

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**RESFRIAMENTO PASSIVO E CONDIÇÕES SALINAS NO CULTIVO
DE COENTRO HIDROPÔNICO**

Vânio Vicente Santos de Souza

CRUZ DAS ALMAS-BAHIA

2024

RESFRIAMENTO PASSIVO E CONDIÇÕES SALINAS NO CULTIVO DE COENTRO HIDROPÔNICO

Vânio Vicente Santos de Souza

Engenheiro Mecânico

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003

Mestre em Engenharia Mecânica

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005

TESE apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos)

Orientador: Prof. Dr. Tales Miler Soares

Coorientador: Dr. Mairton Gomes da Silva

CRUZ DAS ALMAS-BAHIA

2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

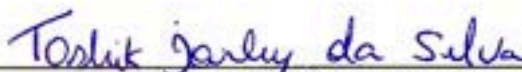
**RESFRIAMENTO PASSIVO E CONDIÇÕES SALINAS NO CULTIVO
DE COENTRO HIDROPÔNICO**

Comissão Examinadora de defesa de TESE de
Vânio Vicente Santos de Souza

Aprovada em: 21 de novembro de 2024



Dr. Tales Miler Soares
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
PRESIDENTE



Dr. Toshik Iarley da Silva
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
(EXAMINADOR INTERNO AO PROGRAMA)



Dr. Áureo Silva de Oliveira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
(EXTERNO AO PROGRAMA)

Dr. Ênio Farias de França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
(EXTERNO À INSTITUIÇÃO)



Documento assinado digitalmente

CARLOS MARLON SILVA SANTOS

Data: 06/02/2025 11:25:27-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Carlos Marlon Silva Santos
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
(INTERNO À INSTITUIÇÃO)

DEDICATÓRIA

A minha mãe Eurídice, sempre e ao meu Pai, José Vicente (In Memoriam);

A meus irmãos Vagner, Vanuza e Vanessa, por fazer parte da caminhada.

A minha família, presente em todos os momentos, Paula Lucielma e Manu.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a YHWH, Criador, “*Ex nihilo nihil fit*” de Parmênides, pelo fôlego de vida nesse curto tempo de existência; e a Iesus Khristos pelo meu resgate imerecido.

Aos meus progenitores José Vicente de Souza, in memoriam, que não me impediu de prosseguir e a minha mãe, Eurídice Santos de Souza, que de tudo lançou mão para exercer altruísmo ... mãe é mãe, como o dito popular.

A minha esposa Paula Lucielma pelo desprendimento de andar em caminhos do sonho de outrem como se fossem os seus; a parte de uma unidade a outra leva; Também levo os seus com os meus. Obrigado. E a minha filha Emanuela Lira por dar significado futuro à continuidade.

Aos meus irmãos Vagner, Vanuza e Vanessa, em ordem de nascimento, pela presença e partilha desse caminhar.

Ao prof. Dr. Tales Miler pela presença e pelo desafio de orientar tema transversal, e ao Dr. Mairton pelo acompanhamento próximo das atividades e experiência tácita.

Aos doutorandos da mesma época, Paulo Vitor e Leandro, por estarem no momento certo.

A todos os professores companheiros de trabalho do curso de Engenharia Mecânica da UFRB, em especial ao prof. Adelson Ribeiro de Almeida Jr (In Memoriam), pelo sempre presente, olhar altruísta e brilhantismo. Sabemos todos, que apesar de recebermos a eternidade no coração, *Pulvis et umbra sumus*.

Aos discentes da graduação pelo desprendimento e auxílio imprescindível na labuta, sem braços não existe obra, Luciana, Lucas , Joilson, Neto, Tayrone, Tamires, ...

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (PPGEA/UFRB) na figura do Dr. Lucas, sempre atencioso e prestativo. Grato a todos os integrantes do PPGEA.

Na realidade, não conhecemos nada,
pois a verdade está no poço.^a
...e o que aumenta em ciência aumenta em trabalho.^b
Quem subiu ao céu e de lá retornou?^c
Quem reúne o poder dos ventos em uma das mãos?
Quem represa as águas do mar numa túnica?
Quem determinou todos os limites da terra?
Qual é o seu Nome, e o Nome do seu Filho?
Respondei-me, se é que o sabes!

a .Demócrito de Abdera, 370 a.c.

b. Eclesiastes 1:18

c. Provérbios de Salomão. 30:4

LISTA DE SÍMBOLOS

T_1	Temperatura de entrada no permutador ($^{\circ}\text{C}$)
T_2	Temperatura da superfície inferior interna inicial da canaleta ($^{\circ}\text{C}$)
T_3	Temperatura da superfície inferior interna final da canaleta ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	Temperatura de referência ou requerida ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ar}	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
T_{a}	Temperatura do água de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$)
U_r	Umidade relativa do ar (%)
η_{th}	Rendimento do permutador (adimensional)
C1	Tratamento salino 1
C2	Tratamento salino 2
C3	Tratamento salino 3
C4	Tratamento salino 4
C1R	Tratamento salino 1 resfriado
C1NR	Tratamento salino 1 não resfriado
C2R	Tratamento salino 2 resfriado
C2NR	Tratamento salino 2 não resfriado
C3R	Tratamento salino 3 resfriado
C3NR	Tratamento salino 3 não resfriado
C4R	Tratamento salino 4 resfriado
C4NR	Tratamento salino 4 não resfriado
CE_{sn}	Condutividade elétrica da solução nutritiva (dSm^{-1})
CE_{a}	Condutividade elétrica da água (dSm^{-1})
MSPA	Massa seca da parte aérea (g)
MFPA	Massa fresca da parte aérea (g)
AP	Altura da planta (cm)
ACP	Análise por componentes principais
FA	Função resultante da contribuição de elementos abióticos
O_{th}	Influências outras
T_{m}	Influência da temperatura média resultante
A_{t}	Influência da amplitude térmica variável
L	Influência da radiação luminosa disponível
f_p, f_v	Função de pico e vale da variação de temperatura

CULTIVO HIDROPÔNICO NFT DE COENTRO “VERDÃO” COM RESFRIAMENTO PASSIVO E CONDIÇÕES SALINAS

RESUMO:

No cultivo hidropônico NFT (nutrient film technique), a temperatura da solução nutritiva que entra em contato com a região radicular e a salinidade são fatores importantes. O presente trabalho busca avaliar a produtividade do cultivo de coentro “Verdão” (*Coriandrum sativum*) em casa de vegetação, utilizando o próprio tubo de recalque (de PVC de ½” com 5,5 m) como resfriador da solução nutritiva, quando submerso em canal a 30 cm de profundidade e ocupado com água resfriada. No primeiro experimento (E1), foram avaliadas as temperaturas alcançadas na solução nutritiva com e sem resfriamento e sem plantas com quatro parcelas durante cinco dias. Enquanto que no segundo experimento (E2), o coentro “Verdão” foi cultivado com o sistema de resfriamento em intervalos de 15 min (ligado) em 15 min (desligado), utilizando água salobra com condutividades elétricas C1; C2; C3 e C4 de 0,3; 2,0; 4,0 e 6,0 dS m⁻¹, respectivamente, com resfriamento (R) e sem resfriamento (NR). O segundo experimento (E2) foi repetido, no mês de maio (1) e junho de 2024 (2), com 32 parcelas, aleatorizadas (2 tipos de resfriamento x 4 salinidades). As parcelas experimentais foram alocadas em casa de vegetação do tipo arco com pé direito de 3,0 m, 24,0 m de comprimento e 7,0 m de largura, Experimento E2(1) com 18 plantas por parcela e E2(2) com 10 plantas. O sistema de resfriamento obteve rendimento térmico de 45%, reduzindo as temperaturas da solução nutritiva em até 5,1 °C entre as 10:00 e 16:00. Foram medidos os valores de massa seca (MSPA), massa fresca da parte aérea (MFPA), altura da planta (AP), seguida de duas análises estatísticas, uma multivariada, feita por componentes principais. A componente CP1 tem relevância maior que 95,1% evidencia a influência de covariância negativa do efeito da salinidade sobre as variáveis de produção em ambos experimentos; A componente CP2 com relevância de 2,7% evidencia influência dos tratamentos resfriados e não resfriados, com covariância negativa do resfriamento em C1 e positiva em C4, com relação às não resfriadas. Na segunda avaliação estatística foi utilizado o método de Kruskal-Wallis com $p < 0,05$,

