



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

JEFFERSON DOS SANTOS MARTINS

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE E NO
RENDIMENTO DE ÓLEO ESSENCIAL DA PIMENTEIRA-DO-REINO NA
MICRORREGIÃO DE CASTANHAL, PARÁ**

BELÉM

2024

JEFFERSON DOS SANTOS MARTINS

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE E NO
RENDIMENTO DE ÓLEO ESSENCIAL DA PIMENTEIRA-DO-REINO NA
MICRORREGIÃO DE CASTANHAL, PARÁ**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Agronomia: área de concentração Socioeconomia, recursos naturais e desenvolvimento do agronegócio, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Alves de Lima Junior

BELÉM

2024

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

M379m Martins, Jefferson dos Santos

MANEJO DA IRRIGAÇÃO E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE E NO RENDIMENTO DE ÓLEO
ESSENCIAL DA PIMENTEIRA-DO-REINO NA MICRORREGIÃO DE CASTANHAL, PARÁ /

Jefferson dos Santos Martins. - 2024.

85 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia(PPGA), Campus Universitário
de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Alves de Lima Junior

1. Piper nigrum L.. 2. Pipericultura. 3. Tensiometria. 4. Estresse hídrico. 5. Agricultura irrigada. I.
Lima Junior, Joaquim Alves de, *orient.* II. Título

CDD 631.709811

JEFFERSON DOS SANTOS MARTINS

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE E NO
RENDIMENTO DE ÓLEO ESSENCIAL DA PIMENTEIRA-DO-REINO NA
MICRORREGIÃO DE CASTANHAL, PARÁ**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Agronomia: área de concentração Socioeconomia, recursos naturais e desenvolvimento do agronegócio, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovado em 16 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Alves de Lima Junior
Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Profa. Dra. Maryjane Diniz de Araújo Gomes
Instituto Federal do Pará – IFPA

Profa. Dra. Mariana Casari Parreira
Universidade do Açores – UAC

Dr. Oriel Filgueira de Lemos
Embrapa Amazônia Oriental – EMBRAPA

Dedico,

A minha esposa e filho,
Marcieli de Sousa David e Guilherme David de Brito.

A minha mãe e avó,
Lúcia dos Santos Martins e Gilda dos Santos Martins.

Aos meus irmãos,
Lucas Martins de Andrade e Lucélia Martins de Andrade.

Aos meus saudosos, avô e padrasto,
João de Deus da Veiga Martins e Edmilson Cardoso de Andrade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por me possibilitar vivenciar mais uma conquista acadêmica e conseqüente evolução profissional, pois sem o seu amparo nas ocasiões de fragilidade e incerteza, este momento não se tornaria possível.

A minha mãe e irmãos, pela motivação e por todas as condições oferecidas em meio as tantas dificuldades (emocionais e financeiras) enfrentadas para que esse sonho se realizasse.

A minha amada, Marcieli de S. David, pelas palavras e gestos de incentivo quando minha fé fraquejou, e pelo seu incondicional amor e companheirismo que foram combustível para seguir em frente.

A Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), pela oportunidade de cursar uma pós-graduação em nível de mestrado de forma gratuita e inclusiva, por intermédio do Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAGRO).

Aos docentes do PPGAGRO, que contribuíram na minha formação com as suas superestimadas experiências profissionais e conhecimentos específicos, em especial, aos professores Alessandro C. de Araújo, Paulo Jorge de O. P. de Souza, Mário Lopes da S. Junior e Joaquim Alves de L. Junior.

A secretária do PPGAGRO, senhorita Neila S. Nazaré, carinhosamente conhecida por todos como Nena, por ser tão solícita e cordial em sanar as minhas eventuais dúvidas durante o transcorrer do curso.

Ao meu orientador Joaquim Alves de L. Junior, pela oportunidade que me foi concedida de trabalhar com uma temática de extrema relevância para o desenvolvimento do agronegócio brasileiro e; pela confiança de aceitar ser meu orientador e, dessa maneira, ter contribuído significativamente na minha formação acadêmica com o seu profissionalismo e na minha vida pessoal através da sua amizade.

A Eng. Agro. DSc. Helane Cristina A. Santos, pela amizade recíproca e por todo empenho, interesse e atenção em compartilhar a sua expertise sobre a temática desta pesquisa, uma vez que a sua colaboração na forma de coorientação foi essencial para a condução da pesquisa em campo e para o tratamento dos dados coletados nele.

Ao Eng. Agro. MSc. Marcos Augusto de S. Gonçalves, pela amizade construída ao longo dos anos de curso, fortalecida por todo apoio logístico, material e, por vez, emocional durante os momentos de angústia e incertezas, os quais foram determinantes para a finalização de mais esta etapa acadêmica.

Ao Grupo de Estudos de Engenharia de Água e Solo na Amazônia (GEEASA), pelo acolhimento e companheirismo, em especial, aos Eng. Agro. MSc. Ermano Prévoir e Rafaela da S. Guerino pelo auxílio nas atividades de campo.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela parceria consolidada com a UFRA através do projeto Supimpa – Produção Sustentável de Pimenta-do-reino, sendo assim, viabilizada a realização desta pesquisa.

A empresa de Produtos Tropicais de Castanhal LTDA (TROPOC), pelo financiamento do projeto de pesquisa, pela área experimental cedida em suas dependências e pelo aporte técnico e de mão-de-obra para a condução do experimento em campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos em nível de mestrado.

A Faculdade de Agronomia (FAGRO) de Cametá/PA, da Universidade Federal do Pará UFPA (UFPA), pela concessão do seu laboratório para realização das extrações dos óleos essenciais, em especial, ao coordenador Prof. Rafael C. Ribeiro e ao Eng. Agro. MSc. Evaldo M. da Silva.

Minha gratidão a todos!

“Aquele que conhece as doçuras e as virtudes do solo, das águas, das plantas, dos céus, e como se aproximar desses encantamentos, este é o homem rico e de realeza.”

(RALPH W. EMERSON, 2014)

RESUMO

A pimenteira-do-reino é a espécie de maior valor econômico do gênero *Piper*, devido à valorização dos seus frutos condimentares no mercado internacional. A utilização de cultivares de alto potencial produtivo sob áreas irrigadas, estão entre os principais fatores que proporcionaram lugar de destaque à pipericultura nacional no cenário internacional. As definições de quando e quanto irrigar são procedimentos inerentes ao manejo da irrigação, através dos quais se define de modo eficiente o momento dos eventos de irrigação e suas respectivas lâminas d'água. Nesse contexto, objetivou-se com a realização deste trabalho avaliar o rendimento do óleo essencial de pimenta-do-reino, e o desempenho produtivo de genótipos de pimenteira-do-reino, em função do manejo da irrigação por tensiometria, nas condições edafoclimáticas da microrregião de Castanhal, no estado do Pará. O estudo foi realizado durante o ano de 2023, no pimental experimental da Empresa de Produtos Tropicais de Castanhal LTDA – TROPOC, localizado no município de Castanhal-PA. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial de parcelas subdivididas 5 x 2, com dez tratamentos e três blocos. Os tratamentos foram constituídos por cinco tensões críticas de água no solo (15, 25, 35, 45 e 55 kPa), sendo avaliadas nas parcelas, e dois genótipos de pimenteira-do-reino (Clonada e Uthirankotta), analisadas nas subparcelas. As variáveis analisadas foram: produção de pimenta verde (Ppv), produção de fruto de pimenta verde (PFpv), produção de pimenta preta (Ppp), rendimento de pimenta preta (Rpp), produtividade (PROD), eficiência de uso de água (EUA) e rendimentos de extração de óleo essencial (R_e) e sua relação com Ppv, Ppp, PROD e EUA, por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r). Através da análise dos resultados, constatou-se que o genótipo Uthirankotta demonstrou os maiores valores de produção (Ppv, PFpv e Ppp) e produtividade de pimenta-do-reino, sendo também mais eficiente no uso da água de irrigação (EUA) que o genótipo Clonada. Verificou-se ainda que a Uthirankotta superou, em cerca de 34%, a Clonada na avaliação de R_e sob a tensão de 15 kPa, na qual foram obtidos os valores máximos de R_e . Os valores de r de Pearson revelaram que há correlação positiva significativa entre as variáveis relacionadas. Nas condições edafoclimáticas da microrregião de Castanhal-PA, a maior produtividade e eficiência no uso da água de irrigação na cultura da pimenteira-do-reino e o maior rendimento de extração de óleo essencial, são obtidos com o genótipo Uthirankotta sob as tensões de 35 e 15 kPa, respectivamente.

Palavras-chave: *Piper nigrum* L.; tensiometria; estresse hídrico; irrigação na Amazônia.

ABSTRACT

The black pepper tree is the species with the greatest economic value in the *Piper* genus, due to the appreciation of its spicy fruits on the international market. The use of cultivars with high productive potential in irrigated areas are among the main factors that gave national pipericulture a prominent place on the international scene. The definitions of when and how much to irrigate are procedures inherent to irrigation management, through which the timing of irrigation events and their respective water depths are efficiently defined. In this context, the objective of carrying out this work was to evaluate the yield of black pepper essential oil, and the productive performance of black pepper genotypes, as a function of irrigation management by tensiometry, in the edaphoclimatic conditions of the microregion of Castanhal, in the state of Pará. The study was carried out during the year 2023, in the experimental pepper plantation of Empresa de Produtos Tropicais de Castanhal LTDA – TROPOC, located in the municipality of Castanhal-PA. The experimental design used was randomized blocks (DBC), in a 5 x 2 split-plot factorial scheme, with ten treatments and three blocks. The treatments consisted of five critical soil water tensions (15, 25, 35, 45 and 55 kPa), being evaluated in the plots, and two black pepper cultivars (Clonada and Uthirankotta), analyzed in the subplots. The variables analyzed were: green pepper production (Ppv), green pepper fruit production (PFpv), black pepper production (Ppp), black pepper yield (Rpp), productivity (PROD), water use efficiency (EUA) and essential oil extraction yields (R_e) and their relationship with Ppv, Ppp, PROD and EUA, using Pearson's correlation coefficient (r). Through analysis of the results, it was found that the Uthirankotta genotype demonstrated the highest production values (Ppv, PFpv and Ppp) and productivity of black pepper, being also more efficient in the use of irrigation water (EUA) than the Cloned genotype. It was also found that the Uthirankotta genotype outperformed the Clonada genotype by approximately 34% in the R_e evaluation under a tension of 15 kPa, in which the maximum R_e values were obtained. Pearson's r values revealed that there is a significant positive correlation between the related variables. In the edaphoclimatic conditions of the Castanhal-PA microregion, the highest productivity and efficiency in the use of irrigation water in black pepper cultivation and the highest essential oil extraction yield are obtained with the Uthirankotta genotype under tensions of 35 and 15 kPa, respectively.

Keywords: *Piper nigrum* L; tensiometry; hydrical stress; irrigation in the Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ramos ortotrópico (A) e plagiotrópico (B) de <i>Piper nigrum</i>	20
Figura 2 – Inflorescência (A) e frutos imaturos (B) de <i>Piper nigrum</i>	21
Figura 3 – Área colhida, quantidade produzida e produtividade de pimenta-do-reino, entre 2001 e 2021, à nível mundial.....	23
Figura 4 – Área colhida, quantidade produzida e produtividade de pimenta-do-reino no Brasil entre 2001 e 2022.....	25
Figura 5 – Área destinada à colheita (AC), quantidade produzida (PROD) e tendência produtiva do cultivo de pimenta-do-reino nos estados do Pará e Espírito Santo entre 2001 e 2022.....	26
Figura 6 – Área irrigada total no Brasil e participação das regiões geográficas em 2019	28
Figura 7 – Área irrigada das unidades federativas da região Norte do Brasil em 2019	29
Figura 8 – Cultivo de pimenta-do-reino sob irrigação localizada por gotejamento no estado do Pará. 31	
Quadro 1 – Características hídricas e climáticas da irrigação, segundo a relação entre evapotranspiração e precipitação efetiva.....	32
Figura 9 – Manejo da irrigação por tensiometria, com potencial mátrico crítico de -55 kPa, na cultura da pimenteira-do-reino.....	34
Figura 10 – Evolução dos potenciais hídricos do solo (Ψ_{ws}), folhas (Ψ_{wf}) e raízes (Ψ_{wr}) em resposta ao déficit hídrico de uma cultura a partir da capacidade de campo (C.C.).....	37
Figura 11 – Mapa de localização da área experimental	41
Figura 12 – Médias mensais de temperaturas máximas ($T_{Máx}$) e mínimas ($T_{Mín}$), radiação global (RAD), umidade relativa (UR) e precipitação pluviométrica (PREC) verificadas durante o ano de 2023	42
Figura 13 – Balanço hídrico mensal do município de Castanhal entre os anos de 2003 e 2022.....	43
Figura 14 – Períodos de excedente, deficiência, retirada e reposição hídrica do município de Castanhal entre os anos de 2003 e 2022	43
Figura 15 – Esquema geral das parcelas experimentais utilizadas no bioensaio em campo, sem escala	45
Figura 16 – Válvulas solenóides (A) e caixas d’água (B) utilizadas nos eventos de irrigação	46
Figura 17 – Instalação dos tensiômetros (A) e leitura das tensões de água no solo (B).....	48
Figura 18 – Curva característica de água no solo da área experimental	49
Figura 19 – Colheita manual de pimenta-do-reino (A), pesagem de pimenta verde (B) e debulhador de frutos (C).....	51

Figura 20 – Ventilador manual (A) e separação de resíduos dos frutos secos (B).....	52
Figura 21 – Pesagem (A), preparação (B) e hidrodestilação (C) das amostras de pimenta-do-reino....	55
Quadro 2 – Interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson (r)	56
Figura 22 – Lâminas de irrigação aplicadas em função das tensões críticas de água no solo.....	57
Figura 23 – Produção de pimenta verde (Ppv) entre os genótipos Clonada e Uthirankotta sob diferentes tensões críticas de água no solo.....	60
Figura 24 – Produção de frutos de pimenta verde (PFpv) entre os genótipos Clonada e Uthirankotta sob diferentes tensões críticas de água no solo.....	61
Figura 25 – Rendimento de pimenta preta (Rpp) entre os genótipos de pimenteira-do-reino Clonada e Uthirankotta em Castanhal, PA.....	62
Figura 26 – Produção de pimenta preta (Ppp) dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo	63
Figura 27 – Produtividade (PROD) de pimenta preta dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo.....	64
Figura 28 – Eficiência de uso de água (EUA) dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo	65
Figura 29 – Rendimento de extração (R_e) de óleo essencial de pimenta preta dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo.....	67
Figura 30 – Correlação entre o rendimento de extração (R_e) de óleo essencial e as produções de pimenta verde (Ppv) (A) e de pimenta preta (Ppp) (B), produtividade (PROD) (C) e eficiência de uso de água (EUA) (D) da pimenteira-do-reino sob manejo de irrigação por tensiometria em Castanhal, PA.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização das principais cultivares (genótipos) de pimenteira-do-reino	22
Tabela 2 – Distribuição percentual das propriedades químicas de cultivares de pimenteira-do-reino .	22
Tabela 3 – Área colhida, produção e produtividade de pimenta-do-reino dos principais países produtores, no ano de 2021	24
Tabela 4 – Área irrigada atual e potencial de expansão da agricultura irrigada no estado do Pará	29
Tabela 5 – Caracterização química dos frutos de <i>Piper nigrum</i> explorados comercialmente pelo Brasil	40
Tabela 6 – Caracterização físico-química do solo antes do plantio das pimenteiras-do-reino.....	44
Tabela 7 – Propriedade química do solo experimental no quarto ano produtivo das pimenteiras-do-reino	44
Tabela 8 – Lâmina bruta (L_B), Lâmina média (L_m), volume de irrigação por planta (V_I), lâmina total aplicada (w), precipitação pluviométrica (PREC), número de irrigações (NI), turno de rega (TR) e demanda hídrica (DH) do manejo de irrigação na cultura da pimenteira-do-reino em Castanhal, PA .	58
Tabela 9 – Resumo da análise de variância para produção de pimenta verde (Ppv), produção de fruto de pimenta verde (PFpv), produção de pimenta preta (Ppp), rendimento de pimenta preta (Rpp), produtividade (PROD), eficiência de uso de água (EUA) e rendimento de extração de óleo essencial (R_e) em genótipos de pimenteira-do-reino submetidos à tensões de água no solo em Castanhal, PA	59
Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o rendimento de extração (R_e) de óleo essencial e as variáveis respostas de produção (Ppv, Ppp e PROD) e de uso eficiente de água (EUA) da pimenteira-do-reino sob manejo de irrigação por tensiometria em Castanhal, PA	68

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
2 MANEJO DA IRRIGAÇÃO E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE E NO RENDIMENTO DE ÓLEO ESSENCIAL DA PIMENTEIRA-DO-REINO NA MICRORREGIÃO DE CASTANHAL, PARÁ	15
RESUMO	15
ABSTRACT	16
2.1 Introdução	16
2.2 Revisão de Literatura	18
2.2.1 Origem da pimenteira-do-reino	18
2.2.2 Aspectos botânicos.....	19
2.2.3 Genótipos	21
2.2.4 Pipericultura	22
2.2.5 Irrigação na cultura da pimenteira-do-reino no estado do Pará.....	27
2.2.6 Uso da tensiometria no manejo da irrigação	31
2.2.7 Influência do estresse hídrico no metabolismo vegetal.....	35
2.2.8 Efeitos de fatores abióticos no rendimento de óleos essenciais	38
2.3 Materiais e Métodos	41
2.3.1 Localização da área experimental	41
2.3.2 Condições edafoclimáticas do experimento	41
2.3.3 Condução agrônômica das cultivares de pimenteira-do-reino	44
2.3.4 Uso da tensiometria no manejo da irrigação	47
2.3.5 Delineamento experimental.....	50
2.3.6 Colheita e processamento dos grãos.....	51
2.3.7 Parâmetros produtivos avaliados.....	52
2.3.8 Determinações dos rendimentos das extrações de óleo essencial	54
2.3.9 Análise estatística dos dados e interpretação do coeficiente de Pearson (<i>r</i>)	55
2.4 Resultados e Discussão	56
2.4.1 Manejo da irrigação.....	56
2.4.2 Desempenho produtivo e eficiência de uso da água.....	59
2.4.3 Rendimento de óleo essencial e sua relação com a produção de pimenta preta.....	66
2.5 Conclusões	70
REFERÊNCIAS (DO ARTIGO)	70
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS (GERAL)	81

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A pimenteira-do-reino (*Piper nigrum* L.), pertencente à família das Piperaceae, é certamente a espécie de maior valor econômico do gênero *Piper*, devido à valorização superestimada dos seus frutos condimentares no mercado internacional. É uma planta trepadeira, com hábito perene e caule constituído por ramos de crescimento vertical, conduzidos em tutor, e ramos de frutificação, responsáveis pela produção das pimentas. No estado do Pará, a especiaria se estabeleceu como uma cultura agrícola no início do século XX, por meio da introdução do genótipo Cingapura nas áreas produtoras do Estado (ALBUQUERQUE; DUARTE, 1986; ALBUQUERQUE; CONDURÚ, 1971; DIAS, 2006).

A cultura da pimenteira-do-reino (pipericultura) é incentivada pelo alto valor de mercado dos grãos (pimenta verde, pimenta preta e pimenta branca) e subprodutos extraídos de óleos essenciais (piperina e óleo-resina) em diversos seguimentos industriais. Nesse contexto, além das indústrias alimentícias, os setores de cosméticos e fármacos, também contribuem significativamente para a valorização da atividade agrícola no âmbito nacional e, especialmente, internacional (EMBRAPA, 2004; DUARTE *et al.* 2006).

Segundo levantamento realizado pela *Food and Agriculture Organization* – FAO (2023), no ano de 2021, a pipericultura brasileira alcançou um expressivo rendimento médio de grãos de 31.073 kg ha⁻¹, com 37.994 ha de área colhida. Apesar do país ocupar a segunda posição entre os principais produtores de pimenta-do-reino, sendo superado apenas pela produção verificada no Vietnã, no ano supracitado a produção brasileira, juntamente com o volume produzido pela pipericultura vietnamita (288.167,21 t), contribuíram com mais de 50% na produção de pimenta-do-reino à nível global (FAOSTAT, 2023).

Na conjuntura nacional, as regiões que se destacaram no ano de 2023, na produção de pimenta-do-reino acumulada pelo Brasil (118.057 t) foram o Sudeste (61,5%), Norte (30,2%) e Nordeste (8,2%). Na região sudeste encontra-se o principal Estado brasileiro produtor de pimenteira-do-reino, o Espírito Santo (72.084 t), enquanto na região norte do país, os maiores índices de produção de frutos foram encontrados no estado do Pará (35.469 t) (IBGE/SIDRA, 2023). Além da sazonalidade da colheita e dos elevados preços de mercado praticados em anos anteriores, a utilização de genótipos de bom rendimento produtivo, cultivados sob áreas irrigadas, estão entre os principais fatores de produção que proporcionaram lugar de destaque à pipericultura capixaba no cenário brasileiro (EMBRAPA, 2004; Vidal, 2020).

De acordo com Bernardo *et al.* (2019), o desenvolvimento de cultivos irrigados possibilita ganhos de rentabilidade aos agricultores, em função dos incrementos de

produtividade alcançados pelas culturas. A reposição de água às culturas agrícolas, transpirada pela planta e evaporada pelo solo, caracteriza-se como um trato cultural essencial para o desenvolvimento do vegetal, visando sua máxima produtividade. Contudo, a negligência de técnicas de manejo racional da irrigação em cultivos irrigados, pode degenerar fatores de estresse hídrico, seja por excesso ou escassez de água, com potenciais efeitos que viabilizam alterações de função física ou química nas plantas.

As definições eficientes de quando e quanto irrigar são procedimentos inerentes ao manejo da irrigação, os quais são determinados a partir da lâmina de irrigação, frequência e intensidade de aplicação de água efetuada pelo sistema. No manejo via solo por tensiometria, realiza-se o monitoramento do potencial matricial (tensão) de água no solo, através de tensiômetros instalados na profundidade efetiva do sistema radicular da cultura de interesse. As leituras realizadas nesses instrumentos, definem o momento dos eventos de irrigação, bem como, as lâminas a serem aplicadas (BRAGA; CALGARO, 2010).

A dinâmica de água nos solos agrícolas e sua consequente disponibilidade às culturas é regimentada pelo sistema solo-água-planta-atmosfera. Nesse fluxo natural, são transferidos altos volumes da água armazenada no solo para a atmosfera, acarretando na diminuição do potencial hídrico do solo e do conteúdo de água da planta, submetendo à cultura ao déficit hídrico (LOPES *et al.* 2011).

Em condições de escassez hídrica, as mudanças fisiológicas em detrimento do estresse são fatores capazes de desencadear perdas significativas de produtividade, contudo, estudos realizados com o objetivo de avaliar a influência do estresse hídrico sobre a composição e rendimento de óleos essenciais demonstram que o déficit hídrico pode aumentar em até duas vezes o rendimento de óleo essencial, especialmente em espécies aromáticas e condimentares (TAIZ; ZEIGER, 2013; SIMON *et al.* 1992; GOBBO-NETO; LOPES, 2007).

Nesse contexto, a hipótese testada neste trabalho é de que o déficit hídrico aumenta o rendimento de óleo essencial extraído da pimenta preta e diminui a produtividade de grãos durante o terceiro ano produtivo dos genótipos de pimenteira-do-reino Clonada e Uthirankota. Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram:

Objetivo principal:

Avaliar o rendimento do óleo essencial de pimenta preta, e o desempenho produtivo da pimenteira-do-reino, em função do manejo da irrigação por tensiometria, nas condições edafoclimáticas da microrregião de Castanhal, no estado do Pará.

Objetivos específicos:

- I. Determinar os parâmetros de produção dos genótipos de pimenteira-do-reino Clonada e Uthirankota sob diferentes tensões críticas de água no solo.
- II. Estimar a eficiência de uso de água pelos genótipos Clonada e Uthirankota em função de lâminas de irrigação aplicadas durante o terceiro ano produtivo da pimenteira-do-reino.
- III. Determinar os rendimentos dos óleos essenciais de pimenta preta dos genótipos Clonada e Uthirankota submetidos a diferentes lâminas de água no solo.
- IV. Estabelecer a correlação entre o rendimento de óleo essencial e os parâmetros de produção e de eficiência de uso da água da pimenteira-do-reino sob manejo de irrigação.

2 MANEJO DA IRRIGAÇÃO E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE E NO RENDIMENTO DE ÓLEO ESSENCIAL DA PIMENTEIRA-DO-REINO NA MICRORREGIÃO DE CASTANHAL, PARÁ

RESUMO: A pimenteira-do-reino é uma espécie perene e trepadeira pertencente à família das piperaceae, que se adaptou de maneira eficiente as condições edafoclimáticas amazônicas. Nos últimos anos, o cultivo de genótipos de alto rendimento, somado ao uso de tecnologias como a irrigação, tem contribuído para incrementos expressivos de produtividade na pipericultura nacional. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o desempenho produtivo e o rendimento de óleo essencial em genótipos de pimenteira-do-reino submetidos ao manejo da irrigação por tensiometria. Para tanto, realizou-se o bioensaio em campo, durante o ano de 2023, no pimental experimental da Empresa de Produtos Tropicais de Castanhal LTDA – TROPOC, localizada no município de Castanhal-PA. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial de parcelas subdivididas 5 x 2, com dez tratamentos e três blocos. Os tratamentos foram constituídos por cinco tensões críticas de água no solo (15, 25, 35, 45 e 55 kPa), sendo avaliadas nas parcelas, e dois genótipos de pimenteira-do-reino (Clonada e Uthirankotta), analisados nas subparcelas. A partir destes tratamentos, foram avaliadas as respostas de produção de pimenta verde (Ppv), produção de fruto de pimenta verde (PFpv), produção de pimenta preta (Ppp), rendimento de pimenta preta (Rpp), produtividade (PROD), eficiência de uso de água (EUA) e rendimentos de extração de óleo essencial (Re) e sua relação com Ppv, Ppp, PROD e EUA, por meio do coeficiente de Pearson (r). Os resultados obtidos demonstraram que o genótipo Uthirankotta apresentou maiores médias de produção ($4,76 \text{ kg planta}^{-1}$) e produtividade ($6.979,29 \text{ kg ha}^{-1}$) de pimenta-do-reino e maior eficiência no uso da água de irrigação ($15,48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) quando comparado ao genótipo Clonada. Além disso, constatou-se que a Uthirankotta também superou a Clonada na avaliação de R_e , expressando o percentual de 5,09% sob a tensão de 15 kPa. Os valores de r de Pearson revelaram que há correlação positiva entre as variáveis relacionadas. O genótipo Uthirankotta expressa os maiores índices de produção, produtividade e eficiência de uso da água de irrigação sob a tensão de 35 kPa (15 mm ou $11,9 \text{ L planta}^{-1}$) e o maior rendimento de extração de óleo essencial sob a tensão de 15 kPa ($6,4 \text{ mm}$ ou $5,0 \text{ L planta}^{-1}$).

