventos de frutificação (cachos verdes, cachos pretos
3 e maturação), além da contagem total de estruturas reprodutivas presentes em cada indivíduo.

4 Avaliou-se o índice de atividade - IA (equação 1) de caráter quantitativo em nível
5 populacional, que indica a porcentagem de indivíduos da população observada que manifestou
6 determinado evento fenológico, sendo classificado como não sincrônico ou assincrônico
7 quando < 20% de indivíduos encontravam-se na fenofase; pouco sincrônico ou sincronia baixa
8 quando entre 20-60% dos indivíduos na fenofase; e sincronia alta quando < 60% de indivíduos
9 na fenofase (Bencke & Morellato 2002).

$$10 \quad IA = \left(\frac{NIF}{NTI} \right) \times 100 \quad (1)$$

11 Em que: NIF é o número de indivíduos na fenofase e NTI o número total de indivíduos
12 observados.

13 A determinação dos estádios fenológicos reprodutivos foi estabelecida de acordo com a
14 ocorrência predominante de determinado estágio fenológico em relação ao total da população.

15 Para a estimativa da temperatura basal inferior (Tb) determinou-se primeiramente os
16 graus-dia (GD), que foi obtido para cada estágio fenológico e para cada planta em estudo, de
17 acordo com as necessidades térmicas, sendo dado pela expressão equação 2 (Arnold, 1959):

$$18 \quad GD = \Sigma \left[\frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} \right] - Tb \quad (2)$$

19 em que: GD é os graus-dia (°C dia), T_{máx} é a temperatura máxima diária do ar (°C), T_{mín} é a
20 temperatura mínima diária do ar (°C) e Tb é a temperatura basal inferior.

21 Para o cálculo do GD foi utilizada uma série de Tb variando de 0° a 20 °C, em intervalos
22 de 0,5 °C. A partir das necessidades térmicas encontradas para cada estágio fenológico,
23 determinou-se o desvio-padrão em graus-dias (DPgd) para cada temperatura, considerando
24 como temperatura basal inferior à de menor desvio-padrão em dias (DPd), semelhante aos
25 trabalhos de Yang et al. (1995) e Schmidt et al. (2018) conforme a equação 3 a seguir:

$$26 \quad DPd = \frac{DPgd}{T_{méd} - Tb} \quad (3)$$

27 em que: DPd = desvio padrão em dias; DPgd = desvio padrão em graus-dia utilizando uma série
28 de Tb; T_{méd} = temperatura média do ar de todas as épocas (°C); Tb = temperatura basal inferior
29 (°C).

1 Posterior a determinação da Tb, determinou-se a temperatura basal superior (TB),
2 utilizando os casos dois e quatro descritos por OMETTO (1981) conforme as Equações (4) e
3 (5), pois ambos abrangeram as condições térmicas no período do experimento. Considerou-se
4 para a TB o valor de temperatura do ar, em que o coeficiente de variação (CV) se tornou
5 constante (SOUZA et al. 2009; SCHMIDT et al., 2018). Para os cálculos da TB utilizou-se para
6 esta estimativa as temperaturas variando de 0,5 em 0,5 graus, compreendidos de 20 a 40 °C.

7 **Caso 2:** $T_b < T_{min}$; $T_{max} < TB$

$$8 \quad GD = \left[\frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} \right] + (T_{mín} - T_b) \quad (4)$$

9 **Caso 4:** $T_b < T_{min}$; $TB < T_{max}$

$$10 \quad GD = \frac{2 \times (T_{máx} - T_{mín}) \times (T_{mín} - T_b) + (T_{máx} - T_{mín})^2 - (T_{máx} - TB)}{2 \times (T_{máx} - T_{mín})} \quad (5)$$

11 em que: TB é a temperatura basal superior (°C).

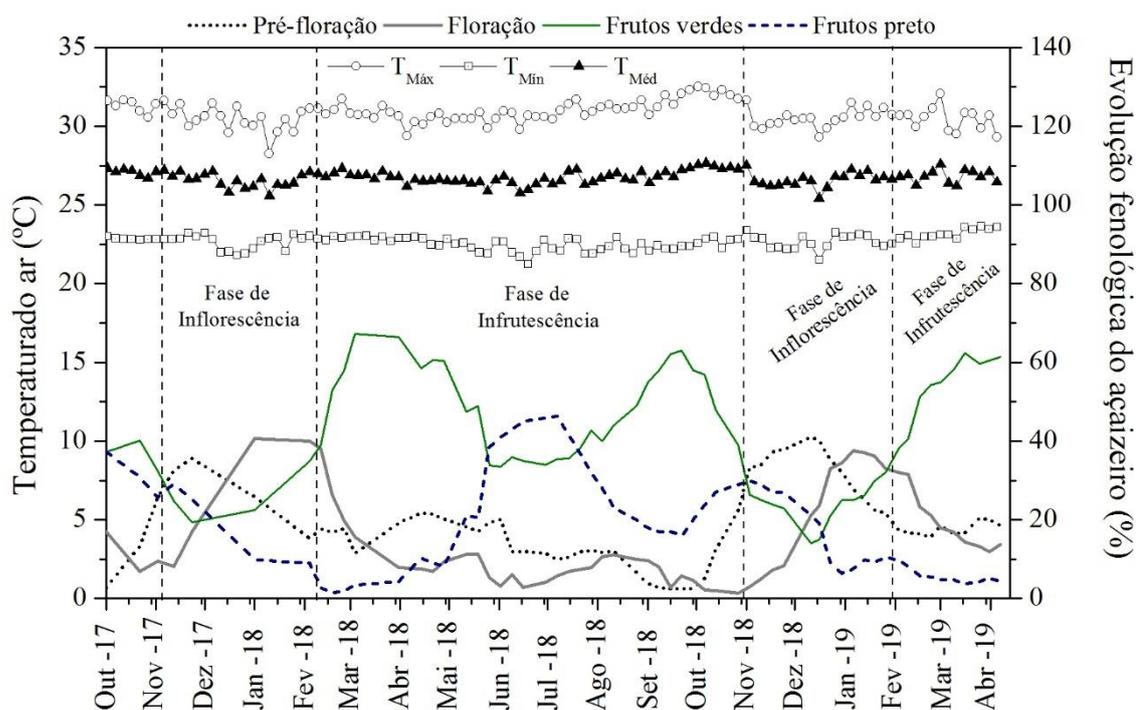
12 De posse das temperaturas basais superiores e inferiores, foi realizada a caracterização
13 da necessidade térmica de cada estágio fenológico reprodutivo do açazeiro, onde utilizou-se
14 repetições (plantas) escolhidas aleatoriamente, que não foram utilizadas para os cálculos das
15 Tb e TB, considerando quatro diferentes épocas (meses) em que o estágio de pré-floração é
16 evidenciado que são: novembro (época 1), dezembro (época 2), janeiro (época 3) e fevereiro
17 (época 4).

18 Dados fenológicos e climáticos independentes foram coletados em experimento
19 implantado no município de Castanhal-PA seguindo a mesma metodologia empregada no
20 município de Capitão Poço, para posteriormente serem utilizados para validar a ocorrência dos
21 estádios fenológicos reprodutivos do açazeiro (em dias do ano) simulados pelo método de
22 Graus-dias. O erro de raiz quadrada média (RMSE) e o índice de acordo (d) foram os critérios
23 estatísticos utilizados para avaliar a desempenho da simulação do desenvolvimento do
24 açazeiro.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 4 é apresentada a evolução fenológica reprodutiva do açaizeiro no experimento de Capitão Poço - PA, onde se verifica estações bem definidas de modo que em todos os meses do ano o açaizeiro produz inflorescências e infrutescências, sendo que de novembro a fevereiro é observado a predominância de dois estádios sendo o de pré-floração com pico de produção entre novembro e dezembro; e do estágio de floração com pico de produção de janeiro a fevereiro.

Entre os meses de março e outubro predomina a frutificação do açaizeiro, nesse período observa-se que o estágio de fruto verde apresenta dois picos de produção, sendo o primeiro entre março e abril e o segundo em setembro; os estádios de fruto preto e maturação predominam no mesmo período com pico de produção entre julho e agosto prolongando-se até o final da safra do fruto que vai até o mês de dezembro.



13

14 **Figura 4.** Variabilidade da temperatura máxima ($T_{máx}$), média ($T_{méd}$) e mínima ($T_{mín}$) do ar e evolução
15 fenológica reprodutiva do açaizeiro em Capitão Poço - PA, entre outubro de 2017 e abril de 2019.

16

17 A temperatura média do ar próximo as inflorescências e infrutescências durante o
18 experimento foi de $26,75^{\circ}\text{C}$, com mínima e máxima ocorrendo no ano de 2018 nos meses de
19 janeiro ($22,57^{\circ}\text{C}$) e outubro ($30,92^{\circ}\text{C}$), respectivamente (Figura 4). A menor temperatura
20 instantânea foi registrada no dia 19 de janeiro ($20,25^{\circ}\text{C}$) e a maior ocorreu no dia 28 de outubro
21 ($33,80^{\circ}\text{C}$). As épocas 2 e 3 passaram por esse período de mínima e máxima temperaturas

1 durante o estágio pré-floração para ambas as épocas e de maturação (época 2) e fruto preto
2 (época 3), respectivamente.

3 A época 1 registrou a temperatura mínima instantânea de 20,25 °C na pré-floração e
4 máxima de 32,87 °C na maturação, enquanto que a época 4 experimentou mínima de 20,66 °C
5 na pré-floração e máxima de 33,80 °C no estágio de fruto verde. As variações de temperaturas
6 observadas ao longo de todo o experimento (figura 4) permitem maior confiabilidade na
7 estimativa das temperaturas basais, propiciando que a planta se desenvolva de forma
8 diferenciada (SOUZA e MARTINS, 2014).

9 O padrão fenológico reprodutivo do açaizeiro se demonstra anual, onde as estipes
10 apresentaram atividade reprodutiva em todo período de observação de forma interrompida, com
11 intensidade diferenciada entre cada estágio fenológico. Os picos de máxima atividade
12 fenológica ocorrem de forma sequencial, onde primeiramente evidencia-se o estágio de espata
13 com pico entre os meses de novembro e janeiro, seguido do estágio de floração que apresenta
14 pico de atividade fenológica concentrada entre os meses de janeiro e março.

15 Os estádios de inflorescência (pré-floração e floração) apresentaram índice de atividade
16 fenológica com baixa sincronia, o que de acordo com Garcia & Barbedo (2016) favorece o
17 prolongamento da safra do fruto, uma vez que permite maior distribuição da maturação do açaí
18 durante um maior período de tempo.

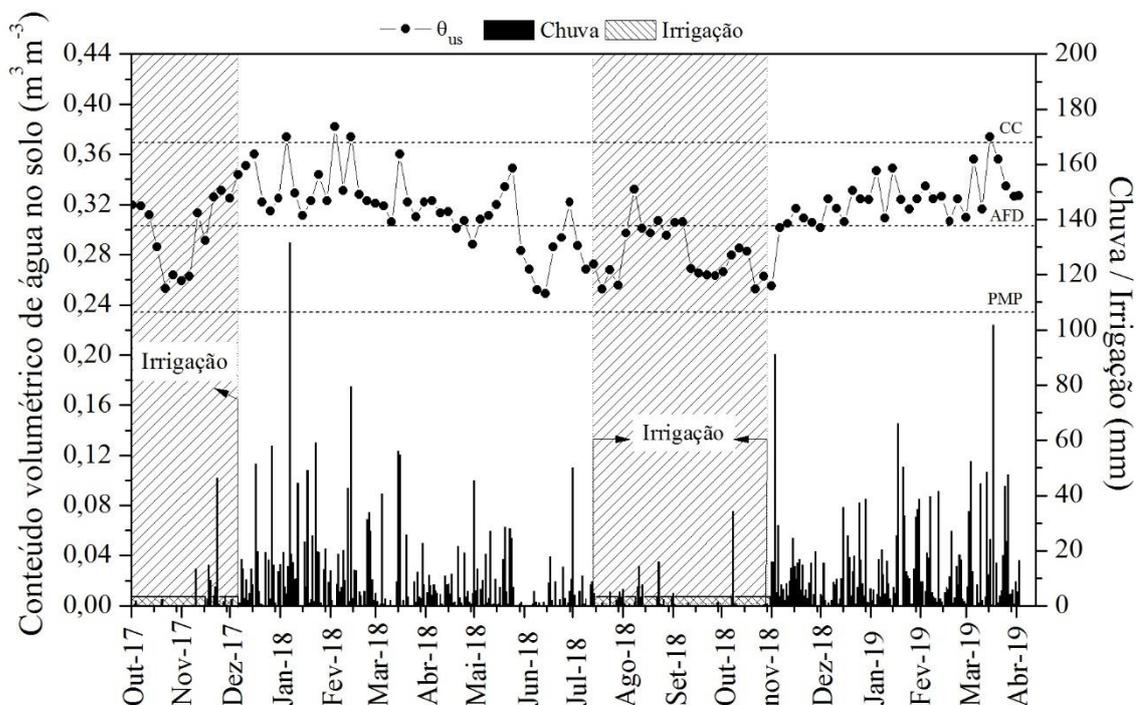
19 Entre os meses de março e outubro predominam os estádios de infrutescência (fruto
20 verde, fruto preto e maturação) do açaizeiro, nesse período observa-se que o estágio de fruto
21 verde apresenta dois picos de produção, sendo o primeiro entre março e abril e o segundo em
22 setembro, ambos com índice de atividade fenológica com alta sincronia.

23 Os estádios de fruto preto e maturação predominam no mesmo período, apresentando
24 dois picos de produção que ocorrem com baixa sincronia fenológica entre julho-agosto e entre
25 outubro-novembro prolongando-se até o final da safra do fruto que vai até o mês de dezembro.

26 Os resultados fenológicos encontrados neste experimento corroboram Cifuentes et al.
27 2013 que estudando o comportamento fenológico do açaizeiro na província biogeográfica de
28 Chocó na Colômbia entre os anos de 1999 e 2001 e de 2006 a 2009 obtiveram índice de
29 atividade fenológica com baixa sincronia para a pré-floração, floração e maturação; e alta
30 sincronia para o estágio de frutos verdes.

31 O conteúdo volumétrico de água no solo durante todo o experimento se manteve acima
32 do ponto de murcha permanente - PMP ($0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), variando entre $0,245$ e $0,385 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com
33 média de $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o que corresponde a uma quantidade média de água disponível de 54,7%

1 (figura 5). Entre dezembro e abril a precipitação ocorrida nesse período fez com que a
 2 quantidade de água no solo ficasse acima do conteúdo volumétrico de água no solo
 3 correspondente à faixa de água facilmente disponível (AFD) com média de 65,2%, condição
 4 essa que acarreta suprimento hídrico adequado para o pleno desenvolvimento para cultura.



5
 6 **Figura 5.** Conteúdo volumétrico de água no solo, chuva e irrigação durante a fase reprodutiva do açaizeiro em
 7 plantio de terra firme entre outubro de 2017 e abril de 2019 no município de Capitão Poço - PA.
 8

9 Durante o período menos chuvoso, entre julho e novembro, o conteúdo volumétrico de
 10 água no solo atingiu em média $0,288 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ que representa 40,2% da capacidade total de água
 11 do solo, estando portanto abaixo das condições hídricas satisfatórias (água facilmente
 12 disponível) para o pleno desenvolvimento da cultura, o que acarreta alterações fisio-
 13 metabólicas da planta e conseqüentemente influência na produtividade final.

14 A safra definida pela época 1 foi onde ocorreu a maior incidência de chuva totalizando
 15 2217 mm no ciclo, enquanto que o menor volume de chuva foi observado na época 4 com 1986
 16 mm. As safras correspondentes às épocas 2 e 3 apresentaram total de chuvas de 2179 e 2068
 17 mm, respectivamente (tabela 3). O maior evento chuvoso em Capitão Poço-PA foi registrado
 18 no dia 03 de fevereiro de 2018 no estágio de floração que correspondeu a uma precipitação de
 19 131,60 mm.

1 **Tabela 3.** Condições meteorológicas, irrigação total e duração do ciclo do açaizeiro durante o experimento em
 2 diferentes épocas de início da pré-floração em Capitão Poço - PA.

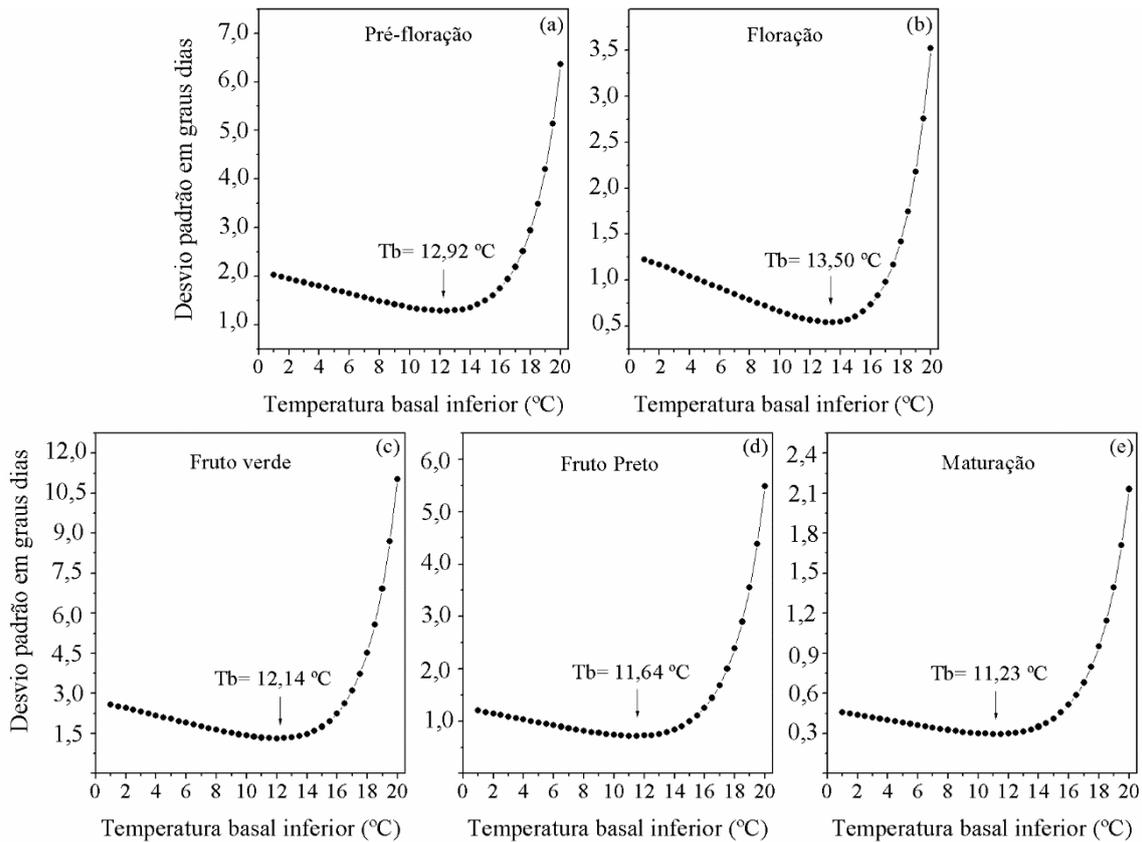
Épocas	Duração do ciclo (dias)	Irrigação (mm)	Variáveis meteorológicas			
			Chuva (mm)	Tméd (°C)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
E1	320	292	2217	26,73	32,87	20,25
E2	317	292	2179	26,63	33,80	20,25
E3	315	328	2068	26,81	33,80	20,25
E4	314	328	1986	26,93	33,80	20,66

3
 4 Nas época 1 e 2, durante a fase de inflorescência (pré-floração e floração) a entrada de
 5 água total acumulada (chuva + irrigação) para o período foi de 1263 e 1394 mm), onde deste
 6 total 8 e 3%, respectivamente, corresponderam a irrigação que ocorreu até o início de dezembro
 7 de 2017 coincidindo com o estágio de pré-floração das épocas 1 e 2. Já a quantidade total de
 8 água durante a fase de infrutescência (fruto verde, fruto preto e maturação) foi de 1246 e 1077
 9 mm, onde 16 e 23% corresponderam a irrigação que foi realizada entre os meses de agosto e
 10 novembro de 2018.

11 Nas épocas 3 e 4 a fase de inflorescência recebeu apenas o quantitativo de chuva que
 12 correspondeu a 1285 e 1129 mm, respectivamente, em virtude de iniciarem no ano de 2018
 13 (janeiro época 3 e fevereiro época 4), ambas não receberam suprimento hídrico através da
 14 irrigação durante esta fase. No período de infrutescência o suprimento hídrico total foi de 1111
 15 e 1186 mm, com 30 e 28% sendo realizados pela irrigação para as épocas 3 e 4, respectivamente.

16 Foram obtidos valores de Tb para cada um dos cinco estádios fenológicos, onde se
 17 observou que o menor desvio-padrão em graus dias foi obtido para a Tb de 12,92 °C no estágio
 18 de pré-floração. Já para o estágio de floração o valor de Tb foi de 13,50 °C, enquanto que para
 19 os estádios de fruto verde, fruto preto e maturação os valores de Tb foram de 12,14, 11,64 e
 20 11,23 °C, respectivamente (Figura 6). As diferenças nos valores de Tb para distintos estádios
 21 fenológicos são comumente verificadas nas mais variadas espécies e materiais genéticos, pois
 22 a maioria das culturas apresenta um estágio mais sensível, que no caso do açaizeiro é o período
 23 de floração, pois nesse estágio ao passar por estresses abióticos o açaizeiro acaba abortando as
 24 flores dando origem a cachos secos, fato esse que desencadeia a queda da produtividade
 25 (AGUIAR et al., 2018).

26



1
 2 **Figura 6.** Temperatura basal inferior dos estádios de pré-floração, floração, fruto verde, fruto preto e maturação
 3 do açaizeiro pelo método do menor desvio padrão em graus dias (DPGd).

4 Assim como realizado para a T_b , foram obtidos valores de TB para cada estágio
 5 fenológico, onde se observou que o coeficiente de variação tornou-se constante na TB de 32,46
 6 °C no estágio de pré-floração, enquanto que para o estágio de floração o valor de TB foi de
 7 32,23 °C. Nos demais estádios de fruto verde, fruto preto e maturação os valores de TB foram
 8 de 32,55, 32,78 e 32,94 °C, respectivamente (Figura 7).

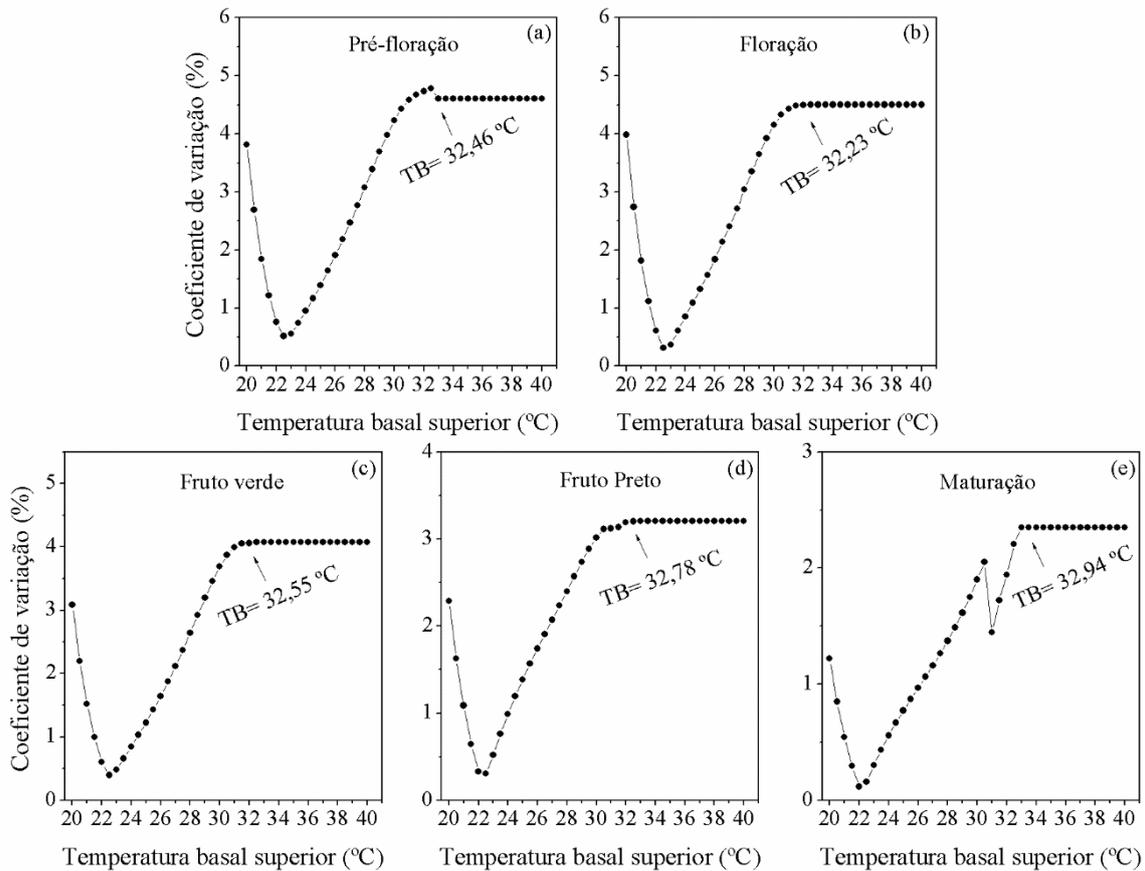


Figura 7. Temperatura basal superior dos estádios de pré-floração, floração, fruto verde, fruto preto e maturação do açazeiro pelo método do Coeficiente de variação constante.

Elevados valores de TB são esperados em função de representarem o limite máximo de temperatura, acima do qual a planta tem seus processos fisio-metabólicos prejudicados (FREITAS et al., 2017), podendo induzir anomalias no crescimento e desenvolvimento da planta, favorecendo a redução de emissão de novas folhas, redução de novas inflorescências, o abortamento floral, e redução expressiva da taxa fotossintética (SOLTANI e SINCLAIR, 2012).

O açazeiro apresenta o estágio de floração como o mais sensível entre os estádios reprodutivos, por apresentar uma menor amplitude térmica entre as basais (18,73 °C) para seu pleno desenvolvimento. Já o estágio de maturação apresenta a maior amplitude térmica que é de 21,71°C, seguido dos estádios de fruto preto, fruto verde e pré-floração com 21,14 20,41 e 19,54°C. Estudos sobre as temperaturas basais para espécies perenes como os de Lima e Silva (2008) para o café, o de Rodrigues et al. (2013) para mangueira e o de Freitas et al. (2017) para o eucalipto, ainda são escassos, principalmente para espécies nativas da Amazônia em função da dificuldade de se avaliar frequentemente a duração fenológica de cada estágio por um longo período de tempo. Essas informações são essenciais para que se possa determinar as necessidades térmicas e suas adaptações às condições climáticas do local de cultivo

1 (TRUDGILL et al., 2005), além de serem fundamentais nos dados de entrada nas funções de
2 temperatura de modelos de desenvolvimento e modelos de produtividade (TRENTIN et al.,
3 2013).