concluindo que o resfriamento não influenciou significativamente no aumento de massa seca (MSPA), massa fresca (MFPA) e comprimento da parte aérea (AP) em grupos (R) e (NR) de mesmo tratamento, mas houveram efeitos salinos com significância entre C1 e C4, em E2(1) e E2(2), com menor produção MSPA em -32%(1) e -49%(2), MFPA em -44,8(1) e -54%(2) e AP com valores de -15%(1) e -24,6%(2), em relação ao controle C1, consequência do aumento na salinidade. O resfriamento amenizou o efeito salino nos tratamentos C3 e C4. Apesar da contribuição limitada do sistema de resfriamento na produtividade, o estudo abre caminhos para utilização das energias passivas nos sistemas de resfriamento da solução nutritiva na hidroponia.

Palavras-chave: Cultivo sem solo, estresse térmico, energia passiva.

CULTIVATION OF “VERDÃO” CORIANDER WITH PASSIVE COOLING AND SALINE CONDITIONS

ABSTRACT:

In NFT (nutrient film technique) hydroponic cultivation, the temperature of the nutrient solution that comes into contact with the root region and the salinity are important factors. This study aims to evaluate the productivity of “Verdão” coriander (*Coriandrum sativum*) cultivation in a greenhouse, using the discharge pipe itself (5.5 m long ½” PVC) as a nutrient solution cooler, when submerged in a channel at a depth of 30 cm and filled with cooled water. In the first experiment (E1), the temperatures reached in the nutrient solution with and without cooling and without plants were evaluated in four plots for five days. While in the second experiment (E2), “Verdão” coriander was cultivated with the cooling system at intervals of 15 min (on) in 15 min (off), using brackish water with electrical conductivities C1; C2; C3 and C4 of 0.3; 2.0; 4.0 and 6.0 dS m⁻¹, respectively, with cooling (R) and without cooling (NR). The second experiment (E2) was repeated in May (1) and June 2024 (2), with 32 randomized plots (2 types of cooling x 4 salinities). The experimental plots were allocated in an arch-type greenhouse with a 3.0 m ceiling height, 24.0 m long and 7.0 m wide, Experiment E2 (1) with 18 plants per plot and E2 (2) with 10 plants. The cooling system obtained a thermal efficiency of 45%, reducing the temperatures of the nutrient solution by up to 5.1 °C between 10:00 and 16:00. The values of dry mass (MSPA), fresh mass of the aerial part (MFPA), and plant height (AP) were measured, followed by two statistical analyses, one multivariate, performed by principal components. The CP1 component has a relevance greater than 95.1% and highlights the influence of negative covariance of the effect of salinity on the production variables in both experiments; The CP2 component, with a relevance of 2.7%, highlights the influence of the cooled and uncooled treatments, with negative covariance of cooling in C1 and positive in C4, in relation to the non-cooled ones. In the second statistical evaluation, the Kruskal-Wallis method was used with $p < 0.05$, concluding that cooling did not significantly influence the increase in dry mass (MSPA), fresh mass (MFPA) and shoot length (AP) in groups (R) and (NR) of the same treatment, but there were saline effects with significance between C1 and C4,

in E2(1) and E2(2), with lower MSPA production at -32%(1) and -49%(2), MFPA at -44.8(1) and -54%(2) and AP with values of -15%(1) and -24.6%(2), in relation to the C1 control, as a consequence of the increase in salinity. Cooling mitigated the saline effect in treatments C3 and C4. Despite the limited contribution of the cooling system to productivity, the study opens ways for the use of passive energies in nutrient solution cooling systems in hydroponics.

Keywords: Soilless cultivation, thermal stress, passive energy.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentração de Cloreto de sódio (NaCl), condutividade elétrica da água (CE_a) e condutividade elétrica da água (CE_{sn}) para os diferentes tratamentos aos quais foram submetidas as plantas de coentro.....	6
--	---

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

Figura 01. Sistemas de resfriamento em casas de vegetação. Adaptado de SOUSSI (2022). * Itens inseridos pelo autor, *** Sistemas utilizados na pesquisa.....	23
--	----

CAPÍTULO 1

Figura 1. Croqui do sistema. a) sistema de cultivo e resfriamento e b) vista superior do sistema mostrando as 4 canaletas e o canal de resfriamento no centro (A.6).....	37
Figura 2. a) Foto do canal de água utilizado para resfriamento da solução nutritiva e b) croqui do canal de resfriamento, mostrando dimensões e a lona de PVC desdobrada sobre placas tampas feitas de Polipropileno.....	38
Figura 3. Diagrama de blocos da interface gráfica e aquisição de dados utilizada no trabalho (HydroThermal.01.9.02-Painel).....	39
Figura 4. Variação da temperatura e umidade relativa do ar no período do experimento.....	44
Figura 5. Temperatura do ar e do canal de resfriamento. a) Variação de temperatura na fonte fria considerando permanência da água no canal. b) manobra de substituição de água e posterior esvaziamento nos dias 06/03/2024 e 16/03/2024..	45
Figura 6.a) Croqui do balanço térmico do sistema de resfriamento; 6.b) variação de calor absorvida pela solução nutritiva, 6.c) variação de calor absorvido pela canaleta e 6.d) Curva WB com T_1 , T_2 , T_3 e T_a	46
Figura 7. Curva Whalebone do experimento e referente ao dia 15/03/2024 do experimento sem manobra.....	48

Figura 8. Variação das temperaturas de entrada do permutador (T_1) e temperatura da canaleta resfriadas T_2 (R) e não resfriadas T_2 (NR) a) período diurno (6:00h e as 18:00h); b) período noturno (18:00h-6:00h), em 15/03/2024 (probabilidades acumuladas).....	50
Figura 9. Variação das temperaturas da solução nutritiva no início (T_2) e fim da canaleta (T_3). a) período diurno (6:00h e as 18:00h) e b) noturno (18:00h-6:00h), com e sem resfriamento para ambos.....	51
Figura 10. Variações das temperaturas dos fluidos quente e frio no permutador (a.1). Eficiência do permutador (a.2), e noturna (b.1) e (b.2) em 15/03/2024.....	52
Figura 11. Variações das temperaturas no interior das canaletas entre o início (T_2) e fim da canaleta (T_3). durante o dia no dia 15/03/2024.....	53
Figura 1.a) Distribuição das 32 parcelas NFT, b) Agrupamento de 4 parcelas.....	64
Figura 2. Montagem experimental detalhamento o sistema de cultivo, resfriamento e instrumentação utilizada na pesquisa.....	66
Tabela 1. Concentração de Cloreto de sódio (NaCl), condutividade elétrica da água (CEa) e condutividade elétrica da solução nutritiva (CE _{sn}) para os diferentes tratamentos aos quais foram submetidas as plantas de coentro.....	67
Figura 4. Variação das temperaturas da solução nutritiva (T_2) e da temperatura (T_1), no 19º DAT do experimento (2) 6:00-18:00 h. a) Variação de temperatura da solução nutritiva (T_2), Temperatura de solução na saída do reservatório (T_1) e a temperatura da água de resfriamento (T_a); com e sem resfriamento; b) Frequência cumulativa de T_1 , T_2 em circuito resfriado e não resfriado.....	71
Figura 5. a) Consumo hídrico acumulado (DAT 20) por maço de coentro em condições de cultivo sob salinidade, com e sem resfriamento no experimento (2). b) Consumo hídrico diário por maço nos dias 7, 10, 13, 16 e 19 dias após transplântio, de acordo com os tratamentos do experimento (2).....	72
Figura 7. Biplot das componentes principais da ACP nos Experimentos (1) e (2), agrupadas.....	74
Figura 10. Valores de TA encontrados nos tratamentos (R) e (NR) a) Experimento (1) b) Experimento (2) b).....	79