Palavras-chave: *Piper nigrum* L.; pipericultura; tensiometria; agricultura irrigada.

ABSTRACT: The black pepper tree is a perennial, climbing species belonging to the piperaceae family, which has efficiently adapted to Amazonian soil and climate conditions. In recent years, the cultivation of high-yield genotypes, combined with the use of technologies such as irrigation, has contributed to significant increases in productivity in national pipericulture. To this end, the bioassay was carried out in the field, during the year 2023, in the experimental pepper plantation of Empresa de Produtos Tropicais de Castanhal LTDA – TROPOC, located in the municipality of Castanhal-PA. The experimental design used was randomized blocks (DBC), in a 5 x 2 split-plot factorial scheme, with ten treatments and three blocks. The treatments consisted of five critical soil water tensions (15, 25, 35, 45 and 55 kPa), being evaluated in the plots, and two black pepper genotypes (Clonada and Uthirankotta), analyzed in the subplots. From these treatments, the responses of green pepper production (Ppv), green pepper fruit production (PFpv), black pepper production (Ppp), black pepper yield (Rpp), productivity (PROD), efficiency of water use (EUA) and essential oil extraction yields (R_e) and their relationship with Ppv, Ppp, PROD and EUA, using the Pearson coefficient (*r*). The results obtained demonstrated that the Uthirankotta genotype presented higher production averages (4,76 kg plant⁻¹) and productivity (6.979,29 kg ha⁻¹) of black pepper and greater efficiency in the use of irrigation water (15,48 kg ha⁻¹ mm⁻¹) when compared to the Clonada genotype. Furthermore, it was found that the Uthirankotta also outperformed the Clonada in the R_e evaluation, expressing a percentage of 5,09% under a tension of 15 kPa. Pearson's *r* values revealed that there is a positive correlation between the related variables. The Uthirankotta genotype expresses the highest production rates, productivity and efficiency of use of irrigation water under the tension of 35 kPa (15 mm or 11,9 L plant⁻¹) and the highest yield of essential oil extraction under the tension of 15 kPa (6,4 mm or 5,0 L plant⁻¹).

Keywords: *Piper nigrum* L.; pipericulture; tensiometry; irrigated agriculture.

2.1 Introdução

De origem indiana, a pimenteira-do-reino (*Piper nigrum* L.) é uma espécie perene, lenhosa, trepadeira e integrante da família piperaceae (ALBUQUERQUE; CONDURÚ, 1971). É uma planta autógama que se adaptou de maneira eficiente as condições edafoclimáticas amazônicas (ALBUQUERQUE *et al.* 1997; FILGUEIRAS *et al.* 2014). A floração ocorre durante os meses de maior precipitação pluviométrica na região, entre dezembro a abril. A

polinização ocorre por geitonogamia (dispersão do pólen por meio de água) e a colheita se inicia aos seis meses após a fecundação (POLTRONIERI *et al.* 2020).

O cultivo comercial da espécie na região amazônica ocorre por meio de estacas retiradas do terço médio da planta, constituídas de um a três nós, garantindo uniformidade e produtividade aos cultivos no primeiro ano (ALBUQUERQUE; DUARTE, 1979; CRASQUE *et al.* 2021). No entanto, a propagação vegetativa das plantas por estaquia e a baixa variabilidade genética dos genótipos utilizados ao longo dos anos, contribuíram consideravelmente para disseminação de doenças fúngicas e viróticas que reduziram o ciclo de produção da cultura para em média de cinco a seis anos (POLTRONIERI *et al.* 2000; LEMOS, 2003).

O início do cultivo comercial da pimenteira-do-reino no Brasil se deu a partir da década de 30 no estado do Pará, o que possibilitou ao país, na década de 80, se tornar o maior exportador mundial de pimenta-do-reino (FILGUEIRAS *et al.* 2014). Atualmente o Brasil ocupa o segundo lugar na produção e exportação mundial de pimenta-do-reino, com 128.331 toneladas (IBGE/SIDRA, 2023), principalmente na forma de pimenta preta. Os principais centros de produção concentram-se nos estados do Espírito Santo e Pará sob diferentes padrões de cultivo, isto é, no Espírito Santo a pipericultura é desenvolvida de maneira empresarial-rural e na região paraense de forma agrícola familiar (PAES; CRUZ, 2022).

Em 2022 o Pará produziu 42.096 toneladas de pimenta-do-reino, responsável por cerca de 33% da quantidade produzida nacionalmente, sendo superado apenas pelo Espírito Santo com 76.533 toneladas de grãos (IBGE/SIDRA, 2023). Diversos fatores contribuem na queda de produção das áreas cultivadas pelos pipericultores paraenses em comparação aos cultivos praticados pelos produtores capixabas, dentre os quais se destacam a baixa adoção de tecnologias agrônomicas e o declínio nos últimos anos de linhas de crédito rural ligadas a cultura (ALBUQUERQUE *et al.* 1997; RIBEIRO *et al.* 2019)

Em contrapartida, o cultivo de genótipos de pimenteira-do-reino de alto rendimento produtivo somado a sazonalidade da colheita e o uso de tecnologias no sistema de produção, como a irrigação, contribuem para os expressivos índices alcançados pelos produtores do Espírito Santo nos últimos anos (EMBRAPA, 2004; VIDAL, 2020). Apesar da agricultura irrigada está associada a um alto grau tecnológico, a condução técnica inadequada da irrigação em algumas regiões do Brasil, gera grandes desperdícios de água, estimando-se que apenas 50% de toda água captada seja efetivamente utilizada pelas plantas (MANTOVANI *et al.* 2006; CHRISTOFIDIS, 2004).

Através do manejo racional da irrigação é possível reduzir o uso de água em até 30% e alcançar incrementos na produtividade das culturas agrícolas entre 10% e 30% (MAROUELLI

et al. 2008). Na irrigação manejada por tensiometria as medições da tensão de água do solo são utilizadas para determinar de forma indireta a demanda hídrica da cultura. As leituras são alcançadas por intermédio do tensiômetro que estabelece quando e quanto irrigar, sem a necessidade de dados meteorológicos, comumente indisponíveis e onerosos ao agricultor (CUNHA *et al.* 2013), minimizando os riscos de estresse hídrico, seja pelo déficit de água, seja pelo excesso.

A água é um recurso essencial às plantas e o principal constituinte da biomassa verde dos vegetais (90 a 95%), sendo fundamental para a realização dos processos fisiológicos e para a sua manutenção no ambiente (MORAES CAMPOS *et al.* 2021). O estresse hídrico provocado pela deficiência de água, pode ser definido como todo o volume de água de um vegetal que está abaixo do conteúdo de água máximo exibido quando o mesmo se apresenta no estado de maior hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2009). O déficit hídrico degenera efeitos na anatomia, fisiologia e bioquímica das plantas, com grau de intensidade variando de acordo com o genótipo e tempo de exposição ao estresse (ARAÚJO *et al.* 2010).

A deficiência hídrica apresenta correlação direta na concentração de substâncias pertencentes ao metabolismo secundário das plantas (MORAIS, 2009). A combinação das classes destas substâncias (voláteis e lipofílicas) constitui os óleos essenciais, os quais podem ter a composição e o rendimento influenciados tanto por fatores genéticos quanto edáficos e climáticos (COSTA *et al.* 2004). O óleo essencial obtido da pimenta-do-reino é amplamente utilizado nas indústrias de alimentos, cosméticos e perfumarias, e possui na sua composição vários compostos, destacando-se a piperina, a qual é responsável pelo seu intenso aroma (EMBRAPA, 2004; DUARTE *et al.* 2006).

Diante do exposto, em plantas aromáticas, além do desempenho produtivo, a produção de óleo essencial também pode ser influenciada por fatores bióticos e abióticos. Assim, com o intuito de analisar a influência do manejo de irrigação na cultura da pimenteira-do-reino nas condições edafoclimáticas da microrregião de Castanha-PA, o presente estudo teve por objetivo avaliar o desempenho produtivo e o rendimento de óleo essencial de pimenta preta em genótipos de pimenteira-do-reino submetidos à diferentes tensões críticas de água no solo.

2.2 Revisão de Literatura

2.2.1 Origem da pimenteira-do-reino

De origem asiática, especificamente das florestas de Kerala, no sul da Índia, a pimenteira-do-reino (*Piper nigrum* L.), também conhecida como pimenta preta, produz frutos condimentares de alto valor econômico no mercado internacional. É uma especiaria que migrou para outras regiões do mundo, especialmente, por conta da sua distribuição pantropical em relação a seu centro de origem (ALBUQUERQUE; DUARTE, 1986).

A introdução da pimenteira-do-reino no âmbito nacional ocorreu durante o século XVII, por meio dos portugueses junto ao território baiano, sendo utilizada para fins ornamentais. Posteriormente, a planta alcançou os estados do Maranhão, Paraíba e Pará, estabelecendo-se neste último, como uma cultura agrícola logo após o início do século XX, em decorrência da inserção da cultivar Cingapura nas áreas de cultivos do Estado, em 1933, em especial no município de Tomé-Açú (ALBUQUERQUE; CONDURÚ, 1971; DIAS, 2006).

Apesar da nova tecnologia de cultivo agrícola introduzida pelos imigrantes japoneses, o Brasil deixou de ser dependente da importação de pimenta-do-reino no mercado internacional, apenas em 1950. Outros marcos históricos transcorreram entre os anos de 1980 e 1983, quando a produção paraense rotulou o Brasil como o principal produtor mundial, e nos anos de 1980 a 1984 (exceto em 1983), quando o país se tornou o maior exportador mundial de pimenta-do-reino (ANDO *et al.* 1997; SILVA; SOUZA, 2009).

2.2.2 Aspectos botânicos

Integrante do grupo das Angiospermas, a família Piperaceae é constituída por 3.600 espécies de plantas distribuídas em 10 gêneros diferentes (SAMAIN *et al.* 2008). No Brasil, são encontrados apenas 5 gêneros da família, com cerca de 450 espécies (BRITO, 2012; MENEZES, 2011). Dentre esses, os gêneros *Piper* e *Peperomia* Ruiz & Pav. contém a maioria das espécies catalogadas, e suas grandes diversidades são evidenciadas principalmente nas regiões da Mata Atlântica e Amazônia (SAMAIN *et al.* 2007).

O gênero *Piper*, de distribuição pantropical, é um dos mais representativos da família Piperaceae, uma vez que integra a espécie botânica *Piper nigrum*, a qual detêm um alto valor comercial, em virtude da produção dos seus frutos (pimenta-do-reino) (DYER *et al.* 2004). A pimenteira-do-reino é uma planta semilenhosa e trepadeira, de hábito perene, com caule formado por ramos de crescimento vertical (ortotrópicos) e ramos laterais conhecidos como ramos plagiotrópicos ou de frutificação (LEMOS *et al.* 2014).

Nos ramos ortotrópicos se encontram raízes adventícias (grampiformes) oriundas de botões terminais (nós), não produtivos, que possibilitam à planta aderir-se ao suporte de

tutoramento (Figura 1A). Já os ramos plagiotrópicos desenvolvem-se nas axilas das folhas presentes no caule ortotrópico, neles são encontrados ramos laterais secundários, folhas, flores e frutos que também brotam sobre nós, porém ausentes de raízes adventícias (Figura 1B). As folhas são pecioladas, de coloração verde escuro, com disposição alternada em ambos os ramos; o sistema radicular tem 3 a 6 raízes fasciculadas, distribuídas em cerca de 60 cm ao redor da planta, a uma profundidade de 30 cm, e uma raiz central (pivotante), que auxilia na fixação do vegetal junto ao solo (EMBRAPA, 2004; TURNER, 2004; LEMOS *et al.* 2014).

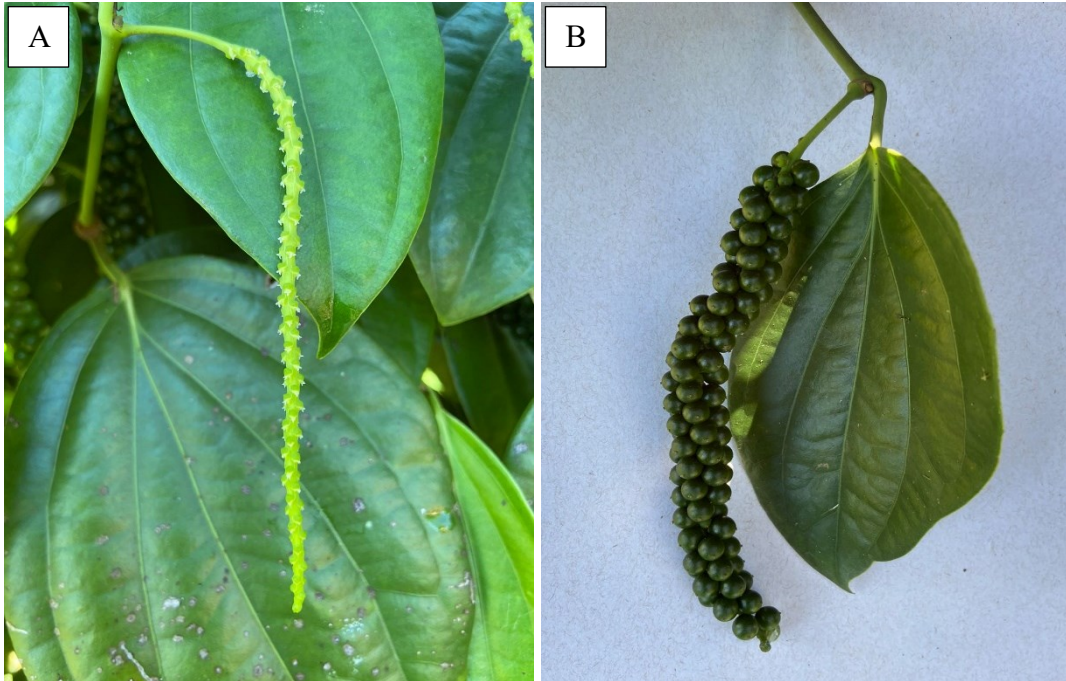
Figura 1 – Ramos ortotrópico (A) e plagiotrópico (B) de *Piper nigrum*



Fonte: O autor (2023).

A inflorescência possui comprimento médio de 12 cm, formada por um conjunto de flores aclamídeas (Figura 2A). O processo de fecundação é por geitonogamia, e a polinização é realizada por meio da dispersão do grão de pólen através das gotas de chuva; entre a floração e a maturação dos frutos há um intervalo de 6 meses. Os frutos são do tipo drupa, indeiscentes, que se desenvolvem em amentilhos (espiguetas ou cachos) (Figura 2B). Ao atingirem a maturação, adquirem coloração avermelhada, podendo alcançar 4 a 6 mm de diâmetro; nesta fase o endosperma da semente possui coloração esbranquiçada (EMBRAPA, 2004; DIAS, 2006).

Figura 2 – Inflorescência (A) e frutos imaturos (B) de *Piper nigrum*



Fonte: O autor (2023).

2.2.3 Genótipos

As pimenteiras-do-reino se desenvolvem bem em condições tropicais, com precipitação anual de 2.000 a 3.000 mm, umidade relativa do ar entre 70 a 90% e temperaturas em torno de 23 a 30°C. Visando o melhor desempenho agrícola, o solo para o cultivo das pimenteiras deve ser bem estruturado, com boa capacidade de armazenamento e drenagem de água e pH na faixa de 5,5 a 6,5. Nessas condições edafoclimáticas, as cultivares de pimenta-do-reino apresentam ótimo crescimento vegetativo e bom desempenho produtivo, atingindo maior estabilidade de produção a partir do terceiro ano de cultivo (KRISHNAMURTHY *et al.* 2011; BASTOS *et al.* 2008).

Entre as principais cultivares (genótipos) utilizadas pelos produtores de pimenteira-do-reino, estão a Cingapura, Guajarina e Bragantina, entretanto, devido o avanço das pesquisas relacionadas ao material genético de *P. nigrum*, outros genótipos também são adotados nas grandes regiões de produção da cultura (LEMOS *et al.* 2014; EMBRAPA, 2004). A Tabela 1 apresenta as características destes materiais genéticos.

Tabela 1 – Caracterização das principais cultivares (genótipos) de pimenteira-do-reino

Cultivares	Espigas			Rendimento médio de pimenta-preta (kg ha ⁻¹)	Ciclo de maturação (mês)	Tolerância a períodos curtos de estiagem
	Tamanho (cm)	Peso (g)	Nº de frutos			
Apra	12	14	78	3.100	ago / out	Tolerante
Bragantina	14	14	77	2.700	jul / set	Pouco tolerante
Cingapura	8	6	27	2.300	jul / set	Tolerante
Guajarina	12	12	68	2.900	ago / out	Pouco tolerante
Iaçará	10	8	40	2.500	jul / set	Tolerante
Kottanadan	11	12	54	2.800	set / nov	Tolerante
Kuthiravally	12	13	75	2.700	ago / out	Tolerante
Clonada	10	8	73	1.647	jul / set	Pouco tolerante
Uthirankotta	11	7	71	3.048	set / nov	Tolerante

Fonte: Adaptado de Lemos *et al.* (2014); Lemos *et al.* (2022); Paracampo *et al.* (2022) Santos (2023).

Na Tabela 2, são apresentados os valores percentuais da composição química de algumas cultivares de pimenteira-do-reino plantadas nas principais regiões produtoras do país, segundo Lemos *et al.* (2014).

Tabela 2 – Distribuição percentual das propriedades químicas de cultivares de pimenteira-do-reino

Cultivares	Óleos essenciais	Óleo-resina	Resina	Piperina	Outros compostos
	------(%)-----				
Apra	5,41	14,80	8,97	55,06	15,76
Bragantina	4,75	14,01	10,06	41,56	29,62
Cingapura	2,37	8,37	6,00	69,09	14,17
Guajarina	4,22	11,28	7,06	39,37	38,07
Iaçará	3,48	10,03	6,85	45,09	34,55
Kottanadan	5,33	12,70	7,37	56,16	28,44
Kuthiravally	5,7	11,65	5,98	56,39	20,28

Fonte: Adaptado de Lemos *et al.* (2014).

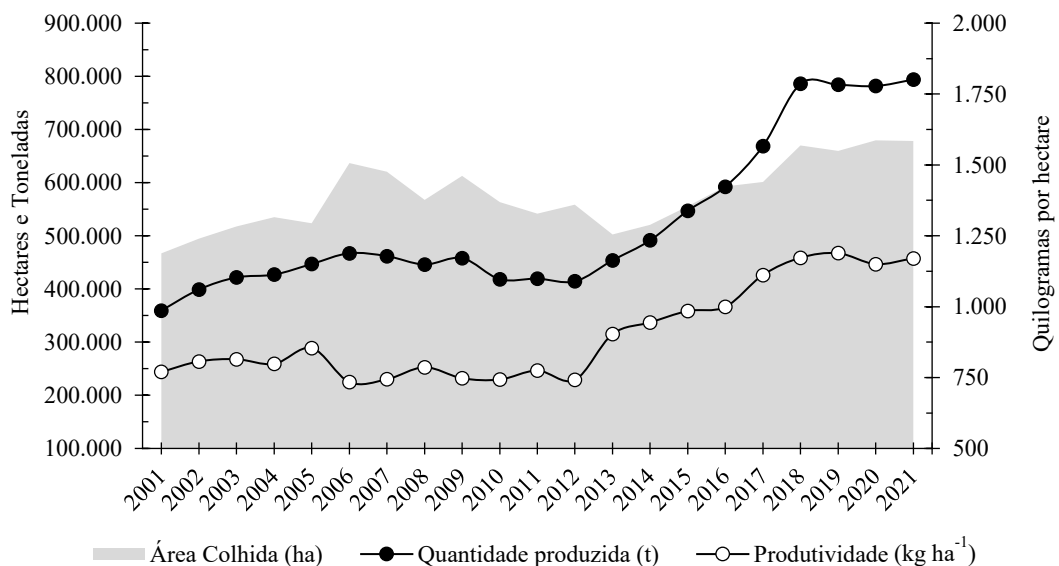
2.2.4 Pipericultura

O desenvolvimento da cultura da pimenteira-do-reino (pipericultura) à nível mundial, basicamente concentra-se nos países tropicais, especialmente os localizados no continente

asiático e na América do Sul. O produto gerado por essa atividade é considerado uma *commodity* extremamente valorizada no mercado agrícola, com alto grau de importância entre as especiarias comercializadas mundialmente. Apesar da pipericultura ser demandada em função da produção de frutos para o comércio internacional nas condições de pimenta verde, pimenta preta e pimenta branca, outros setores industriais (cosméticos e farmacêuticos) movimentam altos valores com subprodutos provenientes de grãos descartados (chochos), como a piperina e a óleo-resina (EMBRAPA, 2004; DUARTE *et al.* 2006).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (2023) (acrônimo de *Food and Agriculture Organization*), no período de 2001 a 2021, ocorreu um crescimento significativo na área colhida, na quantidade produzida e na produtividade de pimenta-do-reino em escala global (Figura 3). Sendo possível evidenciar a ascendência da produção e do rendimento médio de grãos, a partir do ano de 2012, acompanhada por um novo aumento no volume da área colhida nos anos seguintes. Contudo, apenas no ano de 2016, a quantidade produzida de pimenta-do-reino, em toneladas, ultrapassou a estimativa da área colhida em todo o mundo. O que pode ser atribuído ao avanço na utilização de tecnologias de cultivo e manejo pelos pipericultores nos principais países produtores.

Figura 3 – Área colhida, quantidade produzida e produtividade de pimenta-do-reino, entre 2001 e 2021, à nível mundial



Fonte: Adaptado de FAOSTAT (2023).

Os expressivos índices de produção e rendimento alcançados pela pipericultura praticada no mundo no ano de 2021, são atribuídos ao desempenho produtivo de países como

Vietnã e Brasil, que apesar de terem menos áreas de colheita que a Indonésia, foram os maiores produtores de pimenta-do-reino no referido ano, quando juntos contribuíram com mais de 50% na quantidade produzida mundialmente (Tabela 3). Embora a quantidade de frutos colhidos no Vietnã tenha atribuído de forma mais acentuada a margem percentual registrada, nota-se na Tabela 3 que a produtividade alcançada pelos pipericultores brasileiros (3.107 kg ha⁻¹) em 2021, foi aproximadamente 19% mais expressiva que a obtida pelos vietnamitas.

Tabela 3 – Área colhida, produção e produtividade de pimenta-do-reino dos principais países produtores, no ano de 2021

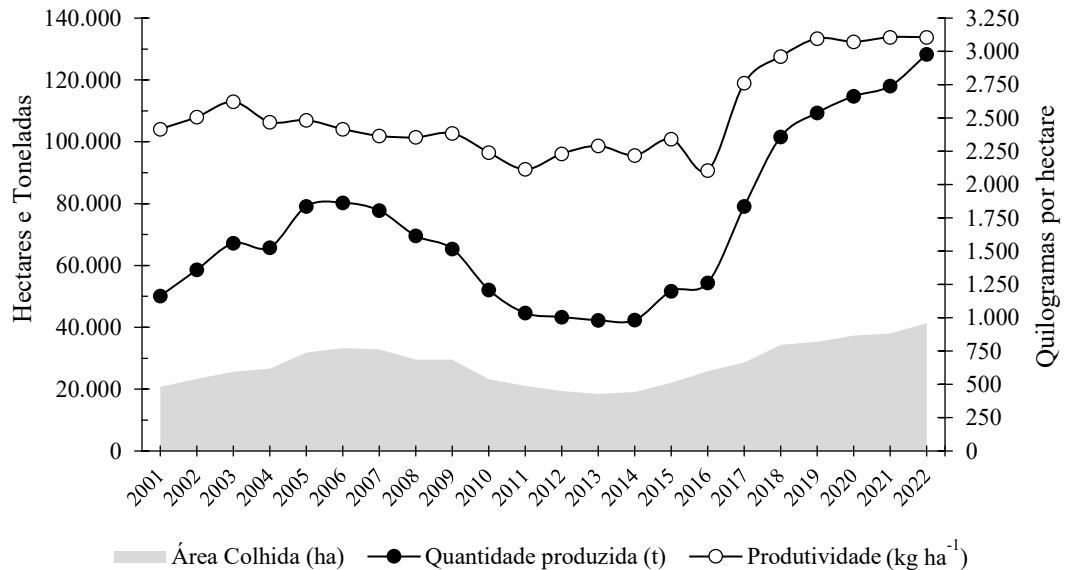
País	Área Colhida (ha)	Produção (t)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Indonésia	188.817	81.218,60	430
Índia	131.711	64.815,81	492
Vietnã	115.095	288.167,21	2.504
Burkina Faso	84.550	67.983,35	804
Sri Lanka	46.235	42.485,30	919
Brasil	37.994	118.057,00	3.107
China	18.485	33.356,38	1.805
China, Continental	18.351	33.132,89	1.806
Madagascar	9.629	5.282,56	549
Malásia	7.754	31.636,00	4.080
Etiópia	6.981	4.431,03	635
Gana	5.475	3.737,90	683
México	3.583	9.841,23	2.747
Níger	3.284	1.062,13	323
Equador	1.787	3.569,73	1.998

Fonte: Adaptado de FAOSTAT (2023).