4 Considerando-se os valores de Tb e TB obtidos respectivamente a partir do método do
5 menor desvio-padrão e do método do coeficiente de variação para cada estágio fenológico,
6 calculou-se a soma térmica necessária para o desenvolvimento desde a pré-floração até a
7 maturação, onde verificou-se o acúmulo médio de 4545,98 °C dia⁻¹, variando de 4355,13 a
8 4724,73 °C dia⁻¹. As necessidades térmicas para os estágios de pré-floração, floração, fruto
9 verde, fruto preto e maturação encontram-se na tabela 2, cujos valores podem ser usados em
10 modelos de simulação do crescimento do açaizeiro para o nordeste paraense como
11 identificadores do desenvolvimento dessa cultura.

12 **Tabela 4.** Duração em dias, graus-dias por estágio e graus-dias acumulados nos estágios reprodutivos do
13 açaizeiro em Capitão Poço - PA.

Estádio	Duração (dias)	Graus-dia por estágio	Graus-dia acumulado	Desvio-padrão	Erro padrão	CV (%)
Pré-floração	78	1069,44	1069,44	86,53	27,36	8,09
Floração	30	395,69	1465,13	24,60	7,78	6,22
Fruto verde	131	1901,87	3367,00	102,23	32,33	5,38
Fruto preto	60	913,04	4280,04	51,04	16,14	5,59
Maturação	17	265,94	4545,98	16,26	5,14	6,11

14
15 As quatro diferentes épocas utilizadas no estudo influenciaram na duração dos estágios
16 fenológicos em função das diferentes condições meteorológicas que cada época foi submetida,
17 logo verificou-se uma relação inversa entre a duração dos estágios e a temperatura do ar, pois
18 quanto menores foram as temperaturas maior foi a duração de cada estágio (tabela 1).

19 O ciclo reprodutivo do açaizeiro apresentou em média duração de 316 dias, onde 78 dias
20 equivaleram a duração do estágio de pré-floração, 30 dias para a floração, 131 dias para o
21 estágio de fruto verde, 60 dias para o estágio de fruto preto e os últimos 17 dias para o estágio
22 de maturação dos frutos (tabela 4). A Duração média (em dias) da ocorrência dos estágios
23 fenológicos obtidos neste estudo são superiores aos encontrados por Oliveira (2002), que
24 estudando o tipo de açaizeiro violáceo (comum) em terra firme sem irrigação na cidade de
25 Belém-PA observou um período de 58 dias para a pré-floração, 26 dias para a floração, 110
26 dias para estágio de fruto verde e 65 dias para a o estágio de fruto preto/maturação.

27 A discordância encontrada entre os resultados pode estar relacionada a diferença de
28 material genético utilizado nos estudos quanto à precocidade, bem como, em função das
29 condições ambientais as quais os experimentos foram submetidos, tendo em vista que o estudo

de Oliveira (2002) foi submetido as condições ambientais naturais o que pode ter aceleração e encurtado a duração dos estádios fenológicos em função de algum déficit hídrico que tenha ocorrido durante o período menos chuvoso do ano, uma vez que ele inibe o crescimento celular reduzindo o crescimento das plantas, afetando vários processos fisiológicos como a fotossíntese (MAR et al., 2013), enquanto que o estudo realizado em Capitão Poço recebia diariamente suprimento hídrico através da irrigação durante o período menos chuvoso.

Verifica-se que o maior coeficiente de variação dos graus-dias (8,09) é encontrada no estágio fenológico de pré-floração (tabela 4), o que deve estar associado ao fato desse estágio ocorrer no período de transição entre o período menos chuvoso e o período mais chuvoso (figura 5), ocasionando maior variação entre as temperaturas e conseqüentemente no acúmulo de energia pela planta e sua duração total.

As temperaturas basais inferiores e superiores e as necessidades térmicas encontradas para cada estágio de desenvolvimento do açaizeiro nas quatro diferentes épocas de avaliação em Capitão Poço - PA, foram utilizadas na simulação da fenologia e duração do ciclo reprodutivo do açaizeiro observados em um segundo experimento independente realizado no município de Castanhal-PA, cujos resultados estão presentes na tabela 5 e figura 8.

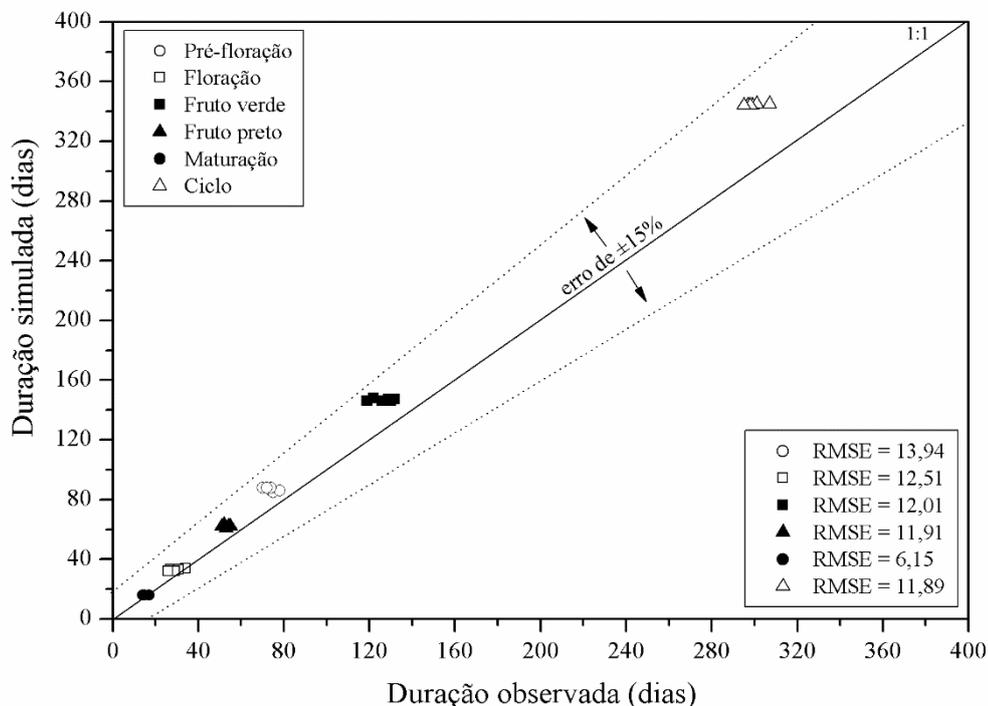
Tabela 5. Desempenho estatístico da simulação da duração dos estádios reprodutivos do açaizeiro durante o processo de validação.

Estádio	Chuva (mm)	Irrigação (mm)	Duração observada (dias)	N	Duração simulada (dias)	d	Dif (%)
Pré-floração	322,63	7,61	73,83±2,71	6	84,17±1,33	0,34	+0,14
Floração	238,23	0,00	29,00±3,03	6	32,16±0,75	0,63	+0,11
Fruto verde	642,20	0,00	126,33±5,01	6	141,16±0,82	0,36	+0,12
Fruto preto	175,49	4,79	53,33±1,63	6	59,67±0,63	0,33	+0,12
Maturação	26,46	24,43	15,00±1,10	6	16,00±0,57	0,61	+0,04

A simulação baseou-se nos graus-dia necessários para atingir cada estágio reprodutivo do açaizeiro desde o início da safra (pré-floração) até o ponto ideal de colheita do fruto (maturação), cujos resultados indicaram duração média (em dias) de 84, de 32, de 141, de 59 e de 16 dias para a pré-floração, floração, estágio de fruto verde, estágio de fruto preto e para a maturação dos frutos, respectivamente. Os resultados da foram considerados satisfatórios, devido aos baixos erros de estimativa, com raiz quadrada média dos erros (RMSE) variando entre 6 dias na fase de maturação a cerca de 14 dias para o estágio de pré-floração (Figura 8).

Ao contrastar o regime pluviométrico durante os experimentos dos dois municípios, verificou-se que o experimento de Capitão Poço recebeu em média 2112mm de chuva, enquanto

1 que o experimento de Castanhal recebeu 1405mm de chuva, ou seja, o solo contou com cerca
 2 de 33,5% menos água em Castanhal, o que resultou em uma quantidade de água disponível no
 3 solo média de 17,3%.



4
 5 **Figura 8.** Fenologia reprodutiva do açaizeiro observada e simulada em plantio de terra firme no município de
 6 Castanhal-PA

7
 8 A diferença na quantidade de água no solo dos dois experimentos influenciou na
 9 simulação da duração dos estádios fenológicos e consequentemente na duração do ciclo total,
 10 o que culminou em uma superestimativa dos dados simulados apresentando erro de 11,89%
 11 para o ciclo total do açaizeiro (figura 8). Esse fator pode ter sido determinante na contribuição
 12 dos erros gerados pela simulação no experimento de Castanhal, haja visto que as condições
 13 pluviométricas foram distintas das de Capitão Poço, e que a disponibilidade de água no solo é
 14 o principal fator que interfere no crescimento do açaizeiro em terra firme (Nogueira & Santana
 15 2016).

16
 17 **2.4 CONCLUSÃO**

18 As temperaturas basais encontradas variaram em função dos diferentes estádios de
 19 desenvolvimento, com as basais inferiores variando de 11,23 a 13,5 °C, e as basais superiores
 20 variando de 32,23 a 32,94 °C.

1 O ciclo fenológico reprodutivo do açaizeiro irrigado em terra firme variou entre 304 e
2 328 dias, com média de 78 dias para a pré-floração, 30 dias para a floração, 131 dias para o
3 estágio de fruto verde, 60 dias para o estágio de fruto preto e 17 dias para a maturação.

4 A necessidade térmica do açaizeiro cultivado em terra firme para o ciclo total de sua
5 fase reprodutiva varia de 4355,13 a 4724,73 °C dia⁻¹, com necessidade térmica média de
6 1069,44 °C dia⁻¹ para o estágio de pré-floração, de 395,69 °C dia⁻¹ para a floração, de 1901,87
7 °C dia⁻¹ para o estágio de fruto verde, de 913,04 °C dia⁻¹ para o estágio de fruto preto e de 265,94
8 °C dia⁻¹ para a maturação.

9 A simulação da fenologia reprodutiva do açaizeiro pela teoria dos graus dias evidencia
10 ser um método eficiente para as condições do Nordeste paraense com erros de estimativa de no
11 máximo de 11,89% para o ciclo total da cultura.

12

13 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

14 AGUIAR, AG; MARTINS, PFS; SIMÕES, AV. Efeitos da intensidade do desbaste de estipes
15 de açaizeiros (*Euterpe oleracea* Mart.) nativos na composição de parcelas de produção em
16 várzea do estuário amazônico. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 60, n. 4, p. 358-365, out./dez. 2017.
17 <https://doi.org/10.4322/rca2709>

18 ARNOLD, CY. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit
19 system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.74, p.430-445,
20 1959.

21 COSTA, LC; JUSTINO, F; OLIVEIRA, IJC; SEDIYAMA, GC; FERREIRA, WPM; LEMOS,
22 CF. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean
23 (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 4,
24 n. 1, p. 1 - 10, 2009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>

25 FARIAS, VDS; LIMA, MJA; NUNES, HGGC; SOUSA, DP; SOUZA, PJOP. Water demand,
26 crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, v.
27 30, p. 190-200, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>.

28 FREITAS, CH; MARTINS, FB; ABREU, MC. Temperaturas cardinais no desenvolvimento
29 foliar de duas espécies de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 5,
30 p. 283 - 292, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000500001>

1 GARCIA, VA; BARBEDO, CJ. Estudo fenológico de *Bactris gasipaes* Kunth, *Euterpe edulis*
2 Mart. e *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman no Vale do Ribeira, SP, Brasil. **Hoehnea**, v.
3 43, p. 135-149, 2016. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2015>

4 GRAMIG, GG; STOLTENBERG, DE. Leaf appearance base temperature and phyllochron for
5 common grass and broad leaf weed species. **Weed Technology**, v. 21, n. 03, p. 249-254, 2007.
6 <https://doi.org/10.1614/WT-06-039.1>

7 GRAY, SB; BRADY, SM. (2016). Plant developmental responses to climate change.
8 *Developmental Biology*, v. 419, p. 64–77, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>

9 HATFIELD, JL; PRUEGER, JH. Temperature extremes: Effect on plant growth and
10 development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, (2015).
11 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

12 HOMMA, AKO; MULLER, AA; MULLER, CH; FERREIRA, CAP; FIGUEIRÊDO, FJC;
13 VIEGAS, IJM; LEMOS, WP. Sistema de produção do açaí. Sistema de produção. ISSN 1809
14 – 4325. Versão eletrônica dez./2005.

15 LIMA, EP; SILVA, EL. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro
16 arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.
17 12, n. 3, p. 266-273, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300007>

18 LISBOA, PMM; MARTINS, FB; ALVARENGA, MIN; VIEIRA NETO, J; REIS, DF.
19 Desenvolvimento vegetativo de duas cultivares de oliveira na fase de muda. **Ciência Rural**,
20 v.42, p.1556-1562, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000900007>.

21 MAR, CC. CONCEIÇÃO, HEO; SANTOS, ABR; VIÉGAS, IJM; SILVA, FSN. Produção de
22 massa Seca e área foliar do Açaizeiro sob déficit hídrico. **Revista Agroecossistemas**, v. 5, n.
23 2, p. 14–23, 2013. <https://doi.org/10.18542/ragros.v5i2.1794>

24 MARTINOT, JF; PEREIRA, HS; SILVA, SCP. Coletar ou Cultivar: as escolhas dos produtores
25 de açaí-da-mata (*Euterpe precatoria*) do Amazonas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**,
26 v. 55, n. 4, p. 751–766, 2017. doi:10.1590/1234-56781806-94790550408

27 NOGUEIRA, AKM; SANTANA, AC. Benefícios socioeconômicos da adoção de novas
28 tecnologias no cultivo do açaí no Estado do Pará. **Revista Ceres**, v. 63, n.1, p. 001-007, 2016.
29 <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010001>

- 1 OLIVEIRA, FJ; FARIAS, PR; SILVA, AG; RODRIGUES, KC. Distribuição espacial da
2 leprose dos citros na Amazônia Oriental. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 56-68,
3 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160007>
- 4 OLIVEIRA, MSP; CARVALHO, JEU; NASCIMENTO, WMO; MÜLLER, CH. Cultivo do
5 açaizeiro para produção de frutos. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. Circular técnica 26,
6 2002. 17 p.
- 7 OMETTO, JC. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425p.
- 8 QUEIROZ, JALD; MELÉM JÚNIOR, NJ. Efeito do tamanho do recipiente sobre o
9 desenvolvimento de mudas de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de**
10 **Fruticultura**, v. 23, n. 2, p. 460-462, 2001. <https://doi.org/10.1590/s0100->
11 [29452001000200054](https://doi.org/10.1590/s0100-29452001000200054)
- 12 RANA, G; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field
13 under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy, Kidlington**, v.13,
14 p.125- 153, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- 15 RENATO, NS; SILVA, JBL; SEDIYAMA1, GC; PEREIRA, EG. Influência dos métodos para
16 cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão.
17 **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 382 - 388, 2013.
18 <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>.
- 19 RODRIGUES, JC; SOUZA, PJOP; LIMA, RT. Estimativa de temperaturas basais e exigência
20 térmica em mangueiras no Nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.
21 35, n. 1, p. 143-150, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000100017>.
- 22 RUFINO, MSM; PÉREZ-JIMÉNEZ, J; ARRANZ, S; ALVES, RE; DE BRITO, ES;
23 OLIVEIRA, MSP; SAURA-CALIXTO, F. Açaí (*Euterpe oleraceae*) “BRS Pará”: A tropical
24 fruit source of antioxidant dietary fiber and high antioxidant capacity oil. **Food Research**
25 **International**, v. 44, n. 7, p. 2100-2106, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.011>
- 26 SCHMIDT, D; CARON, BO; VALERA, O; MEIRA, D; FONTANA, DC; ZANATTA, TP;
27 WERNER, CJ; BREZOLIN, P. Base temperature, thermal time and phyllochron of escarole
28 cultivation. **Horticultura Brasileira**, v. 36, p. 466-472, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102->
29 [053620180407](http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180407)

- 1 SOLTANI, A; SINCLAIR, TR. Modeling Physiology of crop development, growth and yield.
2 **Oxfordshire**: CAB Internacional, 2012, p. 322.
- 3 SOUZA, AP; SILVA, AC; LEONEL, S; ESCOBEDO, JF. Temperaturas basais e soma térmica
4 para a figueira podada em diferentes épocas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.31, p.314-
5 322, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000200005>
- 6 SOUZA, PMB; MARTINS, FB. Estimativa da temperatura basal inferior para as cultivares de
7 oliveira Grappolo e Maria da Fé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 29, n. 2,
8 p. 307-313, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200013>
- 9 SOUZA, PJOP; SOUSA, AML; SAMPAIO, LS. Soybean development and thermal
10 requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil. **Revista de**
11 **Ciências Agrárias**. v. 56, n. 4, p. 371-375, 2013. <https://doi.org/10.4322/rca.2013.055>
- 12 STRECK, NA; LAGO, I; GABRIEL, LF; SAMBORANHA, FK. Simulating maize phenology
13 as a function of air temperature with a linear and a non linear model. **Pesquisa Agropecuária**
14 **Brasileira**, v. 43, p. 449-455, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400002>
- 15 TRENTIN, R; HELDWEIN, AB; STRECK, NA; TRENTIN, G; SILVA, JC. Subperíodos
16 fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura. **Pesquisa**
17 **Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 703–713, 2013. [https://doi.org/10.1590/s0100-](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2013000700002)
18 [204x2013000700002](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2013000700002)
- 19 TREVISAN, ACD; FANTINI, AC; SCHMITT-FILHO, AL; FARLEY, J. Market for
20 Amazonian Açai (*Euterpe oleraceae*) Stimulates Pulp Production from Atlantic Forest Juçara
21 Berries (*Euterpe edulis*). **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 39, n. 7, p. 762–781,
22 2015. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1025461>
- 23 TRUDGILL, DL; HONEK, A; LI, D; STRAALEN, NM. Thermal time - concepts and utility.
24 **Annals of Applied Biology**, v. 146, n. 1, p. 1–14. 2005. doi:10.1111/j.1744-
25 7348.2005.04088.x
- 26 YAMAGUCHI, KKL; PEREIRA, LFR; LAMARÃO, CV; LIMA, ES; VEIGA-JUNIOR, VF.
27 Amazon acai: Chemistry and biological activities: A review. **Food chemistry**, v. 179, p. 137-
28 151, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.055>

- 1 YANG, S; LOGAN, J; COFFEY, DL. Mathematical formulae for calculating the base
- 2 temperature for growing degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 74, p. 61-74,
- 3 1995. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02185-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02185-M)

3. BALANÇO DE ENERGIA EM PLANTIO DE AÇAIZEIRO IRRIGADO NO NORDESTE PARAENSE

RESUMO

O avanço dos cultivos agrícolas sobre áreas de florestas nativas já é evidenciado em diversas pesquisas para espécies anuais, comprovando que a mudança no uso da terra altera o balanço energético no microclima local, entretanto, para cultivos perenes como o açaizeiro que passou por processo acelerado de expansão para áreas de terra firme não se tem informações sobre os possíveis impactos causados ao microclima e conseqüentemente não se sabe a variabilidade dos fluxos de energia que são fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas. Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar o particionamento do balanço de energia no plantio de açaí irrigado durante a fase reprodutiva nas condições climáticas do nordeste do Pará, Brasil. Para tal, uma torre micrometeorológica foi instalada e instrumentada no centro da área experimental para o monitoramento de variáveis meteorológicas entre os anos de 2017 e 2019. O balanço de energia foi obtido através do método da razão de Bowen, e a energia disponível foi particionada em fluxos de calor para o solo, de calor sensível, de calor latente e de calor armazenado no dossel vegetal. O consumo de energia disponível apresentou variação com o decorrer da evolução fenológica, onde observou-se um máximo de 69% no estágio de floração a um mínimo de 63% na maturação do fruto para o fluxo de calor latente, já o fluxo de calor sensível atingiu máximos valores na maturação com 31% e mínimos de 27% durante a floração. O fluxo de calor no solo apresentou pouca variação ao longo do ano com média de 4% para o ciclo, demonstrando boa cobertura do solo impedindo grandes variações em seu aquecimento. O efeito do calor armazenado no dossel do açaizeiro demonstrasse irrelevante quando comparado com os outros componentes do balanço de energia, representando menos de 1% da energia disponível. Os resultados encontrados na partição dos fluxos de energia frente ao avanço dos açaizais para áreas de terra firme evidenciam alterações importantes, principalmente relacionadas ao aumento de temperatura e redução da umidade do ar, fazendo-se necessários estudos que monitorem no mesmo período esses dois ecossistemas.

Palavras-chave: *Euterpe oleracea* Mart., razão de Bowen, balanço de energia.

1 3.1 INTRODUÇÃO

2 De origem amazônica, o fruto do açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) nos últimos anos
3 passou a ser considerado o ouro negro da Amazônia, dada sua alta rentabilidade e versatilidade
4 dos produtos produzidos a partir desta palmeira. Atualmente o açaí é exportado para todos os
5 continentes do mundo, gerando milhares de empregos diretos e indiretos, constituindo-se como
6 a principal fonte de renda para muitas famílias (YOKOMIZO et al., 2012).

7 A partir da década de 90, o açaizeiro passou a ser cultivado em escala comercial em
8 áreas de terra firme, em função do significativo aumento na procura pelo fruto que passou a não
9 ser suficiente para atender a demanda do mercado interno e externo (NOGUEIRA et al., 2013).
10 Devido a expansão do açaizeiro que antes era oriundo apenas das populações naturais em áreas
11 de várzeas para ambientes de terra firme, tornou-se indispensável a compreensão dos padrões
12 de trocas energéticas entre o solo, a planta e a atmosfera, bem como de sua partição no sistema,
13 para que se possa ponderar os efeitos causados com a mudança no uso da terra, pelas alterações
14 na cobertura vegetal original, os impactos na dinâmica dos diversos elementos climáticos, no
15 ciclo hidrológico e conseqüentemente no consumo hídrico que influencia diretamente na gestão
16 dos recursos naturais (GRAY & BRADY, 2016).

17 Os padrões de trocas energéticas e a quantificação dos componentes de radiação solar
18 líquida (energia disponível), tem sido amplamente investigada por vários autores nas mais
19 diversas culturas, através do balanço de energia e de seu particionamento entre os seus fluxos
20 de calor nas superfícies vegetadas (ALBERTO et al., 2011; SOUZA et al., 2012; LÓPEZ-
21 OLIVARI et al., 2016; VANOMARK et al., 2018), verificando-se padrões distintos de
22 interação com a atmosfera, em função das demandas atmosféricas variarem de região pra região
23 e das coberturas vegetais apresentarem diferentes características ópticas sendo determinantes
24 na variabilidade e particionamento diferenciado da energia disponível para os fluxos de calor
25 latente (LE), fluxos de calor sensível (H), fluxos de calor no solo (G) e fluxos de calor
26 armazenados no dossel (S_{dv}).

27 Os métodos micrometeorológicos mais utilizados na determinação do balanço de
28 energia são os de vórtices turbulentos (eddy covariance) e da razão de Bowen (NIAGHI & JIA
29 2019). O primeiro é considerado um método direto e altamente oneroso, que mede o fluxo de
30 CO₂ decorrente da interação entre a vegetação e a atmosfera, como também os fluxos de calor
31 latente e sensível (GEBLER et al., 2015), e o segundo um método indireto (SILVA et al., 2016),
32 que determina os fluxos de calor latente e sensível a partir de um gradiente vertical de
33 temperatura e de umidade do ar (IRMAK et al., 2014).

1 Diversos estudos realizados em todo o mundo comprovam a acurácia dos resultados
2 obtidos pelo método de razão de Bowen - MRB em relação ao método dos vórtices turbulentos
3 na determinação dos componentes do balanço de energia (BROTZGE & CRAWFORD 2003;
4 BILLESBACH & ARKEBAUER 2012; GONG et al., 2016; TIE et al., 2018), propiciando que
5 o MRB seja utilizado como uma ferramenta relativamente prática e confiável.

6 A determinação dos fluxos de energia no plantio de açazeiro possibilitará quantificar
7 os impactos causados pela mudança no uso da terra, já verificadas por outros autores na
8 substituição da floresta nativa por áreas agricultáveis (SOUZA et al., 2011; WEBLER et al.,
9 2013; ANGELINI et al., 2017; WANG et al., 2020), bem como, servirá como guia para a
10 adoção de práticas que visem minimizar tais impactos.

11 Diante disso, se faz necessário compreender a variabilidade da energia disponível ao
12 longo do ciclo do açazeiro e seu particionamento nos fluxos de calor latente, sensível e do solo,
13 para que se possam criar estratégias de manejo que auxiliem a tomada de decisão na região.
14 Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar o particionamento do balanço de energia em
15 plantio de açazeiro irrigado durante a fase reprodutiva nas condições climáticas do nordeste do
16 Pará, Brasil.

17 **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

18 3.2.1 Área experimental

19 O experimento foi realizado na região Nordeste do estado do Pará, durante duas safras
20 entre os anos de 2017 e 2019 em uma área de dez hectares localizada nas dependências da
21 fazenda Ornela no município de Capitão Poço, cujas coordenadas geográficas são 01°43'44,4"S
22 latitude, 47°06'39,3"W longitude e altitude de 71 m (figura 1).



Figura 1 – Localização da área experimental em Capitão Poço – PA.

Na tabela 1 são apresentadas as propriedades físico-químicas do solo da área experimental, o qual foi classificado como latossolo amarelo distrófico, com textura franco arenosa com 14% de argila na camada de 0-20 cm e de textura franco argilo arenosa na camada de 20-40 com 28% de argila. O clima local é caracterizado como Am, clima tropical, apresentando moderada estação seca com precipitação pluvial média anual variando de 2500 a 3000 mm, onde o trimestre mais seco do ano ocorre entre setembro e novembro (OLIVEIRA et al., 2016).

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental.