CAPÍTULO 2

Figura 1. Croqui do sistema. a) sistema de cultivo e resfriamento e b) vista superior do sistema mostrando as 4 canaletas e o canal de resfriamento no centro (A.6).....	40
Figura 2. a) Foto do canal de água utilizado para resfriamento da solução nutritiva e b) croqui do canal de resfriamento, mostrando dimensões e a lona de PVC desdobrada sobre placas tampas feitas de Polipropileno.....	41
Figura 3. Diagrama de blocos da interface gráfica e aquisição de dados utilizada no trabalho (HydroThermal.01.9.02-Painel).....	42
Figura 4. Variação da temperatura e umidade relativa do ar no período do experimento.....	47
Figura 5. Temperatura do ar e do canal de resfriamento. a) Variação de temperatura na fonte fria considerando permanência da água no canal. b) manobra de substituição de água e posterior esvaziamento nos dias 06/03/2024 e 16/03/2024..	48
Figura 6. Curva Whalebone do experimento e referente ao dia 15/03/2024 do experimento sem manobra.....	50
Figura 7. Variação das temperaturas de entrada do permutador (T_1) e temperatura da canaleta resfriadas T_2 (R) e não resfriadas T_2 (NR) a) período diurno (6:00h e as 18:00h); b) período noturno (18:00h-6:00h), em 15/03/2024 (probabilidades acumuladas).....	52
Figura 8. Variação das temperaturas da solução nutritiva no início (T_2) e fim da canaleta (T_3). a) período diurno (6:00h e as 18:00h) e b) noturno (18:00h-6:00h), com e sem resfriamento para ambos.....	53
Figura 9. Variações das temperaturas dos fluidos quente e frio no permutador (a.1). Eficiência do permutador (a.2), e noturna (b.1) e (b.2) em 15/03/2024.....	54
Figura 10. Variações das temperaturas no interior das canaletas entre o início (T_2) e fim da canaleta (T_3). durante o dia no dia 15/03/2024.....	55
Figura 01.a) Distribuição das 32 parcelas NFT, b) Set-up de cada agrupamento de 4 parcelas.....	67
Figura 2. Montagem experimental detalhamento o sistema de cultivo, resfriamento e instrumentação utilizada na pesquisa.....	68
Figura 3. Variação das temperaturas, umidades relativas do ar no período dos	

experimentos (1) e (2) em maio e junho de 2024, respectivamente.....	73
Figura 4. Variação das temperaturas da solução nutritiva (T_2) e da temperatura (T_1), no 19º DAT do experimento (2) 6:00-18:00 h. a) Variação de temperatura da solução nutritiva (T_2), Temperatura de solução na saída do reservatório (T_1) e a temperatura da água de resfriamento (T_a); com e sem resfriamento; b) Frequência cumulativa de T_1 , T_2 em circuito resfriado e não resfriado.....	74
Figura 5. a) Consumo hídrico acumulado (DAT 20) por maço de coentro em condições de cultivo sob salinidade, com e sem resfriamento no experimento (2). b) Consumo hídrico diário por maço nos dias 7, 10, 13, 16 e 19 dias após transplântio, de acordo com os tratamentos do experimento (2).....	75
Figura 7. Biplot das componentes principais da ACP nos Experimentos (1) e (2), agrupadas.....	77
Figura 9. Curvas de regressão de MSPA, MFPA e AP. a) MSPA (1); b)MSPA (2); c) MFPA (1); d) MFPA (2); e) AP (1);f) AP(2). As letras representam a significância dos grupos por Kruskal-Wallis $p < 0,05$, letras iguais significam mesmo grupo de dados..	82
Figura 10. Valores de TA encontrados nos tratamentos (R) e (NR) a) Experimento (1) b) Experimento (2) b).....	84



Sumário

LISTA DE SÍMBOLOS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	10
1. INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo Geral.....	5
2.2. Objetivos Específicos.....	5
3. HIPÓTESES.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
Capítulo 1.....	32
RESUMO.....	33
ABSTRACT.....	34
1. INTRODUÇÃO.....	35
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4. CONCLUSÃO.....	54
5. AGRADECIMENTOS.....	54
6. REFERÊNCIAS.....	54
Capítulo 2.....	59
RESUMO.....	60
ABSTRACT.....	61
1. INTRODUÇÃO.....	62
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4. CONCLUSÃO.....	81
5. AGRADECIMENTOS.....	81
6. REFERÊNCIAS.....	82
Considerações Finais.....	87

APÊNDICES.....	88
APÊNDICE A. DETALHAMENTO MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	89
APÊNDICE B. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES.....	90
APÊNDICE C. TRATAMENTOS NOS EXPERIMENTOS (1) E (2).....	93
APÊNDICE D. VARIAÇÕES DE CE E PH DOS TRATAMENTOS.....	95
APÊNDICE E. REGISTRO FOTOGRÁFICO COLHEITA (1) e (2) -20 DAT.....	96
APÊNDICE F. FOTOGRAFIAS REFERENTES A UMA AMOSTRA DE (1) e (2). 97	
APÊNDICE G. BOXPLOT DE MFPA E AP.....	98
APÊNDICE H. CURVAS DE TENDÊNCIA, TRATAMENTOS (R) E (NR).....	100
APÊNDICE I. MATRIZ DE VARIÂNCIA, AUTOVALORES DA ACP.....	101
APÊNDICE J. RESULTADO DO TESTE POST HOC, DUNN(1964).....	101

1. INTRODUÇÃO/JUSTIFICATIVA

O sistema NFT (Nutrient Film Technique) é uma das técnicas hidropônicas mais difundidas, principalmente pela maior facilidade de manejo e por sua usabilidade em culturas como a alface, rúcula e coentro. A hidroponia com coentro (*Coriandrum sativum*), em especial, tem grande importância agrícola no cultivo NFT. Regiões como o Semiárido, que tem clima com a mais baixa disponibilidade de chuva e altas temperaturas, são desafios para a implementação de técnicas como a hidroponia. No caso específico da hidroponia NFT, a intermitência da irrigação expõe as raízes às temperaturas do ar e do contato com as canaletas de cultivo. Outra característica dessa região é a da qualidade das águas utilizadas localmente na irrigação, uma vez que com a escassez das águas superficiais torna-se necessária a utilização das águas subterrâneas, geralmente salobras. As três condições concomitantes: escassez de água doce, disponibilidade de água salobra e temperaturas elevadas para a cultura, representam características bem presentes na região Nordeste brasileira e constituem barreiras técnicas de aplicações hidropônicas em regiões tropicais, impactando a produtividade das culturas.