Apesar das oscilações nas últimas décadas, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2023), a produção média anual de pimenta-do-reino no Brasil (72.549,6 t) obteve um importante incremento de 61% na quantidade produzida, entre os anos de 2001 e 2022 (128.331 t). Em contrapartida, um aumento significativo na produtividade brasileira é evidenciado somente no final da década de 2010. Verifica-se também que em 2001, o país apresentou uma tendência de crescimento na área destinada à colheita que se estendeu até o ano de 2006, adentrando, no ano seguinte, em um declínio que perdurou por longos sete anos. No

ano de 2014, o volume da área colhida no Brasil (19.070 ha) voltou a aumentar, resultando em um crescimento expressivo de 54% até o final da série histórica avaliada (Figura 4).

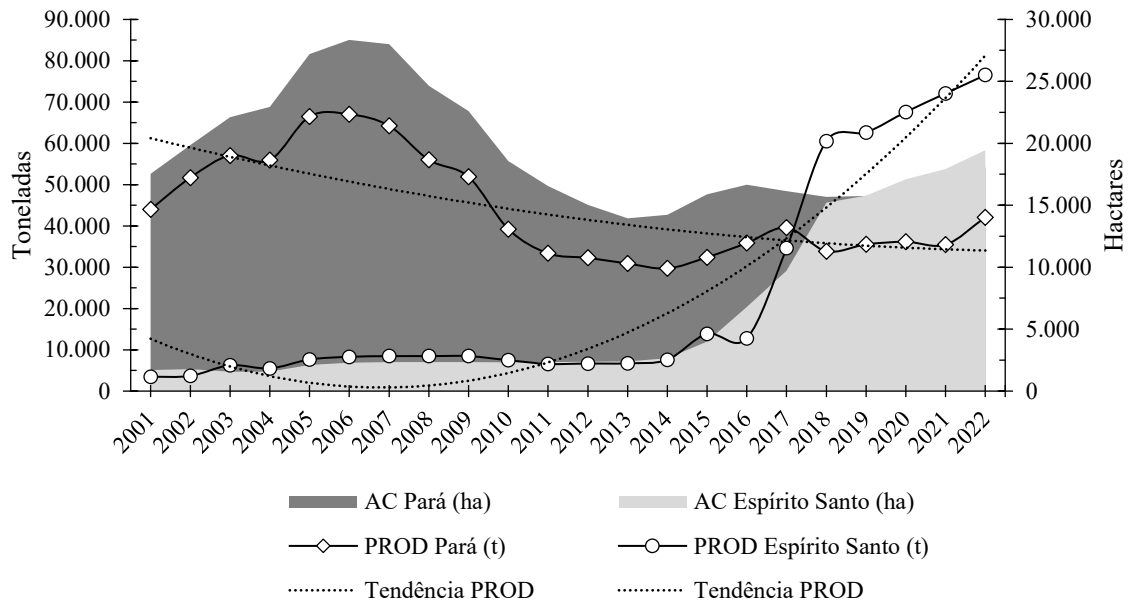
Figura 4 – Área colhida, quantidade produzida e produtividade de pimenta-do-reino no Brasil entre 2001 e 2022



Fonte: Adaptado de IBGE/SIDRA (2023).

Em nível regional, a produção de pimenta-do-reino se sobressai em três regiões geográficas do país, sendo a região Sudeste a maior produtora nacional, seguida pelas regiões Norte e Nordeste, respectivamente. No Sudeste, o principal produtor de pimenta-do-reino é o estado do Espírito Santo, e na região Norte a maior produção encontra-se no Pará. A Figura 5 demonstra que no período de 2001 a 2022, a pipericultura paraense acumulou uma produção média anual de 44.123,9 t, superando em 49% a produção média anual verificada no Espírito Santo durante a mesma época. Contudo, no ano de 2022 a pipericultura capixaba contribuiu com cerca de 60% na produção nacional de frutos. Juntos, Pará e Espírito Santo foram responsáveis por mais de 92% da quantidade total de pimenta-do-reino produzida no Brasil em 2022.

Figura 5 – Área destinada à colheita (AC), quantidade produzida (PROD) e tendência produtiva do cultivo de pimenta-do-reino nos estados do Pará e Espírito Santo entre 2001 e 2022



Fonte: Adaptado de IBGE/SIDRA (2023).

Segundo a EMBRAPA (2004) e Vidal (2020), determinados fatores de produção contribuíram para o súbito crescimento da produção do Espírito Santo entre 2015 e 2018, que proporcionou ao Estado superar a quantidade produzida pelo Pará e se tornar o maior produtor nacional de pimenta-do-reino. Neste contexto, além dos altos preços atingidos em 2015 e 2016, a realização de duas colheitas durante o ano e o investimento em tecnologias de cultivo, como a irrigação, foram fundamentais para posicionar atualmente a pipericultura capixaba em lugar de destaque no cenário nacional e despontar o Brasil no mercado mundial.

Por outro lado, o declínio e a estabilidade, da produção de pimenta-do-reino nos principais polos da pipericultura paraense nas últimas décadas, como nos municípios de Baião e Tomé-Açú, retratam os problemas fitossanitários historicamente enfrentados pelos agricultores nas áreas de cultivo de pimenteiros-do-reino na Amazônia Oriental. Especialmente, os relacionados à doença fusariose (*Fusarium solani* f. sp. *piperis*) que afeta significativamente a vida útil e o rendimento produtivo das pimenteiros (CARNEIRO JÚNIOR *et al.* 2017).

Além dos problemas causados pela fusariose e por outras pragas e doenças inerentes à cultura, a baixa variabilidade genética entre os genótipos de pimenteira-do-reino disponíveis aos produtores (RODRIGUES; LEMOS, 2019) somado ao baixo aparato tecnológico utilizados nos cultivos (VIDAL, 2020), também são considerados fatores que, eventualmente,

potencializaram a redução da produção e produtividade da cultura da pimenteira-do-reino entre uma década e outra no estado do Pará.

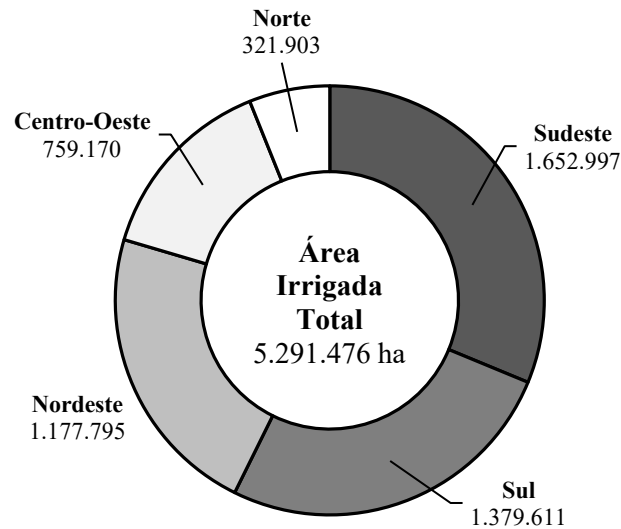
2.2.5 Irrigação na cultura da pimenteira-do-reino no estado do Pará

Ao longo do tempo a técnica milenar da irrigação foi adotada apenas como um método fundamental de combate à seca e de forma independente dos demais fatores de produção agrícola. Porém, atualmente, o conceito de irrigação, considerado pelo modelo empresarial do agronegócio, atribui à prática agrícola a possibilidade efetiva do aumento da rentabilidade do produtor rural, mediante aos incrementos da produção e produtividade das culturas por meio da utilização de equipamentos eficientes, de tecnologias inovadoras e dos conhecimentos técnico-científicos promovidos pelo desenvolvimento da agricultura irrigada em escala nacional e mundial (BERNARDO *et al.* 2019).

A irrigação das culturas agrícolas no Brasil iniciou no Rio Grande do Sul, entre os séculos XIX e XX, nas áreas de produção de arroz e se manteve até os dias atuais como um dos principais polos de irrigação do país. Outras iniciativas importantes durante a fase inicial de desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil também foram marcadas historicamente, como por exemplo a construção das represas d'água para as diferentes finalidades de uso pela população do Semiárido. Além de suprir a necessidade total ou parcial de água para as plantas, a irrigação também pode impactar positivamente na área socioambiental, através da diminuição do êxodo rural e da geração de emprego e renda de maneira sustentável (ANA, 2021).

O Brasil está entre os principais países com maior área irrigada no mundo, com cerca de 8.200.000 hectares o país ocupa a sexta posição no ranking liderado pela China e Índia, cada um com, aproximadamente, 70 milhões de hectares, seguidos dos Estados Unidos, Paquistão e Irã com 26,7 milhões, 20,0 milhões e 8,7 milhões de hectares, respectivamente (FAO, 2023). A Figura 6 representa o número de áreas irrigadas por região do Brasil no ano de 2019, segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2021).

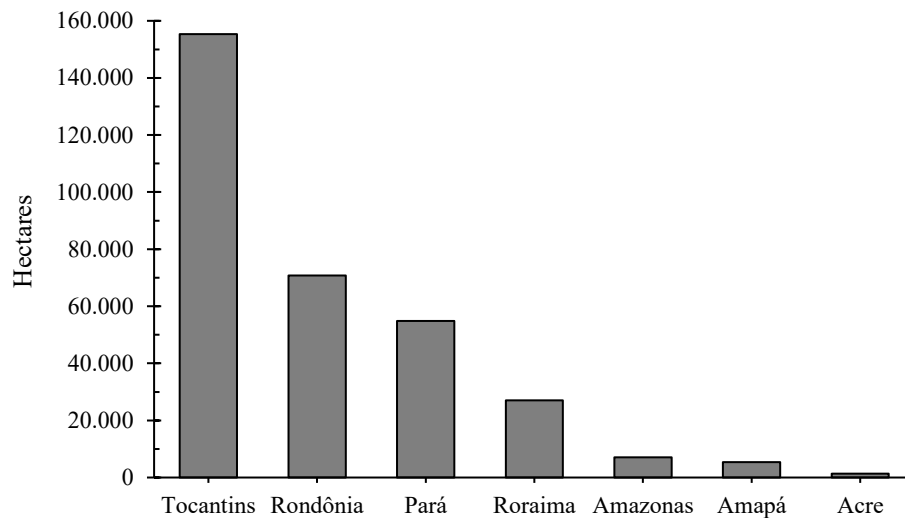
Figura 6 – Área irrigada total no Brasil e participação das regiões geográficas em 2019



Fonte: Adaptado de ANA (2021).

Como demonstrado na figura acima, na região Norte encontram-se apenas 6% da área irrigada total no Brasil em 2019, em contraponto aos valores relativos verificados no Sudeste (31%), Sul (26%) e Nordeste (22%). Nos Estados que compreendem a região Norte o panorama da agricultura irrigada não é diferente do observado entre as regiões geográficas do país, ou seja, mais de 36% das áreas irrigadas estão concentradas no Tocantins, e cerca de 22% em Rondônia e 17% no Pará (Figura 7). Contudo, a significativa extensão de área irrigada registrada no estado do Tocantins, deve-se às grandes áreas de cultivo de arroz sob irrigação superficial por inundação que representaram mais de 70% da área irrigada total pelo Estado no ano de 2019 (ANA, 2021).

Figura 7 – Área irrigada das unidades federativas da região Norte do Brasil em 2019



Fonte: Adaptado de ANA (2021).

Na Tabela 4, são listados os dez principais municípios paraenses em extensão irrigada atualmente e as suas respectivas projeções de áreas destinadas à irrigação das culturas agrícolas para os anos de 2030 e 2040, realizadas pela ANA (2021). Nesse sentido, nota-se que Tomé-Açu é o município paraense com maior volume de área irrigada no Pará e que embora haja uma estimativa de 46% na expansão da irrigação no Estado até 2040, grande parte dos municípios apresentam uma tendência de queda percentual ao longo dos próximos anos em relação a área irrigada total paraense, inclusive o município de Tomé-Açu.

Tabela 4 – Área irrigada atual e potencial de expansão da agricultura irrigada no estado do Pará

Municípios	Área irrigada atual – 2019		Área irrigada estimada – 2030		Área irrigada estimada – 2040	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Tomé-Açu	8.270	15,08	11.571	14,78	14.643	14,29
Ulianópolis	6.033	11,00	8.250	10,54	10.328	10,08
Paragominas	3.578	6,52	5.006	6,39	6.335	6,18
Cachoeira do Arari	2.872	5,24	4.890	6,24	7.928	7,74
Salvaterra	2.857	5,21	4.869	6,22	7.902	7,71
Capitão Poço	2.263	4,12	3.166	4,04	4.006	3,91
Igarapé-Açu	1.967	3,59	2.752	3,51	3.483	3,40
Concórdia do Pará	1.630	2,97	2.281	2,91	2.886	2,82
Garrafão do Norte	1.475	2,69	2.064	2,64	2.611	2,55
Tailândia	1.242	2,26	1.738	2,22	2.199	2,15

Demais municípios	22.673	41,33	31.723	40,51	40.143	39,18
Total do Pará	54.860	100	78.308	100	102.463	100
Total do Brasil	5.291.476	–	7.395.308	–	9.376.988	–

Fonte: Adaptado de ANA (2021).

De acordo com o último Censo Agropecuário realizado pelo IBGE (2023), em 90% dos 5.617 hectares irrigados pelos 480 estabelecimentos agropecuários de Tomé-Açu, são utilizados sistemas de irrigação localizada, tanto por gotejamento (2.166 ha) quanto por microaspersão (2.871 ha). No método de irrigação localizada a água é aplicada pontualmente sobre a região do sistema radicular da planta, por meio de condutos pressurizados, em intensidades de 1 a 160 L h⁻¹ e turno de rega com frequência de 1 a 4 dias, mantendo o teor de umidade do solo na região aplicada próximo à “capacidade de campo” (BERNARDO *et al.* 2019).

Apesar das maiores áreas irrigadas no Pará estarem situadas no principal polo de produção de pimenta-do-reino do Estado, a demanda da pimenteira-do-reino por água ainda é pouco conhecida nas diferentes condições de solo e clima regional, principalmente, pelo fato de grande parte dos cultivos serem realizados em condições de sequeiro (PARTELLI, 2009) e o volume de água usado na irrigação ser geralmente estimado fora dos moldes científicos. Em contrapartida, entre os principais benefícios da irrigação para a cultura da pimenteira-do-reino estão: melhora no crescimento e desenvolvimento das pimenteiros; redução em até 40% das perdas de produção; menos lixiviação dos nutrientes no solo e; menor risco de incidência de doenças nas plantas (DUARTE *et al.* 2008; TELES, 2020).

Diante do exposto, a expansão das áreas irrigadas no estado do Pará, tendo em vista o desenvolvimento da cultura da pimenteira-do-reino (Figura 8) se revela como uma demanda essencial para os municípios paraenses que outrora despontaram entre os maiores produtores nacionais, voltarem a ocupar lugar de destaque no cenário da pipericultura brasileira. Para tanto, destacam-se as altas produtividades alcançadas nos cultivos irrigados realizados na região norte do Espírito Santo, onde as pimenteiros-do-reino se desenvolvem em pleno sol, com baixos índices de precipitação pluviométrica e frequentes períodos de seca ao longo das safras (FERRÃO *et al.* 2016; PARTELLI, 2009).

Figura 8 – Cultivo de pimenta-do-reino sob irrigação localizada por gotejamento no estado do Pará



Fonte: O autor (2023).

O uso da irrigação tem como princípio básico repor água de forma artificial às culturas, visando potencializar a produtividade e a eficiência do uso da água pelas plantas e reduzir os custos de produção (BERNARDO *et al.* 2019). Entretanto, a carência de estudos e pesquisas em programas de manejos de sistemas de irrigação adequados para o cultivo de pimenteiras-do-reino em diferentes condições regionais, torna-se um fator técnico limitante para que a cultura consiga atingir o seu máximo potencial produtivo. Em vista disso, conhecer os processos biológicos das pimenteiras sob condições de déficit hídrico projetando o uso eficiente da água pelas plantas (TELES, 2020) é primordial para o pleno desenvolvimento da pipericultura no estado do Pará.

2.2.6 Uso da tensiometria no manejo da irrigação

A baixa disponibilidade e a má qualidade da água no ambiente de produção das propriedades rurais são os principais fatores limitantes no desenvolvimento econômico das culturas agrícolas. O uso da água de maneira eficiente pela irrigação, requer além de estudos sobre as interações entre os componentes do sistema solo-água-planta-atmosfera, também conhecimentos sobre a operacionalização de programas de manejo racional da irrigação, tendo

em vista à maximização da produção e à melhor qualidade dos produtos (BERNARDO *et al.* 2019).

A quantidade de água evapotranspirada (evaporação e transpiração de água em superfícies vegetadas) por determinada cultura pode ser restituída naturalmente pelas chuvas e, ou, artificialmente pela irrigação (CAMPOS *et al.*, 2008). Para tanto, a estimativa da quantidade de água necessária para a irrigação deve ser realizada de maneira que não haja superestimação ou subestimação de valores, pois a aplicação de água em excesso pode causar a salinização do solo, lixiviação dos nutrientes e asfixia nas raízes das plantas, assim como o estresse hídrico provocado pela escassez, pode ocasionar perdas significativas de produção e produtividade (OLIVEIRA *et al.* 2011; SILVA *et al.* 2014).

De um modo geral, a irrigação pode ser classificada de duas maneiras, de acordo com os dois principais parâmetros utilizados convencionalmente para mensurar a quantidade de irrigação necessária, sendo estes a demanda evapotranspirométrica da cultura e a intensidade e regime das precipitações pluviométricas efetivas (chuvas) (Frizzone *et al.* 2012), como pode ser visualizado na Quadro 1.

Quadro 1 – Características hídricas e climáticas da irrigação, segundo a relação entre evapotranspiração e precipitação efetiva

Práticas de irrigação	Irrigação total	Reposição hídrica	A quantidade de água para atender a demanda evapotranspirométrica da cultura provém totalmente da irrigação.
		Condições climáticas	Regiões de clima árido ou semiárido; locais de precipitação insignificante; estações secas de regiões úmidas e subúmidas.
	Irrigação suplementar	Reposição hídrica	A quantidade de água para atender a demanda evapotranspirométrica da cultura provém, tanto da irrigação quanto da precipitação pluviométrica efetiva.
		Condições climáticas	Regiões úmidas e subúmidas que apresentam baixo índice e má distribuição de chuvas.

Fonte: Adaptado de Frizzone *et al.* (2012).

O manejo da irrigação é um procedimento utilizado para determinar a frequência, a quantidade e a intensidade de água a ser aplicada nos eventos de irrigação. Nesse contexto, as técnicas de manejo permitem definir de maneira eficiente quando e quanto de água deverá ser aplicado pelo sistema de irrigação. O momento adequado para a realização de cada irrigação é definido pelo turno de rega, isto é, o intervalo de tempo entre uma irrigação e outra. Já a quantidade a ser aplicada em cada evento é definida pela lâmina d'água de irrigação, enquanto que a intensidade de aplicação e o tempo exigido para completar a irrigação total da área (período de irrigação), determinam o tempo necessário de aplicação do volume de água (FRIZZONE *et al.* 2007; BERNARDO *et al.* 2019).

Basicamente, existem estratégias fundamentais para o manejo da irrigação, com finalidades de uso conforme o estágio de desenvolvimento do cultivo e o grau de produtividade da cultura, sendo assim, as irrigações podem ser realizadas, tanto na ausência quanto na presença de déficit hídrico. Na irrigação sem déficit, busca-se potencializar a produtividade por meio do fornecimento pleno da quantidade evapotranspirada pela cultura. Na irrigação com déficit, pressupõe-se que a produção é impactada pela disponibilidade limitada de água e que as perdas hídricas devem ser minimizadas pelo manejo racional da irrigação, atendendo apenas parte da evapotranspiração de determinada cultura que é conduzida sob restrição de água durante todo o seu ciclo de desenvolvimento ou nas fases de menor susceptibilidade ao déficit hídrico (NOGUEIRA *et al.* 2005; LOPES *et al.* 2011; KARAM *et al.* 2011).

No manejo, o monitoramento da irrigação pode ser efetuado por meio de três métodos diferentes: via planta, via clima e via solo. O monitoramento via planta é realizado de forma subjetiva, através de avaliações visuais para analisar os efeitos provocados pelo estresse hídrico, ou de forma direta, utilizando-se métodos para a medição da condição hídrica das plantas. Já o monitoramento via clima pode ser realizado pela reposição da evapotranspiração da cultura ou pelo balanço hídrico climatológico dos fluxos de entrada (irrigação, precipitação efetiva e ascensão capilar) e saída (evapotranspiração e percolação profunda) de água no solo (COELHO *et al.* 2005; FRIZZONE *et al.* 2012).

Para o manejo da irrigação realizado via solo são necessárias informações sobre a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, capacidade total de água disponível do solo (CAD) e o potencial mátrico (tensão de água no solo) crítico para a cultura. Neste tipo de monitoramento, os eventos de irrigação são realizados quando o potencial matricial ou teor de água atual atingir um determinado valor crítico, em que não ocorram prejuízos para a produtividade da cultura – define quando irrigar, aplicando uma lâmina d'água apropriada para

aumentar a quantidade de água armazenada no solo até a sua capacidade de campo – define quanto irrigar (FRIZZONE *et al.* 2012; CAMARGO, 2016).

Dentre os diversos métodos e equipamentos utilizados para a determinação do teor de água no solo, destaca-se a técnica da tensiometria no manejo da irrigação de diversas culturas agrícolas, especialmente, nos cultivos de grãos. Na tensiometria, utiliza-se o tensiômetro para aferição do grau de energia com que a água está retida pelas partículas sólidas do solo até tensões próximas à 80 kPa (Figura 9). Este instrumento foi desenvolvido por Gardner em 1922, sendo constituído basicamente por um tubo de PVC de aproximadamente 1/2 polegada, contendo uma cápsula porosa de cerâmica e, dependendo do tipo, um manômetro ou uma borracha siliconada nas extremidades da tabulação (BRAGA; CALGARO, 2010).

Figura 9 – Manejo da irrigação por tensiometria, com potencial mátrico crítico de -55 kPa, na cultura da pimenteira-do-reino



Fonte: O autor (2023).

Em meio aos vários tipos de tensiômetros existentes no mercado, o tensiômetro de punção é o mais utilizado no manejo da irrigação, devido a praticidade do tensiômetro durante as leituras das tensões de água no solo. Por intermédio deste instrumento pode se estabelecer, de maneira direta, a tensão de água ou potencial matricial do solo e, de forma indireta, o teor de umidade atual no solo, associando-se o nível de tensão aferido à um determinado conteúdo de água, através de uma curva de retenção de água no solo (DIRKSEN, 1999).

Após a medição do potencial matricial com o auxílio do tensiômetro, o teor de água atual do solo pode ser determinado utilizando-se o gráfico ou o modelo matemático ajustado da curva de retenção (GENUCHTEN, 1980). Outros indicadores limítrofes da disponibilidade total de água no solo (CAD), capacidade de campo e ponto de murcha permanente, também são essenciais no manejo da irrigação. Em solos de textura grossa, a tensão considerada como equivalente à capacidade de campo é de 10 kPa e em solos de textura fina de 33 kPa. Já o ponto de murcha permanente teórico ou ponto em que a planta mesmo sob irrigação não consegue mais absorver água, é aquele retido contra a força gravitacional de 1.500 kPa (RICHARDS; WEAVER, 1943; OLIVEIRA *et al.* 2004; BERNARDO *et al.* 2019).

As determinações do volume de água e do tempo necessário para a aplicação da irrigação, perpassam inicialmente pela definição da lâmina líquida de irrigação (irrigação real necessária), através da relação entre capacidade de campo, teor de água atual no solo, densidade aparente do solo e profundidade do sistema radicular da cultura. No entanto, a lâmina de irrigação a ser aplicada efetivamente deve considerar a eficiência do método de irrigação (lâmina bruta ou irrigação total necessária). Em sistemas de irrigação localizada, onde se irriga apenas uma parte da área do solo, recomenda-se operar com valores de eficiência de irrigação acima de 90% (MANTOVANI *et al.* 2007; BERNARDO *et al.* 2007).

Neste caso, para a determinação da lâmina bruta de irrigação, deve-se calcular as percentagens de área molhada e sombreada e, posteriormente, decidir pelo maior valor a ser usado na equação. Por fim, ao se relacionar o valor da irrigação total necessária com o número de emissores por planta, a vazão média e a área molhada por eles, se estabelece o tempo necessário para aplicação do volume de água calculado (tempo de irrigação) (MIRANDA; PEREIRA, 2019). Dessa forma, o manejo da irrigação poderá ser otimizado quando realizada à correlação entre a tensão de água no solo aferida no tensiômetro e o tempo de operação necessário para cada evento de irrigação.