Profundidade (cm)	pH (H ₂ O)	P	K ⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Al ³⁺
		-- mg·dm ⁻³ --		-----cmol _c ·dm ⁻³ -----		
0-20	4,07	45	65	0,90	1,30	0,20
20-40	4,82	51	10	0,50	0,90	0,50
Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Ds ¹	CC ²	PMP ³
	----(g·kg ⁻¹)----			(g·cm ³)	-- (m ³ ·m ³) --	
0-20	792	68	140	1,43	0,37	0,23
20-40	633	87	280	1,68	0,32	0,21

1 ¹Densidade do solo, ²Capacidade de campo, ³Ponto de murcha permanente.

2 O plantio foi implantado para fins comerciais em 2012, utilizando o ecotipo chumbinho,
3 em espaçamento de 6,0 x 4,0 m com o manejo de três estipes/plantas por touceira, cultivado em
4 terra firme com irrigação diária durante o quadrimestre mais seco do ano por meio de um
5 sistema de microaspersão, aplicando-se uma lâmina bruta média diária de 3,28 mm.

6 O desenvolvimento fenológico reprodutivo do açazeiro foi analisado adaptando a
7 escala proposta por Garcia & Barbedo (2016), que apresenta quatro fenofases reprodutivas que
8 são: pré-floração, floração, frutos verdes e frutos pretos, acrescentando a fenofase de maturação
9 que é descrita por Homma et al. (2005). A determinação dos estádios fenológicos reprodutivos
10 foi estabelecida de acordo com a ocorrência predominante de determinado estágio em relação
11 ao total da população, monitorando-se de forma aleatória 300 plantas dentro do hectare de
12 controle.

13 3.2.2 Instrumentação

14 No centro da área experimental foi instalada uma torre metálica de 16 m de altura e nela
15 acoplada três estações meteorológicas automáticas, sendo duas da Campbell Scientific
16 (CR1000, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA), acima e abaixo do dossel vegetal
17 e uma da Onset Hobo (U30, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA) (tabela 2):

18 **Tabela 2** – Variáveis e instrumentos utilizados no experimento, assim como, a disposição dos mesmos em relação
19 ao solo e o dossel vegetal.

Variáveis meteorológicas	Instrumento, fabricante, modelo	Nível dos sensores (m)
Temperatura do ar	Thermo-hygrometer (CMP6-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 e 8,0 acima do solo
Radiação global incidente	Pyranometer (CMP6-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Saldo de radiação	Net radiometer (NR-LITE2-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Velocidade e direção do vento	Wind monitor (05106-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Chuva	Rain gauge (TB4-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,5 acima do dossel
Temperatura do ar	Thermo-hygrometer (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Umidade relativa do ar	Thermo-hygrometer (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Temperatura do solo	Thermometer (108, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,02 e 0,06 de profundidade
Umidade do solo	Time Domain Reflectometer (CS615, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,3 de profundidade
Fluxo de calor no solo	Soil Heat Flux Plate (HFP01SC-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,08 de profundidade

20

1 A estação da Campbell acima do dossel foi equipada com um pluviômetro (TB4-L), um
2 saldo de radiação (NR-LITE2-L), um sensor de radiação global incidente (CMP6-L), um sensor
3 de velocidade e direção do vento (05106-L), dois Termoigrômetros (HMP45), sendo um a 2 m
4 do solo e outro ao nível das inflorescências e infrutescências do açazeiro correspondendo à
5 altura de 8 m do solo (tabela 2); já a estação da Campbell abaixo do dossel foi equipada com
6 duas placas de fluxo de calor no solo (HFP01SC), dois termopares (TEMP108) instalados a
7 0,02 e 0,06 cm de profundidade, e dois sensores de umidade do solo (CS615) (tabela 2); e a
8 estação meteorológica automática da Onset Hobo foi instalada acima do dossel vegetal com
9 dois sensores de temperatura e umidade do ar (STHB-M002) a 0,5 e a 2,0 m de altura acima da
10 copa das plantas.

11 Os sensores da Campbell Scientific foram conectados a um datalogger CR1000 e a um
12 multiplexador AM416 e os sensores da estação Onset Hobo foram conectados a um datalogger
13 modelo U30. A programação de leitura foi realizada para obter dados a cada dez segundos, e
14 médias totais a cada 20 minutos. A localização da torre obedeceu às exigências mínimas de
15 bordadura da área, apresentando “fetch” disponível (superior a razão 1:100), a fim de que as
16 medidas obtidas fossem representativas da área experimental, não sofrendo influência do calor
17 advectivo (RANA & KATERJI 2000).

18 3.2.3 Balanço de energia

19 Os componentes do balanço de energia do açazeiro foram obtidos pela lei de
20 conservação de energia para uma superfície vegetada com base na razão de Bowen, de acordo
21 com a seguinte expressão (ROSENBERG et al., 1983):

$$22 \quad R_{net} = LE + H + G + S_{dv} + F \quad \text{Eq.1}$$

23 Em que R_{net} é o saldo de radiação, LE e H são os fluxos verticais de calor latente e sensível,
24 respectivamente; G o fluxo de calor no solo, S_{dv} a energia armazenada no sistema solo dossel
25 vegetativo e F é a energia utilizada no processo fotossintético, a qual não foi considerada por
26 representar menos de 2% do saldo de radiação (HEILMAN et al., 1994). Todos os termos da
27 Eq. 1 foram expressos em $W m^{-2}$.

28 O balanço de energia foi efetuado sobre o dossel do açazeiro, para um volume de
29 controle compreendido entre a profundidade de 8 cm do solo e a altura do psicrômetro mais

1 elevado (2,0 m acima do dossel do cultivo); consideram-se positivos os fluxos verticais que
2 chegam e negativos os que saem do volume de controle.

3 A componente G foi estimado a partir de duas placas de fluxo de calor no solo instaladas
4 horizontalmente a 0,08 m de profundidade em ambos os lados da linha de plantio (uma na linha
5 e outra entre as linhas de plantio), de onde se obteve a energia média transportada para o solo.

6 O calor armazenado na camada de solo acima dos fluxímetros foi obtido conforme
7 (KUSTAS et al., 2000), utilizando dois termopares (TEMP108, Campbell Scientific Instrument,
8 Logan, UT, USA) instalados acima do fluxímetro a uma profundidade de 0,02 e 0,06 m abaixo
9 de superfície do solo (Tabela 2).

$$10 \quad G = G_8 + \frac{\Delta T_s C_s z_r}{t} \quad \text{Eq.2}$$

11 Em que G_8 é a medição de fluxo de calor no solo pelo fluxímetro, ΔT_s é a diferença média da
12 temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) durante o período de medição, z_r é a profundidade do fluxímetro, t é
13 o intervalo da medição em minutos e C_s é a capacidade calorífica volumétrica do solo, obtida
14 pela expressão:

$$15 \quad C_s = \rho_s (C_{sd} + C_{sw} \theta_v) \quad \text{Eq.3}$$

16 Em que ρ_s é a densidade do solo (g cm^{-3}); C_{sd} é o calor específico do solo seco ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); C_{sw}
17 é o calor específico da água no solo ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) e θ_v é a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

18 3.2.4 Calor armazenado no dossel vegetal

19 O fluxo de calor sensível no dossel do açazeiro (Sd) foi calculado com base no gradiente
20 vertical de temperatura do ar, em dois níveis, regularmente espaçado em 2 e 6m, a partir da
21 superfície do solo até 8 m, totalizando duas camadas no interior do dossel vegetativo do
22 açazeiro, pela equação (MCCAUGHEY, 1985):

$$23 \quad Sd = \frac{\left(\sum \rho c_p \Delta h \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \right)_{j+1} - \left(\sum \rho c_p \Delta h \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \right)_j}{1200} \quad \text{Eq.4}$$

24 em que Sd é o fluxo de calor sensível armazenado, ρ é a densidade do ar ($1,3 \text{ kg m}^{-3}$), c_p é o
25 calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$), Δh é distância vertical entre os sensores térmicos (8 m), T_i é a
26 temperatura do ar nas alturas “i” e “j” ($^{\circ}\text{K}$). O calor armazenado no dossel do açazeiro foi

1 obtido pela diferença entre as somas das energias térmica de cada uma das camadas, estimadas
 2 entre cada intervalo de 20 minutos, obtendo-se o resultado em segundos, ou seja, 1200 s.

3 Para o cálculo do fluxo de calor latente no dossel vegetativo do açazeiro (ΔQ_a), nos
 4 mesmos níveis do calor sensível, foi utilizada a seguinte equação (MCCAUGHEY, 1985):

$$5 \quad \Delta Q_a = \int_0^{z_r} \rho L e \frac{\delta e_i}{\delta t} dz \approx \rho L e \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta e_i}{\Delta t} \Delta z_i \right) \quad \text{Eq.5}$$

6 sendo ρ densidade do ar (kg m^{-3}), L_e é o fluxo de calor latente de vaporização (kJ Kg^{-1}), t é a
 7 temperatura do ar, z é a distância entre as medições de temperatura e umidade relativa e e a
 8 pressão parcial do vapor d'água (hPa), calculado a partir da temperatura do ar ($^{\circ}\text{K}$) e umidade
 9 relativa (%) em 2 e 8 m de altura. O fluxo de calor armazenado no dossel do açazeiro (S_{dv}) foi
 10 determinado a partir da soma de S_d e de ΔQ_a .

11 3.2.5 Razão de Bowen, fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H)

12 A partir da energia disponível ($R_{net}-G$) o fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível
 13 foram determinados em função dos gradientes de temperatura do ar e na pressão de vapor, em
 14 dois níveis (0,5 e 2,0 metros acima do dossel).

15

$$16 \quad \beta = \frac{H}{LE} = \frac{-k_h \frac{d(\rho_a c_p T)}{dz}}{-k_v \frac{d(\rho_a \lambda q)}{dz}} \quad \text{Eq.6}$$

17 Em que K_h e K_v são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água,
 18 respectivamente, c_p é o calor específico do ar úmido, ρ_a é a densidade do ar, T e q são as
 19 diferenças de temperatura e umidade do ar específica, em respectivo, e γ é o fator psicrométrico
 20 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

21 Considerando-se a igualdade entre K_h e K_v (GAVILAN & BERENGENA, 2007) e
 22 $(dT/dz)/(dq/dz) \approx \Delta T/\Delta e$; a equação 6 pode ser simplificada para:

$$23 \quad \beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Eq.7}$$

24 Sendo $\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$ e $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$ as diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor
 25 d'água na camada de ar acima da copa do açazeiro, respectivamente.

1 Com base na razão de Bowen, obteve-se o fluxo de calor latente segundo a expressão 8:

$$2 \quad LE = \frac{Rn - G - S_{dv}}{1 + \beta} \quad \text{Eq.8}$$

3 Com o resíduo da equação 1, obteve-se o fluxo de calor sensível através da seguinte
4 equação:

$$5 \quad H = Rn - LE - G - S_{dv} \quad \text{Eq.9}$$

6 3.2.6 Critério para rejeição de dados inadequados do método da razão de Bowen

7 Para rejeitar valores inconsistentes, incluindo aqueles fora dos limites da resolução
8 instrumental, adotou-se os critérios descritos por Perez et al. (1999). Em função de algumas
9 vezes, as medidas darem sinais incorretos para os fluxos de calor latente e sensível a tabela 3
10 foi levada em consideração, onde os dados fornecidos pelo método da razão de Bowen foram
11 corretos quando atenderam aos critérios abaixo.

12 **Tabela 3** - Limites de aceitabilidade dos valores obtidos pelo método da razão de Bowen sob condições não-
13 advectivas.

Energia disponível	Gradiente de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor
Rnet - G > 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H ≤ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H > 0 para β > 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H > 0
Rnet - G < 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H < 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H ≥ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H < 0 para β > 0

14 Quando as condições da tabela 3 não foram satisfeitas o método da razão de Bowen
15 forneceu um sentido incorreto para os fluxos e obrigatoriamente os dados foram descartados.
16 Esse tipo de erro ocorre no início da manhã e no final da tarde, quando o fluxo de calor muda
17 de sinal, durante a irrigação ou a precipitação, em que Δe apresenta valores baixos quando os
18 valores de energia disponível são baixos.

19 A estimativa de LE e do H fornecida pelo método razão de Bowen deve ser consistente
20 com a relação fluxo-gradiente entre os componentes e de quais valores de β próximos de -1
21 podem ser rejeitados, de acordo com a precisão considerada para as medições que no presente
22 estudo foram de 0,2 °C para a temperatura do ar e de 2% para a umidade relativa do ar. Tais

1 valores foram utilizados para a obtenção do erro (ε), a fim de se determinar o intervalo próximo
 2 de -1 a ser excluído.

$$3 \quad \varepsilon = \frac{(\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T)}{\Delta e} \quad \text{Eq. 10}$$

4 O intervalo excluído foram os valores de β próximos de -1: $-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$

5 Após o controle de qualidade, o preenchimento das falhas de dados de fluxo de energia
 6 foi realizado através de uma regressão entre o H + LE com a energia disponível (Rnet + G) para
 7 cada estágio reprodutivo do açaizeiro (TEIXEIRA & BASTIAASEEN, 2012) de acordo com
 8 as correlações obtidas a partir dos dados de cada estágio e de ambos os períodos (Tabela 4).

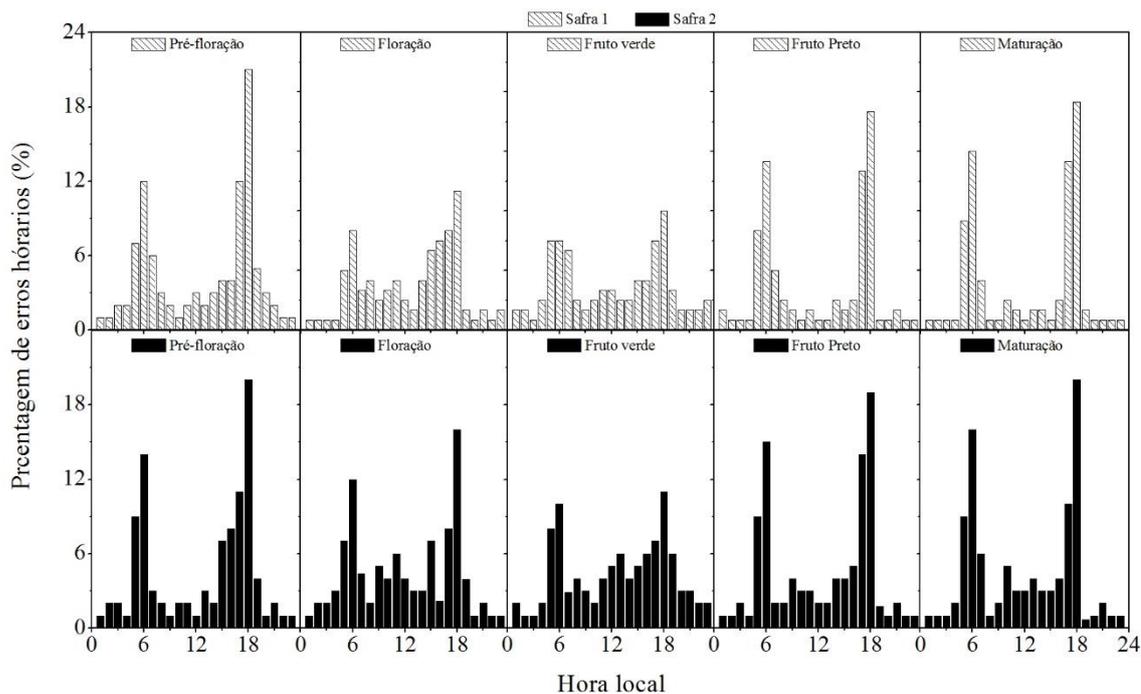
9 **Tabela 4** - Coeficiente da análise de regressão da correlação horária entre H + LE (coordenada Y) e Rnet + G
 10 (coordenada X), ambos em $W m^{-2}$, durante os diferentes estádios reprodutivos do açaizeiro, Capitão Poço - PA,
 11 Brasil.

Estádio fenológicos	Coeficientes lineares		
	a	b	R ²
Pré-Floração	4.1712	0.9677	0.9985
Floração	5.4304	0.9561	0.9976
Fruto verde	11.108	0.9163	0.9957
Fruto preto	17.971	0.8961	0.9951
Maturação	20.161	0.8819	0.9944

12

13 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

14 Na figura 2 são apresentados os resultados horários da análise do controle de qualidade
 15 dos dados na série da razão de Bowen para as duas safras, onde verifica-se que 69,77% e
 16 71,95% dos dados coletados na primeira e segunda safras, respectivamente, permitem a
 17 realização do balanço de energia.



1
2 **Figura 2** – Porcentagem de erros horários do método de razão de Bowen em diferentes estádios fenológicos do
3 açazeiro durante duas safras em Capitão Poço – PA.

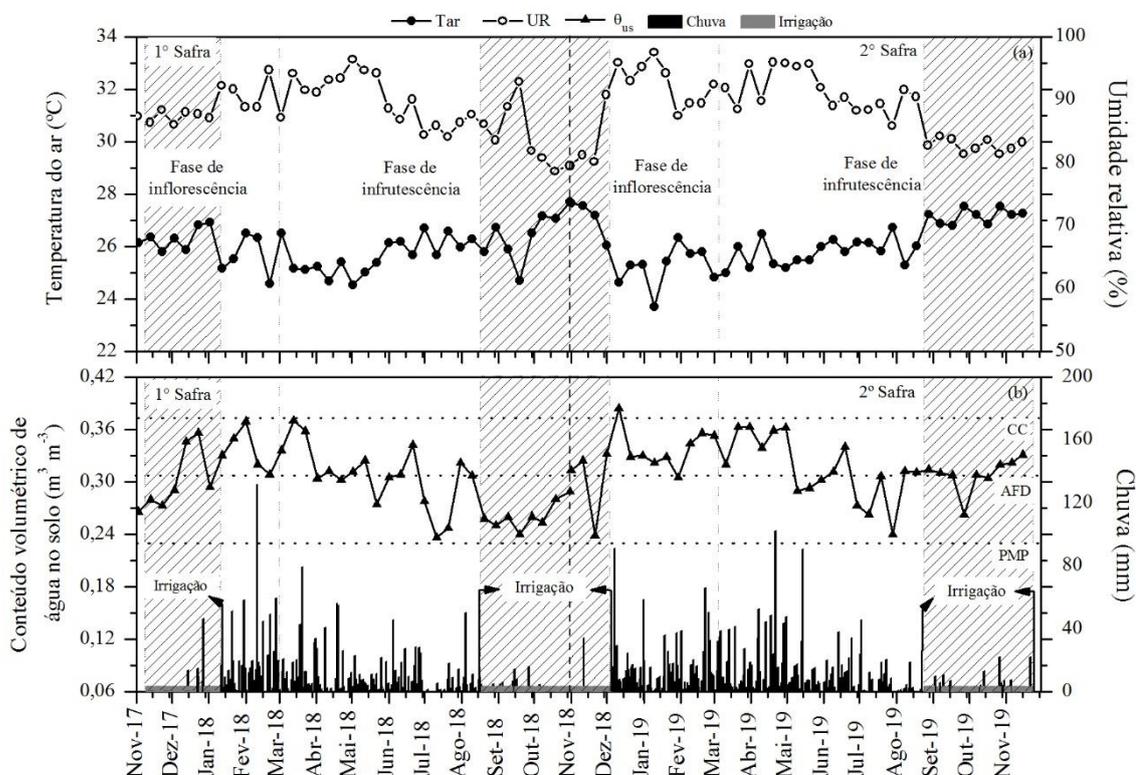
4 Ao longo das duas safras e em todos os estádios e horários foram observadas
5 inconsistências nos dados gerados pelo método de razão de Bowen, em função da baixa
6 variabilidade nos gradientes de temperatura e umidade do ar (SOUZA et al., 2018), com
7 predominância no início da manhã entre 05h00min e 08h00min e no final da tarde entre
8 16h00min e 18h00min (figura 2), principalmente nos estádios de pré-floração, fruto preto e
9 maturação.

10 Durante os estádio de floração e fruto verde observou-se uma maior homogeneização
11 dos dados inconsistentes, principalmente durante a segunda safra, quando verifica-se aumento
12 de erros entre os horários das 11h00min e 15h00min, em função da maior incidência de chuvas
13 nesses horários que ocasionam redução nos gradientes de temperatura e umidade que não são
14 favoráveis para aplicação da metodologia de razão de Bowen (PEREZ et al., 1999; TEIXEIRA
15 & BASTIAANSEEN, 2012).

16 Na figura 3a verifica-se ao longo de duas safras as fenofases do açazeiro, cuja
17 predominância durante o período mais chuvoso corresponde à fase de inflorescência que integra
18 os estádios de pré-floração e floração, as quais iniciam em novembro e terminam em meados
19 de março, apresentando duração média de 78 e 30 dias, respectivamente. Já durante o período
20 final de março a outubro a fase de infrutescência é a que prevalece, sendo constituída pelos

1 estádios de fruto verde, fruto preto e maturação que apresentam duração média de 130, 60 e 16
2 dias, respectivamente.

3



4

5 **Figura 3** – Variação dos elementos climáticos de temperatura e umidade relativa do ar, conteúdo volumétrico de
6 água no solo, chuva e da irrigação em diferentes estádios fenológicos do açaizeiro em Capitão Poço – PA.

7

8 A variabilidade das variáveis climáticas de temperatura do ar (Tar) e umidade relativa
9 (UR) (figura 3a), bem como do conteúdo volumétrico de água no solo (θ_{us}) e chuva (Prp) (figura
10 3b) durante o experimento também são apresentadas na figura 3. A temperatura média do ar foi
11 ligeiramente superior durante a primeira safra (25,88 °C), quando comparado a segunda safra
12 (25,72 °C), com máxima de 36,47 °C e mínima de 20,27 °C, registradas nos meses de outubro
13 e janeiro, respectivamente. Assim como a Tar, a umidade relativa demonstrou pequena variação
14 média entre a primeira e a segunda safra com valores de 88,68% e 89,37%, respectivamente.

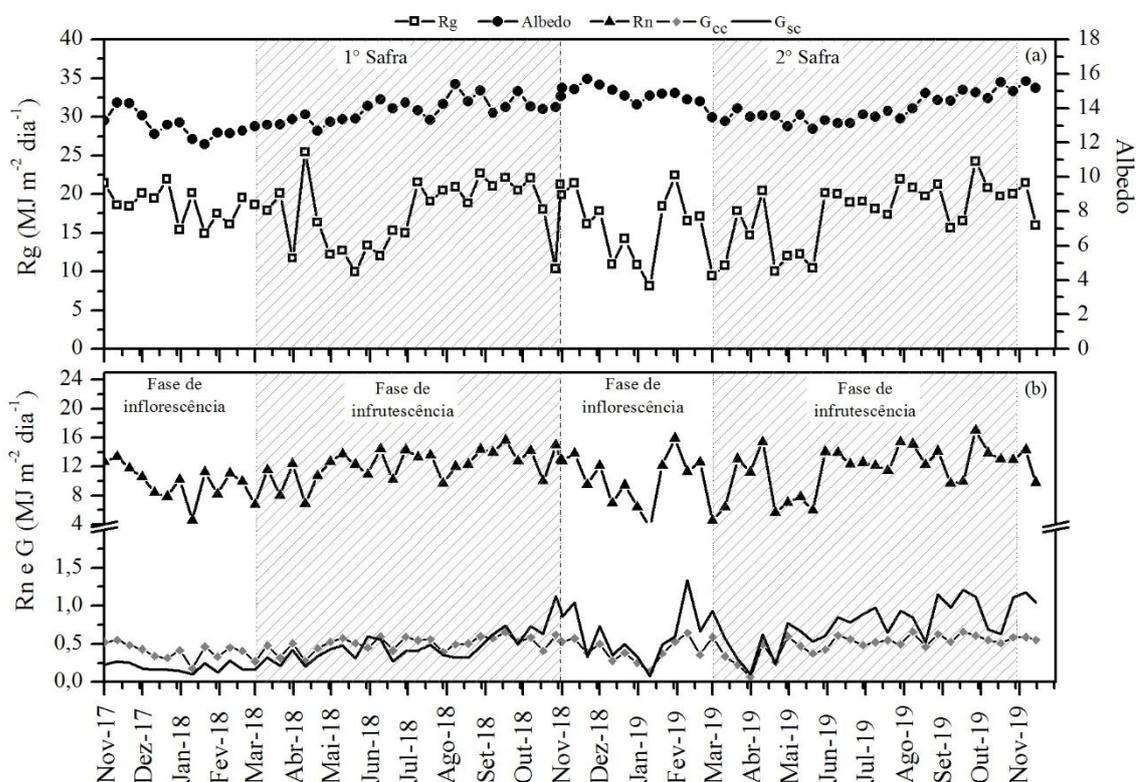
15

16 A figura 3b demonstra a variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo, da
17 chuva e o período que utilizou-se a irrigação, onde verifica-se que entre os meses de dezembro
18 e julho em ambas as safras, o solo se manteve com boas condições hídricas, em função desse
19 período ter concentrado 88,02% dos 2.222,41 mm de chuva ocorridos na primeira safra e
87,72% dos 2.805,80 mm registrados na segunda safra. Tal fato proporcionou que na maior
parte do experimento o conteúdo volumétrico de água no solo se mantivesse acima de 0,306 m³

1 m^3 que corresponde ao limite de água facilmente disponível – AFD, com nível médio de
2 capacidade total de água no solo acima dos 50% nas duas safras.

3 Entre os meses de julho e novembro, quando se concentra em média apenas 12,13% do
4 total de chuvas na região, se faz necessário a utilização da irrigação para prevenir danos que
5 possam ser causados pelo déficit hídrico. Em função disso realizou-se durante a primeira safra
6 101 irrigações e 77 irrigações na segunda safra. Observa-se que apesar da utilização da irrigação
7 durante o período menos chuvoso do ano, o conteúdo volumétrico de água no solo ficou abaixo
8 da AFD, demonstrando a subestimativa da lâmina de irrigação aplicada para a demanda hídrica
9 do açaizeiro.

10 Na fase de inflorescência os valores médios da radiação global (R_g) e do saldo de
11 radiação (R_{net}) foram, respectivamente, de 16,83 e 11,77 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ durante a primeira safra
12 (figura 4a) e de 17,56 e 11,74 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a segunda safra (figura 4b) com máximo de
13 25,42 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e mínimo de 4,74 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para a R_g , já o valor máximo do R_{net} foi de
14 17,73 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e a mínima de 0,10 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.



16
17 **Figura 4** – Variação diária da radiação global, albedo, do saldo de radiação e dos fluxos de calor no solo com e
18 sem correção em diferentes estádios fenológicos do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA.

19 Na fase subsequente (fase de infrutescência) houve uma elevação na média do saldo de
20 radiação para ambos os anos, em consequência do aumento dos valores de radiação global, uma

1 vez que a redução da incidência de chuvas (principalmente entre agosto e outubro) culminou
2 na redução de radiação difusa em função de mais dias de céu claro, que favoreceu a incidência
3 da radiação direta. Tanto a R_g quanto o R_{net} se mostraram superiores aos valores obtidos
4 durante a fase de inflorescência, apresentando elevação percentual de 9,48% e 12,05% na
5 primeira safra e de 16,20 % na segunda safra, para o R_g e R_{net} , respectivamente.