As opções tecnológicas de redução da temperatura, da solução nutritiva utilizada no cultivo NFT, exigem alto custo exergético¹ e têm difícil acesso pelo pequeno produtor que não pode diluir os custos de produção na economia de larga escala, como nos grandes empreendimentos. Os grandes empreendimentos utilizam torres de resfriamento, chillers², permutadores de calor e exaustores. A troca de calor evaporativa por transferência em massa líquida é inclusive utilizada em casas de vegetação, mas necessitam de estruturas auxiliares e exaustores de grande porte.

Sugere-se no presente projeto a utilização do próprio conduto de recalque como trocador de calor, utilizando o próprio fluxo de solução nutritiva e uma fonte fria encontrada próximo ao cultivo para redução da temperatura da solução nutritiva. Técnicas de redução da temperatura são comumente utilizadas, principalmente as

¹ O custo exergético se refere ao trabalho máximo obtido quando uma dada substância é levada a atingir o equilíbrio termomecânico com o ambiente. Mede a eficácia energética de um sistema.

² Resfriadores que utilizam a expansão de um fluido refrigerante como absorvedor de calor, geralmente atingem temperaturas abaixo das de bulbo úmido, podendo alcançar a temperaturas negativas a depender do fluido de refrigeração utilizado.

que recomendam cobertura do reservatório e das tubulações de solução nutritiva (CARRIJO, 2000), o procedimento de “enterramento” das tubulações não são dimensionadas para maximizar as trocas de calor entre o conduto e o solo. Assim, apesar dessas técnicas serem utilizadas para redução da influência da radiação solar sobre o sistema, não atuam como trocadores de calor parametrizados.

O cultivo hidropônico NFT utiliza uma solução nutritiva bombeada de um reservatório para dentro de canaletas, que são suportes para as raízes das plantas. A superfície externa das canaletas recebe radiação solar e transfere calor para solução na recirculação, aumentando assim a sua temperatura. Caso a temperatura seja alta, diminuirá a produtividade do plantio no sistema hidropônico, sendo necessário rebaixamento de temperatura da solução, principalmente nos intervalos de maior exposição radiativa.

Uma das formas de resfriamento da solução nutritiva é a que utiliza o calor absorvido durante evaporação de um fluido térmico, disponibilizado em superfícies porosas (potes de cerâmica ou colmeias úmidas) ou através de aspersores. Os sistemas evaporativos são mais eficientes em cidades no Semiárido com umidade relativa média anual menor que 60%, sendo fortemente dependentes da umidade do ar. Medições da variação entre umidade e temperatura efetuadas no local de estudo indicam umidade relativa do ar acima de 70% e temperaturas acima de 30 °C durante o verão em janeiro de 2024, clima Aw a Am, tropical quente e úmido, segundo a classificação de Köppen, inviabilizando, em grande parte, a utilização de troca evaporativa para o trabalho, devido ao baixo rendimento.

No caso dos vegetais com sistema radicular no solo, os efeitos da difusividade térmica da cobertura que atua como proteção contra as variações térmicas do dia sobre a temperatura da zona de raiz (TZR), reduzindo a necessidade de estratégias bioquímicas para sobrevivência. Caso o cultivo hidropônico pudesse aliar sua disponibilidade hídrica às menores temperaturas disponíveis em solo ou outra fonte fria qualquer que atuasse sobre a solução nutritiva, em contato direto com a TZR, seria criado um ambiente de menor estresse térmico, conseqüentemente mais produtivo.

Estudo com geotermia foi feito por SOUZA(2024), em mesmo local durante o verão de 2023, indicando vocação geotérmica para aquecimento noturno da solução nutritiva ao invés de resfriamento diurno; Diante do pressuposto buscou-se outras

alternativas de fonte fria ³(FF) que fosse utilizada como amortecedora do estresse térmico ocasionado pela temperatura na solução nutritiva da hidroponia. Esse calor pode ser termodinamicamente transportado, do solo ou outra fonte passiva, para o fluido da canaleta hidropônica através de fluido acoplador térmico, nesse caso, água de resfriamento na superfície externa ao próprio conduto de solução nutritiva.

Avaliando-se o comportamento térmico noturno do ambiente de estudo, surgiu a oportunidade de utilização da fonte fria que acontece neste período, qual seja: a própria temperatura do ar no interior da casa de vegetação. Ensejou-se então, os questionamentos bases da tese: 1º) Pode existir transporte eficaz de calor da solução nutritiva para fonte fria obtida no ar, em turno noturno do dia anterior? Utilizando para tal, um permutador de feixe tubular⁴ (o feixe é o próprio conduto de recalque hidropônico), submerso em um canal de água resfriada ao ar. Sendo assim, o calor adquirido nas canaletas hidropônicas durante o pico de temperatura entre as 9:00 e 16:00h é transferido para a água (acoplador térmico), reduzindo as temperaturas de uma solução hidropônica cultivada em canaletas comerciais NFT (Capítulo 1). 2º) Esse sistema pode ser utilizado em um cultivo de coentro NFT com algum impacto produtivo (Capítulo 2)?

Como as temperaturas nas canaletas hidropônicas têm valor maior que o ar circundante, devido ao efeito estufa de seu interior, no período das 9:00 as 16:00h; Pode-se utilizar uma fonte fria para resfriamento das canaletas hidropônicas. Procedeu-se então com a medição das temperaturas de em canal submerso, preenchido com água, resfriada durante a noite, percebendo-se atuação como fonte fria durante o período diurno, justamente nos horários de maior temperatura. Caso o conduto fosse mergulhado, poderia ser utilizado como resfriador em sistema de cultivo hidropônico; O que foi feito nos meses de maio e junho de 2024, com o cultivo do Coentro “Verdão”.

O Coentro (*Coriandrum sativum*) é uma cultura pouco sensível a altas temperaturas e associada à salinidade (SILVA et al., 2022). Por essa razão, grande parte da literatura relacionada ao controle de temperatura utiliza sistemas de resfriamento hidropônico de outras culturas mais sensíveis, como a do alface

³ Fonte fria é representada pelo fluido com menor energia térmica de um ciclo termodinâmico, usado como sorvedouro de calor, para onde o calor absorvido é dissipado.

⁴ Permutador de feixe tubular é um equipamento que usa tubos com fluidos ou meio externo e interno com temperaturas distintas para resfriamento ou aquecimento, nesse caso a solução nutritiva (interno) e água ou solo (externo)

(*Lactuca sativa*). Na atual pesquisa, devido ao ciclo curto, o coentro “Verdão” foi escolhido para o estudo da influência da técnica de resfriamento passivo na produtividade, avaliando os efeitos conjugados da utilização de águas salobras (salinidade), condições desafiadoras para o cultivo hidropônico e típicas de regiões como as do semiárido brasileiro.

Esperou-se que a atuação concomitante do permutador horizontal submerso em água diminuísse a temperatura da solução nutritiva, influenciando positivamente no aumento da produtividade do coentro “Verdão”.

O ineditismo da pesquisa se deve à utilização dos sistemas e da energia térmica passiva⁵ (TOROXEL, 2024), aplicada ao cultivo hidropônico, usando o próprio solo ou ambiente da casa de vegetação como fonte fria noturna, sugerindo nova aplicação das energias passivas direcionada às necessidades térmicas da hidroponia.