2.2.7 Influência do estresse hídrico no metabolismo vegetal

As reações das plantas às ações adversas do meio ambiente que provocam modificações no metabolismo ou normal crescimento dos vegetais são estresses biológicos que acompanham, especialmente, o desenvolvimento das monoculturas agrícolas. De maneira geral, a natureza dos estresses nos vegetais pode ser de origem biótica, geralmente causados por insetos e microrganismos, ou abiótica, desencadeados pelas condições de temperatura, salinização do solo e disponibilidade de água. Nesse contexto, existem diversos fatores de estresse biológico

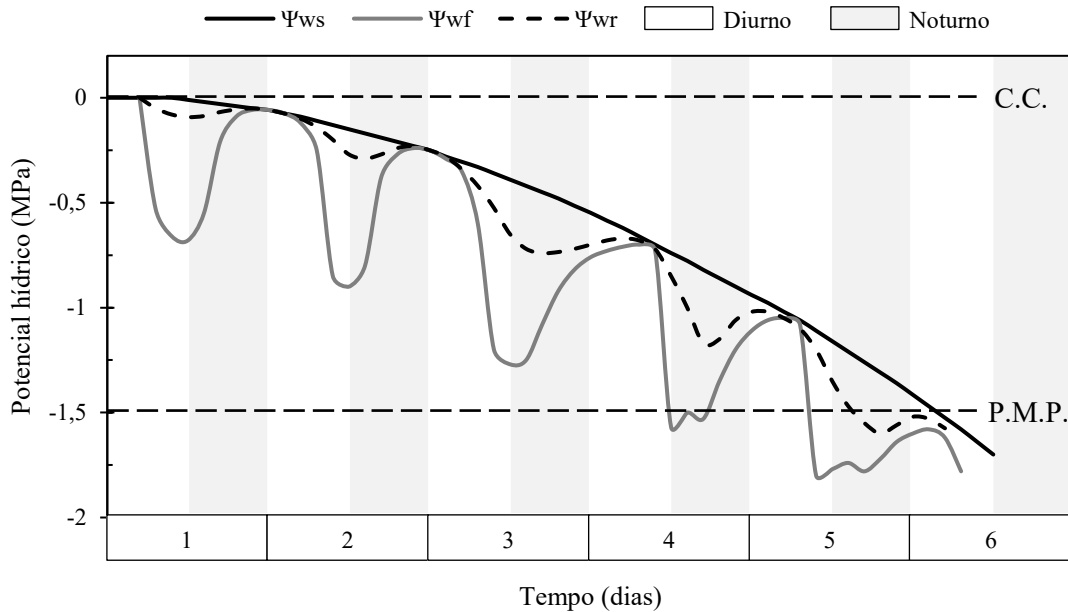
(causas), potencialmente capazes de promoverem mudanças de função física ou química irreversíveis na planta (efeitos) (LOPES; LIMA, 2015).

Ainda de acordo com Lopes e Lima (2015), a redução ou mudança de função produzida pelo estresse pode ser classificada como elástica ou plástica. O efeito elástico é definido como uma alteração física ou química reversível, ou seja, o organismo recupera a sua condição normal quando o estresse é superado. Já o efeito plástico é uma modificação física ou química irreversível, em outras palavras, mesmo que se retire o fator de estresse, os efeitos produzidos impossibilitam que o organismo retorne às suas funções normais. Todavia, ressalta-se que em determinados sistemas orgânicos, a injúria do efeito plástico pode ser reparada com a diminuição ou descontinuidade do fator de estresse biológico.

A dinâmica hídrica em áreas de cultivos agrícolas é regulamentada pelo fluxo de água ao longo do sistema solo-planta-atmosfera (BERGONCI *et al.* 2000). Através das culturas se desenvolvem fluxos contínuos de água entre o solo e o meio ambiente que permitem realizar grandes transferências da água armazenada no solo e disponível às plantas para a atmosfera, por meio dos processos de transpiração vegetal e evaporação do solo. Este último fenômeno, normalmente é potencializado pelas condições desprotegidas do solo, comuns nos agroecossistemas de monocultura. A quantidade de água absorvida pelas plantas e, posteriormente, perdida para a atmosfera, pode reduzir substancialmente o potencial hídrico do solo (Ψ_{ws}) e o conteúdo de água da planta (Ψ_{wp}), submetendo à cultura ao estresse hídrico na ausência de chuvas ou irrigação (SLATYER, 1967).

Em plantas sob estresse hídrico, em condições de escassez de água (déficit hídrico), o efeito plástico é irreversível quando a disponibilidade de água (CAD) ou potencial hídrico do solo ultrapassa o ponto de murcha permanente (PMP) e as injúrias, provocadas por dessecação interna, ocasionam a morte do vegetal. À medida que o potencial hídrico do solo decresce em função dos dias de seca, cresce a quantidade de energia necessária para a planta extrair água do solo, como evidenciam as amplificações dos gradientes de potencial hídrico no decorrer do tempo, entre o potencial hídrico do solo e os potenciais de raízes e folhas que representam o conteúdo de água na planta, na Figura 10 (BRIX, 1962; LOPES; LIMA, 2015).

Figura 10 – Evolução dos potenciais hídricos do solo (Ψ_{ws}), folhas (Ψ_{wf}) e raízes (Ψ_{wr}) em resposta ao déficit hídrico de uma cultura a partir da capacidade de campo (C.C.)



Fonte: Adaptado de Lopes e Lima (2015).

Na prática, o déficit hídrico vegetal ocorre quando a taxa transpiratória da planta supera a sua taxa de absorção de água, levando a perda de turgência plena das células e tecidos do vegetal (BLUM, 2009). Na figura acima, nota-se que nos três primeiros dias de seca, o equilíbrio entre o potencial hídrico do solo e os potenciais hídricos internos da planta (Ψ_{ws} e Ψ_{wf}) é restabelecido somente no período noturno, em razão da recuperação no conteúdo de água na planta.

No quarto dia de seca, após o potencial hídrico das folhas declinar abaixo de -1,5 MPa (-1.500 kPa), o fechamento parcial dos estômatos, incitado pela redução do potencial hídrico do solo, foi suficiente para recuperar o teor de água na planta. Entretanto, após o quinto dia, essa estratégia fisiológica não foi eficaz para elevar novamente o potencial hídrico das folhas acima do P.M.P.

As fases do estágio fenológico das plantas são impactadas de maneira diferentes pelos fatores de estresse, ou seja, no estágio reprodutivo, nas fases de floração e produção, os efeitos provocados pelo déficit hídrico são mais sensíveis, enquanto que nas fases de maturação e crescimento vegetativo o impacto pode ser moderado, desde que os fatores sejam atenuados nas fases seguintes (LOPES; LIMA, 2015). Em outras palavras, as perdas no rendimento das culturas agrícolas em detrimento da escassez de água durante as fases vegetativa e de maturação

são pouco significantes quando comparadas aos danos proeminentes durante os períodos de floração e formação dos grãos.

Em termos fisiológicos, as mudanças provocadas pela escassez de água, são fatores capazes de promover alterações no metabolismo das plantas (WINK, 2013). O metabolismo vegetal é constituído pelo conjunto de reações bioquímicas que ocorrem constantemente no interior da planta, fornecendo energia ao vegetal, e renovação das suas moléculas (ALMEIDA, 2017). As plantas, de um modo geral, utilizam vias metabólicas para a síntese e utilização de compostos orgânicos essenciais para a sua sobrevivência como aminoácidos, ácidos carboxílicos e nucléicos, polissacarídeos, proteínas, lipídios entre outros, estas vias constituem o metabolismo primário dos vegetais (VERMA; SHUKLA, 2015).

Contudo, outras vias metabólicas podem ser utilizadas pelas plantas para produzir compostos fotoquímicos de acordo com o estado de desenvolvimento do vegetal, e a condições de estresses causados por fatores bióticos ou abióticos, designados metabólitos secundários (SILVA *et al.* 2018). A mistura complexa das classes das substâncias pertencentes ao metabolismo secundário das plantas é o principal constituinte dos seus óleos essenciais. Os metabólitos secundários derivam-se biossinteticamente dos metabólitos primários a partir da conversão da energia luminosa em energia química, e possibilitam que a planta responda de maneira defensiva aos diferentes fatores de estresse biológico (TAIZ; ZEIGER, 2013; CUNHA *et al.* 2016).

Apesar dos metabólitos secundários não serem considerados essenciais para o crescimento, desenvolvimento e reprodução das células vivas dos vegetais, eles são fundamentais para as indústrias farmacêutica (princípios ativos de fármacos) e alimentícia (aromatizantes e corantes) (SILVA *et al.* 2018). Nesse contexto, além do estresse hídrico ocasionar perdas produtivas significativas às culturas agrícolas, também pode interferir no rendimento e composição das substâncias dos óleos essenciais em função da intensidade de atuação do fator de estresse sobre a planta (TAIZ; ZEIGER, 2013).

2.2.8 Efeitos de fatores abióticos no rendimento de óleos essenciais

Em geral, óleos essenciais apresentam característica odorífera agradável e marcante, sendo constituídos a partir de misturas complexas de substâncias líquidas, voláteis e com baixo peso molecular. Podem ser extraídos das partes dos vegetais por diferentes técnicas, sendo as mais comuns o arraste à vapor d'água e a hidrodestilação. Contudo, na indústria o método de

extração supercrítico é o mais utilizado, enquanto que a extração por solventes orgânicos apolares não apresenta valor comercial (MORAIS, 2009).

Os óleos essenciais apresentam aspecto oleoso e volátil sob temperatura ambiente, com sabor ácido e pungente, geralmente incolores ou levemente amarelado, o que basicamente os diferencia dos óleos fixos (mistura de substâncias lipídicas), extraídos de sementes oleaginosas. Outras características que se destacam sobre os óleos essenciais estão relacionadas a sua estabilidade e solubilidade, pois são pouco estáveis perante a luz e altas temperaturas, e pouco solúveis em água (SIMÕES; SPITZER, 1999; SAITO; SCRAMIN, 2000).

A composição e o rendimento de óleo essencial representam um campo de ligação química entre as plantas e o ambiente. Em outras palavras, a natureza da biossíntese dos compostos fitoquímicos é influenciada pelos estímulos resultantes do ambiente onde se encontra o vegetal. Tais incitações são decorrentes de interações planta-microrganismo, planta-inseto e planta-planta. Outros fatores que também podem ser ressaltados são: o genótipo, idade e estágio de desenvolvimento da planta, bem como a luminosidade, temperatura, nutrição, pluviosidade e colheita (época, horário e técnicas pós-colheita) (MORAIS, 2009).

Nesse contexto, no estudo realizado por Silva *et al.* (2003), ao avaliarem os efeitos do estágio de desenvolvimento no rendimento de óleo essencial de *Ocimum basilicum*, foram encontrados melhores rendimentos na colheita das plantas com maior tempo de cultivo em campo. Em contrapartida, Sanda *et al.* (2001) verificaram que o rendimento de *O. basilicum* decresceu drasticamente para 0,14%, quando extraídos de plantas cultivadas em maior período.

Como supracitado, outro fator abiótico de extrema influência sobre a composição e rendimento de óleos essenciais é a água. Pressupõe-se, devido a essencialidade da água ao metabolismo das plantas, que em ambientes com maior teor de umidade a produção e rendimentos de substâncias dos óleos essenciais seja maior, no entanto, isto nem sempre acontece. Embora existam limites ideais de umidade para o desenvolvimento das plantas, o excesso de água no solo pode causar menos problemas que as condições de déficit hídrico (MORAIS, 2009; ORTOLANI; CAMARGO, 1987).

O estresse hídrico apresenta correlação direta na concentração de substâncias no metabolismo secundário das plantas, podendo induzir a significativos incrementos em função da intensidade do déficit hídrico (SIMON *et al.* 1992). De acordo com Lopes *et al.* (2001), ao avaliarem os efeitos de regime hídrico na produção de óleo essencial de *Polygonum punctatum* foram observados maiores rendimentos de óleo em ambiente seco que nos ambientes úmido e moderadamente úmido. Este resultado evidencia que, em resposta ao estresse hídrico, há um

incremento na biossíntese do óleo essencial como possível reação adaptativa e fisiológica às variações do ambiente.

A pimenteira-do-reino é uma planta aromática de conhecido efeito medicinal, em razão da aplicação dos seus metabólitos no tratamento de diversos problemas de saúde humana, como na redução de dores musculares, distúrbios gastrointestinais, processos inflamatórios e oxidantes entre outros. Além da sua dada importância para a medicina, os frutos de *P. nigrum* possuem propriedades organolépticas (sabor e aroma) que são exploradas pelos diversos seguimentos industriais, sendo os grãos utilizados principalmente como condimentos e na conservação de alimentos e pelas indústrias de perfumaria por meio do seu óleo essencial (RAVINDRAN, 2000; GARCIA *et al.* 2000; LIAN EE *et al.* 2010).

As características químicas mais importantes, sob o espectro socioeconômico, identificadas nos frutos de *P. nigrum* são o componente bioativo piperina e os seus óleos essenciais (Tabela 5) (LEMOS *et al.* 2014). A pimenta-do-reino contém cerca de 2 a 6% de óleos voláteis. Esses óleos são constituídos de 70 a 80% de hidrocarbonetos monoterpênicos, de 20 a 30% de hidrocarbonetos sesquiterpênicos e de quantidades inferiores a 4% de compostos oxigenados. O aroma peculiar do óleo essencial da pimenta-do-reino é devido à presença de terpenos oxigenados, enquanto que o sabor ardente (pungência) dos grãos é fornecido por alcaloides e por subprodutos desses alcaloides (JOSE, 1978).

Tabela 5 – Caracterização química dos frutos de *Piper nigrum* explorados comercialmente pelo Brasil

Componente	Teor no grão (%)
Amido	22,0 – 48,0
Cinza	5,0 – 6,0
Fibra crua	10,3 – 18,3
Óleo-resina	10,0 – 14,8
Óleos essenciais	2,4 – 5,7
Piperina	39,4 – 69,1
Resina	5,9 – 10,1
Umidade	12,0 – 14,0

Fonte: Adaptado de Lemos *et al.* (2014).

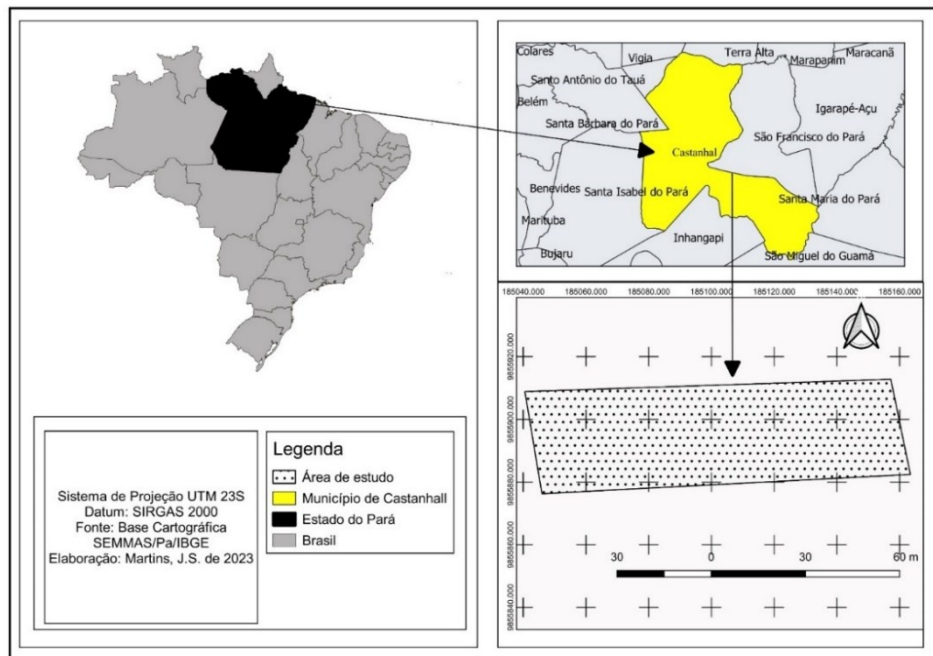
Nesse sentido, a realização de estudos no ecossistema amazônico, com objetivo de avaliar a influência do regime hídrico sobre o rendimento de óleo essencial extraído da pimenteira-do-reino em plena fase produtiva de grãos, apresenta-se como uma importante estratégia de agregação de valor tanto acadêmico quanto industrial à espécie.

2.3 Materiais e Métodos

2.3.1 Localização da área experimental

O experimento foi realizado *in situ*, no período de dezembro de 2022 a dezembro de 2023, na lavoura experimental da Empresa de Produtos Tropicais de Castanhal LTDA – TROPOC, instalada no município de Castanhal (1° 17' 50" S e 47° 55' 20" W), no estado do Pará (Figura 11).

Figura 11 – Mapa de localização da área experimental

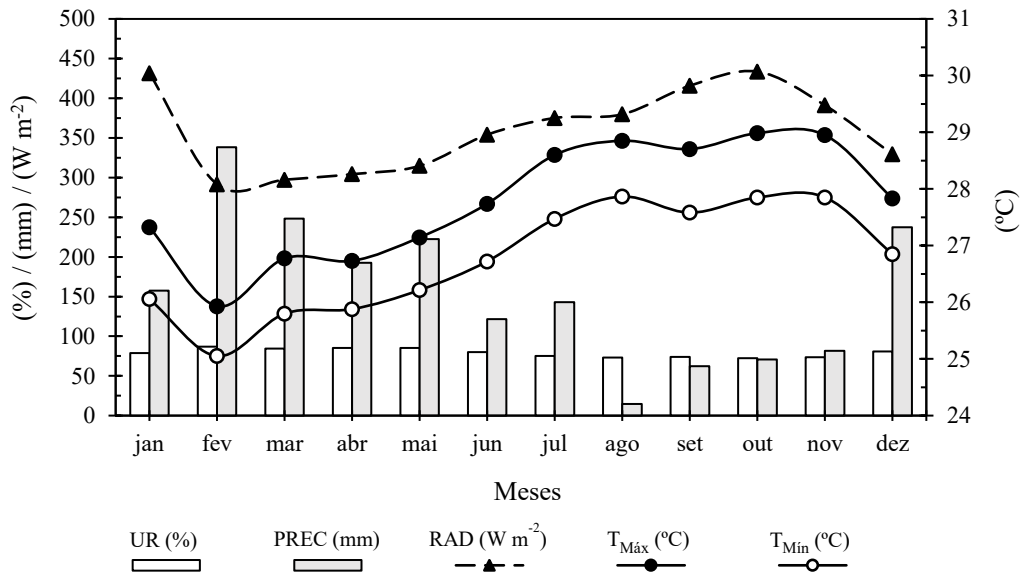


Fonte: O autor (2023).

2.3.2 Condições edafoclimáticas do experimento

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, com médias de temperatura anual de 26°C e precipitação pluviométrica de 2.571,6 mm (ALBUQUERQUE *et al.* 2021). A Figura 12 ilustra o comportamento das variáveis meteorológicas temperatura do ar, radiação global, umidade relativa e precipitação pluviométrica ao longo do experimento, de acordo com a base de dados da estação automática A202 (Castanhal-PA), do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

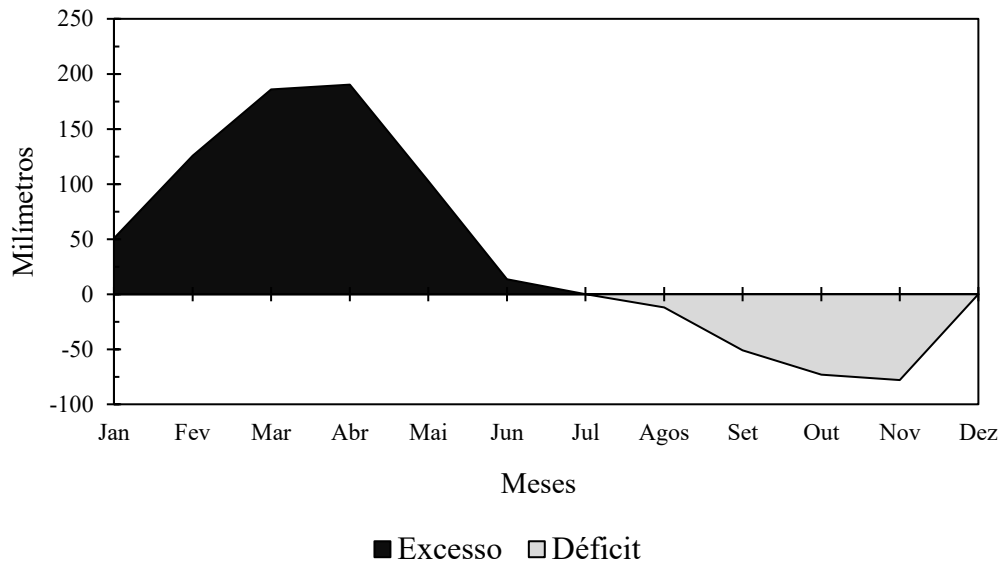
Figura 12 – Médias mensais de temperaturas máximas ($T_{Máx}$) e mínimas ($T_{Mín}$), radiação global (RAD), umidade relativa (UR) e precipitação pluviométrica (PREC) verificadas durante o ano de 2023



Fonte: Adaptado de INMET (2023).

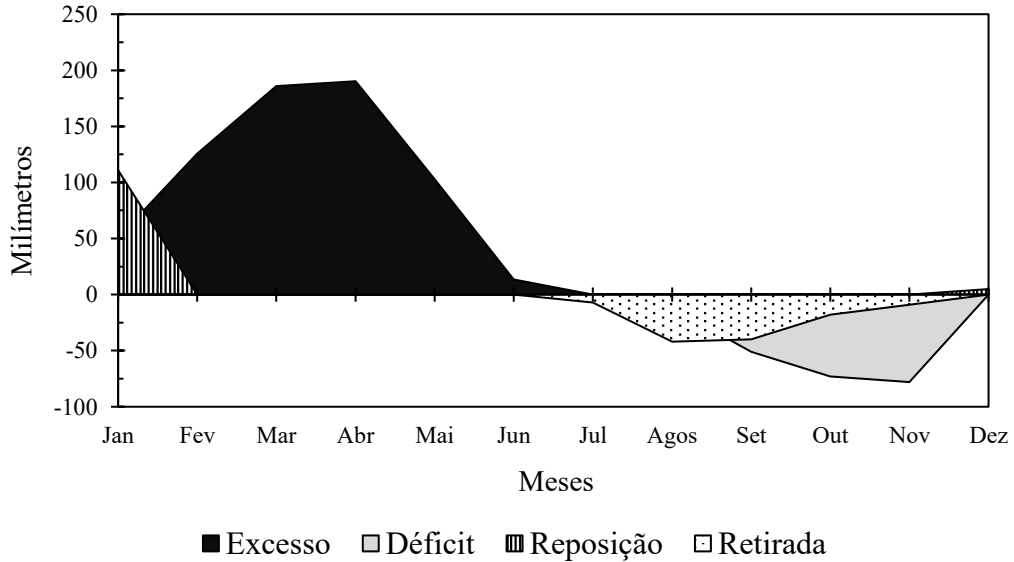
De acordo com o balanço hídrico climatológico do município de Castanhal, realizado por Santos (2023), verifica-se que no período de fevereiro a maio há excesso hídrico na região e de julho a novembro há ocorrência de déficit hídrico (Figura 13). Segundo a mesma autora, entre os meses de dezembro a janeiro transcorre a reposição de água no solo através do início da estação chuvosa, enquanto que a máxima deficiência hídrica, devido a retirada de água no solo no período de estiagem, é verificada nos meses de agosto e setembro (Figura 14).

Figura 13 – Balanço hídrico mensal do município de Castanhal entre os anos de 2003 e 2022



Fonte: Santos (2023).

Figura 14 – Períodos de excedente, deficiência, retirada e reposição hídrica do município de Castanhal entre os anos de 2003 e 2022



Fonte: Santos (2023).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2006), o solo da propensa área experimental é classificado como Latossolo Amarelo distrófico, de classe textural média. Foram coletadas amostras de solo da referida área antes do plantio

(2020) e no início do quarto ano de cultivo (2023), na profundidade de 0-20 cm para realização de análises químicas e físicas no Laboratório de Solos da EMBRAPA Amazônia Oriental.

Os resultados das propriedades físico-químicas do solo, apresentados nas Tabelas 6, foram utilizados para determinação dos teores de fertilizantes aplicados na adubação de plantio, assim como, os da Tabela 7, usados nos cálculos de adubação de produção para o quarto ano após o plantio das pimenteiros-do-reino.

Tabela 6 – Caracterização físico-química do solo antes do plantio das pimenteiros-do-reino

Propriedades químicas													
Prof.	pH	M.O.	N	P	K	Na	Ca	Ca+Mg	Al	H+Al	CTC	Saturação	
(cm)	(H ₂ O)	(g kg ⁻¹)	(%)	--(mg dm ⁻³)--			------(cmol _c dm ⁻³)-----					Base	Al
												(V%)	(m%)
0-20	4,16	7,44	0,06	9	12	3	0,38	0,68	1,24	6,06	6,79	10,69	63,09
Propriedades físicas													
Prof.	Granulometria				Densidade			Porosidade			Total		
	Areia		Silte	Argila	Solo	Partícula	Macro	Micro					
	Grossa	Fina											
(cm)	------(g kg ⁻¹)-----			------(g cm ⁻³)-----			------(cm ³ cm ⁻³)-----						
0-20	291	442	127	140	1,54	2,6	0,078	0,286	0,364				

Fonte: EMBRAPA (2020).