6 A variabilidade média do albedo diário ao longo do ciclo reprodutivo do açazeiro
7 apresentou flutuações no decorrer do experimento, como se pode observar na figura 4a. Em
8 termos de valor médio diário para todo o ciclo da cultura em ambos os anos, registrou-se um
9 albedo de 13,89%, atingindo valores mínimos e máximos durante a fase de inflorescência e
10 infrutescência respectivamente. O valor médio do albedo nos estádios de desenvolvimento do
11 açazeiro foi de 14,18% na floração, 13,92% na pré-floração, 13,46% no estágio de fruto verde,
12 14,40% no estágio de fruto preto e 14,52% na maturação. O índice de área foliar obtido para a
13 primeira e segunda safra foi de 2,02 e 2,12, respectivamente. A superioridade no IAF da
14 segunda safra contribuiu para que o conteúdo volumétrico de água no solo sofresse menor
15 influência da radiação direta quando comparado a safra anterior.

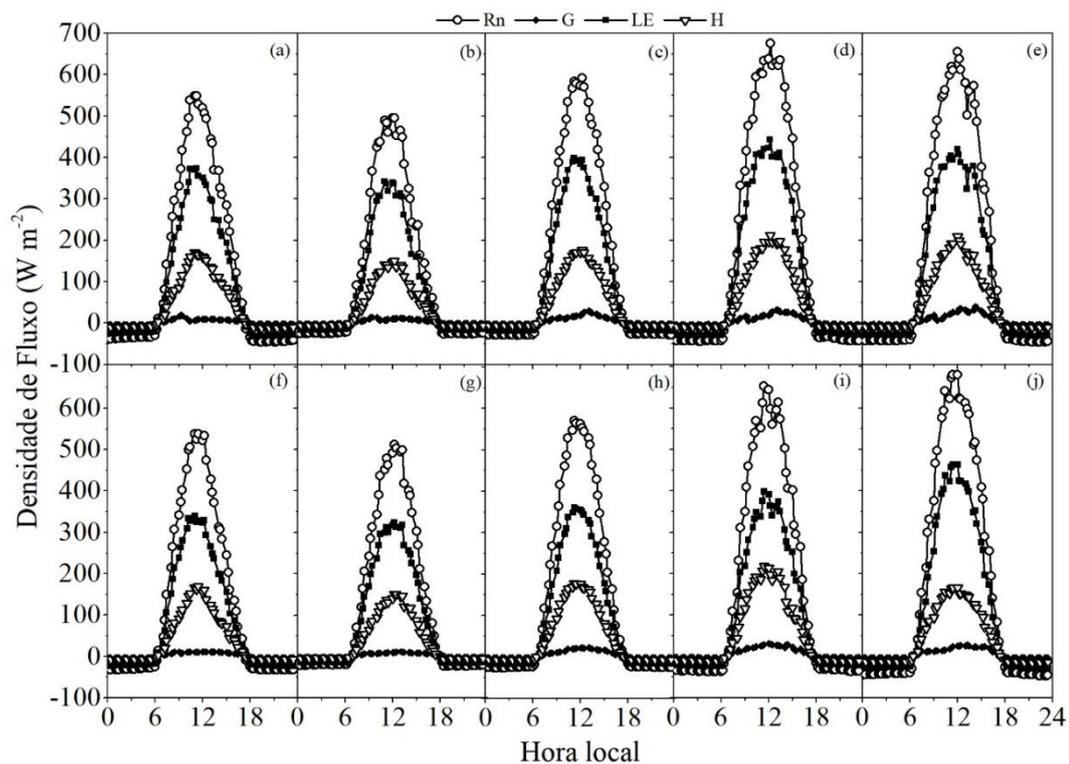
16 A Figura 4b demonstra a variabilidade do fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e
17 com correção (G_{cc}) ao longo do ciclo reprodutivo do açazeiro. Verifica-se que em ambas as
18 safras os valores de G_{sc} apresentaram maior variabilidade, com amplitudes instantâneas dos
19 dados chegando a ser 54,47% maior que a amplitude observada no G_{cc} .

20 Durante a fase de inflorescência, verificou-se que o G_{cc} médio foi de $0,46 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
21 ¹, sendo superior ao G_{sc} ($0,22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) na primeira safra, enquanto que na segunda safra a
22 média do G_{cc} foi de $0,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, apresentando-se inferior quando comparado ao G_{sc}
23 ($0,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Já durante a fase de infrutescência o G_{cc} foi de $0,60$ e $0,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e
24 o G_{sc} foi de $0,50$ e $0,78 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ na primeira e segunda safras, respectivamente.

25 Os resultados obtidos demonstram a importância de se calcular o calor armazenado na
26 camada acima das placas de fluxo de calor no solo, pois verifica-se nesse caso um padrão atípico
27 do G_{sc} em relação as condições climáticas durante as fases de inflorescência e infrutescência
28 em ambas as safras, pois ao comparar o total de chuva ocorrido nas duas fases verifica-se que
29 na segunda safra ocorreu um aumento de 12,91% (inflorescência) e 24,31% (infrutescência) no
30 total de chuva, o que acarreta o aumento do teor de umidade no solo, propiciando menor
31 variabilidade na temperatura do solo e consequentemente, menor é a energia disponível para o
32 seu aquecimento (SANTOS et al., 2010). Mudanças significativas entre G_{cc} e G_{sc} foram

1 verificadas no pomar de mangueiras por Borges et al. (2008) ao observarem valores de partição
2 de energia de 7,46 % para Gcc e de 1,42% para o Gsc.

3 As variações horárias do saldo de radiação e dos fluxos de calor são apresentadas na
4 figura 5. Observa-se que durante o período noturno todos os componentes do balanço de energia
5 são negativos ($LE < H < G$), mas à medida que surgem os primeiros raios solares o Rnet começa
6 a se elevar, passando a positivo em média a partir das 6h40min nos estádios de maturação e
7 pré-floração e a partir das 7h00min nos estádios de floração, fruto verde e fruto preto.



8

9 **Figura 5** – Densidade dos fluxos horários de calor latente, calor sensível, calor do solo e do saldo de radiação em
10 diferentes estádios fenológicos do açazeiro irrigado em Capitão Poço – PA

11 O saldo de radiação atinge valores máximos em torno das 12h00min, com picos
12 instantâneos de até 900 W m^{-2} para os diferentes estádios de desenvolvimento. Observou-se nos
13 estádios de fruto preto e maturação em ambas as safras valores médios do Rnet próximos dos
14 700 W m^{-2} , enquanto que nos estádios de pré-floração, floração e fruto verde a média foi
15 próxima de 550 W m^{-2} (Figura 5).

16 A diferença média nos valores de Rnet nos diferentes estádios fenológicos está
17 relacionada com a variação do albedo que reduz durante o periodo mais chuvoso e com o regime
18 de chuvas que tem predominância principalmente nos estádios de pré-floração, floração e fruto
19 verde, ocasionando maior nebulosidade e conseqüentemente menor incidência de radiação
20 direta e menor energia disponível no sistema.

1 À medida que o açazeiro se desenvolveu, ocorreu uma diferença de 14,77% no fluxo
2 de calor latente entre as fases de inflorescência e de infrutescência, onde se verificou picos
3 instantâneos de LE na primeira e segunda safras, respectivamente, atingindo os 597,27 e 594,29
4 $W m^{-2}$ durante o estágio de pré-floração, 689,63 e 645,99 $W m^{-2}$ na floração, 648,16 e 676,81
5 $W m^{-2}$ no estágio de fruto verde, 603,47 e 618,06 $W m^{-2}$ no estágio de fruto preto e 542,38 e
6 581,69 $W m^{-2}$ na maturação.

7 .O fluxo de calor sensível - H, que culmina na energia utilizada para o aquecimento do
8 ar, apresentou valores energéticos menores que o LE, com máximos de energia de 276,58 e
9 349,76 $W m^{-2}$ na pré-floração; 321,53 e 357,33 $W m^{-2}$ na floração; 319,12 e 343,44 $W m^{-2}$ no
10 estágio de fruto verde; 295,01 e 306,89 $W m^{-2}$ no estágio de fruto preto; e 367,32 e 304,96 W
11 m^{-2} na maturação, para a 1^o e 2^o safras de modo consequente. Já para o fluxo de calor no solo
12 a energia máxima utilizada atingiu os 42,15 e 42,70 $W m^{-2}$ na pré-floração, 49,45 e 47,08 $W m^{-2}$
13 na floração, 48,13 e 47,25 $W m^{-2}$ no estágio de fruto verde, 49,98 e 47,74 $W m^{-2}$ no estágio
14 de fruto preto e na maturação chegou aos 52,18 e 48,54 $W m^{-2}$.

15 Verifica-se ao longo do experimento que a maior parte da energia disponível no sistema
16 é consumida pelo fluxo de calor latente (tabela 5), que é a energia utilizada na
17 evapotranspiração, apresentando maiores percentuais (LE/Rnet), ocorrendo
18 predominantemente no período mais chuvoso do ano, correspondente a fase de inflorescência
19 que apresentou consumo médio de 67 e 68% na primeira e segunda safras (tabela 5). O maior
20 consumo de LE nos estádios de floração e fruto verde pode estar diretamente associado a baixa
21 resistência do dossel em transportar o vapor d'água (ORTEGA-FARIAS et al., 2004; SOUZA
22 et al., 2012), em função da boa disponibilidade hídrica do solo, uma vez que o conteúdo
23 volumétrico de água solo apresenta-se nesse período acima da faixa de água facilmente
24 disponível para as plantas (figura 3).

1 **Tabela 5** - Média diária do albedo e dos componentes do balanço de energia e partição diurna em diferentes
 2 estádios reprodutivos do açazeiro em Capitão Poço – PA.

Estádio	1° Safra							
	Energia (MJ m ⁻² d ⁻¹)					Partição de energia		
	Rnet	LE	H	G	Sd	LE/Rnet	H/Rnet	G/Rnet
Pré-floração	10,28	6,94	3,09	0,26	-0,01	0,66	0,30	0,04
Floração	10,81	7,38	3,16	0,43	-0,01	0,68	0,29	0,03
Fruto verde	11,99	8,08	3,52	0,48	-0,03	0,67	0,29	0,04
Fruto preto	13,83	9,18	4,16	0,50	-0,01	0,65	0,31	0,04
Maturação	13,95	8,77	4,51	0,67	-0,02	0,63	0,32	0,05
Média	12,17	8,07	3,69	0,47	0,016	0,66	0,30	0,04
Estádio	2° Safra							
	Energia (MJ m ⁻² d ⁻¹)					Partição de energia		
	Rnet	LE	H	G	Sd	LE/Rnet	H/Rnet	G/Rnet
Pré-floração	10,47	7,01	3,00	0,42	---	0,67	0,29	0,04
Floração	10,40	7,17	2,81	0,42	---	0,69	0,27	0,04
Fruto verde	11,93	8,11	3,34	0,48	---	0,68	0,28	0,04
Fruto preto	13,73	9,20	3,98	0,55	---	0,67	0,29	0,04
Maturação	14,30	9,35	4,19	0,76	---	0,65	0,29	0,05
Média	12,17	8,17	3,46	0,53	---	0,67	0,28	0,04

3
 4 Durante a fase de infrutescência, correspondente ao período menos chuvoso, os valores
 5 de energia particionados para o LE continuaram superiores aos fluxos de calor sensível (H e
 6 G), mas com percentual reduzido em 4,60% na primeira safra e 2,97% na segunda safra, quando
 7 comparado a fase de inflorescência, com menor consumo no estádio de maturação.

8 A partição de energia utilizada para H apresenta padrão inverso aos dos valores de LE
 9 durante os dois ciclos de experimento, com menores percentuais na fase de inflorescência e
 10 maiores na fase de infrutescência. No estádio de floração sob ótimas condições hídricas do solo,
 11 29% da energia disponível foi utilizada para o aquecimento diurno do ar na 1° safra e 28% na
 12 2° safra, enquanto que 32% (1° safra) e 29% (2° safra) foram no estádio de maturação os
 13 maiores percentuais utilizados pelo H.

14 Seguindo a mesma tendência do H, o fluxo de calor no solo (G) apresentou percentuais
 15 que aumentam tanto na primeira quanto na segunda safra com mínimos de 3% (floração) e 4%
 16 (pré-floração) e máximos de 5% no estádio de maturação, respectivamente. Um dos motivos
 17 para o aumento nos valores de G é que durante o estádio de fruto verde é realizado o controle
 18 de plantas daninhas, o que deixa o solo mais exposto e conseqüentemente eleva a incidência
 19 direta de radiação ao solo, provocando maior aquecimento.

20 Os resultados da partição dos fluxos de energia (LE e H) obtidos para o açazeiro, ao
 21 serem comparados com os resultados dos fluxos de energia da floresta nativa de Caxiuanã,

1 obtidos por Silva (2014) durante quatro anos, demonstram redução de 4,35% no valor de LE e
2 aumento de 48,26% no valor de H, evidenciando que o avanço do cultivo do açazeiro para
3 áreas de terra firme, modifica os padrões da partição de energia.

4 Os impactos causados pela mudança na cobertura vegetal modificam principalmente as
5 condições climáticas locais, influenciadas pelas modificações das propriedades biofísicas,
6 como as observadas por Moon et al. (2020), que verificaram reduções na resistência da
7 superfície e aumentos na resistência aerodinâmica a medida que aumentava o índice de
8 vegetação da floresta estadual de Morgan-Monroe (EUA).

9 Outra propriedade biofísica que é alterada com a mudança na cobertura vegetal é o
10 albedo que se correlaciona diretamente com o aumento de temperatura e do déficit de pressão
11 de vapor à medida que a cobertura vegetal é reduzida (CUNHA et al., 2012). Os maiores valores
12 no índice de área foliar da floresta nativa que em média é 63,68% superior ao IAF do plantio
13 de açazeiro (CARSWELL et al., 2002), acarreta o que de acordo com Forzieri et al (2020), é
14 o aprimoramento do consumo de energia para o LE, que demonstra correlação positiva à medida
15 que se aumenta o IAF em uma unidade eleva-se em $3,66 \text{ W m}^{-2}$ a utilização da energia para a
16 evapotranspiração, enquanto que para o H a correlação com o IAF é negativa, onde o aumento
17 em uma unidade ocasiona redução de $3,26 \text{ W m}^{-2}$ para o aquecimento do ar.

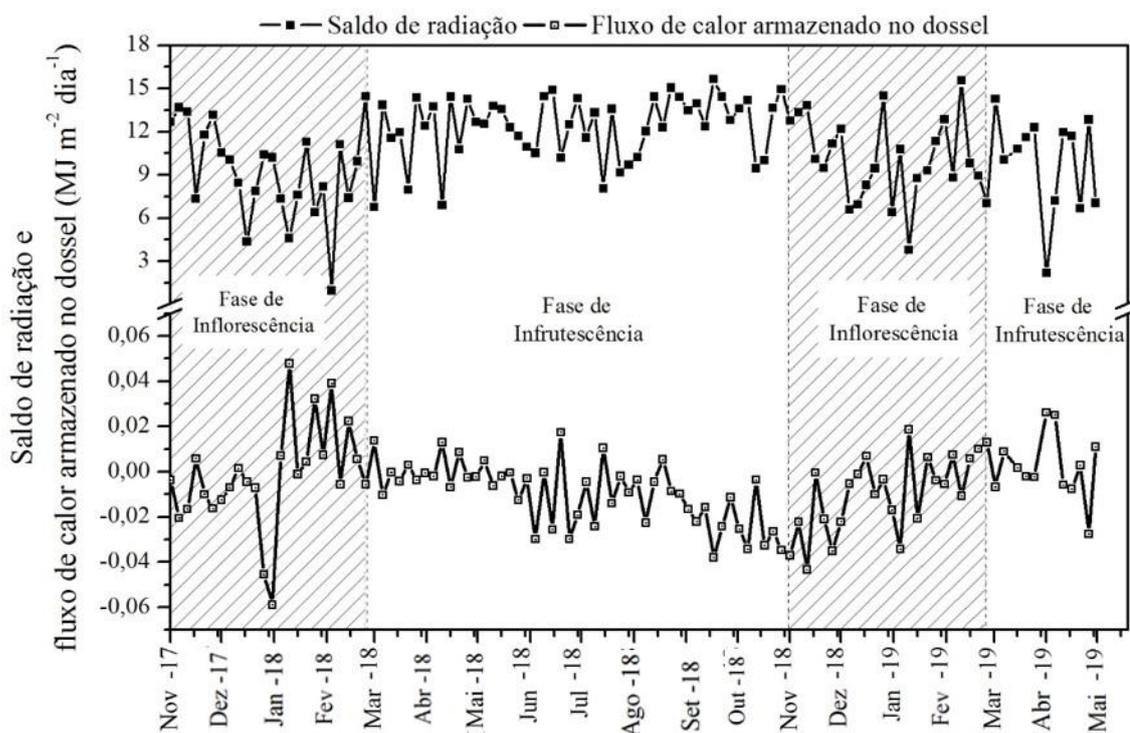
18 Ao transformar os valores de LE diurnos em lâmina de água, verifica-se que o consumo
19 total de água do açazeiro durante a primeira safra foi de 1130,20 mm, enquanto que na segunda
20 safra o consumo total foi de 999,49 mm. A diferença encontrada de 11,57% entre as safras
21 refletem a variabilidade da demanda atmosférica entre os anos que foi maior na primeira safra,
22 influenciada pela redução de 20,79% no total de chuvas e por fatores meteorológicos que
23 incrementam os valores de consumo hídrico como deficit de pressão de vapor e altas
24 temperaturas (ZHAO & LIU, 2018).

25 A partir dos valores particionados dos fluxos de energia em função dos diferentes
26 estádios fenológicos do açazeiro, observa-se a possibilidade de se criar estratégias sazonais
27 que visem a redução nos valores dos fluxos para o aquecimento do ar e do solo, principalmente
28 durante o periodo mais seco do ano, que é quando ocorre uma acentuada redução no conteúdo
29 volumétrico de água no solo, mesmo fazendo uso da irrigação (figura 3b) em função da lâmina
30 bruta utilizada subestimar a demanda hídrica real.

31 Neste sentido a quantificação e reposição exata da água utilizada pela cultura, faz com
32 que o fluxo de calor latente utilize a maior parte da energia disponível. Este suprimento hídrico
33 adequado atrelado a utilização de folhas senescidas e cachos secos do próprio açazeiro são

1 estratégias indispensáveis para evitar que a água disponível no solo fique abaixo do limite de
2 água facilmente disponível, fazendo com que a planta feche os estômatos, reduzindo a
3 transpiração e consequentemente a evapotranspiração, acarretando que a energia que antes
4 estava disponível para LE seja utilizada pelo H e/ou G.

5 A variabilidade diária do fluxo de calor armazenado pelo dossel (Sdv) (sensível +
6 latente) do açazeiro obtido entre os meses de setembro de 2017 e abril de 2019 é apresentado
7 na figura 6, onde verifica-se que quanto maior era o saldo de radiação menor era a quantidade
8 de calor armazenado pelo dossel, em função da perda do calor do dossel para a atmosfera, a
9 partir da grande quantidade de vapor de água armazenada em seu interior, acarretando na
10 elevada amplitude de $-0,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ nos valores de calor latente quando comparado ao calor
11 sensível que apresentou amplitude de $0,004 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, evidenciando variabilidade contrária
12 ao Rnet.



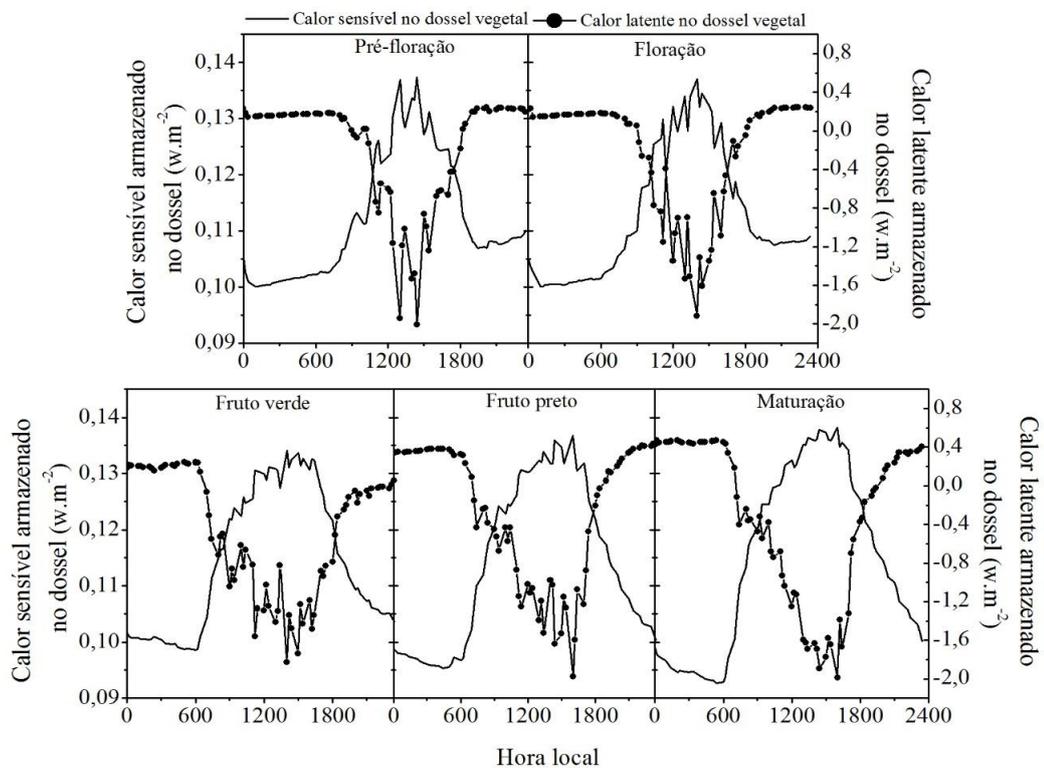
13
14 **Figura 6** – Densidade do fluxo diário de calor armazenado no dossel e do saldo de radiação em diferentes estádios
15 fenológicos do açazeiro irrigado em Capitão Poço – PA.

16 Durante a fase de inflorescência os valores de calor armazenado no dossel atingiram o
17 máximo e mínimo de $0,05$ e $-0,07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente, com média para o período de
18 $-0,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, já durante a infrutescência a média de calor foi de $-0,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com
19 máximo de $0,03 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e mínimo de $-0,08 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Os valores de fluxo de calor

1 armazenado pelo dossel demonstram-se relativamente baixos, representando uma pequena
2 porcentagem da energia disponível, correspondente a 0,016% do saldo de radiação.

3 Ao avaliar o fluxo de calor armazenado no dossel do açazeiro por estádios, verifica-se
4 que com exceção do estágio de floração que apresentou média positiva para o valor de fluxo de
5 calor, todos os demais estádios apresentaram média negativa. Observa-se que o valor médio
6 positivo do fluxo de calor no dossel durante o estágio de floração, está completamente
7 correlacionado ao período de maior precipitação (figura 3), que propicia baixa demanda
8 atmosférica elevando a quantidade de vapor de água presente na atmosfera ao ponto de ser
9 maior que a do interior do dossel, fazendo com que o dossel receba calor da atmosfera para
10 utilizar nos seus processos físico-químicos.

11 As variações horárias dos fluxos de calor latente e sensível armazenados no dossel do
12 açazeiro em diferentes estádios fenológicos estão presentes na figura 7, onde verifica-se que o
13 fluxo de calor sensível armazenado pelo açazeiro segue o mesmo padrão do saldo de radiação
14 (figura 5), que se apresenta com valores mínimos durante o período noturno e máximo após as
15 12h (Figura 7), diferente do fluxo de calor latente que apresenta o padrão contrário ao Rnet,
16 com valores máximos e mínimos durante o período diurno e noturno, respectivamente.



17
18 **Figura 7** – Densidade dos fluxos horários de calor latente e calor sensível armazenados no em diferentes estádios
19 fenológicos do açazeiro irrigado em Capitão Poço – PA.

1 Na fase de inflorescência, durante as primeiras horas do dia o fluxo de calor sensível
2 armazenado no dossel apresentou-se com pouca variação até às 8h20min no estágio de pré-
3 floração e até às 9h20min no estágio de floração, com média de $0,10 \text{ W m}^{-2}$ para ambos os
4 estádios (figura 7), a partir dos horários mencionados o H armazenado no dossel começou a
5 sofrer variações atingindo valor máximo de $0,14 \text{ W m}^{-2}$ às 14h40min (pré-floração) e 14h00min
6 (floração), onde em seguida começa a reduzir seus valores, chegando próximo de se tornar
7 constante em $0,11 \text{ W m}^{-2}$.

8 Nos estádios da fase de infrutescência, o H armazenado no dossel apresentou-se com os
9 mesmos padrões e valores da fase anterior, mas com pouca variação até as 7h00min para todos
10 os estádios (figura 7) e com valores máximos ocorrendo as 16h00min em torno dos $0,14 \text{ W m}^{-2}$
11 e posteriormente a isso ocorreu redução gradativa, porém não atingindo um valor de
12 constância como nos estádios de inflorescência.

13 O fluxo de calor latente armazenado no dossel durante os estádios de pré-floração e
14 floração apresentam valores máximos no período noturno de $0,23 \text{ W m}^{-2}$, enquanto que os
15 estádios da fase de infrutescência apresentaram valores de $0,25 \text{ W m}^{-2}$ no estágio de fruto verde,
16 $0,38 \text{ W m}^{-2}$ no estágio de fruto preto e $0,47 \text{ W m}^{-2}$ no estágio de maturação. Verifica-se aumento
17 gradativo do LE armazenado no dossel à medida que o açazeiro evolui fenologicamente, o que
18 pode ser explicado pelo aumento da demanda atmosférica ao longo do ano, haja visto que a fase
19 de inflorescência ocorre no período mais chuvoso do ano o que acarreta em elevada quantidade
20 de vapor de água na atmosfera, enquanto que a infrutescência ocorre no período menos chuvoso
21 que propicia menor quantidade de vapor na atmosfera, fazendo com que as trocas de calor nesse
22 período sejam superiores a fase de inflorescência.