O trabalho foi dividido em duas partes distintas: Capítulo 1, referente ao estudo de proposta de redução de temperatura da solução hidropônica, utilizando canal de água submerso; capítulo 2, sobre o impacto do sistema no cultivo do coentro “Verdão” comparativamente ao sistema sem resfriamento passivo.

Foram inseridos apêndices explicativos ao trabalho devido a quantidade de interfaces envolvidas, a citar:

Apêndice A, sobre os detalhes referentes a montagem dos sistemas de controle e leitura das variáveis coletadas em linguagem python 3.8 e Arduino;

Apêndice B, sobre os experimentos preliminares até a concepção da proposta de resfriamento.

Apêndice C e D dos tratamentos e as variações de pH e CE (Condutividade elétrica) da solução nutritiva.

Apêndices G, H e J, referentes ao teste estatístico de Kruskal-Wallis e post hoc; e Apêndice I, referente aos autovalores e autovetores das componentes principais.

Nos capítulos os apêndices são indicados através de índices em notas de rodapé.

⁵ Energia térmica passiva são estratégias de aproveitamento energético com baixo consumo energético que reduzem a necessidade de usar sistemas de resfriamento ativo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver e aplicar um sistema de resfriamento do conduto de recalque da solução nutritiva mediante sua submersão em água para redução da temperatura no cultivo NFT de coentro “Verdão” submetido à salinidade, avaliando efeitos sobre a cultura.

2.2. Objetivos Específicos

Quantificar a variação das temperaturas das soluções nutritivas na interface líquida da canaleta de cultivo no início, na extremidade e no recalque do cultivo hidropônico NFT, com ou sem tubo submerso em canal de água de resfriamento;

Construir sistema de resfriamento em canal de água para diminuição da temperatura de reciclo da solução nutritiva no cultivo NFT de coentro “Verdão”, com temperatura limitada pela estabilidade das temperaturas da fonte fria noturna com água em canal enterrado;

Avaliar a influência do sistema de resfriamento com água na resposta produtiva do cultivo hidropônico de coentro “Verdão”.

3. HIPÓTESES

- O ambiente da casa de vegetação promove fonte fria passiva noturna e/ou diurna, suficiente para ser utilizado na redução ou aumento da temperatura da solução nutritiva de um sistema hidropônico NFT, considerando as variações térmicas nos períodos diurno e noturno.
- A utilização de tubo de PVC horizontal mergulhado a 20 cm em água, resfriada naturalmente em período noturno, é suficiente para a redução das temperaturas da solução nutritiva e tem impacto produtivo do coentro hidropônico “Verdão” no outono.
- O coentro “Verdão” cultivado no sistema hidropônico NFT com água salobra e resfriamento da solução nutritiva em canal de água, apresenta impacto produtivo positivo sob efeito conjugado.

4. REVISÃO DE LITERATURA

Dentre os principais desafios atuais da agricultura se encontram: custo do recurso água, as mudanças climáticas, o controle das pragas e a disponibilidade de energia para os sistemas de produção e agricultura sustentável (BRODT, 2011). O aquecimento global e as alterações na precipitação sugerem ajustes na gestão dos recursos naturais, com impacto na produtividade agrícola. Dentre esses recursos se encontram o solo e a água (HAQ, 2023).

Segundo SAQIB (2022), as alterações climáticas, como o aumento das temperaturas em vários países dos trópicos, como Brasil e Índia (SILVA, 2022; SHARMA, 2022), estão causando efeitos substanciais na produtividade das culturas hortícolas, bem como na qualidade da produção de hortaliças. Dentre os desafios, se destacam, o de satisfazer a demanda de alimentos, a limitação do acesso a água, a poluição do solo, entre outros fatores. Neste contexto, a hidroponia e suas aplicações na agroindústria ou na agricultura familiar, (SOUSA, 2024; NETO, 2017), mostra-se como um método agrícola que dispensa o uso do solo, oferecendo uma alternativa viável para redução do problema (VELAZQUEZ, 2022).

As recentes tecnologias de plantio como é o caso da hidroponia têm como importante premissa de projeto o menor consumo de água por planta na irrigação, principalmente nos sistemas de ciclo fechado (FELTRIM, 2005).

Parâmetros de sustentabilidade como o menor consumo de água são imprescindíveis quando as considerações de projeto propõem diminuição da pegada ecológica dos sistemas. Segundo ALMEIDA (2020), a hidroponia apresenta uma pegada ecológica inferior em comparação com produção semelhante, sendo possível reduzir os volumes de água necessários e aumentar a produção das culturas, inclusive com utilização de águas residuárias para cultivo hidropônico.

Uma avaliação do ciclo produtivo em cultivo NFT⁶ feita por CASEY (2022), determinou as pegadas ambientais da alface produzida em dez configurações de cadeia de suprimentos, evidenciando consumo energético de cerca de 15 kWh por kg cultivado, apresentando baixa pegada ambiental quando cultivado indoor, nas cidades, com 17,8 kg CO₂ eq. , enquanto que no campo foi de 0,48 kg CO₂ eq. , principalmente devido à cadeia de suprimentos.

⁶ O Sistema NFT (Nutrient Film Technique), utiliza fluxo laminar para irrigação das raízes no sistema hidropônico.

Sistemas hidropônicos

A palavra hidroponia vem do grego, dos radicais hydro = água e ponos = trabalho. Apesar de ser uma técnica relativamente antiga, o termo hidroponia só foi utilizado pela primeira vez em 1937 pelo Dr. W. F. Gericke da Universidade da Califórnia (SHARMA, 2024; DHURI et. al., 2023; KHATRI, 2024; NETO, 2012).

Segundo RODRIGUES (2002), a hidroponia é uma técnica alternativa de cultivo de plantas em solução nutritiva, com ausência ou na presença de substratos naturais ou artificiais nas canaletas. De modo geral, as principais vantagens dessa tecnologia de cultivo são o aumento da produtividade, com menor impacto ambiental, a maior eficiência na utilização de água de irrigação e de fertilizantes, a redução da quantidade ou eliminação de alguns defensivos e maior probabilidade de obtenção de produtos de qualidade.

No cultivo hidropônico, a disponibilidade de solução nutritiva líquida e a forma como estão submersas as raízes, com intervalos intermitentes ou não, diferencia os diversos sistemas; Em destaque os sistemas NFT (Nutrient Film Technique) com intermitência de irrigação das plantas que se encontram com as raízes em canais e o sistema DFT (Deep Film Technique) na qual a zona radicular permanece imersa constantemente na solução nutritiva, geralmente recebendo injeção de oxigênio por borbulhamento (MACWAN, 2020).

Cada tipo de sistema hidropônico apresenta características e produtividade distintas quando comparados entre si. Segundo FRASETYA (2020), o sistema NFT de alface, foi de 6%-10% mais eficiente no aumento da massa seca, quando comparado ao sistema DFT. Estudos como o de SANTOS (2020) indicam que a eficiência da produção de coentro entre os sistemas variam de acordo com o parâmetro produtivo estudado, inclusive o tipo de cultura e dimensão dos sistemas.

Segundo RAMADAN (2023), a FAO⁷ Relatou que, em 2020, a produção total de erva-doce, badiana, erva-doce e coentro atingiu 11.362 hectogramas por hectare (hg/ha) com grande potencial de produção mundial, evidenciando a importância mundial da produção de coentro.