Tabela 7 – Propriedade química do solo experimental no quarto ano produtivo das pimenteiros-do-reino

Prof.	pH	P	K	Na	Ca	Ca+Mg	Al	H+Al	CTC	Saturação	
(cm)	(H ₂ O)	------(mg dm ⁻³)-----			------(cmol _c dm ⁻³)-----					Base	Al
										(V%)	(m%)
0-20	5,75	10	36	8	2,14	3,25	0,11	2,51	4,36	59,89	4,09

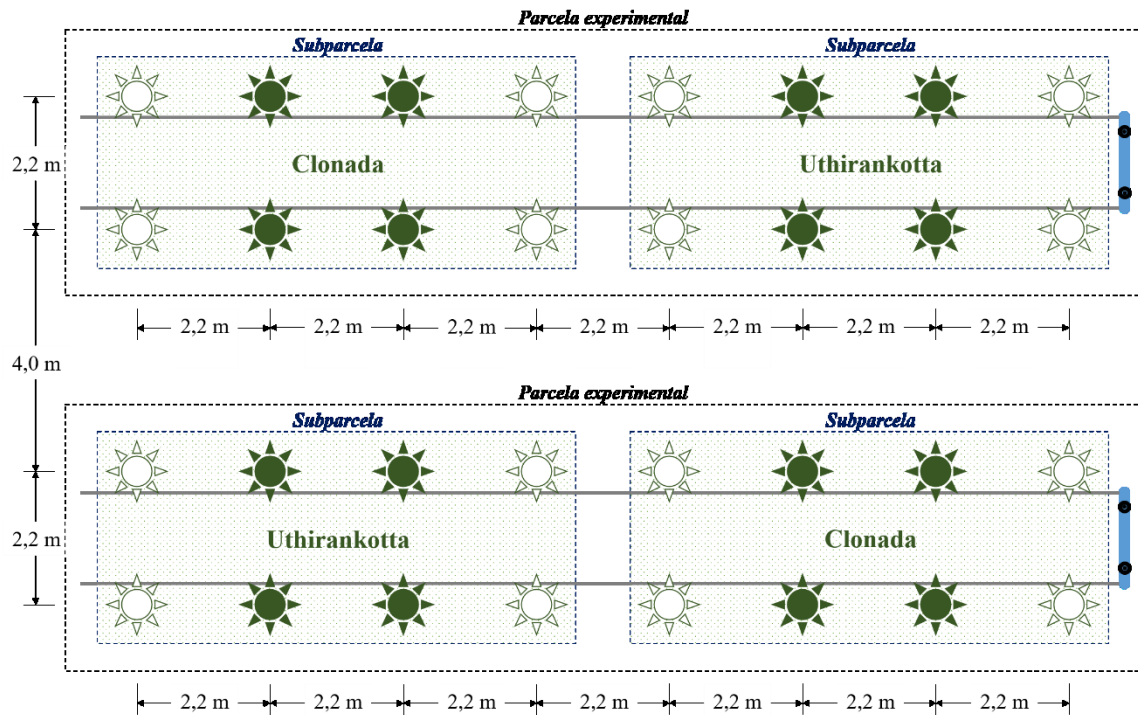
Fonte: EMBRAPA (2023).

2.3.3 Condução agrônômica das cultivares de pimenteira-do-reino

As pimenteiros-do-reino foram tutoradas em estacas de madeira (tutor morto) instaladas em leiras com dimensões de 2,2 m x 26,4 m (58,08 m²), em fileira dupla no espaçamento de 4,0 x 2,20 x 2,20 m (EMBRAPA, 2004). Cada leira abrigou um total de 24 pimenteiros, onde, foram cultivadas 16 plantas em cada parcela experimental (38,72 m²) e oito para fins comerciais. As subparcelas (2,2 m x 8,8 m) constituíram-se de oito plantas dos genótipos Uthirankotta e

Clonada, outrora adquiridos do viveiro ProMudas (Castanhal-PA). A subparcela útil (4,84 m²) foi constituída por quatro plantas centrais, sendo descartas duas plantas no início e no final de cada subparcela experimental (bordaduras) (Figura 15).

Figura 15 – Esquema geral das parcelas experimentais utilizadas no bioensaio em campo, sem escala



Fonte: O autor (2023).

A adubação de produção para o quarto ano de plantio (estádio fenológico durante a condução da pesquisa) foi realizada de acordo com o resultado da análise química do solo (Tabela 7), seguindo as recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará (BRASIL *et al.* 2020). Para tanto, no início de janeiro de 2023, na época das chuvas (Figura 13), realizou-se a adubação orgânica e mineral em cobertura, com as seguintes aplicações, em semicírculo aberto em frente do caule das plantas: 1,5 L planta⁻¹ de torta de mamona; 109,8 g planta⁻¹ de superfosfato triplo – 41% de P₂O₅ e 10% de Ca (equivalente a dose total de fósforo); 148,1 g planta⁻¹ de ureia – 45% de N e; 161,1 g planta⁻¹ de cloreto de potássio – 60% de K₂O (um terço das quantidades totais de nitrogênio (144,4 g planta⁻¹) e potássio (483,3 g planta⁻¹), respectivamente).

Após a aplicação em conjunto, a mistura dos adubos foi coberta com terra. Ainda de acordo com Brasil *et al.* (2020), aos 45 e 90 dias após a primeira adubação, foram aplicados de modo semelhante os dois terços restantes das doses totais de nitrogênio e potássio. Após 15 dias

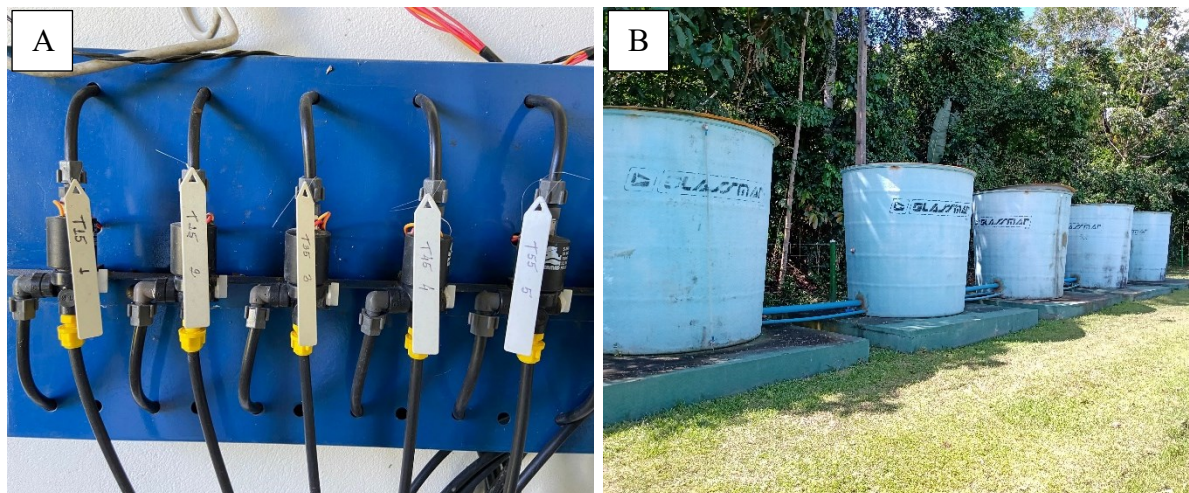
da primeira adubação do quarto ano de plantio, utilizou-se $0,1 \text{ g L}^{-1}$ do complexo 151 via adubação foliar para melhorar a recomposição e o desenvolvimento das plantas (RODRIGUES *et al.* 2019).

Os tratos fitossanitários na área experimental constituíram-se das aplicações de óleo de neem ($20 \text{ mL L de H}_2\text{O}^{-1}$) para o eventual controle de insetos pragas (LEMOS *et al.* 2014), e de roçagem nas linhas e entrelinhas de plantio, além de capinas manuais ao pé das pimenteiras-do-reino para o controle de plantas daninhas. Realizou-se ainda cobertura morta ao redor das plantas, com a biomassa de *Brachiaria decumbens* (também utilizada como cobertura viva) retirada das entrelinhas de cultivo, para a manutenção do teor de unidade na rizosfera.

Um sistema de microirrigação por gotejamento foi utilizado para o manejo da irrigação e umidade do solo. O sistema contou com uma vazão de $3,55 \text{ L h}^{-1}$, com espaçamento entre emissores de 30 cm. A mangueira gotejadora, de diâmetro nominal (DN) 16 mm dispôs de emissores plano autocompensante drip-tech PC/AS, a qual foi instalada sobre a superfície da área experimental com pressão de serviço de 10 m.c.a. no final do tubogotejador. Foram utilizados sete gotejadores por planta, com duas linhas de gotejamento posicionadas dentro da parcela experimental devido ao cultivo das pimenteiras-do-reino em espaçamento duplo.

Para a automação do sistema irrigante utilizou-se um programador e cinco válvulas elétricas de comando (um solenóide em cada tratamento) para repor a lâmina de irrigação em função do tempo necessário de funcionamento do sistema (Figura 16A). Foram usados cinco reservatórios d'água, com volume de 10.000 L cada, para o armazenamento da água de irrigação (Figura 16B). A sucção da água dos reservatórios e injeção no sistema foi realizada por meio de uma bomba elétrica com vazão de $8,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (1 cv), ativada por controlador e filtro de disco.

Figura 16 – Válvulas solenóides (A) e caixas d'água (B) utilizadas nos eventos de irrigação



Fonte: O autor (2023).

Após a realização da manutenção anual do sistema de irrigação, verificou-se o índice de desempenho hidráulico por meio do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição de água – CUD (Equação 1) (*Soil Conservation Service*, 1968), de acordo com a metodologia para a coleta de dados em campo, proposta por Deniculi *et al.* (1980). Nesta ocasião, o sistema apresentou CUD igual a 97%, o qual foi utilizado para os cálculos das lâminas de irrigação aplicadas em cada tratamento.

$$\text{CUD} = \frac{q_{25\%}}{q_m} \quad (1)$$

em que,

CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (%);

$q_{25\%}$ – Média das 25% menores vazões coletadas (L h^{-1}) e;

q_m – Média das vazões coletadas (L h^{-1}).

2.3.4 Uso da tensiometria no manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi efetuado via solo, por meio do monitoramento do potencial mátrico crítico para a cultura. Para isso, utilizou-se baterias formadas por três tensiômetros de punção para a verificação da tensão de água no solo, o que definiu quando e quanto irrigar. Dois tensiômetros foram instalados a 20 cm de profundidade e um posicionado a 40 cm da superfície do solo para o monitoramento da percolação de água. Os instrumentos foram alocados paralelamente as linhas de cultivo a uma distância de 15 cm dos gotejadores (Figura 17A) (BRAGA; CALGARO, 2010). Para leitura do potencial mátrico (tensão) nos tensiômetros, foi utilizado um tensímetro digital de punção. As verificações transcorreram em escala diária, com leituras às 08 h 30 min. (Figura 17B).

Figura 17 – Instalação dos tensiômetros (A) e leitura das tensões de água no solo (B)



Fonte: O autor (2023).

Os eventos de irrigação foram realizados quando o valor médio entre as tensões aferidas pelo tensímetro nos tensiômetros instalados a 20 cm de profundidades, atingiu a tensão crítica definida para cada tratamento, buscando-se elevar o teor de umidade do solo à sua capacidade de campo (LIMA *et al.* 2013). O volume de água aplicado por planta e o tempo de irrigação para cada tratamento foram calculados, determinando-se inicialmente o potencial mátrico de água no solo por meio da Equação 2 (BRAGA; CALGARO, 2010).

$$\Psi_m = -L + 0,098 * c \quad (2)$$

em que,

Ψ_m – Potencial mátrico de água no solo (kPa);

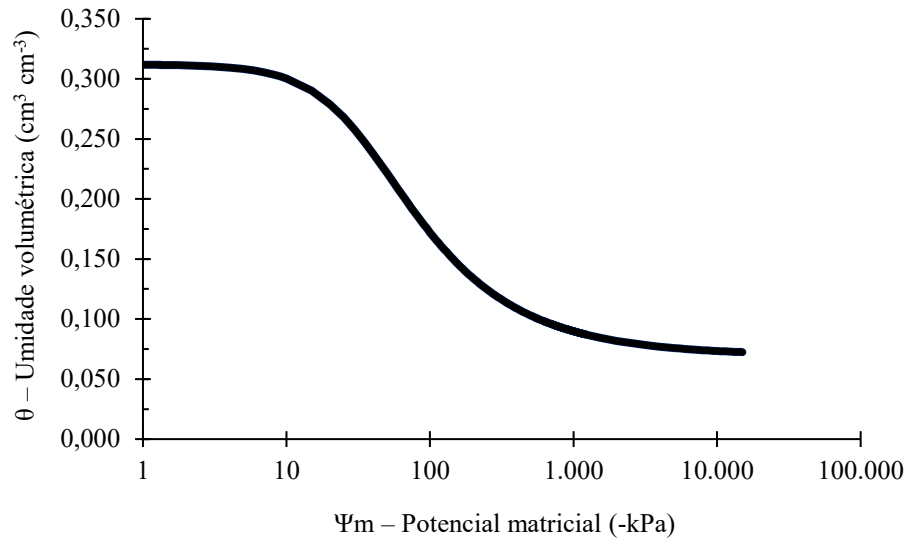
L – Tensão média aferida nos tensiômetros de punção (kPa);

0,098 – Fator de ajuste de umidade (adimensional) e;

c – Comprimento do tensiômetro (cm).

De posse da curva de retenção de água no solo, ajustada pelo modelo matemático de Genuchten (1980) por Santos (2023) para a camada de 0–20 cm de profundidade (Figura 18), estimou-se o teor de umidade atual no solo (θ) em função da tensão de água no solo (Ψ_m), através da Equação 3.

Figura 18 – Curva característica de água no solo da área experimental



Fonte: Santos (2023).

$$\theta = \left\{ \frac{(0,312 - 0,0696)}{[1 + (0,03 * |\Psi_m|)^{1,73}]^{0,422}} \right\} + 0,0696 \quad (3)$$

em que,

θ – Umidade do solo com base em volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e;

Ψ_m – Potencial mátrico de água no solo (kPa).

Por meio do valor de umidade atual do solo (θ), estimado pela Equação 3, foi calculada a lâmina líquida de irrigação para cada tratamento utilizando-se a Equação 4 (MIRANDA; PEREIRA, 2019), considerando a profundidade efetiva do sistema radicular da pimenteira-do-reino de 20 cm (LEMOS *et al.* 2014) e o teor de água volumétrica equivalente à capacidade de campo na tensão de 10 kPa (SILVA; MAROUELLI, 1998), o qual segundo o modelo ajustado na Equação 3 corresponde a $0,3003 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

$$L_L = (\theta_{CC} - \theta) * Z \quad (4)$$

em que,

L_L – Lâmina líquida de irrigação (mm);

θ_{CC} – Umidade do solo na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ – Umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e;

Z – Profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

Tendo-se obtido a lâmina líquida, foi calculada a lâmina bruta de irrigação, fazendo uso da Equação 5 e finalmente definiu-se o tempo de funcionamento do sistema para cada evento de irrigação através da Equação 7 (MIRANDA; PEREIRA, 2019).

$$L_B = \frac{L_L}{(1 - k) * CUD} \quad (5)$$

em que,

L_B – Lâmina bruta de irrigação (mm);

L_L – Lâmina líquida de irrigação (mm);

CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (%) determinado pela Equação 1 e;

k – Constante de aplicação de água eficiente do sistema de irrigação, calculada segundo a Equação 6:

$$k = 1 - E_a \quad (6)$$

E_a – Eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação determinada de acordo com Vermeiren e Jobling (1997).

$$T_i = \frac{L_B * A}{e * q_m} \quad (7)$$

em que,

T_i – Tempo de irrigação em cada tratamento (horas);

L_B – Lâmina bruta de irrigação (mm);

A – Área ocupada por parcela (m^2);

q_m – Vazão média dos emissores ($L h^{-1}$) e;

e – Número de emissores por parcela experimental (unid.).

2.3.5 Delineamento experimental

Para a realização do bioensaio em campo, foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial de parcelas subdivididas 5 x 2, totalizando dez tratamentos e três blocos (repetições). Os fatores que constituíram os tratamentos foram cinco tensões críticas de água no solo (15, 25, 35, 45 e 55 kPa), sendo avaliadas nas parcelas, e dois genótipos de pimenteira-do-reino (Clonada e Uthirankotta), analisados nas subparcelas.

2.3.6 Colheita e processamento dos grãos

As colheitas foram realizadas entre os meses de julho a novembro de 2023. Sendo os frutos do genótipo Clonada colhidos de julho a setembro e os do genótipo Uthirankotta de setembro a novembro. Foram colhidas de forma manual espigas apresentando 1/3 dos frutos no estágio maduros (coloração amarela e, ou, vermelha), das quatro plantas centrais de cada cultivar analisadas nas subparcelas do experimento (Figura 19A); em seguida, aferiu-se o peso fresco dos frutos nas espigas por planta em uma balança digital (Figura 19B) e posteriormente se procedeu a debulha dos mesmos (separação das espiguetas) (Figura 19C).

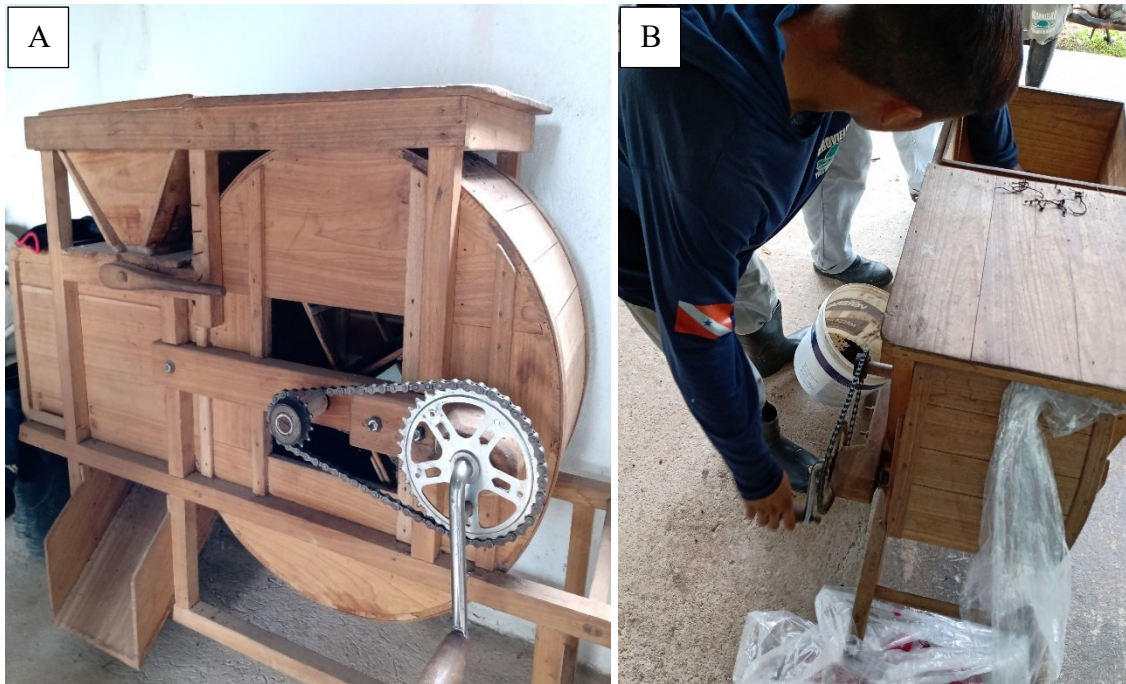
Figura 19 – Colheita manual de pimenta-do-reino (A), pesagem de pimenta verde (B) e debulhador de frutos (C)



Fonte: O autor (2023).

Após a debulha os frutos verdes foram pesados e posteriormente destinados ao processo de secagem natural, realizado em estufa com duração média de três dias, buscando-se obter umidade de grãos em torno de 13% (TOMÉ *et al.* 2018). As amostras de frutos secos foram inseridas em um ventilador manual (Figura 20A) para a eliminação dos resíduos da planta e separação dos grãos chochos (ventilação) (Figura 20B); por fim, as pimentas pretas (secas) foram pesadas, acondicionadas em sacos de polipropileno e destinadas ao armazenamento nas instalações da empresa.

Figura 20 – Ventilador manual (A) e separação de resíduos dos frutos secos (B)



Fonte: O autor (2023).

2.3.7 Parâmetros produtivos avaliados

Produção de pimenta verde (Ppv) e Produção de fruto de pimenta verde (PFpv)

A determinação da produção média de pimenta verde, em kg por planta, foi realizada por meio da relação entre o somatório do peso dos frutos após a colheita (frutos frescos) e o número de plantas avaliadas por cultivar (Equação 8). Já a produção média de fruto de pimenta verde foi definida através do peso dos grãos aferido após a debulha, seguindo o mesmo método de quantificação da Ppv (Equação 9).

$$Ppv = \frac{\sum_{i=1}^4 PF_F}{4} \quad (8)$$

em que,

Ppv – Produção de pimenta verde (kg planta⁻¹) e;

PF_F – Peso de fruto fresco (kg).

$$PFpv = \frac{\sum_{i=1}^4 PF_D}{4} \quad (9)$$

em que,

PFpv – Produção de fruto de pimenta verde (kg planta⁻¹) e;

PF_D – Peso de fruto após a debulha (kg).

Produção de pimenta preta (Ppp)

A produção média de pimenta preta, em kg por planta, foi obtida mediante a razão matemática entre o somatório dos pesos conferidos depois do processo de ventilação e o número de pimenteiros-do-reino avaliadas em cada subunidade experimental através da Equação 10.

$$P_{pp} = \frac{\sum_{i=1}^4 PF_V}{4} \quad (10)$$

em que,

Ppv – Produção de pimenta preta (kg planta⁻¹) e;

PF_V – Peso de fruto após a ventilação (kg).

Rendimento de pimenta preta (Rpp)

Para o cálculo do rendimento percentual de pimenta preta em relação a produção de pimenta verde por planta, utilizou-se a Equação 11 (RODRIGUES *et al.* 2019):

$$R_{pp} = \frac{P_{pp}}{P_{pv}} * 100 \quad (11)$$

em que,

Rpp – Rendimento de pimenta preta (%);

Ppp – Produção média de pimenta preta (kg planta⁻¹) e;

Ppv – Produção média de pimenta verde (kg planta⁻¹).

Produtividade (PROD)

A produtividade média de pimenta preta obtida do experimento foi calculada por meio da razão entre o peso total de pimenta preta e a área ocupada pelas quatro plantas avaliadas de cada cultivar, conforme a Equação 12:

$$PROD = \frac{\sum_{i=1}^4 PF_V}{A} \quad (12)$$

em que,

PROD – Produtividade de pimenta preta (kg ha⁻¹);

PF_V – Peso de fruto após a ventilação (kg) e;

A – Área (ha).

Eficiência de uso de água (EUA)

A produtividade por umidade de lâmina aplicada, definida na agricultura irrigada como eficiência de uso de água, foi estimada de acordo com a Equação 13 (SOUSA *et al.* 2000):

$$EUA = \frac{PROD}{w} \quad (13)$$

em que,

EUA – Eficiência de uso de água ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$);

PROD – Produtividade de pimenta preta (kg ha^{-1}) e;

w – Lâmina de irrigação aplicada (mm).

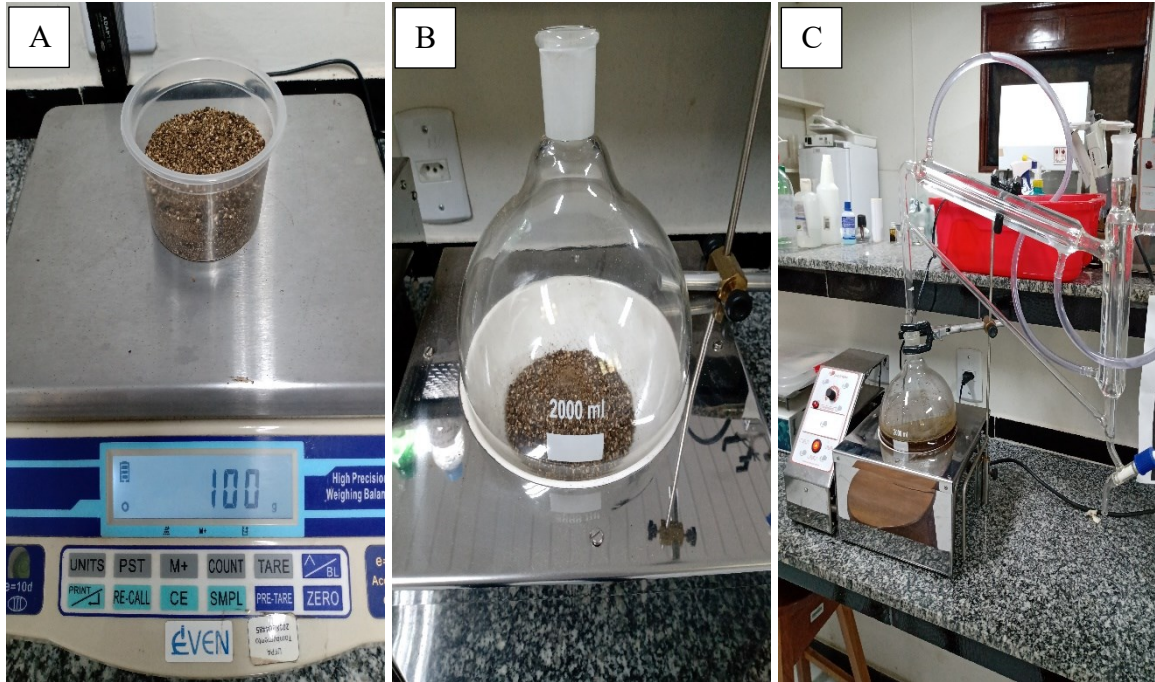
2.3.8 Determinações dos rendimentos das extrações de óleo essencial

Preparação das amostras e Método de extração

As amostras de pimenta-do-reino utilizadas para a realização das análises em laboratório, foram coletadas em setembro de 2023 (de acordo com a Figura 14, época de maior déficit hídrico de Castanhal-PA). Após o processo de secagem natural dos grãos (pimenta preta), realizado em estufa na empresa TROPOC LDTA, foram coletados 30 g de pimenta preta de cada uma das quatro plantas avaliadas na subparcela útil. Em seguida, formou-se uma amostra composta de cada tratamento por bloco (30 amostras) de 120 g de pimenta-do-reino produzidas pelos genótipos Clonada e Uthirankotta.

O material coletado foi levado ao Laboratório de Agronomia, do Campus Universitário do Tocantins/Cametá, da Universidade Federal do Pará (UFPA) para a extração dos óleos essenciais dos frutos secos. Os grãos foram triturados utilizando-se um moinho de facas, e em seguida pesados 100 g de cada amostra (Figura 21A). As porções pesadas foram acondicionadas em balões volumétricos de fundo redondo, com capacidade de 2.000 mL, e combinadas com 1.000 mL de água destilada (Figura 21B). Empregou-se o método de hidrodestilação para a extração dos óleos essenciais usando um aparelho do tipo Clevenger, por 3 horas a 100° C (Figura 21C). Em seguida, o volume do óleo extraído foi quantificado com o auxílio de uma micropipeta (COSTA *et al.* 2021).