23 Durante o período diurno verifica-se perda de calor armazenado no dossel para
24 atmosfera na forma de LE nos estádios de pré-floração e floração com média de $-0,76$ e $-0,82 \text{ W m}^{-2}$
25 m^{-2} , respectivamente, enquanto que no estágio de fruto verde a média foi de $-0,83 \text{ W m}^{-2}$, no
26 estágio de fruto preto foi de $-0,86 \text{ W m}^{-2}$ e no estágio de maturação a média ficou em $-0,91 \text{ W m}^{-2}$.
27 A fase de inflorescência acaba perdendo maior quantidade de calor armazenado no dossel
28 para a atmosfera quando comparado com a fase de infrutescência durante o período diurno em
29 detrimento da temperatura do ar ser mais amena e da umidade do ar ser elevada próximo da
30 saturação no interior do plantio.

31 Ao contrastar a variabilidade padrão do fluxo de calor no solo horário com o fluxo de
32 calor latente armazenado no dossel, verifica-se que com a ocorrência dos primeiros raios
33 solares, o solo se aquece primeiro e posteriormente o ar dentro do dossel começa a se aquecer,

1 em função disso os valores apresentam uma constância mais prolongada nas primeiras horas do
2 dia mesmo com o aumento da energia disponível para utilização nos processos físico-químicos
3 no interior dossel.

4

5 **3.4 CONCLUSÃO**

6 A partição da energia disponível apresentou variação máxima de 6% ao longo do ciclo
7 para a fração disponível de LE / Rnet, variando de 63% no estágio de maturação até um máximo
8 de 69% no estágio de floração, enquanto que a fração H/Rnet apresentou 3% de variação nos
9 mesmos estádios fenológicos com média de 29%.

10 A fração de energia destinada a aquecer o solo apresentou baixa variação, representando
11 em média 4% da energia ao longo do ciclo, demonstrando que o solo apresenta boa cobertura
12 evitando grandes variações no aquecimento do solo.

13 O efeito do calor armazenado no dossel do açazeiro irrigado no nordeste paraense é
14 irrelevante quando comparado com os outros componentes do balanço de energia por
15 representar apenas 0,16% da energia disponível.

16 Os resultados encontrados na partição dos fluxos de energia frente ao avanço dos açazais
17 para áreas de terra firme evidenciam alterações importantes, principalmente relacionadas ao
18 aumento de temperatura e redução da umidade do ar, fazendo-se necessários estudos que
19 monitorem no mesmo periodo esses dois ecossistemas.

20

21 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

22 ALBERTO, M. C. R.; WASSMANNA, R.; HIRANO, T.; MIYATAC, A.; HATANO, R.;
23 KUMAR, A.; PADRE, A.; AMANTE, M. Comparisons of energy balance and
24 evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural**
25 **Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1417–1430, 2011.
26 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.011>

27 ANGELINI, L. P.; SILVA, P. C. B. S.; FAUSTO, M. A. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M.
28 S. Balanço de Energia nas Condições de Mudanças de Uso do Solo na Região Sul do Estado de
29 Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 353-363, 2017.
30 <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230003>

- 1 BILLESBACH, D. P.; ARKEBAUER, T. J. First long-term, direct measurements of
2 evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and**
3 **Forest Meteorology**, v. 156, p. 104-110, 2012. [https://doi.org/10.1016/j.agrformet.](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001)
4 2012.01.001
- 5 BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; MOURA, M.
6 S. B. ; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta
7 no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**
8 **e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 393–399, 2008. [https://doi.org/10.1590/s1415-](https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400010)
9 43662008000400010
- 10 BROTZGE, J. A.; CRAWFORD, K. C. Examination of the Surface Energy Budget: A
11 Comparison of Eddy Correlation and Bowen Ratio Measurement Systems. **J. Hydrometeorol.**,
12 v. 4, p. 160–178, 2003. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)4<160:EOTSEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)4<160:EOTSEB>2.0.CO;2)
- 13 CARSWELL, F. E.; COSTA, A. C. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIER, P.; COSTA, J.
14 P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENTE, R. J.; GRACE, J.
15 Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian Rain Forest. **Journal of**
16 **Geophysical Research – Atmospheres**, v. 107, p. 1-16, 2002.
17 <https://doi.org/10.1029/2000JD000284>
- 18 CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P. A.;
19 DOURADO NETO, D.; LIER, Q. de J. van; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e
20 aspectos fisiológicos na cultura de soja - uma revisão. **Rev. da FZVA**. Uruguaiana, v.14, n.2,
21 p. 102-120. Ano 2007.
- 22 CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de
23 cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira**
24 **de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 139–152, 2012. [https://doi.org/doi:10.1590/ s0102-](https://doi.org/doi:10.1590/s0102-77862013000200003)
25 77862013000200003
- 26 DEMOTES-MAINARD, S.; PÉRON, T.; COROT, A.; BERTHELOOT, J.; GOURRIEREC,
27 J.L. et al. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. **Environmental**
28 **and Experimental Botany**, v. 121, p. 4-21, 2016.
29 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>

- 1 FORZIERI, G; MIRALLES, D. G.; CIAIS, P.; ALKAMA, R.; RYU, Y.; et al. Increased control
2 of vegetation on global terrestrial energy fluxes. **Nat. Clim. Chang.**, v. 10, p. 356-362, 2020.
3 <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0717-0>
- 4 GARCIA. V. A.; BARBEDO, C. J. Estudo fenológico de *Bactris gasipaes* Kunth, *Euterpe*
5 *edulis* Mart. e *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman no Vale do Ribeira, SP, Brasil.
6 **Hoehnea**, v. 43, p. 135-149, 2016. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2015>
- 7 GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for
8 measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p.
9 127-140, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0040-1>
- 10 GEBLER, S.; HENDRICKS FRANSSEN, H. J.; PÜTZ, T.; POST, H.; SCHMIDT, M.;
11 VEREECKEN, H. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: A
12 comparison with eddy covariance and tipping bucket. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 19, p. 2145–
13 2161, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2145-2015>
- 14 GONG, J.; SHURPALI, N. J.; KELLOMÄKI, S.; WANG, K.; ZHANG, C.; SALAM, M. M.
15 A.; MARTIKAINEN, P. J.; IMUKOVA, K.; INGWERSEN, J.; HEVART, M.; et al.
16 Comparing different methods for determining forest evapotranspiration and its components at
17 multiple temporal scales. **Agric. For. Meteorol.**, v. 13, p. 595–605, 2016.
18 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.082>
- 19 GRAY, S. B.; BRADY, S. M. Plant developmental responses to climate change.
20 **Developmental Biology**, v. 419, p. 64–77, 2016. [http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.](http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023)
21 [07.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023)
- 22 HEILMAN, J. L.; MCINNES, K. J.; SAVAGE, M. J.; GESH, R. W.; LASCANO, R. J. Soil
23 and canopy energy balance in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**,
24 Amsterdam, v. 71, p. 99-114, 1994. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90102-3)
- 25 HOMMA, A. K. O.; NOGUEIRA, O. L.; MENEZES, A. J. E. A. Açáí: novos desafios e
26 tendências. **Amazônia: Ciência e desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 7 - 23, 2006.
- 27 IRMAK, S.; KILIC, A.; CHATTERJEE, S. On the Equality Assumption of Latent and Sensible
28 Heat Energy Transfer Coefficients of the Bowen Ratio Theory for Evapotranspiration

- 1 Estimations: Another Look at the Potential Causes of Inequalities. **Climate**, v. 2, p. 181–205.
2 2014. <https://doi.org/10.3390/cli2030181>
- 3 KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, H.; HIPPS, L. E.
4 Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**,
5 v. 103, n. 3, p. 249-264, 2000. doi:10.1016/s0168-1923(00)00131-3
- 6 LÓPEZ-OLIVARI, R.; ORTEGA-FARÍAS, S; POBLETE-ECHEVERRÍA, C. Partitioning of
7 net radiation and evapotranspiration over a superintensive drip-irrigated olive orchard.
8 **Irrigation Science**, v. 34, p. 17-31, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-015-0484-2>.
- 9 MCCAUGHEY, J. H. Energy balance storage terms in a nature mixed forest at Petawawa,
10 Ontario – a case study. **Boundary Layer Meteorological**, v.31, n.1, p.89-101, 1985.
11 <https://doi.org/10.1007/BF00120036>
- 12 MOON, M.; LI, D.; LIAO, W.; RIGDEN, A. J.; FRIEDL, M. A. Modification of surface energy
13 balance during springtime: The relative importance of biophysical and meteorological changes.
14 **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, 2020.
15 <https://doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2020.107905>
- 16 NIAGHI, A. R.; JIA, X. New Approach to Improve the Soil Water Balance Method for
17 Evapotranspiration Estimation. **Water**, v. 11, n. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11122478>
- 18 NOGUEIRA, A. K. M.; SANTANA, A. C.; GARCIA, W. S. A dinâmica do mercado de açaí
19 fruto no Estado do Pará: de 1994 a 2009. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 60, n.3, p. 324-331, 2013.
20 <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2013000300004>
- 21 OLIVEIRA, F. J.; FARIAS, P. R.; SILVA, A. G.; RODRIGUES, K. C. Distribuição espacial
22 da leprose dos citros na Amazônia Oriental. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 56-68,
23 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160007>
- 24 ORTEGA-FARIAS, S. O.; OLIOSO, A.; ANTONIOLETTI, R.; BRISSON, N. Evaluation of
25 the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, v.
26 23, p. 1-9, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0087-1>

1 PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of
2 Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**,
3 Amsterdam, v. 97, n. 3, p. 141-50, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5)

4 RANA, G; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field
5 under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Kidlington, v.13,
6 p.125- 153, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)

7 ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological**
8 **environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.

9 SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e
10 evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. **Pesquisa**
11 **Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 488-496, 2010. [https://doi.org/10.1590/S0100-](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500008)
12 [204X2010000500008](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500008).

13 SILVA, F. M. Evapotranspiração de uma floresta de terra firme no oeste da Amazônia.
14 **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural da Amazônia, 82
15 f. 2014.

16 SILVA, L. D. B.; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F.; NASCENTES, A. L.;
17 ALMEIDA, G. V.; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia - razão
18 de bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p.
19 516-529, 2016. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n3p516-529>

20 SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; BOTELHO, M. D. N.; SOUSA, A. M.
21 L.; SOUZA, E. B.; FARIAS, J. R. B. Impacts of soyabean expansion on the Amazon energy
22 balance: a case study. **Experimental Agriculture**, v. 47, p. 553–567, 2011.
23 <https://doi.org/doi:10.1017/s0014479711000391>

24 SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A. Impactos do avanço da soja no balanço
25 de radiação no leste da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 43 n. 2, p. 169-178, 2012.
26 <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000200006>.

27 SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E. B. Diurnal Energy
28 Balance in a Mango Orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de**
29 **Meteorologia**, v. 33, p. 537-546, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333012>

- 1 TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M. Five methods to interpret field
2 measurements of energy fluxes over a micro-splinkerirrigated mango orchard. **Irrigation**
3 **Science**, v.30, p.13-28, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>
- 4 TIE, Q.; HU, H.; TIAN, F.; HOLBROOK, N. M. Comparing different methods for determining
5 forest evapotranspiration and its components at multiple temporal scales. **Science of The Total**
6 **Environment**, v. 633, p. 12–29, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.082>
- 7 VANOMARK, G. M. M. S.; SOBRINHO, J. E.; BEZERRA, J. R. C.; SANTOS, C. A. C.;
8 AZEVEDO, P. V.; SILVA, S. T. A.; BEZERRA, B. G. Energy balance partitioning and
9 evapotranspiration from irrigated Muskmelon under Semi-Arid Conditions. **Bragantia**,
10 Campinas, v. 77, n. 1, p. 168-180, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016453>
- 11 WANG, X.; HUO, Z.; SHUKLA, M. K.; WANG, X.; GUO, P.; XU, X.; HUANG, G. Energy
12 fluxes and evapotranspiration over irrigated maize field in an arid area with shallow
13 groundwater. **Agricultural Water Management**, v. 228, 2019.
14 <https://doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2019.105922>
- 15 WEBLER, A. D.; GOMES, J. B.; AGUIAR, R. G.; ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR L. J. G.
16 Mudanças no uso da terra e o particionamento de energia no sudoeste da Amazônia. **Revista**
17 **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, p. 868–876, 2013.
18 <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000800011>.
- 19 YOKOMIZO, G. K.; QUEIROZ, J. A. L.; CAVALCANTE, E. S.; PINHEIRO, I. N.; SILVA,
20 P. A. R.; MOCHIUTTI, S. Caracterização Fenotípica e Genotípica de Progenies de *Euterge*
21 *oleracea* coletados no Afuá-Pará nas condições do Amapá. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 205–213,
22 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000200004>
- 23 ZHAO, X.; LIU, Y. Variability of surface heat fluxes and its driving forces at different time
24 scales over a large ephemeral lake in China. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 123, n. 10, p. 4939–
25 4957, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JD027437>.

4. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DO AÇAIZEIRO NA AMAZÔNIA ORIENTAL (BRASIL) USANDO O SISTEMA DE RAZÃO BOWEN

RESUMO

O açaizeiro é uma frutífera de origem amazônica encontrada em áreas alagadas, que nos últimos anos tem ganhado expressiva força no mercado nacional e internacional devido seu potencial agrônomo, nutricional e econômico. Entretanto o seu cultivo em escala comercial em áreas de terra firme ainda é baseado no empirismo, devido à escassez de informações técnico-científicas para a cultura durante sua fase reprodutiva, onde se destaca, por exemplo, a ausência de pesquisas sobre o consumo hídrico. Portanto o objetivo do trabalho foi determinar o consumo hídrico do açaizeiro (evapotranspiração - ET_c), coeficientes de cultivo simples (K_c) e dual ($K_{cb} + K_e$) na Amazônia Oriental, Brasil, usando o sistema de razão de Bowen. Para tal, uma torre micrometeorológica foi instalada e instrumentada no centro da uma área experimental para o monitoramento de variáveis meteorológicas. O monitoramento do desenvolvimento fenológico do açaizeiro foi realizado durante duas safras. Os valores de K_e e K_{cb} foram determinados pela razão entre evapotranspiração de referência (ET_o), evaporação da superfície do solo e da transpiração, respectivamente. A ET_c foi obtida pelo método de razão de Bowen e a ET_o pelo método de Penman-Monteith utilizando-se os dados coletados numa estação automática localizada próxima à área experimental. O consumo hídrico total do açaizeiro foi em média de 1164,86 mm, sendo a média diária para o ciclo de 3,49 mm dia⁻¹. Os valores médios do K_c , K_e e K_{cb} do açaizeiro foram, respectivamente, de 1,08; 0,21 e 0,84, respectivamente. Os resultados da pesquisa mostram a importância do correto manejo da irrigação no açaizeiro, para reduzir as perdas de água por evaporação, aumentando o uso eficiente da água pela cultura.

Palavra-chave: *Euterpe Oleracea*, razão de Bowen, consumo hídrico.

1 **ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION AND SINGLE AND DUAL CROP**
2 **COEFFICIENTS OF ACAI PALM IN THE EASTERN AMAZON (BRAZIL) USING**
3 **THE BOWEN RATIO SYSTEM**

4
5 **ABSTRACT**

6 The acai palm (*Euterpe oleracea* Mart.) is a fruit from the Amazon that is originally found in
7 flooded areas. Over recent years, its marketability has gained significant strength in Brazil and
8 abroad because of its agronomic, nutritional and economic potential. However, there is a lack
9 of technical-scientific information about crop water requirements for irrigation management
10 during the reproductive phase of acai palm. Therefore, the aim of this research was to estimate
11 the water requirements (crop evapotranspiration - ET_c), single (K_c) and dual ($K_{cb} + K_e$) crop
12 coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. A
13 micrometeorological tower was installed in the center of an experimental area to monitor ET_c
14 and meteorological variables. Phenological development was monitored during two growing
15 seasons. K_e and K_{cb} values were calculated by the ratio of soil surface evaporation and
16 transpiration to reference evapotranspiration (ET_o), respectively. ET_c values were determined
17 by the Bowen ratio method while those of ET_o , by the Penman-Monteith model, using data
18 collected from an automatic weather station located near the experimental area. Total water
19 requirements of the acai palms were 1164.86 mm, with a daily average of 3.49 mm day^{-1} for
20 the growing season. The average values of K_c , K_e and K_{cb} for the acai palm were 1.08; 0.21
21 and 0.84, respectively. The results of this research show the importance of appropriate irrigation
22 management for the acai palm to reduce evaporative water losses, thereby increasing the
23 efficient use of water by the crop.

24 **Keywords:** *Euterpe Oleracea*, Bowen Ratio, Water Consumption.

1 4.1 INTRODUÇÃO

2 O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira encontrada ao longo do estuário
3 amazônico, principalmente nos estados do Pará, Amapá e Maranhão (Nogueira et al. 2013) que
4 apresenta grande importância socioeconômica para as famílias destas regiões em função de
5 representar a principal fonte de alimento que é consumido diariamente, como também de renda
6 através da comercialização do fruto (Nygren et al. 2006).

7 Nos últimos anos a comercialização do açaí se expandiu para o mercado nacional e
8 internacional, passando a ser vendido em diversos estabelecimentos, com o intuito de atender
9 novos mercados que envolvem consumidores de maior poder aquisitivo (Santana et al. 2007).
10 Em função do aumento na comercialização do fruto, o sistema de produção extrativista do açaí
11 não conseguiu suprir as demandas de mercado e por isso começou a ser cultivado em áreas de
12 terra firme (Conforto e Contin 2009).

13 Entretanto, por ser uma palmeira e ter sua ocorrência natural em área de várzea, o
14 açazeiro é muito exigente em água e de acordo com Souza e Jardim (2007) a disponibilidade
15 de água no solo é fator importante que favorece a sobrevivência do açazeiro. Dessa forma, os
16 produtores tem utilizado a tecnologia da irrigação para fazer o suprimento hídrico,
17 principalmente nos locais onde o período de estiagem é prolongado (Souza et al. 2013), sendo,
18 porém, adotado uma lâmina de irrigação empírica sem qualquer informação técnica sobre sua
19 eficiência.

20 O manejo da irrigação deve ser feito pelos produtores para que haja um suprimento
21 hídrico adequado que vise a produção agrícola de alto nível, fazendo-se necessário conhecer a
22 demanda hídrica da cultura (evapotranspiração - ET), em seus diferentes estádios de
23 desenvolvimento (Souza et al. 2013). O uso racional da água para fins de irrigação, bem como
24 o correto dimensionamento dos sistemas de irrigação e o gerenciamento da água dependem,
25 entre outros requisitos, do conhecimento da demanda precisa de água das culturas (Canales-Ide
26 et al. 2019).

27 A evapotranspiração da cultura - ET_c é uma importante variável usada para calcular e
28 monitorar o consumo hídrico em diferentes períodos, e que pode ser mensurada por diversas
29 técnicas, como pela lisimetria (Peters et al. 2017; Xu et al. 2018; Silber et al. 2019), por eddy
30 covariance (Ortega-Farias et al. 2010; Prueger et al. 2018), pelo balanço da água do solo
31 (Abdelkhalik et al. 2019; Domínguez-Niño et al. 2020) e pelo balanço de energia pelo método
32 da razão de Bowen (Souza et al. 2016; Chebbi et al. 2018).

1 O método micrometeorológico do balanço de energia baseado na razão de Bowen
2 (BERB) é relativamente prático e confiável e tem sido amplamente utilizado para a
3 determinação da ETc (Silva et al. 2007, Dicken et al. 2013, Fun et al. 2015, Wijewardana et al.
4 2019), apresentando diversas vantagens (Nizinski et al. 2014) em relação aos métodos de
5 medida direta (lisímetro e eddy covariance), como a possibilidade de ser empregado com
6 elevado grau de mobilidade, proporcionando medidas simples e contínuas sobre extensas áreas
7 sem que haja alteração da superfície, fornece medidas em pequeno espaço de tempo, exige
8 poucos parâmetros de entrada, além de ser menos oneroso (Hu et al. 2013).

9 Billesbach e Arkebauer. (2012) ao compararem os fluxos de calor sensível e latente
10 determinados a partir BERB com os obtidos pelo método de eddy covariance, verificaram
11 valores muito próximos entre os métodos, o que demonstra a acurácia e confiabilidade do
12 BERB (Gavilán e Berengena 2007), principalmente em períodos curtos, que de acordo com
13 Dicken et al. (2013) os desvios de leituras dos instrumentos são mínimos. O BERB apresenta
14 como desvantagem a exigência de leituras contínuas dos elementos climáticos essenciais na
15 determinação da evapotranspiração (Silva et al. 2016) e limitações próximo do nascer e pôr do
16 sol, devido à baixa variabilidade nos gradientes de temperatura e umidade do ar (Souza et al.
17 2018).

18 Esse método já foi utilizado em alguns estudos para culturas perenes como nos trabalhos
19 de Teixeira e Bastiaanssen (2012) para cultura da manga em Petrolina-PE, de Consoli e Papa
20 (2013) para um pomar de laranja em Sicília na Itália e de Souza et al. (2016) para um pomar de
21 manga na região nordeste do Pará, cujos resultados da aplicação do método apresentaram-se
22 satisfatórios para todos os estudos.

23 Em alguns estudos a ETc obtida através do balanço de energia tem sido utilizada para
24 definir a curva do coeficiente da cultura (Kc) (Euser et al. 2014; Consoli et al.2018, Niaghi et
25 al. 2019). A grande utilização deste método é atribuída a sua praticidade e precisão (Silva et al.
26 2007; Guo e Sun 2011), pois são requeridas apenas medições dos gradientes de temperatura e
27 umidade do ar, saldo de radiação e fluxo de calor no solo para estimar a evapotranspiração real
28 (Hou et al. 2010).

29 Allen et al. (1998) seguindo outros consideram que o Kc deve ser dividido em outros
30 dois coeficientes devido apresentar contribuições independentes da evaporação do solo e da
31 transpiração das plantas, os quais são o coeficiente de evaporação do solo (Ke) e o coeficiente
32 de transpiração basal da cultura (Kcb). Essa abordagem fornece uma análise do consumo

1 hídrico de uma forma desacoplada, fornecendo ao produtor informações sobre a real
2 necessidade da planta.

3 Pesquisas sobre a evapotranspiração de espécies perenes como fruteiras vem sendo
4 desenvolvidas desde a década de 50 (Pereira 1957, Rogers et al. 1983, Rao 1989) e mais
5 recentemente como os trabalhos de Hou et al. (2010) para a oliveira, Silva et al. (2011) para o
6 coqueiro e Meijide et al. (2017) para a palma de óleo, assim como as pesquisas para
7 determinação do Ke e do Kcb realizadas por Girona et al. (2011) na Espanha para a maçã, a de
8 Paço et al. (2011) em Portugal para pêsego, a de Abrisqueta et al. (2013) na Espanha para o
9 pessegueiro e a de Taylor et al. (2015) para o citros na África do Sul. Entretanto, para espécies
10 de origem amazônica como o açazeiro, os estudos sobre a demanda hídrica ao longo do seu
11 ciclo reprodutivo ainda são inexistentes, em função da dificuldade de implantação de unidades
12 experimentais e da carência de instrumentos agrometeorológicos.

13 Portanto, levando em consideração a falta de informações técnicas e científicas,
14 juntamente com a necessidade de ferramentas de tomada de decisão para criar estratégias de
15 manejo da irrigação, o objetivo deste trabalho é estimar ETc, coeficientes de cultura simples
16 (Kc) e dual (Ke e Kcb) usando o sistema de razão Bowen durante a fase reprodutiva do açazeiro
17 irrigado na Amazônia Oriental, Brasil.

18 **4.2 MATERIAL E MÉTODOS**

19 4.2.1 Descrição da área

20 O experimento foi realizado na região Nordeste do estado do Pará, durante duas safras
21 do açazeiro 2017/2018 e 2018/2019 entre novembro e outubro. A área experimental ficou
22 localizada nas dependências de uma fazenda de 100 ha (Fazenda Ornela) no município de
23 Capitão Poço, nordeste Paraense, cujas coordenadas geográficas são 01°43'44,4"S latitude,
24 47°06'39,3"W longitude e altitude de 71 m.

25 Na tabela 1 são apresentadas as propriedades físico-químicas do solo da área
26 experimental, o qual foi classificado como latossolo amarelo distrófico, com textura franco-
27 arenosa, com 14% de argila na camada de 0-20 cm, e de textura franco-argilo-arenosa na
28 camada de 20-40, com 28% de argila. O clima local é caracterizado como Am, clima tropical,
29 apresentando moderada estação seca com precipitação pluvial média anual de 2500 a 3000 mm,
30 onde o trimestre mais seco do ano ocorre entre setembro e novembro (Oliveira et al. 2016).

1 **Tabela 1** - Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental.

Profundidade (cm)	pH (H ₂ O)	P	K ⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Al ³⁺
		mg·dm ⁻³			cmol _c ·dm ⁻³	
0-20	4.07	45	65	0.90	1.30	0.20
20-40	4.82	51	10	0.50	0.90	0.50
Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Ds ¹	CC ²	PMP ³
	(kg·kg ⁻¹)			(g·cm ⁻³)	(m ³ ·m ⁻³)	
0-20	792	68	140	1.43	0.37	0.23
20-40	633	87	280	1.68	0.32	0.21

2 ¹Densidade do solo, ²Capacidade de campo, ³Ponto de murcha permanente.

3 O plantio comercial de açazeiro utilizado no experimento, tinha 8 anos de implantação
 4 com estipes do ecótipo “chumbinho” de 12 metros de altura em espaçamento de 6,0 x 4,0 m,
 5 com o manejo de três estipes/plantas por touceira, cultivado em terra firme com irrigação diária
 6 durante o quadrimestre mais seco do ano por meio de um sistema de microaspersão, que
 7 aplicava diariamente uma lâmina empírica bruta de 3,28 mm.

8 4.2.2 Medições de plantas

9 O desenvolvimento fenológico reprodutivo do açazeiro foi analisado adaptando a
 10 escala proposta por Garcia e Barbedo (2016), que apresenta quatro fenofases reprodutivas que
 11 são: pré-floração, floração, frutos verdes e frutos pretos, acrescentando a fenofase de maturação
 12 que é descrita por Homma et al. (2005). A determinação dos estádios fenológicos reprodutivos
 13 foi estabelecida de acordo com a ocorrência predominante de determinado estádio em relação
 14 ao total da população, monitorando-se de forma aleatória 300 plantas dentro do hectare de
 15 controle.

16 Avaliou-se a sincronia fenológica de acordo com o índice de atividade - IA (equação 1),
 17 que indica a porcentagem de indivíduos da população observada que manifestou determinado
 18 evento fenológico, sendo classificado como não sincrônico ou assincrônico quando IA < 20%,
 19 pouco sincrônico ou sincronia baixa quando IA entre 20-60% e sincronia alta quando IA < 60%
 20 (Bencke e Morellato 2002).

$$21 \quad IA = \frac{NIF}{NTI} \times 100 \quad \text{Eq.1}$$

22 Em que: NIF é o número de indivíduos em determinado estádio fenológico e NTI o número
 23 total de indivíduos observados.