Dentre as principais plantas cultivadas no NFT se encontra o coentro (*Coriandrum sativum L.*), que é uma hortaliça folhosa aromática da família Apiaceae

⁷ FAO-Food and agriculture organization of the united nations em <https://www.fao.org/faostat>

(a mesma da salsa e da cenoura) cultivada comercialmente em um ciclo de 40 a 55 dias, podendo ser produzido em regiões e em épocas ou ambientes de temperaturas acima de 25 °C, preferencialmente em solos com pH em torno de 6,0. Destaca-se por sua adaptação aos diversos tipos de cultivo, tais como os sistemas convencional e orgânico, cultivo protegido, fertirrigação e hidroponia (REIS, 2016).

Influências da salinidade e temperatura no cultivo hidropônico

Os parâmetros concomitantes da disponibilidade de água salobra, restrição hídrica e temperaturas tropicais, são presentes no cultivo hidropônico do Semiárido, e sugerem pesquisas com o coentro hidropônico, como as de SILVA (2015).

A água salobra pode ser aproveitada na solução nutritiva, especialmente no nordeste Brasileiro, com aplicação da hidroponia com diversos tipos de hortaliças associadas ao clima tropical, como chicória, pak choi e Coentro que são de ciclo curto (ALVES, 2019; OLIVEIRA, 2024; LIRA et al., 2018).

O aumento da salinidade das soluções nutritivas provoca estresse salino ocasionando diversos impactos nas relações hídricas e fisiológicas no cultivo hidropônico (SOARES, 2019).

Em experimento NFT com coentro, cultivar “Verdão”, dirigido por BEZERRA (2022), variando a condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva, foi concluído que a eficiência hídrica do coentro foi inibida pelo aumento na concentração de sais na solução nutritiva, enquanto o aumento na vazão da solução nutritiva afetou negativamente os parâmetros produtivos das plantas de coentro.

A temperatura ambiente da casa de vegetação também é fator de grande influência para produção vegetal, afetando as fases e os processos fisiológicos como germinação, crescimento, floração e os processos de fotossíntese, respiração, transpiração, atividades enzimáticas, permeabilidade das membranas celulares, absorção de água e de nutrientes e a própria velocidade das reações químicas, podendo induzir precocidade ou retardar a produção final (LUCCHESI, 1987).

O coentro pode ser cultivado na hidroponia em temperaturas de soluções nutritivas de até 32°C, resultando 66% da massa fresca quando comparado ao controle com água a temperatura atmosférica, se não for usada água salobra (SILVA et al. , 2020).

Outras hortaliças como o alface, quando cultivado em hidroponia NFT, também apresentam temperatura média mensal ideal para o bom desenvolvimento das plantas, da ordem de 15 a 18°C, com máximo de 21°C a 24°C e mínimo de 7°C em NFT (BRUNINI, 1976), e 24°C e 25°C em DFT (HOOKS, 2022).

As temperaturas limites variam de cultura para cultura. Em cultivos hidropônicos, sugerem-se os valores de 4,4 °C e 21,1°C, como temperaturas cardiais (SLACK et al. ,1994).

BLISKA (1998) recomenda que a temperatura da solução nutritiva na germinação não deva ultrapassar 30°C, sob pena de causar danos às plantas, e que as temperaturas diurna e noturna devem ficar próximas de 16 e 10 °C durante época fria e de 24°C e 15°C na época quente, dependente da variedade de alface utilizada.

Temperaturas aumentadas, como fator abiótico, afetam o cultivo hidropônico. Segundo JENSEN (1985), temperaturas superiores a 30°C em hidroponia tropical afetam negativamente a quantidade de oxigênio dissolvido na solução. Deve haver aproximadamente 5 ppm ou mais de oxigênio dissolvido, especialmente na solução nutritiva que flui sobre o sistema radicular no canal de cultivo. A consequente diminuição da concentração de oxigênio na solução pode causar a morte da raiz e acelerar o processo de necrose radicular.

MAGALHÃES (2006) recomenda que essa temperatura não exceda 20° C para a alface. Segundo PADMASHREE (2018), cultivou alface a temperatura máxima de 32°C, afirmando que a influência da temperatura na produtividade é multifatorial.

THAKULLA et al. (2021) ensaiaram 17 cultivares de alface com a manutenção da temperatura da água resfriada por chiller⁸, chegando à conclusão que a temperatura de solução nutritiva controlada em 21,1 °C produziu alface com maior crescimento e biomassa. A pesquisa foi feita em Dyersville, Iowa (EUA), com temperaturas de verão entre 21°C e 27 °C.

HASANUZZAMAN et al. (2013) mostram os diferentes mecanismos de adaptação ou aclimatação das plantas a mudanças na temperatura, a citar: maturação adiantada, alteração na composição da membrana lipídica, ativação da defesa antioxidativa , proteínas anti estresse térmico, sinalização em cascata e

⁸ chiller- Trocador de calor que utiliza fluido de troca por expansão que gera água gelada, numa temperatura geralmente abaixo do bulbo úmido, e dependendo do fluido utilizado, abaixo de 0°C.

controle transcricional, mudança na orientação foliar, resfriamento por transpiração e enrolamento das folhas.

Os vegetais desenvolveram mecanismos de tolerância a estresses (no caso, salino e térmico) para garantir sua sobrevivência (SINGH et al., 2019).

Para ativar estes mecanismos, plantas fazem uso de compostos sinalizadores. Dentre os compostos sinalizadores, destacam-se as ERO (HASANUZZAMAN et al., 2020). Porém, sob condições de estresse, o balanço de produção e eliminação de ERO nas plantas é afetado, gerando acumulação destas nos tecidos vegetais (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011) e posterior estresse oxidativo.

Para evitar o estresse oxidativo, as plantas utilizam complexos enzimáticos e não enzimáticos que atuam em sinergia (HUANG et al., 2019).

DAWSON et al. (2003) citam que a produção de matéria seca pelas culturas é limitada pela quantidade de clorofila, devido à forte relação deste pigmento com os processos fotossintéticos, relacionando assim, o desenvolvimento da planta às condições de estresse.

A temperatura da solução na hidroponia deve ser igual ou menor à do ambiente. De um modo geral, considera-se adequada a faixa de 20°C a 25°C. Temperaturas superiores a 30°C são indesejáveis, por causarem necrose nas raízes. Uma das técnicas para evitar grandes variações de temperatura da solução nutritiva nos reservatórios é a de construí-los com material isolante e ao abrigo da radiação solar (CARRIJO, 2000).

O aumento da temperatura da solução hidropônica promove o crescimento micelial de *Pythium sp.*⁹ TEIXEIRA (2006) avaliou o efeito da temperatura (10, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 37 e 40°C) nesse crescimento. As temperaturas máximas variaram de 40 a 40,7°C, respectivamente. A temperatura ótima foi de 24 a 37 °C para *P. helicoides*, de 25 a 35°C para o isolado F4 e de 21 a 30 °C para os demais isolados. Evidenciou-se efeito direto da temperatura no crescimento do oomiceto¹⁰ na hidroponia da alface, ocasionando necrose dos tecidos radiculares.

⁹ O *Pythium sp.* pode sobreviver muito bem no solo ou substrato, mesmo se não estiverem presentes quaisquer plantas, podendo através de contaminação em hidroponia, causar podridão de raiz.

¹⁰ Atualmente, *Pythium sp.* foi classificado como oomiceto. Segundo Circular técnica 176 (EMBRAPA). Principais doenças das brássicas causadas por fungos, oomicetos e protozoários: Identificação e manejo.