Figura 21 – Pesagem (A), preparação (B) e hidrodestilação (C) das amostras de pimenta-do-reino



Fonte: O autor (2023).

Definições dos rendimentos de extração

Os teores de óleo essencial extraídos das amostras de pimenta preta foram calculados por meio do método padronizado em base livre de umidade (BLU). Para tanto, durante o processo de secagem natural adotou-se o teor de umidade da biomassa em torno de 13%, em razão do padrão de qualidade estabelecido para comercialização de pimenta-do-reino (TOMÉ *et al.* 2018). Os rendimentos das extrações foram determinados pela Equação 14 (SANTOS *et al.* 2004).

$$R_e = \frac{V_o}{B_m - \left(\frac{B_m * U_{\%}}{100}\right)} * 100 \quad (14)$$

em que,

R_e – Rendimento de extração (%);

V_o – Volume de óleo extraído (mL);

B_m – Biomassa vegetal (g) e;

$U_{\%}$ – Teor de umidade (%).

2.3.9 Análise estatística dos dados e interpretação do coeficiente de Pearson (r)

Após a verificação da homocedasticidade e normalidade dos dados, foi realizada análise de variância ($p \leq 0,05$). Mediante diferença significativa entre os tratamentos, realizou-se análise de regressão para as variáveis obtidas sendo testados os modelos linear e polinomial de 2º grau, tendo como parâmetro de escolha a significância dos coeficientes de regressão a 5% de probabilidade (teste F) e o maior valor de R^2 . As médias das variáveis analisadas também foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. As análises foram realizadas com o auxílio do software estatístico Sisvar 5.8.

Foram feitos ainda estudos de correlação de Pearson entre o rendimento de óleo essencial e as variáveis produção de pimenta verde e preta, produtividade e eficiência de uso de água pelas cultivares Clonada e Uthirankotta. Para tanto, utilizou-se o programa SigmaPlot na versão 11.0. A interpretação do coeficiente de correlação de Pearson (r) considerada nesta pesquisa é demonstrada na Quadro 2 (HINKLE *et al.* 2003).

Quadro 2 – Interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson (r)

r de Pearson	Interpretação
$\pm 0,90$ a $\pm 1,00$	Correlação positiva ou negativa muito alta
$\pm 0,70$ a $\pm 0,90$	Alta correlação positiva ou negativa
$\pm 0,50$ a $\pm 0,70$	Correlação positiva ou negativa moderada
$\pm 0,30$ a $\pm 0,50$	Baixa correlação positiva a negativa
$\pm 0,00$ a $\pm 0,30$	Correlação insignificante

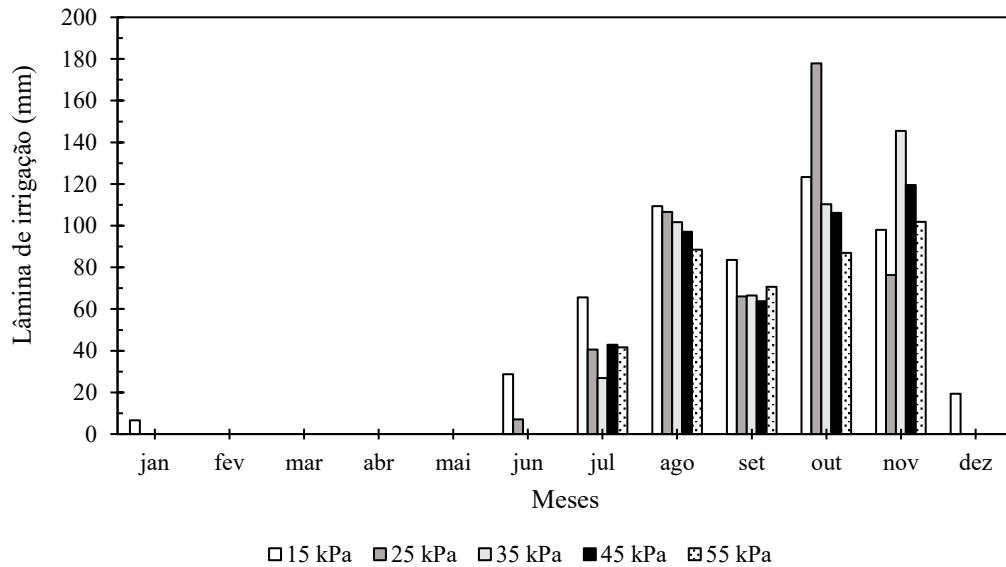
Fonte: Adaptado de Hinkle *et al.* (2003).

2.4 Resultados e Discussão

2.4.1 Manejo da irrigação

Na Figura 22 encontram-se as quantidades de água de irrigação aplicadas em razão das tensões de água no solo avaliadas (15, 25, 35, 45 e 55 kPa) sob a cultura da pimenteira-do-reino, durante o ano de 2023, no município de Castanhal-PA.

Figura 22 – Lâminas de irrigação aplicadas em função das tensões críticas de água no solo



Apesar dos volumes de água aplicados pelo sistema de irrigação nos meses de janeiro e dezembro, a diferenciação efetiva dos tratamentos relacionados as tensões de água no solo iniciaram no final de junho e se estenderam até o término de novembro, isto é, durante 157 dias. Observa-se que as maiores lâminas de irrigação foram aplicadas nos meses de outubro e novembro nas tensões 25 kPa (177,9 mm) e 35 kPa (145,45 mm), respectivamente. Com exceção dos meses supracitados, nos tratamentos submetidos à tensão crítica de 15 kPa foram aplicadas as maiores lâminas de irrigação nos demais meses avaliados.

Devido a tensão da capacidade de campo (10 kPa) e a baixa retenção de água no solo de condução do experimento, o manejo dos eventos de irrigação nos tratamentos de tensão 15 kPa ocorreram com maior frequência em relação aos outros tratamentos de tensões controle. De acordo com Marouelli *et al.* (2007), em solos de textura arenosa as irrigações devem ser realizadas quando a tensão crítica atingir de 10 a 15 kPa, já para solos de textura média e fina o momento de irrigar deve ser realizado quando os sensores de decisão atingirem a tensão de 20 a 40 kPa. Para o manejo de irrigação via gotejamento deve-se considerar a faixa de tensão crítica entre 7 e 20 kPa, visando manter o solo com teor de água ideal.

O início da reposição de água no solo realizada no mês de junho, por meio de irrigação suplementar para a cultura da pimenteira-do-reino em Castanhal-PA, foi comprovado pelo período de retirada de água no solo verificado no extrato do balanço hídrico apresentado na Figura 14. Em relação as maiores lâminas de água aplicadas em outubro, constatou-se para este mês o maior valor de radiação solar (434 W m^{-2}) e o menor índice de umidade relativa (72,3%)

na série observada na Figura 12. Nota-se ainda que durante os meses de agosto a novembro de 2023, os volumes de chuva estiveram abaixo de 100 mm (Figura 12).

A deficiência hídrica entre agosto e novembro em Castanhal-PA, com máximas em outubro e novembro (Figura 13), induzida pela má distribuição das chuvas ao longo do ano, é fator determinante para a utilização de irrigação suplementar durante o período de estiagem no segundo semestre amazônico. Segundo Duarte *et al.* (2008), há uma redução de 40% das perdas de produção de pimenta-do-reino em plantas cultivadas sob irrigação. Bastos *et al.* (2005) descrevem que lavouras irrigadas apresentam produção elevada no município de Paragominas-PA, em contraponto aos cinco meses de déficit hídrico no segundo semestre do ano.

Na Tabela 8 são apresentadas as lâminas brutas (L_B) utilizadas para a condução do experimento (157 dias) em função das tensões críticas de água no solo, bem como, as lâminas médias (L_m) e total aplicada em cada tratamento tensão (w), o volume de chuva no período avaliado (PREC), o número de eventos de irrigação por tensão controle (NI), o turno de rega (TR) e a demanda hídrica diária (DH).

Tabela 8 – Lâmina bruta (L_B), Lâmina média (L_m), volume de irrigação por planta (V_I), lâmina total aplicada (w), precipitação pluviométrica (PREC), número de irrigações (NI), turno de rega (TR) e demanda hídrica (DH) do manejo de irrigação na cultura da pimenteira-do-reino em Castanhal, PA

Tensão (kPa)	L_B (mm)	L_m (mm)	V_I (L planta ⁻¹)	w ------(mm)-----	PREC	Total	NI (unid.)	TR (dias)	DH (mm dia ⁻¹)
15	2,2	6,4	5,0	508,49	493,6	1002,09	80	2	3,24
25	7,0	14,0	11,0	474,48	493,6	968,08	34	5	3,02
35	11,5	15,0	11,9	450,88	493,6	944,48	30	5	2,87
45	15,4	18,7	14,7	429,38	493,6	922,98	23	7	2,73
55	18,6	19,5	15,4	389,53	493,6	883,13	20	8	2,48

Como a porcentagem de área molhada foi de 11,6% da área total ocupada por cada planta (6,8 m²), a conversão dos valores de L_m em milímetros para litros por planta (V_I) foi realizada multiplicando-se o valor em mm pela área efetivamente molhada por planta (SILVA *et al.* 2001). As informações do manejo de irrigação evidenciam que as pimenteiras-do-reino submetidas à tensão de 15 kPa, receberam mais de 23,4% de água de irrigação (w) que as plantas cultivadas sob a tensão de 55 kPa (349,53 mm) e 11,3% mais que as pimenteiras submetidas à tensão de 35 kPa (450,88 mm).

Em razão do menor turno de rega da tensão de 15 kPa (2 dias), foram observadas maior frequência de irrigação (80 unid.) e maior demanda hídrica diária (3,24 mm dia⁻¹) para essa

tensão crítica de água no solo, durante os 157 dias de diferenciação dos tratamentos. Em contrapartida, as pimenteiros-do-reino submetidas às tensões de 35 kPa com TR de 5 dias e de 55 kPa com TR de 8 dias, receberam, respectivamente, 62,5 e 75% menos eventos de irrigação (NI) que as plantas sob condições hídricas de 15 kPa.

Trabalhando com o cultivo de cenoura sob diferentes tensões críticas de água no solo, Lima Junior *et al.* (2012) também verificaram que plantas submetidas à tensão de 15 kPa (TR de 4 dias) recebem 41% mais eventos de irrigação que os vegetais sob tensão de 35 kPa com turno de rega de 7 dias. Ao cultivar a pimenteira-do-reino sob diferentes intervalos de irrigação, Rasanjali *et al.* (2019) observaram que quanto maior o turno de rega menor a massa fresca, e que o acúmulo de massa seca pela pimenteira é maior conforme o aumento do volume de água de irrigação e redução do turno de rega. Para Mauri *et al.* (2017) a redução do acúmulo de massa seca em condições de déficit hídrico ocorre como forma de manutenção do teor de água celular da planta devido a sua redução foliar como mecanismo de regulação transpiratória.

2.4.2 Desempenho produtivo e eficiência de uso da água

Na Tabela 9 encontram-se os valores do teste F ao nível de 5% de significância para as variáveis produtivas (Ppv, PFpv, Ppp, Rpp e PROD), eficiência de uso da água pelas cultivares (EUA) e rendimento de extração de óleo essencial de pimenta preta (R_e). Observa-se que, com exceção do rendimento de pimenta preta, todas as variáveis foram influenciadas tanto pelo fator genótipo de pimenteira-do-reino (Clonada e Uthirankotta) quanto pelo fator tensões de água no solo (15, 25, 35, 45 e 55 kPa), assim como também pela interação entre ambos os fatores.

Tabela 9 – Resumo da análise de variância para produção de pimenta verde (Ppv), produção de fruto de pimenta verde (PFpv), produção de pimenta preta (Ppp), rendimento de pimenta preta (Rpp), produtividade (PROD), eficiência de uso de água (EUA) e rendimento de extração de óleo essencial (R_e) em genótipos de pimenteira-do-reino submetidos à tensões de água no solo em Castanhal, PA

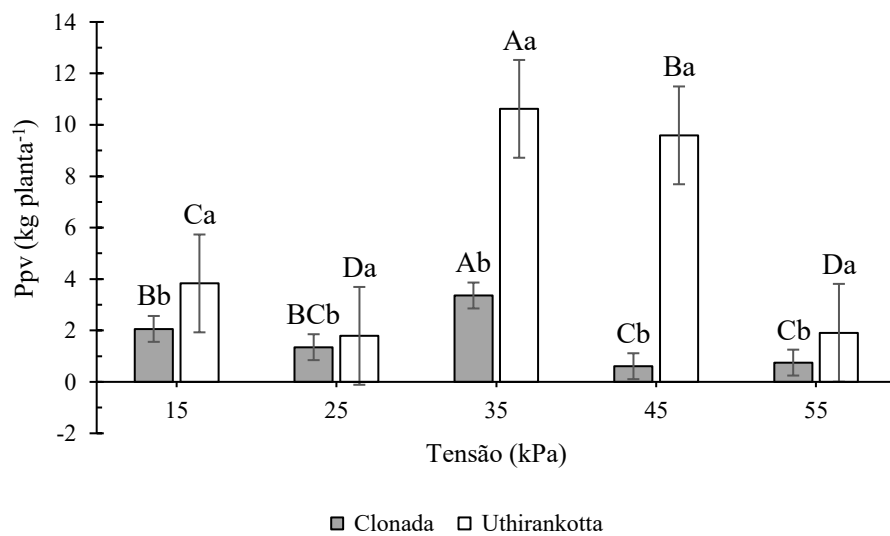
Fator de variação	Valores de F						
	Ppv	PFpv	Ppp	Rpp	PROD	EUA	R_e
Bloco	0,13 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,09 ^{ns}
Genótipo (G)	6560,31*	4170,38*	9670,80*	9,07*	8984,78*	7824,38*	638,76*
Tensão (T)	161,69*	160,77*	137,44*	1,27 ^{ns}	137,81*	152,82*	47,06*
G x T	1302,78*	807,10*	869,61*	0,59 ^{ns}	805,80*	740,73*	5,55*
CV (G) (%)	3,70	4,73	2,74	2,08	2,85	3,08	6,16

CV (T) (%)	13,01	13,15	10,78	1,60	10,76	10,38	6,19
------------	-------	-------	-------	------	-------	-------	------

*significativo a 5 % de probabilidade. ^{ns} não significativo. CV (%) = coeficiente de variação.

O resultado do desdobramento da interação entre tensões de água no solo e genótipos de pimenteira-do-reino para a variável produção de pimenta verde é demonstrado graficamente na Figura 23.

Figura 23 – Produção de pimenta verde (Ppv) entre os genótipos Clonada e Uthirankotta sob diferentes tensões críticas de água no solo



Nota: Valores médios seguidos da mesma letra, não diferem entre si no teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas comparam o efeito das tensões e minúsculas comparam o efeito dos genótipos.

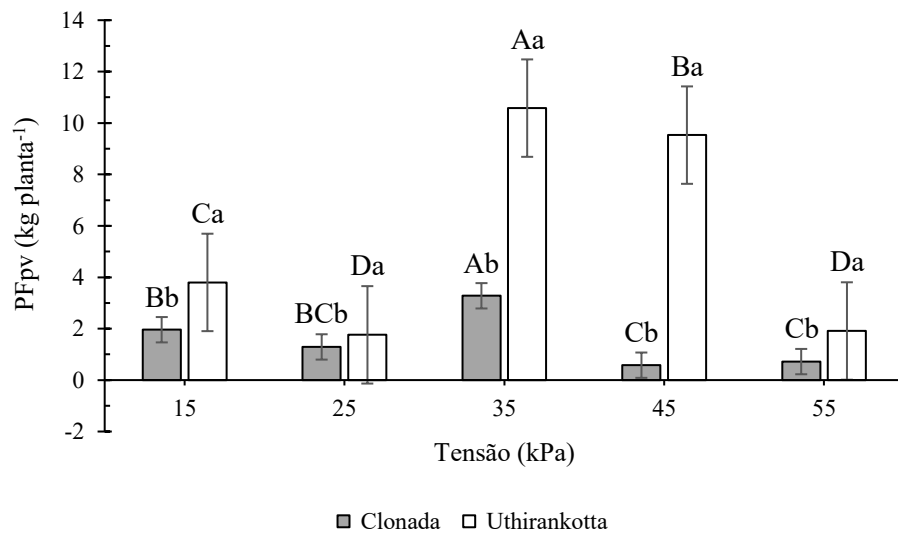
Ao analisar a Figura 23, nota-se que os valores médios de Ppv da Clonada ($3,36 \text{ kg planta}^{-1}$) e da Uthirankotta ($10,62 \text{ kg planta}^{-1}$) na tensão crítica de 35 kPa foram superiores das médias verificadas para as demais tensões de água no solo. Observou-se também nos resultados da tensão 35 kPa que o genótipo Uthirankotta superou em cerca de 68% a produção média de pimenta verde da Clonada. O genótipo Clonada expressou na tensão 45 kPa a menor média de Ppv ($0,61 \text{ kg planta}^{-1}$), não diferindo das tensões 55 e 25 kPa. Já as menores produções de Ppv encontradas para a Uthirankotta foram de 1,79 e $1,91 \text{ kg planta}^{-1}$ nas tensões de 25 e 55 kPa, respectivamente.

O resultado médio de Ppv entre as duas cultivares na tensão de 35 kPa, é aproximadamente 19% inferior ao constatado por Santos (2023), em sua análise sobre os efeitos da tensão 35 kPa na produção de pimenta verde ($8,61 \text{ kg planta}^{-1}$) em cultivares de pimenteira-do-reino submetidas ao manejo da irrigação na microrregião de Castanhal-PA. Entre as possíveis causas que levaram a resposta encontrada neste trabalho estão os fatores climáticos,

proporcionados pelas condições do fenômeno El Niño em 2023 (NICOLAU NETO, 2023), uma vez que, foi registrado temperatura média anual de 27,3° C para a região do experimento (Figura 12), isto é, uma média superior em 1,3° C que a temperatura média anual estabelecida pela classificação de Köppen para o município de Castanhal-PA (ALBUQUERQUE *et al.* 2021).

Evidenciado pela Figura 24, a produção de frutos de pimenta verde desempenhada pelos dois genótipos de pimenteira-do-reino avaliados em relação as tensões de água no solo, demonstrou resultados semelhantes aos verificados em Ppv.

Figura 24 – Produção de frutos de pimenta verde (PFpv) entre os genótipos Clonada e Uthirankotta sob diferentes tensões críticas de água no solo



Nota: Valores médios seguidos da mesma letra, não diferem entre si no teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas comparam o efeito das tensões e minúsculas comparam o efeito das genótipos.

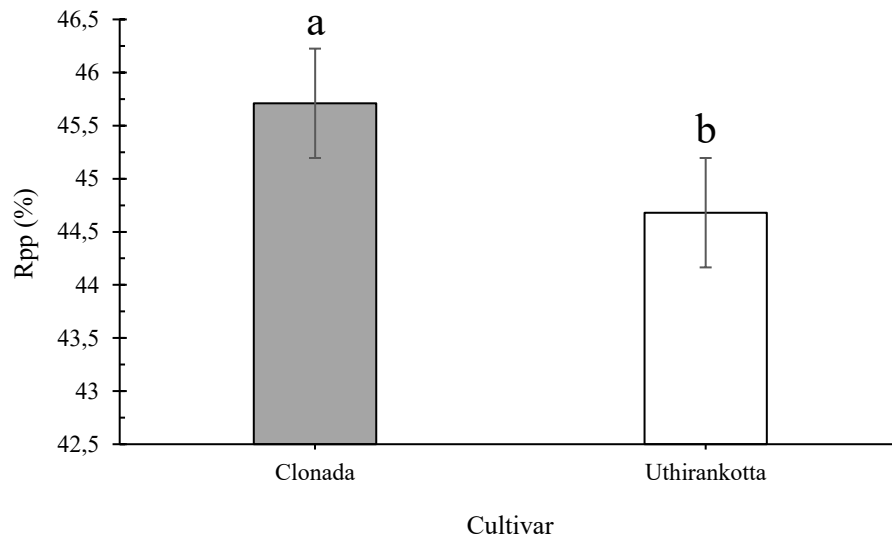
Observa-se que a maior média de PFpv foi de 10,58 kg planta⁻¹ externada pelo genótipo Uthirankotta submetido ao manejo da irrigação com a tensão crítica de 35 kPa, sendo superior em aproximadamente 69% que a média verificada para a Clonada sob a mesma tensão controle. Como supracitado, os menores índices produtivos médios constatados para a produção de frutos de pimenta verde seguiram o mesmo comportamento observado em Ppv. Em termos de valores absolutos, as menores médias de PFpv foram apresentadas pelos genótipos avaliados sob as tensões de 45 e 25 kPa, respectivamente, isto é, uma diferença em torno de 67% entre os menores valores observados.

Além do fator abiótico clima, mencionado anteriormente em Ppv, a produção de frutos de pimenta verde provavelmente foi afetada também por fatores bióticos (pragas e doenças), em vista, a incidência de pulgão, mosca branca e cochonilha durante o ciclo produtivo das

pimenteiras, e de algumas plantas serem acometidas pela doença fúngica antracnose. Segundo Lemos *et al.* (2014), os sintomas da antracnose em pimenteiras-do-reino se intensificam nos meses mais secos do ano, do mesmo modo que a transmissão da cochonilha é favorecida pelas altas temperatura e pelo déficit hídrico.

O rendimento de pimenta preta não foi influenciado pelas tensões críticas de água no solo e nem pela interação destas com os genótipos de pimenteira-do-reino analisadas na presente pesquisa, como demonstrou a Tabela 9. Entretanto, verificou-se diferença entre os valores médios apresentados pelas cultivares (Figura 25).

Figura 25 – Rendimento de pimenta preta (Rpp) entre os genótipos de pimenteira-do-reino Clonada e Uthirankotta em Castanhal, PA



Nota: Valores médios seguidos da mesma letra, não diferem entre si no teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

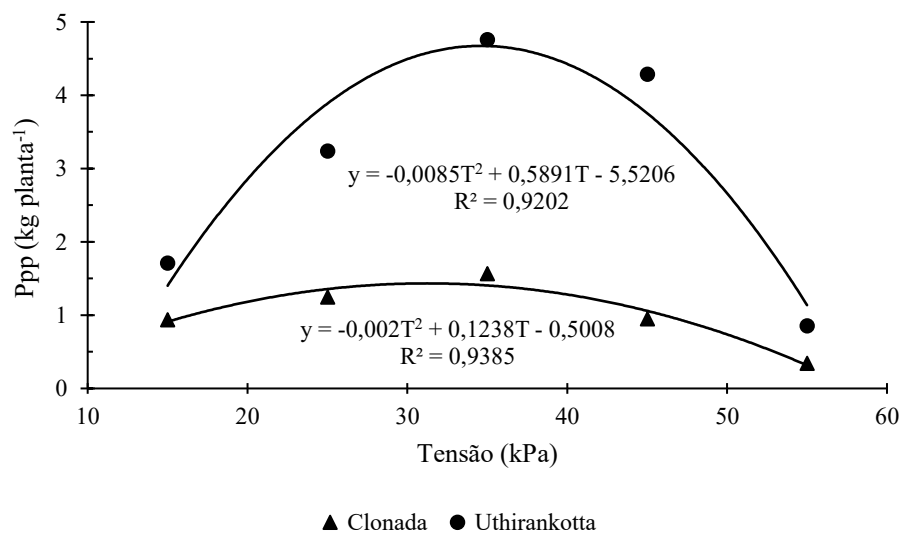
O Rpp foi a única variável em que o efeito do fator genótipo possibilitou a produção da Clonada superar a registrada para a Uthirankotta. Ainda que, o percentual de Rpp calculado para o genótipo Clonada (45,7%) seja superior em menos de 1% do rendimento percentual determinado para a Uthirankotta. Resultados diferentes foram encontrados por Pacheco *et al.* (2019), ao avaliarem os rendimentos de pimenta preta da Clonada e Uthirankotta no terceiro ano produtivo nas condições edafoclimáticas do município de Baião-PA, ou seja, os autores constataram superioridade, em torno de 8%, do genótipo Uthirankotta (Rpp de 34,3%) sobre o genótipo Clonada.

Há evidências científicas indicando que as variações de genótipos (cultivares) da pimenteira-do-reino, podem apresentar diferenças fisiológicas e morfológicas ao serem submetidas ao déficit hídrico (AMBROZIM *et al.* 2022), implicando em diferenças

significativas entre os seus índices produtivos em função do uso da água de irrigação, assim como foi observado neste trabalho.