24 Para determinação do índice de área foliar (IAF) do açazeiro foram coletadas todas as
 25 folhas de 24 plantas da área experimental, as quais foram levadas ao laboratório de sementes
 26 da Universidade Federal Rural da Amazônia para a determinação da área foliar (AF) de cada

1 planta com auxílio de um integrador de área foliar (AF) da marca LI-COR® (modelo LI 3100).
2 Posteriormente, o IAF foi determinado considerando a razão entre a área foliar do dossel e a
3 área de solo disponível para a planta, de acordo com o espaçamento do plantio.

4 A avaliação de produtividade comercializável do açaí (Y) foi realizada durante as duas
5 safras, onde eram colhidos e pesados diariamente todos os cachos com frutos maduros, e ao
6 final de cada safra determinou-se a produtividade em kg ha⁻¹, em função da razão entre a
7 quantidade de frutos colhidos (kg) e a área útil do experimento (ha).

8 A produtividade da água da cultura - PAC (kg m⁻³), que é definida como o rendimento
9 comercializável por unidade de evapotranspiração da cultura, foi determinada de acordo com
10 Zwart e Bastiaanssen (2004) usando a equação 2:

$$11 \quad PAC = \frac{Y}{ET_c} \quad \text{Eq.2}$$

12 Em que ET_c é o consumo de água por evapotranspiração da cultura (m³ ha⁻¹). Ao considerar
13 essa relação do ponto de vista físico, apenas a transpiração foi levada em consideração.

14 4.2.3 Medições das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração da cultura

15 No centro do local experimental (10 ha), localizado dentro da fazenda comercial, foi
16 instalada uma torre metálica de 16 m de altura e nela foram acopladas três estações
17 meteorológicas automáticas distribuídas ao longo do dossel (duas CR1000, Campbell Scientific
18 Instrument, Logan, UT, USA; e uma U30, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA). A
19 tabela 2 mostra os sensores instalados nas três estações meteorológicas automáticas utilizadas
20 no experimento, bem como sua disposição em relação ao solo ou ao dossel.

1 **Tabela 2** – Variáveis e instrumentos utilizados no experimento, assim como, a disposição dos mesmos em
 2 relação ao solo e o dossel vegetal.

Variáveis meteorológicas	Instrumento, fabricante, modelo	Nível dos sensores (m)
Temperatura do ar	Thermo-hygrometer (CMP6-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 e 8,0 acima do solo
Radiação global incidente	Pyranometer (CMP6-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Saldo de radiação	Net radiometer (NR-LITE2-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Velocidade e direção do vento	Wind monitor (05106-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Chuva	Rain gauge (TB4-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,5 acima do dossel
Temperatura do ar	Thermo-hygrometer (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Umidade relativa do ar	Thermo-hygrometer (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Temperatura do solo	Thermometer (108, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,02 e 0,06 de profundidade
Umidade do solo	Time Domain Reflectometer (CS615, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,3 de profundidade
Fluxo de calor no solo	Soil Heat Flux Plate (HFP01SC-L, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,08 de profundidade

3
 4 Os sensores da estação da Campbell Scientific foram conectados a um datalogger
 5 CR1000 e a um multiplexador AM416 e os sensores da estação Onset computer corporation
 6 foram conectados a um datalogger modelo U30, com programação de leitura a cada dez
 7 segundos, e médias totais a cada 20 minutos. A localização da torre obedeceu às exigências
 8 mínimas de bordadura da área, apresentando “fetch” disponível (superior a razão 1:100), a fim
 9 de que as medidas obtidas fossem representativas da área experimental sem a influência de
 10 energia advectiva (Rana e Katerji 2000).

11 A evapotranspiração do açaí (ET_c) foi obtida usando apenas valores positivos do fluxo
 12 de calor latente (LE) de um sistema de razão de Bowen. Neste caso, valores de LE obtidos entre
 13 as 6:00 e as 18:00 h, foram utilizados neste estudo quando o dia de energia disponível (R_n-G)
 14 era maior que zero (Perez et al. 1999). Os valores diários de ET_c foram estimados da seguinte
 15 forma:

$$16 \quad ET_c = \sum_{i=1}^{n=36} \frac{LE_i}{\lambda} \quad \text{Eq.3}$$

17 em que ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹), LE_i é o fluxo de calor latente em
 18 intervalos de 20 minutos (W m⁻²) e λ é o calor latente em vaporização (J kg⁻¹).

19
 20 Os valores de LE_i foram determinados pela lei de conservação de energia para uma
 21 superfície vegetada com base na razão de Bowen, usando a seguinte expressão

$$1 \quad Rn = LE + H + G + Sdv + F \quad \text{Eq.4}$$

2 em que Rnet é o saldo de radiação, LE e H são os fluxos verticais de calor latente e sensível,
 3 respectivamente; G o fluxo de calor no solo, Sdv a energia armazenada no sistema solo dossel
 4 vegetativo e F é a energia utilizada no processo fotossintético. O componente F não foi
 5 considerado por representar menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al. 1994).

6 O componente G foi estimado a partir de duas placas de fluxo de calor no solo instaladas
 7 horizontalmente a 0,08 m de profundidade em ambos os lados da linha de plantio (uma abaixo
 8 da linha de plantio e a outra entre as linhas de plantio), de onde se obteve a energia media
 9 transportada para o solo.

10 O calor armazenado na camada de solo acima dos fluxímetros foi obtido conforme
 11 (Kustas et al., 2000), utilizando dois termopares (TEMP108, Campbell Scientific Instrument,
 12 Logan, UT, USA) instalados acima do fluxímetro a uma profundidade de 0,02 e 0,06 m abaixo
 13 de superfície do solo (Table 2).

$$14 \quad G = G_8 + \frac{\Delta T_s C_s z_r}{t} \quad \text{Eq.5}$$

15 Em que G_8 é a medição de fluxo de calor no solo pelo fluxímetro, ΔT_s é a diferença média da
 16 temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) durante o período de medição, z_r é a profundidade do fluxímetro, t é
 17 o intervalo da medição em minutos e C_s é a capacidade calorífica volumétrica do solo, obtida
 18 pela expressão:

$$19 \quad C_s = \rho_s (C_{sd} + C_{sw} \theta_v) \quad \text{Eq.6}$$

20 Em que ρ_s é a densidade do solo (g cm^{-3}); C_{sd} é o calor específico do solo seco ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); C_{sw}
 21 é o calor específico da água no solo ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) e θ_v é a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

22 A partir da energia disponível ($R_{net}-G$) o fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível
 23 puderam ser obtidos, em função de diferenças na temperatura do ar e na pressão de vapor, em
 24 dois níveis (0,5 e 2,0 metros acima do dossel).

$$25 \quad \beta = \frac{H}{LE} = \frac{-k_h \frac{d(\rho_a c_p T)}{dz}}{-k_v \frac{d(\rho_a \lambda q)}{dz}} \quad \text{Eq.7}$$

26 Em que K_h e K_v são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água,
 27 respectivamente, c_p é o calor específico do ar úmido, ρ_a é a densidade do ar, T e q são as
 28 diferenças de temperatura e umidade do ar específica, em respectivo, e γ é o fator psicrométrico
 29 ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

1 Considerando-se a igualdade entre K_h e K_v (Gavilan e Berengena, 2007) e
 2 $(dT/dz)/(de/dz) \approx \Delta T/\Delta e$; a equação 7 pode ser simplificada para:

$$3 \quad \beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Eq.8}$$

4 Sendo $\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$ e $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$ as diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor
 5 d'água na camada de ar acima da copa do açazeiro, respectivamente.

6 Com base na razão de Bowen, obteve-se o fluxo de calor latente segundo a expressão 9:

$$7 \quad LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad \text{Eq.9}$$

8 4.2.4 Critério para rejeição de dados inadequados do método de razão de Bowen

9 Para rejeitar valores inconsistentes, adotou-se os critérios descritos por Perez et al.
 10 (1999). Nesse procedimento, os dados fornecidos pelo método da razão de Bowen foram
 11 corretos quando atenderam aos critérios conforme a tabela 3, enquanto que para análise e a
 12 exclusão de valores de β inconsistentes, utilizou-se as condições da tabela 4.

13 **Tabela 3** - Condições satisfatórias em que os dados gerados pelo método da razão de Bowen, são considerados
 14 consistentes, sob condições não advectiva.

Energia disponível	Gradiente de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor
$R_{net} - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H > 0$
$R_{net} - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

15 Fonte: Perez et al. (1999)

16
 17 A estimativa de LE e do H fornecida pelo método razão de Bowen deve ser consistente
 18 com a relação fluxo-gradiente entre os componentes e de quais valores de β próximos de -1
 19 podem ser rejeitados, de acordo com a precisão considerada para as medições que no presente
 20 estudo foi de 0,2 °C para a temperatura do ar e de 2% para a umidade relativa do ar (Souza et
 21 al. 2016). Tais valores foram utilizados para a obtenção do erro – ϵ (equação 10), a fim de se
 22 determinar o intervalo próximo de -1 a ser excluído.

$$\varepsilon = \frac{(\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T)}{\Delta e} \quad \text{Eq.10}$$

Tabela 4 – Tipos de erros (equação 10) em que o método da razão de Bowen é considerado inconsistente

Tipo de erro	Condição
A	Rn - G > 0, Δe > 0 e β < -1 + ε
B	Rn - G > 0, Δe < 0 e β > -1 - ε
C	Rn - G < 0, Δe > 0 e β > -1 - ε
D	Rn - G < 0, Δe < 0 e β < -1 - ε
E	Mudança rápida de temperatura e pressão de vapor

Fonte: Perez et al. (1999).

Após o controle de qualidade, realizou-se o preenchimento de falhas dos dados de fluxos de energia, de acordo com a correlação entre (H + LE) com a energia disponível (Rn + G) para cada estágio (Teixeira e Bastiaanssen 2012), utilizando os dados dos coeficientes de correlação obtidos em cada estágio (tabela 5).

Tabela 5 - Coeficiente da análise de regressão da correlação entre H + LE (coordenada Y) e Rnet + G (coordenada X), ambos em W.m⁻², durante os diferentes estádios reprodutivos do açaizeiro, Capitão Poço - PA, Brasil.

Estádio fenológicos	Coeficientes lineares		
	a	b	R ²
Pré-Floração	4.1712	0.9677	0.9985
Floração	5.4304	0.9561	0.9976
Fruto verde	11.108	0.9163	0.9957
Fruto preto	17.971	0.8961	0.9951
Maturação	20.161	0.8819	0.9944

4.2.5 Estimativa da evapotranspiração de referência e dos coeficientes simples, dual e de evaporação

Posteriormente à determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c), obteve-se o coeficiente da cultura simples (K_c), por meio da razão entre a ET_c e a ET_o, conforme equação 11:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad \text{Eq.11}$$

1 A evapotranspiração de referência (ET_o) foi obtida de acordo com o método de Penman-
2 Monteith-FAO 56 do seguinte modo (Allen et al. 1998):

$$3 \quad ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{ar} + 273} \right) u_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Eq.12}$$

4 Em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);
5 G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T_{ar} é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a
6 velocidade do vento (m s^{-1}); es é a pressão de saturação do vapor (kPa); ea é a pressão de vapor
7 de ar (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor vs. temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e o γ é o
8 coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). Os dados climáticos utilizados para estimar o ET_o foram
9 obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET),
10 localizada a 7 km do local experimental.

11 A determinação da evaporação média diária do solo foi realizada utilizando 25
12 microlisímetros de pesagem (ML), distribuídos aleatoriamente na área experimental, conforme
13 proposto por Flumignan et al. (2012). Os microlisímetros foram constituídos de tubos de PVC
14 com 100 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, telados na parte inferior com uma tela de
15 2 micrometros para que se evitasse a perda de solo. As medições foram realizadas diariamente
16 em todos os estágios fenológicos ao longo do experimento. A evaporação foi mensurada pela
17 diferença diária de massa do microlisímetro, obtida sempre no mesmo horário (17:00) com
18 auxílio de uma balança de precisão de 0,01 g. A conversão da massa de água perdida
19 diariamente (kg) em evaporação (mm) foi realizada conforme a equação 13:

$$20 \quad E = \frac{\Delta M_{ML}}{A_{ML}} \quad \text{Eq.13}$$

21 Em que E é a evaporação do solo em mm dia^{-1} , ΔM_{ML} a diferença de massa em quilogramas do
22 microlisímetro de um dia para o outro (kg), A_{ML} é a área cilíndrica do microlisímetro (m^2), que
23 foi obtida:

$$24 \quad A_{ML} = 2\pi r(r + h) \quad \text{Eq.14}$$

25 Em que π é 3,14, r é o raio (0,05 m) e h é a altura do microlisímetro (0,15 m).
26

27 Finalmente, os coeficientes de evaporação (Ke) e de cultivo basal (Kcb) foram
28 determinados de acordo com as seguintes equações (Allen et al. 1998):

$$1 \quad Ke = \frac{E}{ET_0} \quad \text{Eq.15}$$

2

$$3 \quad Kcb = \frac{ET_c}{ET_0} - Ke \quad \text{Eq.16}$$

4 Para a compreensão dos mecanismos de controle da evapotranspiração do açazeiro foi
 5 calculado o fator de desacoplamento - Ω por meio da equação 17 (McNaughton & Jarvis, 1983),
 6 baseado na equação de Penman-Monteith, cujos valores estão compreendidos entre 0 e 1, onde
 7 valores mais próximo de 0 indicam que a transferência de vapor d'água para a atmosfera está
 8 sendo controlada pelas variáveis de u_2 , UR e DPV, caso em que se diz que a superfície vegetada
 9 está acoplada com a atmosfera. Já quando Ω apresenta valores próximos de 1 verifica-se a maior
 10 contribuição da energia na forma de radiação solar no processo de evapotranspiração,
 11 caracterizando a superfície como desacoplada com a atmosfera.

$$12 \quad \Omega = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{\gamma}{\Delta \times \gamma} \right) \times \left(\frac{g_a}{g_s} \right) \right]} \quad \text{Eq.17}$$

13 Em que g_a e g_s – são as condutâncias aerodinâmicas e da superfície ($s \text{ m}^{-1}$), respectivamente.

14 Para determinação da g_a levou-se em consideração fatores microclimáticos,
 15 considerando a equação 18:

$$16 \quad g_a = \frac{0.4^2 u(z)}{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} + \phi_m \right) \right]^2} \quad \text{Eq.18}$$

17 Em que u é a velocidade do vento ($s \text{ m}^{-1}$) na altura de medição z (m), d o deslocamento do plano
 18 zero (m), z_0 a rugosidade da superfície (m) e Φ_m corresponde ao fator de correção do perfil do
 19 vento, conforme Fraga et al. (2015).

20 Para determinação da g_s que indica um controle biológico da evapotranspiração, que
 21 leva em consideração a equação invertida de Penman-Monteith (equação 19), conforme a
 22 metodologia descrita por Fraga et al. (2015).

$$23 \quad g_s = (r_s)^{-1} = \left[\frac{\rho_a c_p DPV}{\gamma LE} - \frac{1}{g_a} \left(1 - \frac{\Delta H}{\gamma LE} \right)^{-1} \right] \quad \text{Eq.19}$$

1 Em que g_s é a resistência da superfície ($s\ m^{-1}$), ρ_a é a densidade do ar ($kg\ m^{-3}$), c_p é o calor
 2 específico do ar úmido ($1013\ J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$).

3 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4 4.3.1 Análise da consistência dos dados pelo método da razão de Bowen

5 Na tabela 6 são apresentados os resultados da análise da consistência dos dados e a
 6 percentagem dos dados falhos distribuídos por classe, que foi realizada utilizando o critério
 7 proposto por Perez et al. (1999), que leva em consideração os valores de β que se enquadraram
 8 nas classificações de erros (ϵ) presentes na tabela 4.

9 **Tabela 6** – Análise da consistência dos dados para o cálculo da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen
 10 em diferentes estágios fenológicos reprodutivos do açaizeiro em Capitão Poço - PA

Safrá 1						
Estádios fenológicos	PDC ^a	Tipos de erros (%)				
		A	B	C	D	E
Pré-floração	70.58	0.00	19.82	5.54	0.38	3.68
Floração	58.10	0.00	25.62	10.01	0.46	5.81
Fruto verde	63.08	0.00	25.04	7.60	0.46	3.82
Fruto preto	77.12	0.00	18.27	2.15	1.06	1.40
Maturação	79.97	0.00	16.74	0.87	1.51	0.92
Média	69.77	0.00	21.09	5.23	0.77	3.13
Safrá 2						
Estádios fenológicos	PDC ^a	Tipos de erros (%)				
		A	B	C	D	E
Pré-floração	84.99	0.00	3.41	10.50	0.00	1.37
Floração	50.35	0.00	28.79	4.05	5.49	11.32
Fruto verde	72.18	0.00	19.64	3.73	1.52	2.93
Fruto preto	76.99	0.00	18.40	2.42	1.06	1.12
Maturação	75.51	0.00	19.31	1.78	1.89	1.50
Média	72.00	0.00	17.91	4.50	1.99	3.65

11 ^aPDC – Porcentagem de dados consistentes

12 Verifica-se que o PDC para as safras 1 e 2 apresentaram similaridade em seus valores
 13 totais, permitindo a realização do balanço de energia em mais de 70% dos dados coletados. Esse
 14 resultado é superior aos obtidos por Silva et al. (2007) para o ciclo do maracujá, que
 15 apresentaram 51,36% de dados consistentes e aos resultados encontrados por Pereira et al.
 16 (2017) para o gergelim atingiram um percentual 62,3% de dados consistentes para a realização
 17 do balanço de energia.

18 Apesar de durante o dia a atmosfera apresentar maior instabilidade, verificou-se a
 19 ausência de erros do tipo A em ambas as safras do açaizeiro, pois quando a condição mais
 20 comum ocorria ($R_n - G > 0$ e $\Delta e > 0$), o β o valor sempre foi superior a $-1 + |\epsilon|$. Por outro lado,

1 observou-se que em média 28,92% dos intervalos amostrados apresentaram algum tipo de erro
2 e desses 71,94% (safra 1) e 22,72% (safra 2) foram erros do tipo B que ocorreram
3 principalmente nos estádios de fruto preto e maturação, que era quando se fazia uso da irrigação,
4 fazendo com que o β fosse superior a $-1 - |\epsilon|$.

5 Os erros do tipo C e E representaram em média nas duas safras 4,87 e 3,39%
6 respectivamente, ocorrendo em maior quantidade nos estádios de pré-floração, floração e fruto
7 verde, período no qual se tem a maior concentração de chuvas nas duas safras. Os erros do tipo
8 C ocorreram quando o $R_n - G$ passou a ser menor que zero, durante os eventos de precipitação
9 que influenciavam a inversão do Δe , já os erros do tipo E ocorriam em função da mudança
10 brusca da temperatura e da pressão de vapor. Os erros do tipo D representaram menos do que
11 2% em ambas as safras e surgiram quando $R_n - G$ foram menores que zero e os valores de β
12 superiores a $-1 - |\epsilon|$.

13 4.3.2 Variabilidade fenológica

14 A figura 1 apresenta variabilidade nos estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro ao
15 longo das duas safras, onde se verifica um período com predominância da fase de inflorescência
16 e outro com a fase de infrutescência do açaizeiro, uma vez que o açaizeiro flora e frutifica
17 durante todo o ano. Estas duas fases ocorrem em estações bem definidas, de modo que durante
18 o período mais chuvoso do ano (entre novembro e março), considerado período de entressafra
19 do fruto, a fase que predomina é a de inflorescência, composta pelos estádios de pré-floração
20 que ocorre principalmente entre novembro e janeiro e tem duração média de 78 dias, e pelo
21 estádio de floração que tem seu ápice entre os meses de janeiro e fevereiro, durando em média
22 30 dias. Ambos estádios apresentam IA com baixa sincronia, o que favorece o prolongamento
23 da safra do fruto, uma vez que permite maior distribuição da maturação do açaí durante um
24 maior período de tempo (Garcia e Barbedo 2016).

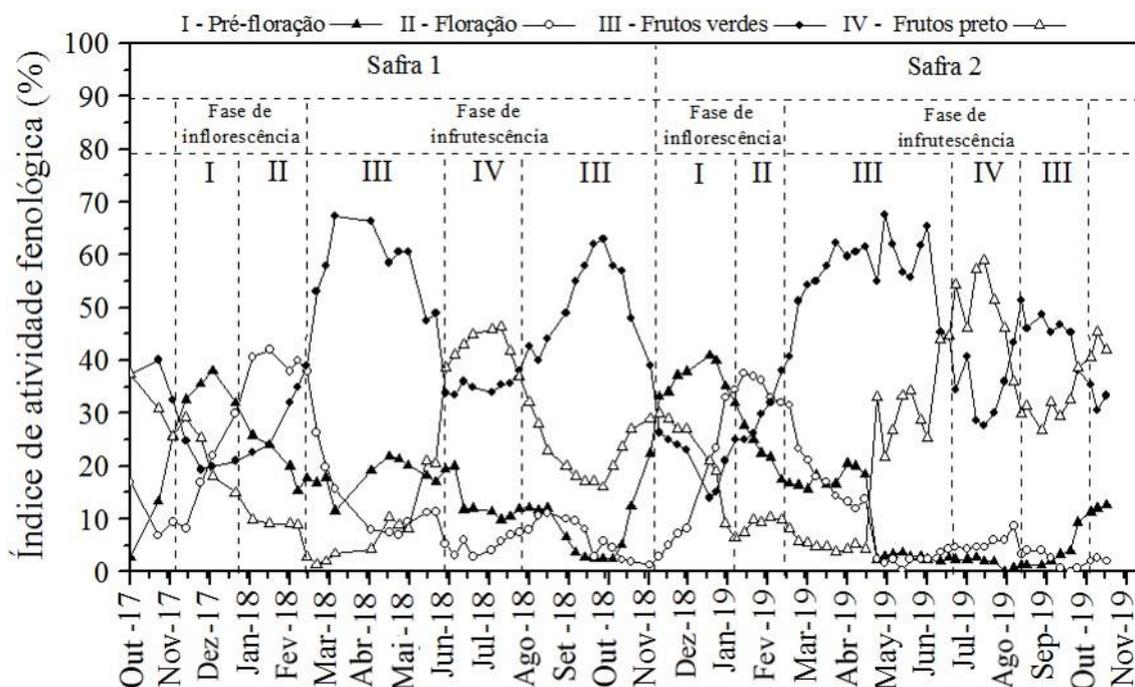
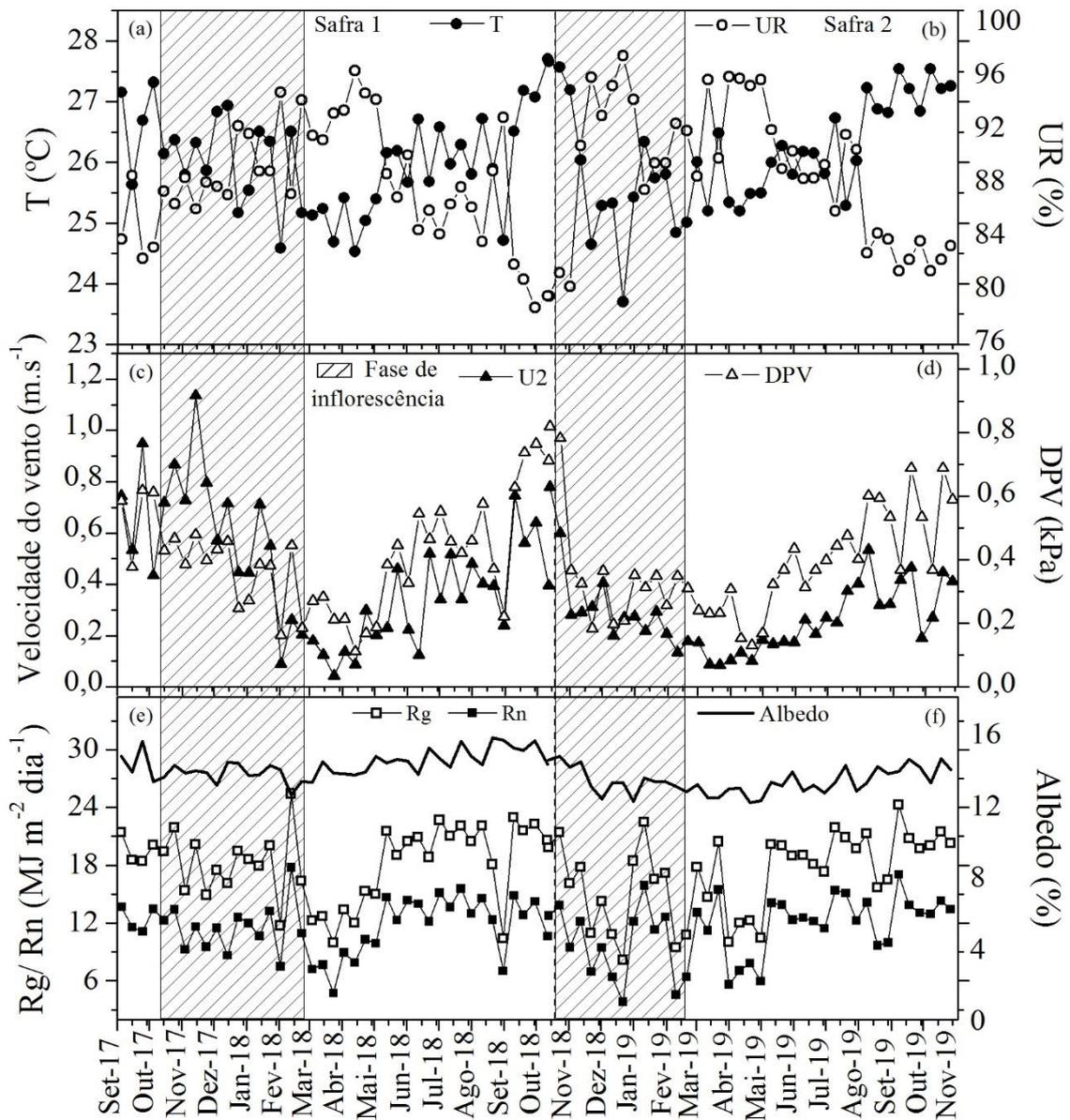


Figura 1 – Variação da atividade fenológica do açazeiro ao longo das duas safras de açaf irrigado em Capitão Poço – PA.

Já durante o período de março a outubro ocorre a fase de infrutescência, composta pelos estádios de fruto verde, entre meados de março a julho, com duração média de 130 dias com índice de atividade fenológica com alta sincronia; e pelos estádios de fruto preto e de maturação do açazeiro que tem duração média de 60 e 16 dias, respectivamente, e ocorrem sob baixa sincronia fenológica predominando no mesmo período já que a maturação ocorre poucos dias após o estádio de fruto preto, entre os meses de agosto e outubro, período em que ocorre a safra do açaf.