Tecnologias agrícolas e controle de temperatura na hidroponia

Diversos tipos de tecnologias são utilizados para aumento de produtividade agrícola, e alguns deles, têm emprego na amenização das temperaturas da solução nutritiva sistemas de cultivo NFT.

DE CLERCQ (2018) elenca algumas das tecnologias utilizadas para a produção agrícola sustentável do campo ao mercado, inclusive as emergentes, destacando o domínio de alternativas como a hidroponia, obtenção de matéria prima a partir das algas, bioplásticos, agricultura em terras áridas e mar, acompanhada das novas tecnologias de aumento de produção como, fazendas urbanas verticais, modificação genética, carne artificial e impressão 3D e incorporando técnicas industriais como drones, análise de dados, internet das coisas (IoT)¹¹, agricultura de precisão, nanotecnologia, inteligência artificial e blockchain¹². Alguns dos caminhos passam por aplicação de fontes de energia com vocação sustentável.

VARMORA (2018) demonstra a possibilidade de utilizar painéis fotovoltaicos para fornecimento de energia, com controle de temperatura através de trocadores de calor baseados na exaustão e evaporação em sistema de cultivo NFT.

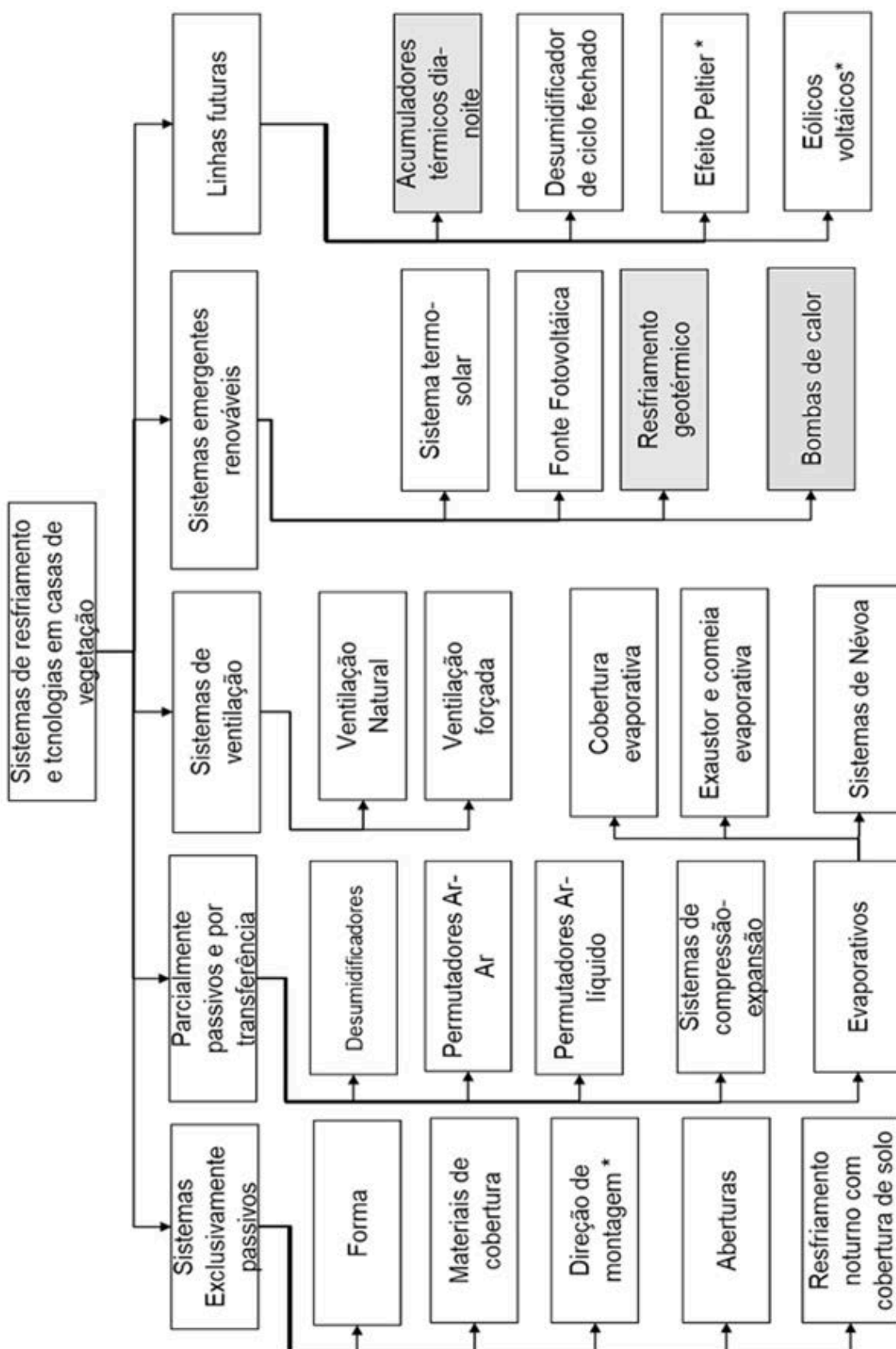
No caso do cultivo hidropônico, obter produtos de qualidade superior ao cultivo do campo, necessita do ambiente protegido (MENEGAES, 2015); tornando a descrição dos sistemas de resfriamento hidropônicos concomitantes com os das casas de vegetação. Essas aplicações em casas de vegetação, modificam as temperaturas do volume de controle interno da casa de vegetação.

Segundo SOUSSI (2022), os principais parâmetros de controle na operação do conforto térmico de uma casa de vegetação são: Radiação solar, temperatura do ar (T), umidade relativa (UR), e a concentração do dióxido de carbono (CO₂). Considerando os parâmetros envolvidos na termodinâmica da casa de vegetação, pode-se controlar mais facilmente os primeiros três parâmetros; o autor classifica os sistemas de controle da temperatura ou umidade de forma simplificada e adaptada nos grupos da Figura 01. Os tópicos são usados no trabalho como apoio para revisão do status tecnológico utilizado no controle das temperaturas na hidroponia.

¹¹ Internet das coisas (IoT) é uma rede coletiva de dispositivos conectados e à tecnologia que facilita a comunicação entre os dispositivos e a nuvem, bem como entre os próprios dispositivos.

¹² Blockchain é um mecanismo de banco de dados avançado que permite o compartilhamento transparente de informações na rede com blocos interligados em cadeia.

Figura 01. Sistemas de resfriamento em casas de vegetação. Adaptado de SOUSSI (2022).



Resfriamento passivo e hidroponia

O conceito de energia passiva no resfriamento ou aquecimento, apesar de pouco utilizado em agronomia, é um termo comum em sustentabilidade e se refere às aplicações exergéticas¹³ sustentáveis.

CAPLOW (2007) apresenta medidas de baixa energia para controle térmico em casas de vegetação através da modificação das aberturas e ventilação forçada.

Técnicas de resfriamento passivo¹⁴ são utilizadas em casas de vegetação fora da hidroponia (IDDIO, 2020).

BEARD (1983) aplicou os conceitos de resfriamento passivo em casa de vegetação para a cultura do tabaco, incluindo resfriamento por ventilação controlada por lógica, uma parede de termossifão acionada por energia térmica solar e modificações nas propriedades do material de construção (térmica e radiativa), juntamente com o armazenamento de energia na massa utilizada na construção.

Resultados de modelos de simulação computacional das temperaturas em casas de vegetação como mostrado por DESTA et al. (2004), modelaram as variáveis climáticas no interior das casas de vegetação.