Para demonstrar os efeitos do fator tensão de água no solo na produção de pimenta preta dos genótipos Clonada e Uthirankotta, realizou-se análise de regressão ($p \leq 0,05$), sendo constatada interação significativa entre os fatores observados, com comportamento polinomial de grau 2 (função quadrática). Tais resultados são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Produção de pimenta preta (Ppp) dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo



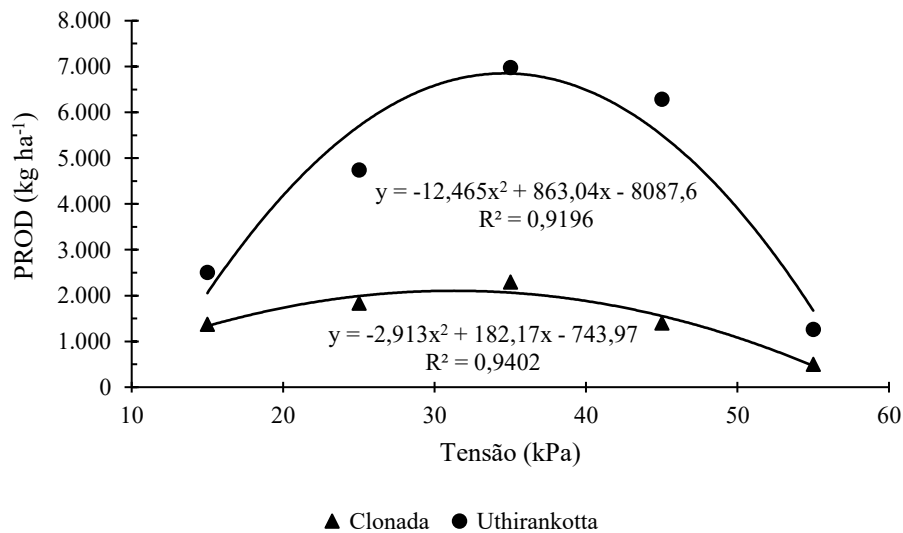
De um modo geral, observa-se o incremento de Ppp em função do aumento da tensão de água no solo, onde as maiores produções foram obtidas sob a tensão de 35 kPa. No entanto, quando os efeitos do estresse hídrico (excesso e déficit hídrico) aumentaram, o valor de Ppp voltou a cair, e de forma mais acentuada para o genótipo Uthirankotta. Neste contexto, o ponto de maior produção de pimenta preta foi obtido com a tensão de 35 kPa, equivalente a uma produção de 4,76 kg planta⁻¹ para a Uthirankotta, e de 1,57 kg planta⁻¹ para o genótipo Clonada.

Os dados de produção de pimenta preta (pimenta-do-reino) estão dentro dos valores verificados por Rodrigues *et al.* (2019), para os genótipos Clonada (1,8 kg planta⁻¹) e Uthirankotta (4,2 kg planta⁻¹) no terceiro ano de produção de grãos, cultivados na microrregião Bragantina. No entanto, tais resultados diferem consideravelmente dos obtidos por Pacheco *et al.* (2019), os quais observaram que a produção de pimenta-do-reino desempenhada pela Clonada foi cerca de 33% superior a exercida pela cultivar Uthirankotta nas condições da microrregião de Cametá.

As respostas de Ppp das cultivares em função do aumento da tensão crítica de água no solo, explicadas pelos seus respectivos modelos quadráticos, estima que a produção máxima de pimenta preta da Clonada ($2,42 \text{ kg planta}^{-1}$) e da Uthirankotta ($4,69 \text{ kg planta}^{-1}$) são obtidas sob as tensões de 31,0 e 34,7 kPa, respectivamente, e apresentam diferença de Ppp entre si, em torno de 48%, quando submetidas à estas tensões de água no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos (2023), ao avaliar os genótipos Clonada e Uthirankotta sob manejo da irrigação por tensiometria nas condições edáficas e climáticas do município de Castanhal-PA, estimando pelo modelo polinomial quadrático a máxima produção média de pimenta-do-reino entre as cultivares ($3,07 \text{ kg planta}^{-1}$) em função da tensão de 34,2 kPa.

As produtividades de pimenta preta estimadas para os genótipos de pimenteira-do-reino em função das tensões de água no solo são apresentadas na Figura 27. A figura demonstra que a análise de regressão para a variável produtividade também foi significativa no ajuste do modelo polinomial quadrático às respostas das cultivares sob as tensões, com coeficiente de determinação (R^2) acima de 90% tanto para a Clonada como para a Uthirankotta.

Figura 27 – Produtividade (PROD) de pimenta preta dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo



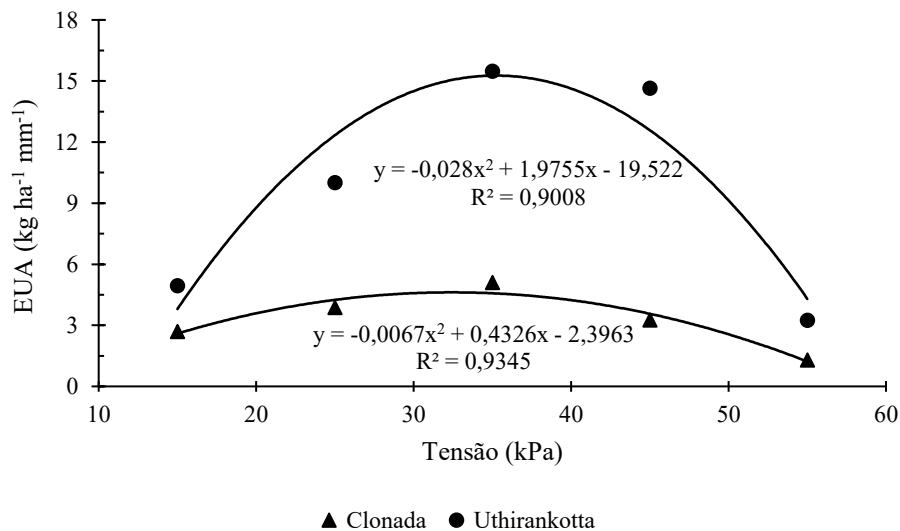
Ao analisar a figura acima, verifica-se que a dispersão dos valores de PROD seguiram comportamento similar aos determinados para Ppp, devido a proporcionalidade (direta) existente entre as duas variáveis produtivas. Desta forma, a PROD obteve valores máximos de $2.296,76 \text{ kg ha}^{-1}$ para a Clonada e $6.979,29 \text{ kg ha}^{-1}$ para a Uthirankotta, quando submetidas à tensão de 35 kPa. As funções quadráticas estabelecidas para os dois genótipos de pimenteira-

do-reino, estimam que a máxima produtividade de pimenta preta da Clonada, de 3.592,06 kg ha⁻¹, é obtida sob a tensão de 31,3 kPa, enquanto a da Uthirankotta (6.850,99 kg ha⁻¹) é alcançada com o genótipo sob a tensão crítica de 34,6 kPa.

A partir da aplicação da densidade de plantio adotada nesta pesquisa junto ao estudo realizado por Pavão (2022), que prospectou a produtividade média da pimenteira-do-reino para o estado do Pará até o ano de 2040 (4.000 kg ha⁻¹) tendo como parâmetro uma produção de 3,0 kg de pimenta por planta, se obtém uma produtividade média de 4.398,0 kg ha⁻¹. Em termos práticos, nas condições experimentais de Castanhal-PA, a maior PROD estimada para a pimenteira-do-reino (6.979,29 kg ha⁻¹), encontrada nas condições de manejo da tensão 35 kPa (11,9 L planta⁻¹), supera em cerca de 37% a produtividade média estimada para o Estado até 2040.

A produtividade por unidade de lâmina aplicada, definido na agricultura irrigada como eficiência de uso de água, também apresentou significância para o modelo de ajuste quadrático junto aos dados obtidos. A dispersão dos valores de resposta dos genótipos de pimenteira-do-reino em razão das tensões críticas de água no solo é demonstrada na Figura 28.

Figura 28 – Eficiência de uso de água (EUA) dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo



Através dos resultados da figura supracitada, verificou-se que houve uma amplitude expressiva, em volta de 67%, entre a máxima (15,48 kg ha⁻¹ mm⁻¹) e mínima (5,09 kg ha⁻¹ mm⁻¹) EUA observadas na tensão de 35 kPa (máxima EUA das cultivares). Ao comparar as tensões, observou-se que ocorreram diferenças entre a tensão de 35 kPa (w de 450,88 mm) e as tensões

de 15 (w de 508,49 mm) e 55 kPa (w de 389,53 mm) – mínimas EUA das cultivares – em torno de 68 e 79%, respectivamente, para o genótipo Uthirankotta e de respectivos 47 e 75% para o genótipo Clonada.

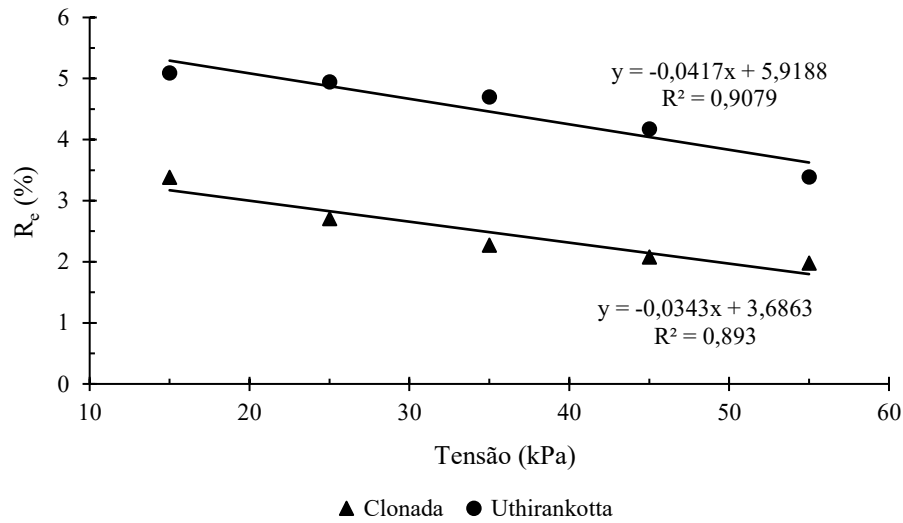
Os resultados expressam, de modo claro e evidente, a relação inversamente proporcional entre os parâmetros PROD e w, ou seja, quanto maior os percentuais de EUA menor será o consumo de água pela planta (w), em contrapartida, lâminas de irrigação aplicadas indiscriminadamente, em detrimento, especialmente, da ausência ou da ineficiência de programas de manejo de irrigação, reduzem a relação entre a produtividade e a demanda hídrica da cultura (SILVA *et al.* 2012; SANTOS *et al.* 2019). Para Peloso *et al.* (2017), a eficiência no uso da água pelas plantas está intrinsecamente relacionada à capacidade dos vegetais em modificar os seus mecanismos fisiológico e hidráulico diante das adversidades ambientais.

Dessa forma, a máxima EUA estimada pelos modelos polinomiais de grau 2 inerentes aos genótipos de pimenteira-do-reino, são de 9,38 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para a Clonada quando submetida ao manejo da irrigação com a tensão de 32,3 kPa, e de 15,32 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para a Uthirankotta ao ser submetida à tensão de 35,3 kPa, isto é, uma desigualdade de eficiência entre os dois genótipos, em torno de 39%, quando submetidos à estas tensões críticas de água no solo. Santos (2023), observou que os genótipos Clonada (4,51 kg ha⁻¹ mm⁻¹) e Uthirankotta (13,03 kg ha⁻¹ mm⁻¹) sob a tensão de 35 kPa, não apresentaram diferença de EUA quando submetidas às tensões de 45 e 55 kPa, ao serem avaliadas no seu segundo ano produtivo sob as mesmas condições deste trabalho.

2.4.3 Rendimento de óleo essencial e sua relação com a produção de pimenta preta

A Figura 29 apresenta graficamente o resultado da análise de regressão dos rendimentos de extração (R_e) de óleos essenciais obtidos a partir dos genótipos de pimenteira-do-reino em função do manejo da irrigação por tensiometria, sob as condições edafoclimáticas do município de Castanhal-PA.

Figura 29 – Rendimento de extração (R_e) de óleo essencial de pimenta preta dos genótipos Clonada e Uthirankotta em função de tensões críticas de água no solo



A análise de regressão para R_e demonstrou que o modelo de ajuste linear junto aos dados obtidos em laboratório, é significativo a 5% de probabilidade para explicar os rendimentos de extração de óleo essencial em função dos tratamentos testados neste trabalho. Deste modo, verificou-se que os valores percentuais de R_e decresceram com o aumento das tensões críticas de água no solo para os dois genótipos avaliados, isto é, os menores rendimentos foram obtidos sob a tensão de 55 kPa.

O estresse hídrico, desencadeado pela deficiência de água, pode elevar a concentração dos constituintes de óleo essencial, entretanto, a redução da biomassa vegetal em detrimento da intensidade deste fator abiótico, leva à diminuição no rendimento de extração de óleo (CARVALHO; CASALI, 1999). Silva *et al.* (2002), avaliando o efeito do estresse hídrico sobre a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel, observaram que o rendimento de óleo é mais influenciado pelas condições ambientais que as concentrações químicas deste, ou seja, as menores lâminas de irrigação aplicadas pelos autores, também implicaram em menores teores de óleo essencial.

Ao analisar a diferença de R_e entre os genótipos, nota-se que na tensão de 15 kPa ($w = 508,49$ mm) – ponto máximo de R_e – o genótipo Uthirankotta, com rendimento de 5,09%, superou em cerca de 34% o genótipo Clonada. Verificou-se também diferença em torno de 34%, ao se comparar o R_e da Uthirankotta entre as tensões de 15 e 55 kPa ($R_e = 3,39\%$). Tais resultados demonstram que o R_e obtido pela Clonada na tensão de 15 kPa ($R_e = 3,38\%$) é 0,01% menor que o rendimento extraído da Uthirankotta sob a tensão de 55 kPa ($w = 389,53$ mm).

Ao avaliar o efeito das tensões de água no solo sobre o rendimento do óleo essencial da pimenta-de-macaco (*Piper aduncum*), Souza *et al.* (2018), constatou que as plantas irrigadas em razão da menor tensão crítica (20 kPa) apresentaram o maior rendimento de óleo essencial (4,15%) com uma lâmina total de água aplicada pelo sistema de 612,5 mm (w), enquanto as pimenteiras cultivadas sem irrigação e sob a maior tensão examinada (100 kPa e w = 289,4 mm), demonstraram os menores rendimentos de 3,25 e 3,75%, respectivamente.

Em termos práticos, os resultados obtidos neste trabalho revelam que o genótipo Uthirankotta é o mais indicado para a extração do óleo essencial de pimenta-do-reino, quando comparado ao genótipo Clonada, nas condições edáficas e climáticas da microrregião de Castanhal, no estado do Pará. No entanto, o rendimento médio (2,48%) expressado pela Clonada em resposta ao estresse hídrico, supera os rendimentos de extração observados por Melo *et al.* (2021), de 1,15%, e por Costa *et al.* (2010), de 1,80%, em seus estudos com óleo essencial de pimenta-do-reino.

Os coeficientes de correlação linear de Pearson obtidos a partir da associação entre o rendimento de extração de óleo essencial e as variáveis respostas: produção de pimenta verde (Ppv), produção de pimenta preta (Ppp), produtividade (PROD) e uso eficiente de água (EUA), são apresentados na Tabela 10, juntamente com as suas respectivas interpretações, de acordo com o Quadro 2.

Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o rendimento de extração (R_e) de óleo essencial e as variáveis respostas de produção (Ppv, Ppp e PROD) e de uso eficiente de água (EUA) da pimenteira-do-reino sob manejo de irrigação por tensiometria em Castanhal, PA

Relação de R_e	r de Pearson	Interpretação de r	P valor
Ppv	0,547	Correlação positiva moderada	0,102 ^{ns}
Ppp	0,692	Correlação positiva moderada	0,027*
PROD	0,691	Correlação positiva moderada	0,027*
EUA	0,653	Correlação positiva moderada	0,041*

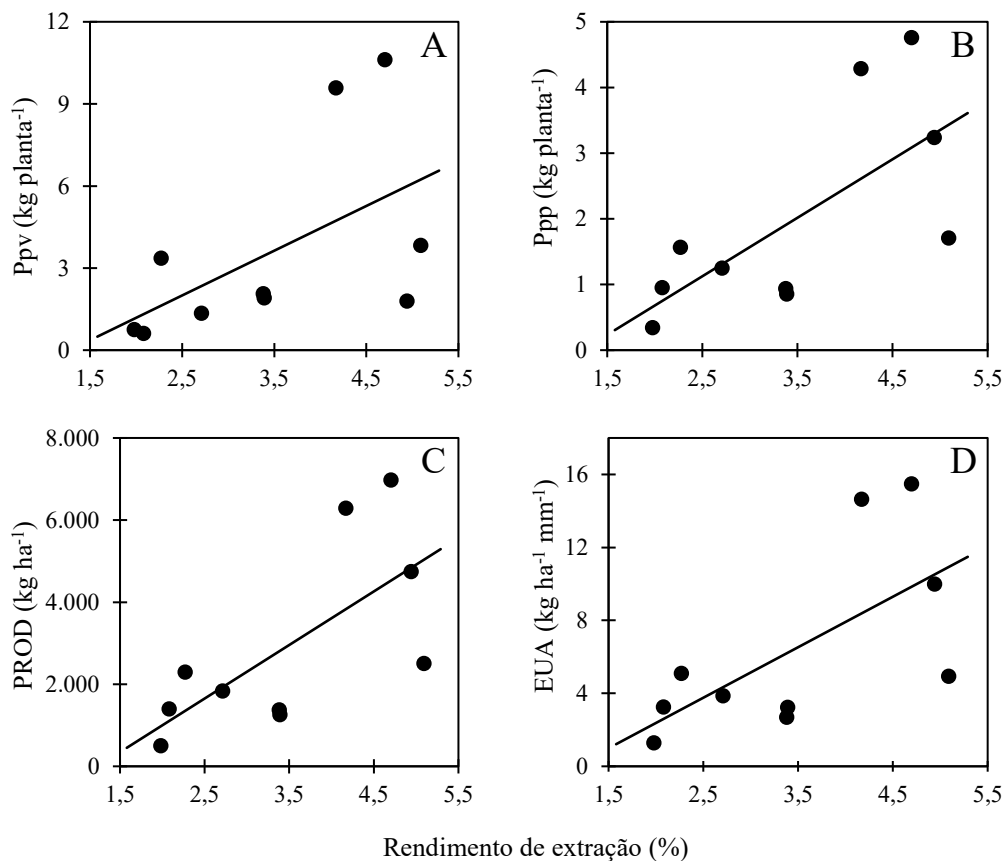
*significativo ($P < 0,05$) e r positivo com tendência de aumento diretamente proporcional entre as variáveis.
^{ns} não há relações significativas entre nenhum par de variáveis ($P > 0,05$).

Foi verificada a existência de correlação linear positiva significativa entre R_e e as variáveis Ppp, PROD e EUA, ou seja, o rendimento de extração de óleo essencial tende a aumentar à medida que o valor da variável relacionada cresce. No entanto, não houve relação significativa entre R_e e Ppv para as condições em que este trabalho foi realizado. Os valores de r de Pearson determinados a partir de R_e indicam que há força moderada na sua relação com as

demais variáveis analisadas, uma vez que todos estão compreendidos na faixa de 0,5 a 0,7. Diversos são os estudos que evidenciam a existência de correlação linear positiva entre o rendimento de óleo essencial e a produção e produtividade de biomassa vegetal (BOLINA, 2011; D'ÁVILA, 2015; FIGUEIREDO *et al.* 2009; SILVA *et al.* 2002; YAMAMOTO, 2006)

Na Figura 30 é exibida a dispersão dos dados das associações entre o rendimento de extração de óleo essencial e as variáveis respostas de produção e de uso eficiente de água, verificadas no cultivo da pimenteira-do-reino sob diferentes tensões críticas de água no solo.

Figura 30 – Correlação entre o rendimento de extração (R_e) de óleo essencial e as produções de pimenta verde (Ppv) (A) e de pimenta preta (Ppp) (B), produtividade (PROD) (C) e eficiência de uso de água (EUA) (D) da pimenteira-do-reino sob manejo de irrigação por tensiometria em Castanhal, PA



Através dos resultados apresentados na Figura 30 é possível observar as tendências entre as regressões lineares obtidos a partir das associações de R_e com Ppp (B), PROD (C) e EUA (D). Nota-se que existe uma similaridade entre as relações de R_e e as variáveis respostas supracitadas, justificando os valores de r de Pearson, em média de 0,68, para estas correlações, em contraponto ao valor de r (0,55) determinado para a associação com Ppv (A). Ao empregar a análise de correlação de Pearson para a investigação da relação existente entre os parâmetros

de produção e o teor de óleo essencial de dois genótipos de tangerineira, Rodrigues (2020), constatou resultados diferentes dos verificados neste trabalho, sendo verificado que não há relação significativa na associação entre os caracteres agrônômicos e fitoquímicos da cultura agrícola estudada pela autora.

Segundo Luiz *et al.* (2009), o rendimento de óleo essencial pode sofrer alterações em função da espécie vegetal, das características climáticas da região de cultivo e de fatores agrônômicos, em especial, a fase fenológica da planta na época de colheita, assim como também dos tratamentos culturais aplicados sobre a mesma durante o seu desenvolvimento vegetativo e produtivo. Desta forma, os rendimentos de extração atingidos neste estudo podem ser atribuídos ao manejo agrônômico (estresse hídrico) e as condições ambientais exercidos sobre os genótipos de pimenteira-do-reino avaliados.

2.5 Conclusões

Os genótipos Clonada e Uthirankotta apresentam os maiores índices de produção e produtividade de pimenta-do-reino sob a tensão de 35 kPa (15 mm ou 11,9 L planta⁻¹), sendo este o fator ótimo (f) para o manejo da irrigação da cultura nas condições da microrregião de Castanhal-PA.

O genótipo Uthirankotta têm melhor desempenho produtivo e maior eficiência no uso da água de irrigação que o genótipo Clonada, quando submetidos ao manejo da irrigação por tensiometria nas condições edáficas e climáticas de Castanhal-PA.

O maior rendimento de extração de óleo essencial de pimenta-do-reino é obtido com a cultivar Uthirankotta sob a tensão de 15 kPa (6,4 mm ou 5,0 L planta⁻¹).

Há correlações positivas de intensidade moderada entre o rendimento de óleo essencial e os parâmetros produtivos de pimenta preta e uso eficiente de água da pimenteira-do-reino sob manejo de irrigação.

REFERÊNCIAS (DO ARTIGO)

ALBUQUERQUE, F. C.; CONDURÚ, J. M. P. **Cultura da pimenta do reino na região Amazônica**. Belém - PA: IPEAN, 149 p., 1971.

ALBUQUERQUE, F. C.; DUARTE, M. L. R. **Estádio atual do conhecimento do melhoramento da cultura da pimenta-do-reino no trópico úmido brasileiro**. In: SIMPÓSIO DO TRÓPICO ÚMIDO, 1984, Belém. Anais. Belém - PA: Embrapa-CPATU, p. 359-372, 1986

ALBUQUERQUE, F. C.; DUARTE, M. L. R. **Propagação de diferentes cultivares de pimenta-do-reino através de estacas de um nó.** Belém - PA: *Embrapa CPATU*, Comunicado Técnico, 23, 14 p., 1979.

ALBUQUERQUE, F. C.; DUARTE, M. L. R.; NUNES, A. M. L.; STEIN, R. L. B.; OLIVEIRA, R. P. **Comportamento de germoplasma de pimenta-do-reino em áreas de ocorrência de fusariose no Estado do Pará.** In: *Seminário internacional sobre pimenta-do-reino e cupuaçu*, 1996, Belém, PA. Anais. Belém - PA: Embrapa-Cpatu: JICA, (Embrapa-CPATU. Documentos, 89), p. 269-276, 1997.

ALBUQUERQUE, J.; GALVÃO, J. R.; MORAES, M. H.; CARVALHO SANTANA, M. A.; ALMEIDA OLIVEIRA, L.; LIMA, M. C. **A erosividade das chuvas: o manejo agrícola sustentável das terras do município de Castanhal/PA.** Biodiversidade Brasileira-BioBrasil, v. 11, n. 4, p. 12-20, 2021.

ALMEIDA, D. F. L. S. **Estudo das vias metabólicas das plantas na síntese de pigmentos naturais.** Projeto de Pós-Graduação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas), Universidade Fernando Pessoa Faculdade de Ciências da Saúde – Porto, 2017.

AMBROZIM, C. S.; MEDICI, L. O.; CRUZ, E. S. D.; ABREU, J. F. G.; CARVALHO, D. F. D. **Physiological response of black pepper (*Piper nigrum* L.) to déficit irrigation.** Revista Ciência Agronômica, v. 53, p. 1-10, 2022.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada.** Brasília, DF: ANA, 2021.

ANDO, A.; ALBUQUERQUE, F. C. de.; POLTRONIERI, M. C.; TULMANN-NETO, A. **Obtenção de mutantes resistentes à fusariose (*Fusarium solani* f. sp. *piperis*) em pimenteira-do-reino (*Piper nigrum* L.) através da irradiação gama.** In: Seminário internacional sobre pimenta-do-reino e cupuaçu, 1., Belém, 1996. Anais. Belém, Embrapa Amazônia Oriental, JICA, p. 237-243, 1997.

ARAÚJO, S. A. C.; VASQUEZ, H. M.; CAMPOSTRINI, E.; NETTO, A. T.; DEMINICIS, B. B.; LIMA, É. S. **Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.), em estresse hídrico.** Acta Scientiarum: Animal Sciences, p. 1-7, 2010.

BASTOS, T. X.; PACHÊCO, N. A.; FIGUEIRÊDO, R. O.; SILVA, G. F. G. **Características agroclimáticas do município de Paragominas.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, Documentos, 228, p. 21, 2005.

BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A.; MONTEIRO, D. C. A. **Zoneamento agroclimático para a pimenteira-do-reino no Estado do Pará.** Embrapa Amazonia Oriental: Belém, (Documentos 319), 27 p., 2008.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; SANTOS, A. O. **Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, 35(8): p. 1531-1540, 2000.

BERNARDO, S; MANTOVANI, E. C.; DA SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9ª ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 545 p., 2019.

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8ª ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 625 p., 2007.

BLUM, A. **O uso efetivo da água (EUW) e não a eficiência do uso da água (WUE) é o objetivo da melhoria do rendimento das culturas sob estresse hídrico**. Pesquisa de Culturas de Campo 112: p. 119-123, 2009.

BOLINA, C. O. **Variabilidade genética e associação entre caracteres agronômicos, fisiológicos e fitoquímicos em variedades de *Artemisia annua* L.** Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFP, 2011.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 30 p., 2010.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. Embrapa Amazônia Oriental-Livro técnico (INFOTECA-E), 2020.

BRITO, W. U. **Isolamento, caracterização e expressão em sistema bacteriano de um gene que codifica uma proteína transportadora de lipídeos de *Piper nigrum* L.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará - UFPA. Belém - PA. 59 p., 2012.