4.3.3 Condições ambientais

As temperaturas médias do ar durante o experimento (figura 2a) foram de 25,88 e 25,72 °C, para a primeira e segunda safra, respectivamente, com amplitude térmica variando entre 20,27 °C a 36,47. A umidade relativa do ar (UR) média para a primeira safras foi de 88,68 enquanto que a segunda safra a média foi de 89,37% (figura 2b). A UR foi inversamente proporcional a variabilidade da T, DPV e u_2 que apresentaram seus máximos valores quando a UR decrescia em função de condições atmosféricas mais exigentes por vapor d'água, de modo que, propiciou a ocorrência de valores de déficit de pressão de vapor (DPV) e de velocidade do vento (u_2) máximos de 0,87 kPa e 1,51 m s⁻¹ na primeira safra e de 0,84 kPa e 1,13 m s⁻¹ na segunda safra 2 (figura 2d).



2

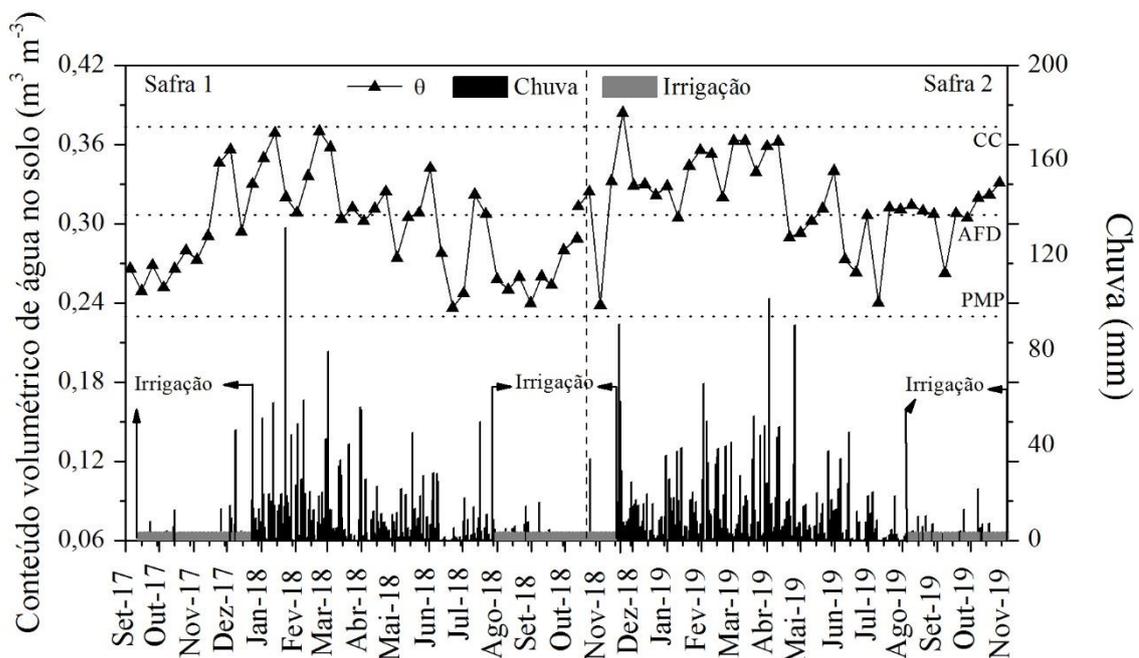
3 **Figura 2** – Variação dos elementos climáticos de temperatura do ar – T, umidade relativa do ar - UR, velocidade
 4 do vento – WS, déficit de pressão de vapor de água – DPV, radiação solar global incidente – Rg, saldo de radiação
 5 - Rnet e albedo – α em diferentes estádios fenológicos do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA.
 6

7 Os valores médios do Rg e do Rn foram, respectivamente, de 17,74 e 11,78 MJ m⁻² dia⁻¹
 8 ¹ (primeira safra) e de 17,48 e 11,69 MJ m⁻² dia⁻¹ (segunda safra) (figura 2e), com variabilidade
 9 de 20,78 MJ m⁻² dia⁻¹ para o Rg e de 16,05 MJ m⁻² dia⁻¹ para o Rn, em decorrência da transição
 10 da estação mais chuvosa para a estação menos chuvosa, que acarretou intensa redução de
 11 radiação difusa em função de mais dias de céu claro, favorecendo a incidência da radiação
 12 direta.

1 O albedo médio diário correspondeu a 14,31% para a safra 1 e 13,47% para a safra 2.
 2 As características ópticas do açaizeiro influenciam consideravelmente a quantidade de energia
 3 disponível no ecossistema (Machado et al. 2016), uma vez que durante a estação menos chuvosa
 4 o albedo tende a ser maior do que no período mais chuvoso, em função do aumento de
 5 superfícies lisas, secas e com cores claras que incrementam seu poder de reflexão e diminuem
 6 a absorção da radiação (Fausto et al. 2014). Já durante o período mais chuvoso a albedo tende
 7 a ser menor em função da maior quantidade de água disponível no sistema que influencia em
 8 menor reflexão e maior absorção da radiação (Silva et al. 2011).

9 4.3.4 Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo

10 O conteúdo volumétrico de água no solo apresentou um padrão esperado (figura 3)
 11 mantendo-se durante a maior parte do ciclo em ambas as safras, entre a umidade correspondente
 12 ao limite da água facilmente disponível – AFD (umidade crítica de $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e a umidade
 13 de capacidade de campo – CC ($0,370 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), mantendo um nível médio correspondente a
 14 52,86% e 62,86% da capacidade total de água – CTA no solo (60,06 mm) na primeira e segunda
 15 safra, respectivamente.



16
 17 **Figura 3** – Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo – θ_{us} , da chuva – Prp e da irrigação em
 18 diferentes estádios fenológicos do açaizeiro ao longo das duas safras em Capitão Poço – PA.

19 Percebe-se que em ambos os anos, a precipitação pluviométrica ocorrida entre os meses
 20 de dezembro e abril, proporcionou que a quantidade total da AFD (27,03 mm) não fosse

1 completamente utilizada, acarretando que a CTA para o período ficasse sempre acima dos
2 65,2% (39,16 mm), condicionando o suprimento hídrico adequado para o pleno
3 desenvolvimento para cultura (Sinclair et al. 2005).

4 Durante o período menos chuvoso, entre julho e novembro, o conteúdo volumétrico de
5 água no solo atingiu em média 0,275 m³.m⁻³ na primeira safra, correspondente a 32,42% (19,47
6 mm) da CTA, enquanto que na segunda safra a média foi de 0,301 m³.m⁻³, equivalente a 50,49%
7 (30,32 mm) da CTA. Verifica-se que nas duas safras as condições hídricas atingiram níveis
8 considerados prejudiciais (CTA < 33,03 mm) para o crescimento e desenvolvimento das plantas
9 (Montesano et al. 2018).

10 Esta condição pode explicar o fato de que apesar do açazeiro florar durante todo o ano,
11 a quantidade percentual de espigas e flores nesse período ser menor que 10% (figura 1), devido
12 esses estádios serem mais sensíveis a estresses abióticos o que faz com que o açazeiro aborte
13 suas inflorescências acarretando alterações fisiometabólicas da planta e consequentemente
14 influência na produtividade final (Aguiar et al. 2018).

15 Durante a safra 1 (novembro de 2017 e outubro de 2018) o total de chuva observado foi
16 de 2222,41 mm, sendo que deste total, 88,02% ocorreram entre os meses de dezembro de 2017
17 a junho de 2018. Já na segunda safra (novembro de 2018 a outubro de 2019) o total de chuva
18 acumulada correspondeu a 2805,80mm, com concentração de 87,72% entre os meses de
19 dezembro de 2018 e junho de 2019.

20 Ao se comparar as duas safras, verifica-se que durante o período menos chuvoso do ano
21 (agosto a novembro) a safra 2 acumulou 344,60 mm de chuva, enquanto que na safra 1 o
22 quantitativo de chuva foi de 243,18 mm. Apesar da quantidade total de chuvas neste período
23 ser quase que suficiente para suprir adequadamente o açazeiro (necessidade de 484,24 mm na
24 safra 1 e 393,21 mm na safra 2 durante o período, resultados a seguir), sua má distribuição
25 (figura 3) fez com que fosse necessário a utilização da irrigação para que se minimizassem
26 possíveis danos fisiometabólicos causados pelo déficit hídrico que pudessem comprometer o
27 desenvolvimento do açazeiro. Logo, aplicou-se uma lâmina de irrigação total de 331,28 mm
28 na safra 1 dividida em 101 irrigações, enquanto que no experimento 2 a lâmina total
29 correspondeu a 252,56 mm durante 77 irrigações.

30 Observa-se que próximo ao período de transição entre a fase de infrutescência e
31 inflorescência o conteúdo volumétrico de água no solo apresentou-se abaixo da umidade crítica
32 correspondente a 0,306 m³.m⁻³ (figure 3), motivado pela redução das chuvas nesse período e
33 pela utilização de uma lâmina de irrigação empírica fixa, que em alguns momentos do

1 experimento esteve abaixo da demanda de água necessária para o açazeiro. Este manejo
2 inadequado provocou uma baixa disponibilidade de água no solo, sugerindo a ocorrência de
3 déficit hídrico neste período, o que é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento
4 do açazeiro, pois ocasiona modificações nos processos fisiometabólicos da planta (Barbosa et
5 al. 2017), podendo ter reduzido o grau de abertura dos estômatos e conseqüentemente as perdas
6 de água por transpiração (Jazayeri et al. 2015).

7 4.3.5 Evapotranspiração

8 A Variabilidade da ETc ao longo do ciclo é apresentada na figura 4, onde verifica-se
9 que durante a fase de inflorescência e infrutescência na safra 1 a ETc média foi de 3,26 e 3,80
10 mm dia-1, respectivamente, enquanto que no mesmo periodo na segunda safra a média da ETc
11 foi de 3,03 mm dia-1 para a inflorescência e de 3,27 mm dia-1 na infrutescência. A redução da
12 ETc tanto na fase de inflorescência (4,72%) quanto na fase de infrutescência (14,30%), está
13 diretamente relacionada com as condições atmosféricas observadas entre as safras (figura 2) e
14 com o total de chuva nesses períodos (Figura 3). A primeira safra recebeu em média 21,90%
15 menos chuva do que a safra 2, sugerindo uma redução da UR e da nebulosidade,
16 conseqüentemente aumentando os valores de T, u2, DPV, Rg e Rnet que acarretaram em maior
17 demanda energética da atmosfera.

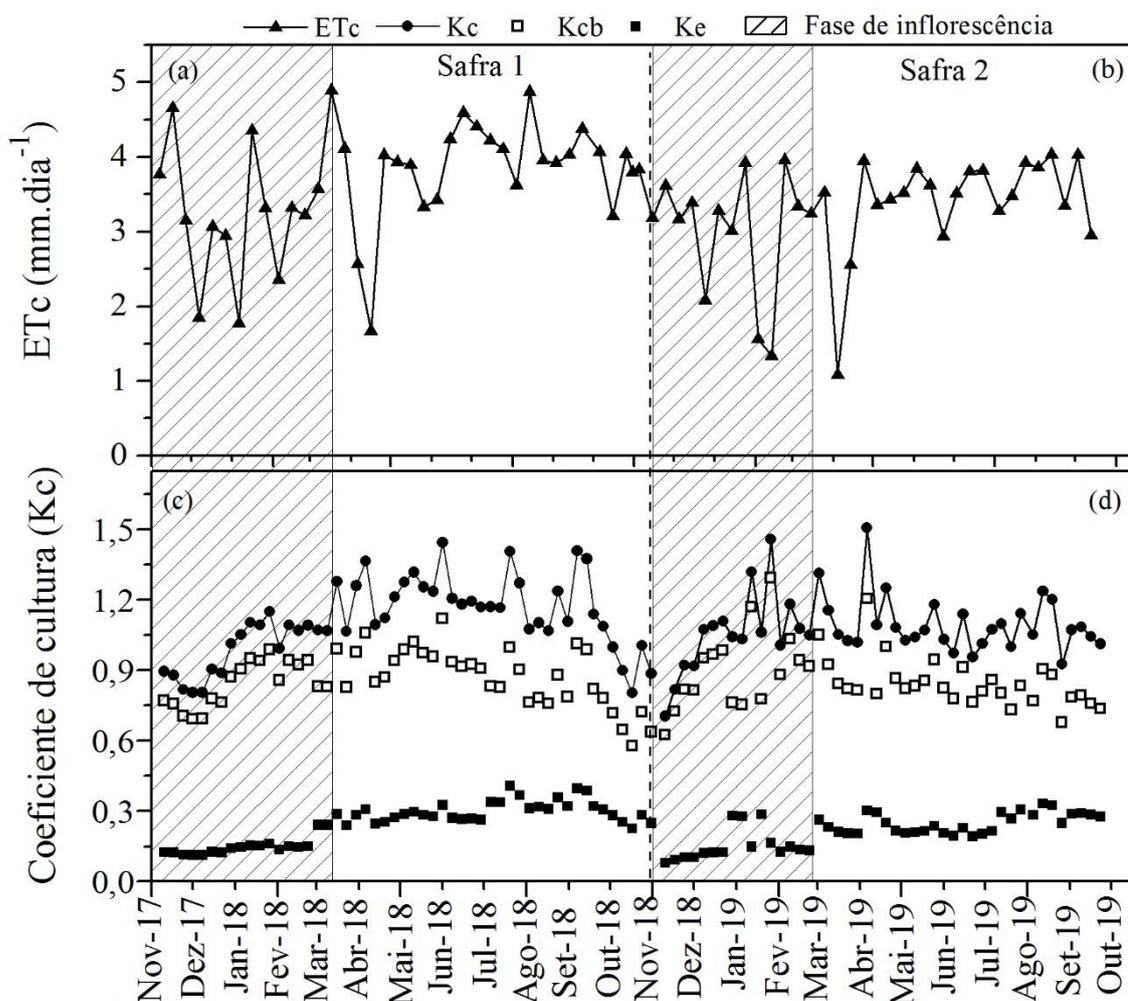


Figura 4 – Variabilidade da evapotranspiração do açaizeiro e dos coeficientes de cultura simples e dual durante a fase reprodutiva do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA.

Quando se analisa os valores médios por ciclo fenológico (tabela 3), observa-se que o menor valor de ETc em ambas as safras ocorreu durante o estágio de floração e a máxima ETc durante o estágio de maturação dos frutos, com índice de área foliar (IAF) sempre próximo de 2. Devido a fase de floração ocorrer predominante no período mais chuvoso do ano as trocas gasosas são limitadas principalmente pela elevada quantidade de vapor de água presente na atmosfera, enquanto que durante o estágio de maturação observa-se que as maiores trocas gasosas entre a atmosfera e as plantas de açaizeiro ocorrem em uma época do ano em que se tem os menores valores de UR e um incremento nos percentuais de T, u_2 , Rg e Rnet, facilitada também pelo suprimento hídrico por meio da irrigação.

1 **Tabela 7** – Médias da evapotranspiração da cultura e dos coeficientes da cultura (Kc) simples e dual em diferentes
 2 estádios reprodutivos do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA.

Estádio fenológico	Safrá 1									
	Consumo hídrico	ETc	Kc	Ke	Kcb	IAF	Y _{act}	CWP	Ω	
									1º fase*	2º fase**
Pré-floração	262,14	3,36	0,89	0,12	0,72					
Floração	89,66	2,99	1,07	0,14	0,84					
Fruto verde	467,5	3,6	1,2	0,24	0,94	2,02	7052	0,76	0,65	0,54
Fruto Preto	244,56	4,08	1,17	0,25	0,78					
Maturação	66,36	4,42	1,19	0,33	0,82					
Média/Total	1130,22	3,69	1,1	0,22	0,82					

Estádio fenológico	Safrá 2									
	Consumo hídrico	ETc	Kc	Ke	Kcb	IAF	Y _{act}	CWP	Ω	
									1º fase*	2º fase**
Pré-floração	239,19	3,03	0,96	0,11	0,85					
Floração	90,65	3,02	1,05	0,13	0,92					
Fruto verde	401,75	3,09	1,14	0,23	0,91	2,12	7469	0,88	0,66	0,56
Fruto Preto	207,54	3,26	1,04	0,24	0,8					
Maturação	60,36	4,02	1,06	0,29	0,77					
Média/Total	999,49	3,28	1,05	0,2	0,85					

3 *Fase de inflorescência, **Fase de infrutescência, Consumo hídrico (mm), ETc (mm dia⁻¹), Kc (adimensional),
 4 Ke (adimensional), Kcb (adimensional), Y_{act} – produtividade dos frutos (Kg há⁻¹), CWP – produtividade de água
 5 (Kg m⁻³) e Ω (adimensional).

6 Observou-se durante a primeira safra, maior variabilidade nos valores máximos e
 7 mínimos da ETc nos estádios de pré-floração, floração e fruto verde quando comparados a safra
 8 seguinte, em função do decréscimo de 20,52% na quantidade de chuvas que contribui para a
 9 amplitude de 4,91 mm nos valores de ETc. Isso ocorre principalmente por conta da maior
 10 variabilidade nos valores de R_g e R_{net} (figura 2e) aliado a condições hídricas satisfatórias
 11 (figura 3) influenciam o maior consumo hídrico em dias de céu claro sem que houvesse
 12 limitações por parte de mecanismos de fisiológicos. Já os estádios de fruto preto e maturação
 13 apresentaram maior amplitude (2,57 mm) na ETc durante a segunda safra, o que está
 14 relacionado com a alta demanda energética da atmosfera para o período, que é reduzida a
 15 medida que se tem um aumento na nebulosidade em função das chuvas, acarretando maior
 16 variabilidade para o período.

17 O consumo hídrico do açaizeiro durante a primeira safra foi de 1130,22 com ETc média
 18 3,70 mm dia-1 e máxima de 5,37 mm dia-1. Já na segunda safra o consumo total foi de 999,49
 19 mm, com ETc média e máxima de 3,28 e 4,86 mm dia-1, respectivamente. Destes totais cerca

1 de 23,56% é consumido na pré-floração, 8,50% na floração, 40,78% no estágio de fruto verde,
2 21,20% no estágio de fruto preto e 5,96% no estágio de maturação dos frutos.

3 Verifica-se que a ETc do açazeiro apresentou menores valores na segunda safra
4 impulsionada pela menor demanda da atmosfera quando comparado a primeira safra, mesmo
5 apresentando índice de área foliar - IAF superior ao da safra 1 (tabela 7). o que está relacionado
6 com o aumento da UR e redução da u_2 e do DPV que fizeram com que a ETc deixasse de sofrer
7 efeito direto da cobertura foliar passando a ser influenciada principalmente pela radiação solar,
8 caracterizando o estado de desacoplamento da superfície com a atmosfera ($\Omega > 0,5$).

9 Embora existam inúmeras pesquisas sobre a evapotranspiração de culturas anuais (Fun
10 et al. 2015, Xu et al. 2018, Wijewardana et al. 2019), os estudos sobre culturas perenes ainda
11 são raros em função da dificuldade de se empregar as diferentes metodologias devido ao grande
12 porte que essas culturas atingem. A utilização do método da razão de Bowen, pode ser
13 empregado em qualquer tipo de cultura, desde que os instrumentos sejam instalados acima do
14 dossel vegetal em um perfil vertical onde os gradientes de temperatura e umidade do ar estejam
15 dentro da camada limite interna de equilíbrio (Perez et al. 1999).

16 A precisão do método de razão de Bowen na determinação da evapotranspiração das
17 culturas é comprovada em diversos estudos que comparam métodos diretos como o caso de
18 Sousa et al (2011) e indiretos como os estudos de Barr et al (1994), Rana e Katerji (1996) e
19 Billesbach e Arkebauer (2012).

20 Sousa et al (2011) compararam as medidas de ETc do coqueiro obtidas por lisímetro de
21 pesagem com as obtidas pelo método de razão de Bowen. Os autores verificaram índice de
22 concordância de 0,92 e índice de desempenho de 0,81 entre os dois metodos, classificando o
23 comparativo como muito bom, o que sugere que o método pode ser usado com precisão na
24 estimativa da evapotranspiração de plantas de grande porte.

25 Barr et al. (1994) ao compararem os metodos de Eddy covariance e razão de Bowen na
26 estimativa dos fluxos de calor sensível e latente acima de uma floresta decídua madura,
27 verificaram diferença de medição de 11% no período diurno, enquanto que Billesbach e
28 Arkebauer (2012) também realizaram a comparação entre os fluxos de calor sensível e latente
29 determinados apartir BERB com os obtidos pelo método de eddy covariance, verificaram
30 precisão de 90% entre os métodos. Já Rana e Katerji (1996) ao compararem o MEC com o
31 MRB em três gradientes de temperatura e pressão verificaram que em escala diária a diferença
32 entre os métodos foi de 2%. Os autores afirmam que o MRB pode ser utilizado como método
33 padrão na estimativa da evapotranspiração em culturas com alta rugosidade superficial.

1 O sucesso na precisão e exatidão do método de razão de Bowen em estimar os fluxos
2 de calor sensível e latente, é determinado por alguns fatores como as condições da atmosfera
3 (Teixeira e Bastiaansen, 2012), a rigidez com que se aplica o controle de qualidade dos dados
4 (Perez et al. 1999) e erros intrínsecos do sensor utilizado (Savage et al., 2010).

5 Savage et al. (2010) em seus resultados sobre a comparação de sensores mais baratos
6 com equipamentos mais caros para a estimativa dos fluxos de energia, verificaram que é
7 possível manter a alta precisão com a utilização de sensores mais acessíveis economicamente,
8 como os utilizados neste estudo com o açazeiro. Os autores verificaram erros de 38 W m^{-2}
9 (RMSE), quando compararam com os resultados obtidos por um sistema de eddy covariance e
10 um sensor similar ao utilizado no experimento com acai, o que se considera aceitável. Conforme
11 sugerido pelos autores, utilizou-se médias de 20 minutos das variáveis, afim de reduzir o ruído
12 nos dados de pressão de vapor de água.

29 De acordo com Tsai et al (2010) a heterogeneidade da superfície encontrada em tais
30 culturas torna-se um importante fator pois influencia na rugosidade da superfície como também
31 na viabilidade do método da razão de Bowen (Friedrich et al. 2000). No entanto, a
32 heterogeneidade do terreno só tem significativa influência em situações onde o fetch da área é
33 menor que 100 m (Friedrich et al. 2000; Gavilan e Berengena 2007).

34 A produtividade dos frutos do açazeiro apresentou aumento de 5,58% na segunda safra
35 quando comparado a safra primeira. Essa diferença está relacionada com as condições
36 climáticas mais acentuadas na primeira safra que proporcionaram aumento de 6,86% na
37 demanda de água pela atmosfera, o que ocasionou em 18,07% menos água disponível no solo.
38 Nestas condições as plantas reduzem a abertura estomática (Viana et al. 2019) e
39 consequentemente a assimilação de CO_2 (Jazayeri et al. 2015), impactando negativamente na
40 produtividade (Taiz e Zeiger 2009).

41 Os resultados médios de ET_c encontrados para o açazeiro estão próximos dos
42 encontrados para outras palmeiras como a cultura da palma de óleo no Mato Grosso, região
43 centro-oeste do Brasil, que apresentou ET_c média de $3,74 \text{ mm dia}^{-1}$ (Viana et al. 2019) e para
44 o coqueiro cultivado em Sergipe, nordeste Brasileiro, com ET_c média de $3,90 \text{ mm dia}^{-1}$. (Sousa
45 et al. 2011) além da cultura da manga cultivada próximo à região de estudo, na Amazônia
46 oriental, que apresentou ET_c média de $3,73 \text{ mm dia}^{-1}$ (Souza et al. 2016).

47 Embora os resultados da ET_c obtidos por outras palmeiras sejam próximos aos
48 encontrados nesta pesquisa, a utilização destes dados para fins de manejo e uso da água em
49 outras culturas devem ser criteriosamente avaliados em função de cada região apresentar

1 diferentes variabilidades no clima, das espécies apresentarem diferentes estádios de
2 desenvolvimento e os distintos manejos empregados nos cultivos influenciarem no consumo de
3 água pelas plantas (Doorenbos e Pruitt 1977, Allen et al. 1998).

4 No estado do Pará, em detrimento da ausência de informações sobre o consumo hídrico
5 do açaizeiro, a maioria dos produtores utilizam uma lâmina de irrigação diária de 5 mm dia-1
6 baseada no trabalho de Foong (1993) que ao longo de 15 anos estudou a ETC da palma de óleo
7 na Malásia. Ao contrastar a lâmina de irrigação utilizada pelos produtores com os resultados
8 obtidos nesta pesquisa verifica-se superestimativa de 43,27% entre a lâmina de irrigação ideal
9 para o açaizeiro e a lâmina utilizada atualmente pelos produtores, o que pode causar
10 desvantagens econômicas.

11 Várias pesquisas que foram desenvolvidas com frutíferas correlacionando diferentes
12 regimes hídricos e o desempenho produtivo, comprovaram que nem sempre a aplicação de
13 maiores lâminas de irrigação refletem em aumento significativo na qualidade ou na
14 produtividade dos frutos (Dag et al. 2008, Kiggundu et al. 2012, Dinc et al. 2018), uma vez que
15 quanto maiores são os níveis de água aplicada no solo, maiores serão as chances de ocorrer a
16 lixiviação de nutrientes para fora do alcance do sistema radicular, acarretando na redução do
17 potencial produtivo da cultura e na eficiência de produtividade da água e consequentemente
18 aumentando os custos de produção (Chai et al. 2015).

19 4.3.6 Coeficientes de cultivo simples e dual

20 Os valores de K_c variaram de um mínimo no estágio de pré-floração a um máximo no
21 estágio de fruto verde nas duas safras. Na pré-floração observa-se que a demanda hídrica da
22 atmosférica é maior que a demanda hídrica da cultura ($K_c < 1$), o que pode estar relacionado
23 com uma série de fatores, como o fato de ser um período de transição da época menos chuvosa
24 para a mais chuvosa (figura 3), onde a quantidade de água no solo ainda é um fator limitante
25 (conteúdo volumétrico de água no solo abaixo da faixa de umidade crítica), o que reduz as
26 trocas gasosas entre o açaizeiro e a atmosfera, aliado também a menor área foliar em razão do
27 lançamento de novas inflorescências que ficam localizadas nas bainhas foliares e são lançadas
28 a partir da abscisão das folhas.

29 O estágio de fruto verde se inicia com o aparecimento dos primeiros frutos do açaizeiro,
30 após a queda das flores, nesse estágio a demanda hídrica da cultura supera a demanda da
31 atmosfera ($K_c > 1$) em função de boas condições hídricas do solo e da maior necessidade
32 energética da cultura para a produção e destinação de fotoassimilados para o crescimento e
33 desenvolvimento do fruto. Os valores de K_c encontrados para o açaizeiro ao serem contrastados

1 com outras frutíferas perenes como o cacaueteiro e a bananeira apresentam grandeza de valores
2 semelhantes, variando de 0,90 a 1,10 (Allen et al. 1998).

3 Os resultados de K_c para palmeiras tropicais obtidos nos estudos de Sousa et al. (2011)
4 e Meijide et al. (2017) para o coqueiro (0,90) e a palma de óleo (1,06), respectivamente, ainda
5 são incipientes, dada a importância social e econômica de muitas espécies. Os principais
6 entraves para se gerar dados sobre os coeficientes de cultivo se dão em função do grande porte
7 das espécies que geram dificuldade de instalação dos equipamentos capazes de monitorar com
8 precisão a evapotranspiração das culturas e a demanda da atmosfera, além dos elevados custos
9 para aplicação de alguns métodos.

10 O K_e mostrou-se crescentes em função dos diferentes estádios fenológicos, com
11 mínimos valores durante o estágio de pré-floração, que é quando se tem uma maior cobertura
12 do solo em detrimento da maior abscisão das folhas para que ocorra o lançamento das espadas.
13 Freitas et al. (2014), ao estudarem a evaporação de água no solo, verificaram relação direta
14 entre as diferentes frações de cobertura do solo e a redução nas taxas de evaporação, onde um
15 solo coberto com até 50% do seu total proporcionou reduções variando entre 17 e 30%, o que
16 é justificado pela redução na quantidade de energia que chega ao solo. Já os máximos valores
17 de K_e foram observados durante o estágio de maturação dos frutos, quando se tinha a reposição
18 diária de água no solo através da irrigação (figura 3) e disponibilidade energética elevada (figura
19 2), acarretando na maior evaporação de água no solo, influenciada principalmente pela U_s , U_r ,
20 u_2 , R_g e pelas temperaturas do solo e do ar.

21 A variabilidade do K_{cb} ao longo da fase reprodutiva do açazeiro assemelha-se ao
22 padrão do K_c , demonstrando-se máxima no estágio de fruto verde quando o conteúdo
23 volumétrico de água no solo está acima da faixa de umidade crítica que correspondente ao limite
24 da AFD em decorrência da grande quantidade de chuvas no período que proporciona maior
25 absorção de água e nutrientes acarretando em maior taxa de transpiração.

26 Observou-se que os valores de K_{cb} oscilariam consideravelmente principalmente
27 durante os estádios de pré-floração, floração e fruto verde, que é quando se tem uma maior
28 quantidade de água no solo que favorece as atividades fotossintéticas das folhas, acarretando
29 na maior abertura dos poros estomáticos que reduzem a resistência estomática favorecendo a
30 maior taxa de transpiração (Silva et al. 2017). Essas condições de suprimento hídrico abundante
31 favorecem a translocação e produção de fotoassimilados que são destinados a produção dos
32 frutos do açazeiro, que tem sobretudo no estágio de fruto verde o ganho no crescimento do
33 fruto (Fan et al. 2015) e conseqüentemente maiores valores de produtividade da água.

1 Durante os estádios de fruto preto e maturação observou-se que as maiores oscilações
2 percentuais ocorreram para o K_e e foram influenciadas pelas variações no conteúdo de água do
3 solo como resultado da menor frequência e intensidade de eventos de chuva e da utilização de
4 uma lamina empírica bruta de irrigação, atrelados à elevada demanda energética da atmosfera,
5 padrão esse relatado por Allen e Pereira (2009) que observaram em seus estudos variações
6 bruscas no K_e em função da variação na frequência de molhamento do solo, ocasionando
7 maiores perdas de água por evaporação e menores por transpiração, quando comparado aos
8 estádios anteriores, em função do aumento da T , u_2 e DPV e da redução da chuva e da UR que
9 influenciaram diretamente para que o período dispusesse de menor disponibilidade de água no
10 solo (Wijewardana et al. 2019).

11 Ao analisar os coeficientes de cultivo K_e e K_{cb} verifica-se que do total de água aplicada
12 pela irrigação no período menos chuvoso do ano, 25,93% correspondeu a taxa utilizada pela
13 evaporação e 74,07% foram utilizados pela transpiração do açazeiro, isso significa que durante
14 os períodos de irrigação o processo de evaporação de água no solo consumiu um total de 85,90
15 mm na primeira safra e 65,49 mm na segunda safra. Essa água transferida para a atmosfera por
16 evaporação não participa dos processos de assimilação de CO_2 pela planta (Steduto et al. 2007),
17 o que acarreta redução na eficiência da evapotranspiração, porém esse processo pode
18 incrementar a eficiência da transpiração, desde que as condições climáticas não promovam
19 elevada diferença no déficit de pressão de vapor entre o interior da folha e a atmosfera, e que
20 as condições vento não influenciem na redução das trocas gasosas (Tanner e Sinclair 1983). A
21 diferença na perda de água por evaporação também influenciou diretamente na PAC, que foi
22 maior na segunda safra em 13,64% em comparação à primeira safra.

23 Motivo pelo qual, faz-se necessário a adoção de técnicas de manejo que visem reduzir
24 essa perda de água aumentando a eficiência de utilização pela transpiração. Uma solução seria
25 a utilização de resíduos vegetais afim de favorecer a melhor cobertura do solo, utilizando folhas
26 e cachos secos do próprio açazeiro, bem como de outras espécies, principalmente durando os
27 meses de julho a novembro que é quando se tem a maior demanda hídrica da atmosfera.

28 Portanto, a presente pesquisa evidencia a importância de um correto manejo de irrigação
29 do ponto de vista ambiental e econômico, pois fornece dados capazes de auxiliar o uso racional
30 dos recursos hídricos, aplicando as reais demandas de água para o açazeiro, evitando possíveis
31 estresses hídricos que levem a queda de produtividade e consequentemente, em aumentos dos
32 custos de produção e em inutilização do real potencial produtivo do açazeiro.

1 4.4 CONCLUSÃO

2 O consumo hídrico total do açaizeiro ao longo do período reprodutivo nas duas safras
3 variou entre 1130,22 e 999,49 mm, apresentando diferença entre as fases de inflorescência e
4 infrutescência, onde os estádios fenológicos de floração e maturação dos frutos foram os que
5 apresentaram as menores e maiores demandas hídricas para o açaizeiro, respectivamente.

6 As diferenças nas condições climáticas das duas safras do açaizeiro proporcionaram um
7 consumo diário médio (ETc) de 3,69 mm dia⁻¹ na primeira safra e de 3,28 mm dia⁻¹ na segunda
8 safra.

9 Os coeficientes de cultivo simples (Kc) e dual (Ke e Kcb) apresentaram variações no
10 padrão entre as duas safras, com valores médios para o ciclo de 1,10 (Kc), 0,22 (Ke) e 0,82
11 (Kcb) para a safra 1, enquanto que na safra 2 os valores foram menores em 4,54% para o Kc e
12 em 9,09% para o Ke, enquanto que o Kcb apresentou aumento de 3,53%.

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

14 Abdelkhalik A, Pascual B, Nájera I, Domene MA, Baixauli C, Pascual-Seva N (2019) Effects
15 of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet
16 pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions. **Irrigation Science**.
17 <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00655-1>

18 Abrisqueta I, Abrisqueta JM, Tapia LM, Munguía JP, Conejero W, Vera J, Ruiz-Sánchez MC
19 (2013) Basal crop coefficients for early-season peach trees. **Agricultural Water Management**
20 121:158–163. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.001>

21 Aguiar AG, Martins PFS, Simões AV (2017) Efeitos da intensidade do desbaste de estipes de
22 açaizeiros (*Euterpe oleracea* Mart.) nativos na composição de parcelas de produção em várzea
23 do estuário amazônico. **Ciências Agrária** 60:358-365. <https://doi.org/10.4322/rca2709>

24 Allen RG, Pereira LS (2009) Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and
25 height. **Irrigation Science** 28:17-34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>

26 Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for
27 Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper** 56. Rome, 300p.

28 Barbosa M, Lobato A, Pereira T, Viana G, Barbosa J, Coelho K (2017) Antioxidant system is
29 insufficient to prevent cell damages in *Euterpe Oleracea* exposed to water deficit. **Emirates**
30 **Journal of Food and Agriculture** 29:206-211. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-09-1217>

31 Barr AG, King KM, Gillespie TJ, Den Hartog G, and Neumann HH (1994) A comparison of
32 Bowen ratio and eddy correlationsensible and latent heat flux measurements above a deciduous
33 forest, **Boundary Layer Meteorology** 71, 21 – 41, doi:10.1007/BF00709218.

34 Billesbach DP, Arkebauer TJ (2012) First long-term, direct measurements of
35 evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and**
36 **Forest Meteorology** 156:104-110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001>

- 1 Canalis-Ide F, Zubelzu S, Rodríguez-Sinobas L (2019) Irrigation systems in smart cities coping
2 with water scarcity: The case of Valdebebas, Madrid (Spain). **Journal of Environmental**
3 **management** 247:187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.062>
- 4 Chai Q, Gan Y, Zhao C, Xu HL, Waskom RM, Niu Y, Siddique KHM (2015). Regulated deficit
5 irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for Sustainable**
6 **Development**, 36(1). doi:10.1007/s13593-015-0338-6
- 7 Chebbi W, Boulet G, Dantec VL, Chabaane ZL, Fanise P, Mougenot B, Ayari H (2018)
8 Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive orchard during three contrasting
9 years in a semi-arid climate. **Agricultural and Forest Meteorology** 256-257:159–178.
10 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.020>
- 11 Conforto EC, Contin DR (2009) Desenvolvimento do açazeiro de terra firme, cultivar Pará,
12 sob atenuação da radiação solar em fase de viveiro. **Bragantia** 68:979-983.
13 <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400018>
- 14 Consoli S, Milani M, Cirelli G, Barbagallo S, Marzo A, Vanella D, Toscano A (2018) Energy
15 and water balance of a treatment wetland under mediterranean climatic conditions. **Ecological**
16 **Engineering** 116:52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.029>
- 17 Consoli S, Papa R (2013) Corrected surface energy balance to measure and model the
18 evapotranspiration of irrigated orange orchards in semi-arid Mediterranean conditions.
19 **Irrigation science** 31:1159-1171. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0395-4>
- 20 Dag, A., Ben-Gal, A., Yermiyahu, U., Basheer, L., Nir, Y., & Kerem, Z. (2008). The effect of
21 irrigation level and harvest mechanization on virgin olive oil quality in a traditional rain-fed
22 “Souri” olive orchard converted to irrigation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,
23 88(9), 1524–1528. doi:10.1002/jsfa.3243
- 24 Dicken U, Cohen S, Tanny J (2013) Examination of the Bowen ratio energy balance technique
25 for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering** 114:397-405.
26 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.11.001>
- 27 Dinc, N., Aydinsakir, K., Isik, M., Bastug, R., Ari, N., Sahin, A., & Buyuktas, D. (2018).
28 Assessment of different irrigation strategies on yield and quality characteristics of drip irrigated
29 pomegranate under mediterranean conditions. *Irrigation Science*, 36(2), 87–96.
30 doi:10.1007/s00271-017-0565-5
- 31 Domínguez-Niño JM, Oliver-Manera J, Girona J, Casadesús J (2020) Differential irrigation
32 scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture
33 sensors. **Agricultural Water Management** 228:105880.
34 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105880>
- 35 Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Crop Water Requirement: Food and Agriculture Organization
36 of the United Nations. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 144.
- 37 Euser T, Luxemburg WMJ, Everson CS, Mengistu MG, Clulow AD, Bastiaanssen WGM
38 (2014) A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb
39 temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences** 18:2021-2032.
40 <https://doi.org/10.5194/hess-18-2021-2014>

- 1 Fan X, Hu H, Huang G, Huang F, Li Y, Palta J (2015) Soil inoculation with *Burkholderia* sp.
2 LD-11 has positive effect on water-use efficiency in inbred lines of maize. **Plant and Soil**.
3 390:337–349. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2410-z>
- 4 Fausto MA, Machado NG, Nogueira JS, Biudes MS (2014) Net radiation estimated by remote
5 sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin. **Journal of Applied Remote**
6 **Sensing** 8:083541. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083541>
- 7 Flumignan DL, Faria RT, Lena BP (2012) Test of a microlysimeter for measurement of soil
8 evaporation. **Engenharia Agrícola** 32:80-90. [https://doi.org/10.1590/S0100-](https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100009)
9 [69162012000100009](https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100009)
- 10 Foong, S. F. (1993). Potential evapotranspiration, potential yield and leaching losses of oil
11 palm. In Proceedings of 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Module-Agriculture.
12 **Palm Oil Research Institute**, Malaysia, Kuala Lumpur, 105–119.
- 13 Fraga CIM, Sanches L, Pinto Junior OB, Curado LFA, Gaio DC (2015) Condutância do dossel,
14 condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia divergens* Pohl
15 (vochysiaceae) no pantanal brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia** 30:275–284.
16 <https://doi.org/10.1590/0102-778620130102>
- 17 Freitas LPS, Gava R, Faria TR, Rezende R, Vieira PVD (2014) Soil evaporation under different
18 straw mulch fractions. **African Journal of Agricultural Research** 9:1793-1800.
19 <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7854>
- 20 Friedrich K, Molders N, Tetzlaff G (2000) On the Influence of Surface Heterogeneity on the
21 Bowen-Ratio: A Theoretical Case Study. **Theoretical and Applied Climatology** 65:181-196.
22 <https://doi.org/10.1007/s007040070043>
- 23 Garcia VA, Barbedo CJ (2016) Estudo fenológico de *Bactris gasipaes* Kunth, *Euterpe edulis*
24 Mart. e *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman no Vale do Ribeira, SP, Brasil. **Hoehnea**
25 43:135-149. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2015>
- 26 Gavilán P, Berengena J (2007) Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for
27 measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science** 25:127-
28 140. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0040-1>
- 29 Girona J, Del Campo J, Mata M, Lopez G, Marsal J (2010) A comparative study of apple and
30 pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. **Irrigation Science**
31 29:55–63. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0217-5>
- 32 Guo Y, Sun L (2011) Surface energy fluxes and control of evapotranspiration from a *Carex*
33 *lasiocarpa* mire in the Sanjiang Plain, Northeast China. **International Journal of**
34 **Biometeorology** 56:221–232. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0415-8>
- 35 Heilman JL, McInnes KJ, Savage MJ, Gesh RW, Lascano RJ (1994) Soil and canopy energy
36 balance in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology** 71:99-114.
37 [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90102-3)
- 38 Homma AKO, Muller AA, Muller CH, Ferreira CAP, Figueirêdo FJC, Viegas IJM, Lemos WP
39 (2005) **Sistema de produção do açaí. Sistema de produção**. Versão eletrônica. Retrieved
40 from <https://www.infoteca>

- 1 .cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/408196/1/SISTEMAPROD4ONLINE.pdf accessed
2 Oct 26, 2019.
- 3 Hou LG, Xiao HL, Si JH, Zhou MX, Yang YG (2010) Evapotranspiration and crop coefficient
4 of *Populus euphratica* Oliv forest during the grow in season in the extreme arid region
5 northwest China. **Agricultural Water Management** 97:351-356.
6 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.022>
- 7 Hu S, Zhao C, Li J, Wang F, Chen Y (2013) Discussion and reassessment of the method used
8 for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrological Processes**
9 28:4506-4510. <https://doi.org/10.1002/hyp.9962>
- 10 Jazayeri SM, Rivera YD, Camperos-Reyes JE, Romero HM (2015) Physiological effects of
11 water deficit on two oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) genotypes. **Agronomía**
12 **Colombiana** 33:164-173. <https://doi.org/10.15446/agron.-colomb.v33n2.49846>
- 13 Kiggundu, N., Migliaccio, K.W., Schaffer, B. et al. (2012) Water savings, nutrient leaching,
14 and fruit yield in a young avocado orchard as affected by irrigation and nutrient management.
15 **Irrigation Science** 30, 275–286 <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0280-6>
- 16 Kustas WP, Prueger JH, Hatfield JL, Ramalingam H, Hipps LE (2000) Variability in soil heat
17 flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**, 103(3): 249-264.
18 doi:10.1016/s0168-1923(00)00131-3
- 19 Machado NG, Sanches L, Silva LB, Novais JWZ, Aquino AM, Biudes MS, Pinto-Junior OB,
20 Nogueira JS (2016) Soil nutrients and vegetation structure in a neotropical seasonal wetland.
21 **Applied Ecology and Environmental Research** 13:289-305.
22 https://doi.org/10.15666/aeer/1302_289305
- 23 McNaughton KG, Jarvis PG (1983) Predicting the effects of vegetation changes on transpiration
24 and evaporation. **Additional Woody Crop Plants** 1–47. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-424157-2.50007-0>
- 26 Meijide A, Röhl A, Fan Y, Herbst M, Niu F, Tiedemann F, June T, Rauf A, Hölscher D, Knohl
27 A (2017) Controls of water and energy fluxes in oil palm plantations: Environmental variables
28 and oil palm age. **Agricultural and Forest Meteorology**, 239, 71–85.
29 doi:10.1016/j.agrformet.2017.02.034
- 30 Montesano FF, Iersel VMW, Boari F, Cantore V, D’Amato G, Parente A (2018) Sensor-based
31 irrigation management of soilless basil using a new smart irrigation system: Effects of set-point
32 on plant physiological responses and crop performance. **Agricultural Water Management**
33 203:20–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.019>
- 34 Niaghi AR, Jia X, Steele DD, Scherer TF (2019) Drainage water management effects on energy
35 flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. **Agricultural Water**
36 **Management** 225:105760. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760>
- 37 Nizinski JJ, Galat G, Galat-Luong A (2014) Actual evapotranspiration and canopy resistance
38 measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). **Russian Journal of**
39 **Ecology** 45:359–366. <https://doi.org/10.1134/s1067413614050191>
- 40 Nogueira AKM, Santana AC (2016) Benefícios socioeconômicos da adoção de novas
41 tecnologias no cultivo do açaí no Estado do Pará. **Revista Ceres** 63:001-007.
42 <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010001>

- 1 Nygren A, Lacuna-Richman C, Keinänen K, Alsa L (2006) Ecological, socio-cultural,
2 economic and political factors influencing the contribution of non-timber forest products to
3 local livelihoods: Case studies from honduras and the Philippines. **Small-scale Forest**
4 **Economics, Management and Policy** 5:249-269. <https://doi.org/10.1007/s11842-006-0013-5>
- 5 Oliveira FJ, Farias PR, Silva AG, Rodrigues KC (2016) Distribuição espacial da leprose dos
6 citros na Amazônia Oriental. **Revista Ciência Agrônômica** 47:56-68.
7 <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160007>
- 8 Ortega-Farias S, Poblete-Echeverria C, Brisson N (2010) Parameterization of a two-layer model
9 for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. **Agricultural**
10 **and Forest Meteorology** 150:276–286. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.012>
- 11 Paço TA, Ferreira MI, Rosa RD, Paredes P, Rodrigues GC, Conceição N, Pacheco PA, Pereira
12 LS (2011) The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the
13 evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance
14 measurements. **Irrigation Science** 30:115–126. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0267-3>
- 15 Pereira AR, Azevedo PV, Lourenço ERC, Saboya LMF, Bezerra JRC (2017)
16 Evapotranspiração da cultura do gergelim irrigada na região da chapada do Apodí-RN. **Irriga**
17 **22:497-511**. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n3p497-511>
- 18 Perez PJ, Castellvi F, Ibañez M, Rosell JI (1999) Assessment of reliability of Bowen ratio
19 method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology** 97:141-50.
20 [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5)
- 21 Peters A, Groh J, Schrader F, Durner W, Vereecken H, Pütz T (2017) Towards an unbiased
22 filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter
23 measurements. **Journal of Hydrology** 549:731-740.
24 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.015>
- 25 Prueger JH, Parry CK, Kustas WP, Alfieri JG, Alsina MM, Nieto H, Wilson TG, Hipps LE,
26 Anderson MC, Hatfield JL, Gao F, Lynn G, McKee LG, McElrone A, Agam N, Los SA (2018)
27 Crop Water Stress Index of an irrigated vineyard in the Central Valley of California. **Irrigation**
28 **Science** 37:297–313. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0598-4>
- 29 Rana G, Katerji N (1996) Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: The sweet
30 sorghum case. **Theor Appl Climatol** 54, 187–200. <https://doi.org/10.1007/BF00865161>
- 31 Rana G, Katerji N (2000) Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field
32 under Mediterranean climate: A review. **European Journal of Agronomy** 13:125-153.
33 [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- 34 Santana AC, Santana ÁL, Nogueira AKM (2007) Retornos à escala e vantagem competitiva de
35 custo das empresas de polpa de frutas no estado do Pará. **Amazônia: Ciência &**
36 **Desenvolvimento** 2:187-203. accessed jun 26, 2019.
- 37 Savage MJ (2010) Field Evaluation of Polymer Capacitive Humidity Sensors for Bowen Ratio
38 Energy Balance Flux Measurements. **Sensors** 10(8), 7748–7771. doi:10.3390/s100807748
- 39 Silber A, Naor A, Cohen H, Bar-Noy Y, Yechieli N, Levi M, Noy M, Peres D, Duari K, Narkis
40 S, Assouline S (2019) Irrigation of “Hass” avocado: effects of constant vs. temporary water
41 stress. **Irrigation Science** 37:451–460. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>

- 1 Silva BB, Silva STA, Gomes HB (2011) Balanço de Radiação no Perimetro Irrigado São
2 Gonçalo – PB mediante imagens Orbitais. **Revista Caatinga** 24:143-152. Retrieved from
3 <http://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/sistema>. accessed feb 10, 2019.
- 4 Silva LDB, Lyra GB, Silva JBG, Pinho CF, Nascentes AL, Almeida GV, Folegatti MV (2016)
5 Desempenho do método do balanço de energia - razão de bowen na estimativa da
6 evapotranspiração de referência. **Irriga** 21:516-529.
7 <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n3p516-529>
- 8 Silva PA, Cosme VS, Rodrigues KCB, Detmann KSC, Leão FM, Cunha RL, Buselli RAF,
9 DaMatta FM, Pinheiro HA (2017) Drought tolerance in two oil palm hybrids as related to
10 adjustments in carbon metabolism and vegetative growth. **Acta Physiologiae Plantarum**
11 39:58. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2354-4>
- 12 Silva TJÁ, Folegatti MV, Silva CR, Alves Júnior J, Bonfim-Silva EM (2007) Balanço de
13 energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método
14 da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola** 27:392-403. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300008>
- 16 Silva VPR, Azevedo PV, Silva BB (2007) Surface energy balance and evapotranspiration of a
17 mango orchard grown in a semiarid environment. **Agronomy Journal** 99:1391-1396.
18 <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0232>
- 19 Sinclair TR, Holbrook NM, Zwieniecki MA (2005) Daily transpiration rates of woody species
20 on drying soil. **Tree Physiology** 25:1469–1472. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.11.1469>
- 21 Sousa IF, Netto AOA, Campeche LFMS, Barros AC, Silva VPR, Azevedo PV (2011) Lisímetro
22 de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado.
23 **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:526–532.
24 <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500014>
- 25 Souza LAS, Jardim MAG (2007) Produção foliar de mudas de açazeiro (*Euterpe oleracea*
26 Mart.) em área de vegetação secundária no Nordeste Paraense. **Revista Brasileira de**
27 **Biociências** 5:225-227. Retrieved from
28 <http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/222/215>. accessed Jul 02, 2019.
- 29 Souza PJOP, Rodrigues JC, Sousa AML, Lima RT, Rocha EJP, Ortega-Farias S (2016) Water
30 requirement estimate for the reproductive period of mango orchards in the Northeast of the state
31 of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura** 3:311. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016311>
- 33 Souza PJOP, Rodrigues JC, Sousa AML, Souza EB (2018) Diurnal Energy Balance in a Mango
34 Orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia** 33:537-546.
35 <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786333012>
- 36 Souza RORM, Amaral MACM, Silvestre WVD, Sacramento TM (2013) Avaliação econômica
37 da irrigação em pomares de açaí. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** 7:54–65.
38 <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v7n100004>
- 39 Steduto PTC, Hsiao TC, Fereres E (2007) On the conservative behavior of biomass water
40 productivity. **Irrigation Science**. 25(3): 189-207. doi:10.1007/s00271-007-0064-1
- 41 Taiz L, Zeiger E (2009) **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre.

- 1 Tanner CB, Sinclair TR (1983) Efficient water use in crop production: research or re-search?
2 In: Taylor HM, Jordan WA, Sinclair TR (eds) **Limitations to efficient water use in crop**
3 **production**. ASA, Madison, pp 1–27
- 4 Taylor NJ, Mahohoma W, Vahrmeijer JT, Gush MB, Allen RG, Annandale JG (2014) Crop
5 coefficient approaches based on fixed estimates of leaf resistance are not appropriate for
6 estimating water use of citrus. **Irrigation Science** 33:153–166.
7 <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-014-0455-z>
- 8 Teixeira AHC, Bastiaanssen WGM (2012) Five methods for interpret Field measurements of
9 energy fluxes over a micro-sprinkler irrigated mango orchard. **Irrigation Science** 30:13-28.
10 <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>
- 11 Tsai JL, Tsuang BJ, Lu PS, Chang KH, Yao MH, Shen Y (2010) Measurements of
12 Aerodynamic Roughness, Bowen Ratio, and Atmospheric Surface Layer Height by Eddy
13 Covariance and Tethersonde Systems Simultaneously over a Heterogeneous Rice Paddy.
14 **Journal of hydrometeorology** 11:452-466. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JHM1131.1>
- 15 Viana JL, Zolin CA, Silva VQR, Souza AP (2019) Physiological and productive responses of
16 irrigated oil palm in early development phase. **Irriga** 24:405-423.
17 <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p405-423>
- 18 Wijewardana C, Alsajri, FA, Irby JT, Krutz LJ, Golden B, Henry WB, Gao W, Reddy KR
19 (2019) Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential
20 and spectral features, **Journal of Plant Interactions** 14:533-543.
21 <http://dx.doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>
- 22 Wrigth JL (1982) New evapotranspiration crop coefficient. **Journal of the Irrigation and**
23 **Drainage Division** 108:57-74. Retrieved from <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/382>.
24 Accessed Jul 19, 2019.
- 25 Xu G, Xue X, Wang P, Yang Z, Yuan W, Liu X, Lou C (2018) A lysimeter study for the effects
26 of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize.
27 **Agricultural Water Management** 208:1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.040>
- 28 Zwart SJ, Bastiaanssen WGM (2004) Review of measured crop water productivity values for
29 irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agricultural Water Management** 69:115–133.
30 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>