BRIX, H. **The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings**. *Physiol. Plant.*, v. 15, p. 10-20, 1962.

CAMARGO, D. C. **Manejo da Irrigação: como, quando e quanto irrigar?** Fortaleza: INOVAGRI/IFCE, 42 p., 2016.

CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J. R.; SOARES, J. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, B. B. **Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 150-156, 2008.

CARNEIRO JÚNIOR, J. F.; LIMA, J. M.; SILVA, A. L. P.; NASCIMENTO, M. N. C. F. **Análise de mercado da pimenta-do-reino no período de 1990 a 2015**. *Tecnologia e Ciência agropecuária*, v. 11, n. 6, p. 139-145, 2017.

CARVALHO, L.M.; CASALI, V.W.D. **Plantas medicinais e aromáticas: relações com luz, estresse e insetos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Fitotecnia, 1999.

CHRISTOFIDIS, D. **Como obter a sustentabilidade dos recursos hídricos na agricultura irrigada?** *Irrigação & Tecnologia Moderna*, Brasília, DF, v. 64, p. 30-31, 2004.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. **Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água**. *Bahia Agrícola*, v. 07, n. 01, p. 57-60, 2005.

COSTA, J. G. M.; SANTOS, P. F.; BRITO, S. A.; RODRIGUES, F. G. G.; COUTINHO, H. D. M.; BOTELHO, M. A.; LIMA, S. G. **Composição química e toxicidade de óleos essenciais de espécies de piper frente a larvas de *Aedes aegypti* L.** Latin American Journal of Pharmacy. v. 29. n. 3, p. 463-467, 2010.

COSTA, K. P.; FONSECA, E. S.; ANDRADE, R. E. S.; FERREIRA, G. S.; RODRIGUES, L. I. T.; FONSECA, F. S. A.; MARTINS, E. R. **Atividade antioxidante dos extratos etanólicos e dos óleos essenciais de *Xylopia aromáticae* e *Piper nigrum*.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 27904-27912, 2021.

COSTA, M. A.; DIAS, A. G.; GUIMARÃES, P. I. C. **Guia prático de química orgânica.** Volume I: Técnicas e procedimentos: aprendendo a fazer. Rio de Janeiro: Interciência, 127 p., 2004.

CRASQUE, J.; ARANTES, S. D.; CERRI NETO, B.; PINTO, M. L. P. B.; ARANTES, L. O.; FERREIRA, T. R.; MACHADO FILHO, J. A. **Primary metabolism and initial development of grafted black pepper seedlings.** Research, Society and Development, 10(14), 2021.

CUNHA, A. L.; MOURA, K. S.; BARBOSA, J. C.; SANTOS, A. F. **Os metabólitos secundários e sua importância para o organismo.** Diversitas Journal. Santana do Ipanema – Alagoas. v. 1, n. 2, p. 175-181, 2016.

CUNHA, P. C.; SILVEIRA, P. M. D.; NASCIMENTO, J. L. D.; ALVES JÚNIOR, J. **Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, p. 735-742, 2013.

D'ÁVILA, J. V. **Desenvolvimento de capim-limão (*Cymbopogon citratus* DC. Stapf) com doses de composto orgânico oriundo de lodo de esgoto urbano e produção de óleo essencial.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense – UFF, Rio de Janeiro, 2015.

DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÁBAUT, J. T. L.; SEDIYAMA, G. C. **Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento.** Revista Ceres, Viçosa, v. 27, n. 50, p. 155-162, 1980.

DIAS, A. G. **O cultivo da Pimenteira-do-reino.** Vitória-ES, S. V. L., 300 p., 2006.

DIRKSEN, C. **Soil physics measurements.** Reiskirchen: Catena Verlag, 1999.

DUARTE, M. L. R.; ALBUQUERQUE, F. C.; KATO, A. K. **Sistema de produção da pimenteira-do-reino: produção de mudas.** Documento 321. ISSN 1517-2201, 2008.

DUARTE, M. L. R.; POLTRONIERI, M. C.; CHU, E. Y.; OLIVEIRA, R. F.; LEMOS, O. F.; BENCHIMOL, R. L.; CONCEIÇÃO, H. E. O.; SOUZA, G. F. **A Cultura da pimenta-do-Reino.** – 2. ed. rev., amp. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Coleção Plantar, 55, 73 p., 2006.

DYER, L. A. J.; RICHARD, C. D. D. **Isolamento, síntese e ecologia evolutiva de Piper Amides**. In: A Model Genus for Studies of Phytochemistry, Ecology, and Evolution; Dyer, LA, Palmer, AON, Eds.; Springer: Boston, MA, EUA, p. 117-139, 2004.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Análise química e física de solo**. Belém - PA: Embrapa Amazônia Oriental (Laboratório de Solos), 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Análise química de solo**. Belém - PA: Embrapa Amazônia Oriental (Laboratório de Solos), 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual segurança e qualidade para a cultura da pimenta-do-reino**. Brasília: EMBRAPA/SEDE (Qualidade e Segurança dos Alimentos). Projeto PAS Campo. Convênio CNI/SENAI/SEBRAE/EMBRAPA, 65 p., 2004.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 306 p., 2006.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, **FAOSTAT**, 2023.

FERRÃO, R. G., MOREIRA, S. O., FERRÃO, M. A. G., RIVA, E. M., ARANTES, L. D. O., COSTA, A., ... & GALVEAS, P. **Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo**, Incaper em Revista, Vitória, v. 6 e 7, n. 4, p. 51-71, 2016.

FIGUEIREDO, L. S.; BONFIM, F. P. G.; SIQUEIRA, C. S.; FONSECA, M. M.; SILVA, A. H.; MARTINS, E. R. **Efeito da época de colheita na produção de fitomassa e rendimento de óleo essencial de alecrim-pimenta (*Lippia sidoides* Cham.)**. Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, v. 11, n. 2, p. 154-158, 2009.

FILGUEIRAS, G. C.; HOMMA, A. K. O.; SANTOS, M. A. S. **Conjuntura do mercado da pimenta-do-reino no Brasil e no mundo**. [Online]. Belém. *Embrapa*, 23 p., 2014.

FRIZZONE, J. A. **Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 24-49, 2007.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 356 p., 2012.

GARCIA, J.; KAMADA, T.; JACOBISON, B. K. T.; CURADO, A. M.; OLIVEIRA, M. S. **Superação de dormência em sementes de pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.)**. Pesquisa Agropecuária Tropical 30(2): p. 51-54, 2000.

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

HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURIS, S. G. **Applied statistics for the behavioral sciences**. 5 Th Ed. Boston: Houghton Mifflin, v. 663, 2003.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola: Sistema de recuperação automática – SIDRA**, 2023.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Catálogo de estações automáticas: estação automática de CASTANHAL (A202)**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, 2023.
- JOSE, A. I. **What makes pepper a spice**. In: SANKUNNY, T.R. ed. *Pepper Research Station Silyer Jubile e Souvenir*, 1978.
- KARAM, F.; SALIBA, R.; SKAF, S.; BREIDY, J.; ROUPHAEL, Y.; BALENDONCK, J. **Yield and water use of eggplants (*Solanum melongena* L.) under full and deficit irrigation regimes**. *Agricultural Water Management* v. 98, p. 1307-1316, 2011.
- KRISHNAMURTHY, K. S.; KANDIANNAN, K.; SIBIN. C.; CHEMPAKAM, B.; ANKEGOWDA, S. J. **Trends in climate and productivity and relationship between climatic variables and productivity in black pepper (*Piper nigrum* L.)**. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 81 (8): p. 729-33, 2011.
- LEMOS, O. F. **Mutagênese e tecnologia in vitro no melhoramento genético da pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.)**. Tese de doutorado. Piracicaba. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. USP-São Paulo, 191 p., 2003.
- LEMOS, O. F.; MIRANDA RODRIGUES, S.; BOTH, J. P. C. L.; ARAÚJO, S. M. B.; POLTRONIERI, M. C. **Aspectos morfológicos de crescimento e produção de cultivares de pimenteira-do-reino em tutor sustentável de glirícidia na mesorregião do Baixo Tocantins-Pará**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 13, p. e399111335596-e399111335596, 2022.
- LEMOS, O. F.; TREMACOLDI, C. R.; POLTRONIERI, M. C. **Boas práticas agrícolas para aumento da produtividade e qualidade da pimenta-do-reino no Estado do Pará**. Brasília: Embrapa, 2014.
- LIAN, E. E. C. G.; LIM, M. C.; RAHMANI, M.; SHAARI, K.; BONG, C. F. J. **Pellitorine, a potential anti-cancer lead compound against HL60 and MCT-7 cell lines and microbial transformation of piperine from *Piper nigrum***. *Molecules* 15: p. 2398-2404, 2010.
- LIMA, E. M. C.; CARVALHO, J. A.; REZENDE, F. C.; THEBALDI, M. S.; GATTO, R. F. **Rendimento da pimenta cayenne em função de diferentes tensões de água no solo**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 11, 2013.
- LOPES, L.; OLIVEIRA, A.; PEREIRA, F. D. C.; SANTOS, R. **Perfil de distribuição de água por um aspersor rotativo de impacto para uso em sistemas de aspersão com linha única**. *Magistra*, v. 23, n. 4, p. 193-199, 2011.
- LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. **Fisiologia da produção**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 492 p., 2015.

- LOPES, R. C.; CASALI, V. W. D.; BARBOSA, L. C. A.; CECON, P. R. **Influência de três regimes hídricos na produção de óleo essencial em sete acessos de *Polygonum punctatum* Ell.** Revista Brasileira de Plantas Mediciniais 3: p. 7-10, 2001.
- LUIZ, J. M. Q.; MORAIS, T. P. S.; BLANK, A. F.; SODRÉ, A. C. B.; OLIVEIRA, G. S. **Teor, rendimento e composição química do óleo essencial de manjeriço sob doses de cama de frango.** Horticultura Brasileira, v. 27, n.3, p. 349-353, 2009.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e práticas.** Viçosa, MG: Editora UFV, 318 p., 2006.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PARALETI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos.** 2.ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 358 p., 2007.
- MAROUELLI, W. A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças.** Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, Circular Técnica, 57, 15 p., 2008.
- MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, W. L. C. **Irrigação da cultura da cenoura.** Brasília: Embrapa Hortaliças. Circula técnica, 48. 14 p., 2007
- MAURI, R.; COELHO, R. D; FRAGA JUNIOR, E. F.; BARBOSA, F. D. S.; LEAL, D. P. **Relações hídricas na fase inicial de crescimento da cana-de-açúcar sob déficit hídrico variável.** Engenharia Agrícola, v. 37, n. 2, p. 268-276, 2017.
- MELO, A. M.; SILVA, E. O.; MARQUES, D. I. D.; QUIRINO, M. R.; SOUSA, S. **Extração, identificação e estudo do potencial antimicrobiano do óleo essencial de pimenta-preta (*Piper nigrum* L.), biomonitorado por *Artemia salina* Leach.** Holos, v. 1, p. 1-16, 2021.
- MENEZES, I. C. **Caracterização genética de espécies do gênero Piper (Piperaceae) utilizando marcadores moleculares.** Tese de doutorado. Belém - Universidade Federal do Pará. 144 p., 2011.
- MIRANDA, J. R.; PEREIRA, G. M. **Cultivo da beterraba sob diferentes tensões de água no solo.** Irriga, v. 24, n. 2, p. 220-235, 2019.
- MORAES CAMPOS, A. J.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. **Estresse hídrico em plantas: uma revisão.** Research, Society and Development, v. 10, n. 15, p. e311101523155-e311101523155, 2021.
- MORAIS, L.A.S. **Influência dos fatores abióticos na composição química dos óleos essenciais.** Horticultura Brasileira 27: p. S4050-S4063, 2009.
- NICOLAU NETO, P. L. A. **Produtividade de soja in sílico no bioma Cerrado em função do fenômeno El Niño Oscilação Sul.** Dissertação de Doutorado. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2023.
- NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B.; SILVA, E. C. **Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga.** In: NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, E. L.;

WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T.; (Ed.). Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas. Recife: UFRPE, Imprensa Universitária, p. 22-31, 2005.

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

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. **Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo**. R. Bras. Ciência do Solo. 28: p. 327-336, 2004.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. **Influência dos fatores climáticos na produção**. In: CASTRO RC et al. Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 71-81, 1987.

PACHECO, L. B.; BOTH, J. P. C.; LEMOS, O. F. **Comportamento de cultivares de pimenta-do-reino quanto à produção em tutor morto**. In: 23º Seminário de Iniciação Científica da Amazônia Oriental; 7º Seminário de Pós-Graduação da Embrapa Amazônia Oriental, 2019, Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, Anais..., p. 247-252, 2019.

PAES, R. L.; CRUZ, B. E. V. **Situação geográfica da produção pimenta do reino no Brasil**. Revista Comunicação Universitária, Belém, PA, v. 1, n. 1, p. 1-14. 2022.

PARACAMPO, N. E. N. P.; ABREU, L. F.; LEMOS, O. F.; BOTH, J. P. C. L. **Quality of black pepper produced in northeastern Pará**. Revista de Agricultura Neotropical, v. 9, n. 3, p. e7020-e7020, 2022.

PARTELLI, F. L. **Nutrition of black pepper (*Piper nigrum* L.) a Brazilian experience**. Journal of Spices and Aromatic Crops, v. 18, n. 2, p. 73-83, 2009.

PAVÃO, E. D. M. **Produção de pimenta do reino no estado do Pará: opções para intensificação produtiva e impactos nas emissões de CO₂ eq**. Dissertação de mestrado. Fundação Getúlio Vargas – FGV, São Paulo, 2022.

PELOSO, A. D. F.; TATAGIBA, S. D.; REIS, E. F. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, J. F. T. D. **Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico**. Coffee Science, v. 12, n.3, p.389-399, 2017.

POLTRONIERI, M. C.; ALBUQUERQUE, F. C.; OLIVEIRA, M. R. C. **Retrospectivas, avanços e perspectivas no melhoramento genético de pimenta-do-reino visando resistência à fusariose**. Fitopatologia Brasileira, 25 Suplemento: p. 246-248, 2000.

POLTRONIERI, M. C.; RODRIGUES, M. R., LEMOS; O. F., MENEZES, I. C.; BOTH, J. P. C. L. **Estado da arte do melhoramento genético de pimenteira-doreino (*Piper nigrum* L.) na Embrapa Amazônia Oriental**. Embrapa Amazônia Oriental, (Documentos 452), 28 p., 2020.

RASANJALI, K. G. A.; SILVA, C. S.; PRIYADARSHANI, K. D. N. **Influence of super absorbent polymers (saps) on irrigation interval and growth of black pepper (*Piper nigrum* L.) in nursery management**. OUSL Journal, v. 14, n. 1, 2019.

RAVINDRAN, P. N. **Black pepper**. Medicinal and Aromatic Plants – Industrial Profiles. Kozhikode, Kerala, India. 1^a ed., 2000.

RIBEIRO, L. L. O.; CUNHA, L. S.; REGO, F. C.; OLIVEIRA, F. L. D. S.; REGO, F. R. C. **Produção e produtividade da pimenta-do-reino no município de Capitão Poço, Pará, Brasil**. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 36, n. 2, p. 26518, 2019.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. **Fitten-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage**. *Soil Sci.*, 56: p. 331-339, 1943.

RODRIGUES, M. S. **Influência de diferentes genótipos e métodos de extração sobre o rendimento e composição dos óleos essenciais de tangerineiras**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2020.

RODRIGUES, S. D. M.; POLTRONIERI, M. C.; LEMOS, O. F.; ARAÚJO, S. M. B.; BOTH, J. P. C. L. **Avaliação de cultivares de pimenteira-do-reino (*Piper nigrum*) em dois tipos de tutores no município de Igarapé-Açu, Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 20 p, 2019.

RODRIGUES, S. M.; LEMOS, O. F. **Tecnologias para inovação na cultura da pimenteira-do-reino: desafios e oportunidades**. Belém, PA: EMBRAPA Amazônia Oriental, Documentos, 44, 252 p., 2019.

SAITO, M. L.; SCRAMIN, S. **Plantas aromáticas e seu uso na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.

SAMAIN, M. S.; MATHIEU, G.; WANKE, S.; NEINHUIS, C.; GOETGHEBEUR, P. **Verhuellia resited - unraveling its intricate taxonomic history and a new subfamilial classification of Piperaceae**. *Taxon*. 57: p. 583-587, 2008.

SAMAIN, M.; MATHIEU, G.; VANDERSCHAEVE, L.; WANKE, S.; NEIHUIS, C.; GOETGHEBEUR, P. **Nomenclature and typification ofsubdivisional namesin the genus *Peperomia* (Piperaceae)**. *Taxon*. 56: p. 229-236, 2007.

SANDA, K.; Koba, K.; AKPAGANA, K.; TCHEPANT, T. **Content and chemical composition of the essential oil of *Ocimum basilicum* L and *Ocimum gratissimum* L. at different harvesting dates after planting**. *Rivista Italiana EPPOS* 31: p. 3-7, 2001.

SANTOS, A. S.; ALVES, S. D. M.; FIGUEIREDO, F. J. C.; ROCHA NETO, O. G. **Descrição de sistema e de métodos de extração de óleos essenciais e determinação de umidade de biomassa em laboratório**. Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico 99, p. 1-6, 2004.

SANTOS, H. A. **Desempenho produtivo de cultivares de pimenta-do-reino sob condições de manejo de irrigação no nordeste paraense**. Tese de Doutorado. UFRA-Campus Belém, 2023.

SANTOS, H. C. A.; LIMA JUNIOR, J. A. D.; SILVA, A. L. P. D.; CASTRO, G. L. S. D.; GOMES, R. F. **Yield of fertigated bell pepper under diferente soil water tensions and nitrogen fertilization.** Revista Caatinga, v. 33, n. 1, p.172-183, 2019.

SILVA, F. A.; BIZERRA, A. M. C.; FERNANDES, P. R. D. **Testes fotoquímicos em extratos orgânicos de *Bixa orellana* L. (urucum).** HOLOS. n. 34, v. 2, p. 484-498, 2018.

SILVA, F.; SANTOS, R. H. S.; DINIZ, E. R.; BARBOSA, L. C. A.; CASALI, V. W. D.; LIMA, R. R. **Teor e composição do óleo essencial de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) em dois horários e duas épocas de colheita.** Revista Brasileira de Plantas Mediciniais 6: p. 33-38, 2003.

SILVA, J. M. D.; FERREIRA, R. S.; MELO, A. S. D.; SUASSUNA, J. F.; DUTRA, A. F.; GOMES, J. P. **Cultivo do tomateiro em ambiente protegido sob diferentes taxas de reposição da evapotranspiração.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 1, p.40-46, 2012.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. **Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, p. 241-249, 2014.

SILVA, R. S.; SOUZA, C. R. B. **Extração e análise eletroforética em gel de poliacrilamida (SDS-PAGE) de proteínas totais de folhas e raízes de *Piper tuberculatum*.** Acta Amazonica, Manaus-AM, v. 39, p. 255-260, 2009.

SILVA, S. R.; DEMUNER, A. J.; ALMEIDA BARBOSA, L. C.; CASALI, V. W. D.; NASCIMENTO, E. A.; PINHEIRO, A. L. **Efeito do estresse hídrico sobre características de crescimento e a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel.** Acta Scientiarum Agronomy, v. 24, p. 1363-1368, 2002.

SILVA, V. D. P.; AZEVEDO, P. V. D.; SILVA, B. B. D.; BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. D. C.; SOARES, J. M.; SILVA, J. A. **Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, p. 456-462, 2001.

SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A. **Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos.** In: FARIA MA; SILVA EL; VILELA LAA; SILVA AM. (Ed.). Manejo de irrigação. Poços de Caldas; UFLA/SBEA, p. 311-348, 1998.

SIMÕES, C. M. O.; SPITZER, V. **Óleos voláteis.** In: SIMÕES, C. M. O. *et al.* Farmacognosia: da planta ao medicamento. Porto Alegre: Ed. Universidade-UFRGS; Florianópolis: Ed. da UFSC. p. 387-415, 1999.

SIMON, J. E.; REISS-BUBENHEIM, D.; JOLY, R. J.; CHARLES, D. J. **Water stress-induced alterations in essential oil content and composition of sweet basil.** Journal of Essential Oil Research 4, p. 71-75, 1992.

SLATYER, R. O. **Plant-water relationships.** London: Academic Press, 366 p., 1967.

SOIL CONSERVATION SERVICE. **Sprinkler Irrigation**. National Engineering Handbook. Washington: Section 15, Chapter 11. 83 p., 1968.

SOUZA, L. P.; ZOCOLER, J. L.; BERGO, C. L.; SOUZA, L. P.; ZOCOLER, J. L.; BERGO, C. L. **Efeito das tensões da água no solo no desenvolvimento vegetativo e produtivo da pimenta-de-macaco**. Irriga, v. 23, n. 1, p. 143-153, 2018.

SOUZA, V. F.; COELHO, E. F.; JUNIOR, A. S. A.; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A. **Eficiência do uso da água pelo meloeiro sob diferentes frequências de irrigação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande v. 4, p. 183-188, 2000.

TAIZ L.; ZEIGER E. **Fisiologia vegetal**. 1ª ed. Porto Alegre: Artmed, Brasil, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, Brasil, 2013.

TELES, G. C. **Avaliação fisiológica e crescimento de pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.) com diferentes lâminas de irrigação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 67 p., 2020.

TOMÉ, T. C. H.; CAVALCANTE, H. S. A.; BONOU, S. I.; DA SILVA, A. R. P.; LINS, A. D. F. **Determinação das propriedades físicas da pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.)**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Maceió. p. 1-5, 2018.

TURNER, J. **Spice: the history of a temptation**. London: vintage books. ISBN 0375707050, 2004.

VERMA, N.; SHUKLA, S. **Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites**. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, v. 2, n. 4, 10 p., 2015.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. (Estudos FAO - Irrigação e Drenagem, 36). Campina Grande: UFPB, 184 p., 1997.

VIDAL, F. **Evolução do cultivo de pimenta-do-reino na área de atuação do BNB**. Caderno Setorial Etene. 5, n. 146, 2020.

WINK, M. **Evolution of secondary metabolites in legumes (Fabaceae)**. South African Journal of Botany, v. 89, p. 164-175, 2013.

YAMAMOTO, P. Y. **Interação genótipo x ambiente na produção e composição de óleos essenciais de *Lippia alba* (Mill.) NE Br**. Dissertação de mestrado. Campinas: USP-IAC, São Paulo, 2006.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As respostas demonstradas pelos genótipos de pimenteira-do-reino (Clonada e Uthirankotta) quando submetidos à diferentes tensões críticas de água no solo (15, 25, 35, 45 e

55 kPa), durante o terceiro ano produtivo, evidenciam que: os maiores índices de produção e produtividade de pimenta-do-reino são obtidos pelos dois materiais genéticos avaliados sob a tensão crítica de 35 kPa, equivalente a uma lâmina de irrigação de 15 mm ou 11,9 L planta⁻¹; o genótipo Uthirankotta têm melhor desempenho produtivo, alta eficiência no uso da água e maior rendimento de extração de óleo essencial que o genótipo Clonada; os maiores percentuais de extração de óleo essencial de pimenta preta são obtidos pelos genótipos sob a tensão de 15 kPa (6,4 mm ou 5,0 L planta⁻¹) e; existem relações significativas positivas de intensidade moderada entre o rendimento de extração de óleo essencial e os parâmetros produtivos e de uso eficiente de água da pimenteira-do-reino sob manejo da irrigação nas condições edafoclimáticas da microrregião de Castanhal-PA.

REFERÊNCIAS (GERAL)

ALBUQUERQUE, F. C.; CONDURÚ, J. M. P. **Cultura da pimenta do reino na região Amazônica**. Belém: IPEAN, 149 p., 1971.

ALBUQUERQUE, F. C.; DUARTE, M. L. R. **Estádio atual do conhecimento do melhoramento da cultura da pimenta-do-reino no trópico úmido brasileiro**. In: SIMPÓSIO DO TRÓPICO ÚMIDO, 1984, Belém. Anais. Belém: Embrapa-CPATU, p. 359-372, 1986

BERNARDO, S; MANTOVANI, E. C.; DA SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9ª ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 545 p., 2019.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiarido, 30 p., 2010.

DIAS, A. G. **O cultivo da Pimenteira-do-reino**. Vitória-ES, S. V. L., 300 p., 2006.

DUARTE, M. L. R.; POLTRONIERI, M. C.; CHU, E. Y.; OLIVEIRA, R. F.; LEMOS, O. F.; BENCHIMOL, R. L.; CONCEIÇÃO, H. E. O.; SOUZA, G. F. **A Cultura da pimenta-do-reino**. – 2. ed. rev., amp. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Coleção Plantar, 55, 73 p., 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual Segurança e qualidade para a cultura da pimenta-do-reino**. Brasília: EMBRAPA/SEDE (Qualidade e Segurança dos Alimentos). Projeto PAS Campo. Convênio CNI/SENAI/SEBRAE/EMBRAPA, 65 p., 2004.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, **FAOSTAT**, 2023.

GOBBO-NETO, L.; LOPES, N. P. **Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários**. Química Nova, v. 30, n. 2, p. 374-381, 2007.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: Sistema de recuperação automática – SIDRA, 2023.

LOPES, L.; OLIVEIRA, A.; PEREIRA, F. D. C.; SANTOS, R. **Perfil de distribuição de água por um aspersor rotativo de impacto para uso em sistemas de aspersão com linha única**. *Magistra*, v. 23, n. 4, p. 193 -199, 2011.

SIMON, J. E.; REISS-BUBENHEIM, D.; JOLY, R. J.; CHARLES, D. J. **Water stress-induced alterations in essential oil content and composition of sweet basil**. *Journal of Essential Oil Research* 4, p. 71-75, 1992.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

VIDAL, F. **Evolução do cultivo de pimenta-do-reino na área de atuação do BNB**. *Caderno Setorial Etene*. Ano 5, n. 146, 2020.