As simulação bi-dimensionais e tridimensionais com CFD, têm sido utilizadas, através do traçado das isotermas, para modelar a influência da inclinação dos telhados e abertura das janelas, na transferência de calor; no entanto, os modelos não consideram o efeito da transpiração das plantas (SHKLYAR, 2004; BOURNET, 2010; BAEZA et al., 2005; BRUGGER et al., 2005).

Resultados de simulação em duas dimensões podem ser eficientes e suficientes para estudar a ventilação. Segundo MOLINA-AIZ et al. (2005), o aumento das dimensões da casa de vegetação pode causar redução da eficiência da ventilação de até 88%.

As combinações de resfriamento passivo reduzem eficientemente a alta temperatura interna das casas de vegetação em 2–6 °C, e reduzem as necessidades de água em 19–46%, em estimativas para locais de clima árido, como Cairo (Egito), Doha (Catar) e Carachi (Paquistão) com técnicas de ventilação natural,

¹³ Exergia- é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente (atinge o estado morto).

¹⁴ Resfriamento passivo- Resfriamento de baixa entropia, que utiliza fontes ou variações energéticas locais para aumento de eficiência energética de um sistema.

telas de sombreamento e casas de vegetação parcialmente aterradas (buried greenhouse), técnica que utiliza um desnível abaixo do solo para promover fonte fria no solo da estrutura (ABEDRABBOH et al, 2023).

O aumento da produção na casa de vegetação pode ser promovido através da redução da temperatura com o uso de coberturas plásticas, sendo a aplicação mais comum das telas de sombreamento. OLIVEIRA et al. (2009) relatam que o uso de tela termo-refletores com cerca de 26% a 40% de reflexão, gera precocidade na formação de mudas citrícolas.

Os sistemas de resfriamento passivo são utilizados para aplicação em hidroponia. NISAR (2024) utilizou três propostas de resfriamento evaporativo de solução nutritiva NFT com serpentinas em pote aberto, pote fechado horizontal e fechado vertical, concluindo que a serpentina vertical tem maior redução das temperaturas, de 4,5 °C das 14:00 as 15:00.

Uma aplicação térmica passiva que não se refere a temperatura da solução nutritiva na hidroponia, é o da utilização da variação na temperatura ocasionada pela evapotranspiração de culturas hidropônicas como redutora de temperatura de construções urbanas utilizando telhados verdes hidropônicos (“Green roofs”).

ANDI et al. (2022), simularam redução de 7 °C em ambiente interno com cobertura hidropônica. Como o trabalho concentra-se na redução da temperatura do ambiente interno abaixo da cultura, não foi quantificado o impacto na produtividade.

Outro método de minimização da troca térmica na hidroponia é a cobertura dos canais de cultivo. MATTOS (2001) mediu a temperatura do ar no interior das canaletas no cultivo de alface hidropônico em bancada de 24 m, utilizando 60 termopares, concluindo que a temperatura do ar no interior dos canais foi sempre superior à do ar ambiente em todas as parcelas mesmo com cobertura. O método de recobrimento utilizou como lona dupla face, Tetra-pak® e tubo PVC. Por fim, os resultados não influenciaram na produtividade apesar de reduzirem os valores das temperaturas internas das canaletas, a menor diferença relativa alcançada entre a temperatura ambiente e a das canaletas foi de 2 °C, durante os picos diurnos, utilizando Tetra-pak®.

Sistemas de compressão-expansão

Outras tecnologias, além das referentes às modificações na estrutura da casa de vegetação, são utilizadas atualmente para controle da temperatura da solução nutritiva hidropônica, concentram-se em redução de temperatura com fluido sob compressão-expansão, sendo necessário trabalho de compressão, são resfriadores usuais com acionamento por energia elétrica, como o usado por COMETTI et al. (2013); THAKULLA et al. (2021); TRIYONO et. al. (2024) e ONGUN (2016).

VILLELA et al. (2004) cultivaram morangueiros em sistema hidropônico tipo NFT com solução nutritiva resfriada e mantida à temperatura de aproximadamente 12 °C, por meio de um trocador de calor com compressão de gás.

Os sistemas de resfriamento com compressão-expansão de gás são os mais utilizados na atualidade e necessitam de aporte energético para o controle de vazão e pressão em casa de vegetação. KHAOUA et al. (2006) afirmam que o controle da vazão de ar de ventilação em casas de vegetação contribui para manter a temperatura, a umidade relativa e a concentração de CO₂ dentro dos níveis recomendados. Os referidos autores desenvolveram a simulação através de CFD (Computational fluid dynamics), do comportamento da vazão de ar, validando os dados com medições da velocidade e da composição do ar, feitas com um anemômetro sônico tridimensional e um analisador de gases.

Trocadores de calor com tubos são auxiliares aos sistemas com chillers, e utilizados em trabalho utilizando sistema hidropônico de hortaliças em container no Mediterrâneo, BOUADILA (2022) rebaixou a temperatura diária em 6°C usando trocadores de calor de tubos com umidade de cerca de 75% no ambiente de cultivo indoor. O sistema controlou aquecimento e resfriamento, dia e noite.

Sistemas evaporativos

Sistemas de troca de calor utilizando pulverização associada à exaustão também são comuns para rebaixamento da temperatura em casas de vegetação e são considerados como evaporativos. RANDIMAL (2020) descreve um sistema instalado em casa de vegetação no Sri Lanka, utilizado para hidroponia de alface, capaz de reduzir a temperatura média do dia em 3°C em comparação com o sem sistema de resfriamento.

GHANI et al. (2019) fizeram uma investigação experimental e numérica do desempenho térmico de resfriamento evaporativo por exaustão em casa de vegetação submetida a climas quentes e áridos no Qatar, e concluíram que o sistema pode diminuir sua temperatura interna de 3° C a 10°C com eficiência de 80%. No mesmo trabalho foi mostrado que os ventiladores de indução localizados na altura da cultura ou abaixo dela resultaram na diminuição da temperatura média da casa de vegetação. A duplicação da taxa de ventilação da casa de vegetação de 20 ACH para 40 ACH (taxa do fluxo de ar ventilado (m^3/h) dividido pelo volume do ambiente) diminuiu ainda mais a temperatura do ar no ambiente. A temperatura (provocada pela radiação solar incidente) foi reduzida em 8 °C através do aumento das taxas de ventilação.

Os sistemas evaporativos também são utilizados no controle da temperatura através de trocadores térmicos como o estudo de CHAMROON (2019), outro sistema evaporativo é o de elementos porosos. Os elementos porosos mais utilizados são os de resfriamento (potes cerâmicos) e apresentam diversos mecanismos de transmissão de calor não limitados à condução. Estudos como os de HARISH (2014) evidenciam a influência da convecção forçada na variação de temperatura de água dentro de um pote simples cilíndrico com menores temperaturas quando o pote é exposto a convecção forçada.

No entanto, para garantir a ocorrência da evaporação adiabática¹⁵, a temperatura do ar não pode diminuir abaixo da temperatura do bulbo úmido (ALKHEDHAIR et. al. 2016). Conseqüentemente, os sistemas de resfriamento evaporativo são incapazes de diminuir significativamente as altas temperaturas que prevalecem durante a estação quente e úmida do verão.

Segundo KITTAS et al. (2003), o sistema de resfriamento evaporativo estudado pôde reduzir a uma temperatura interna de uma casa de vegetação em 3 °C, mesmo em ambiente úmido, utilizando exaustores; considerando o diagrama psicrométrico $R_h=70\%$ e $T=35^\circ C$ o experimento promoveria reduções teóricas de 5 °C.

Aplicações desse sistema na redução de temperatura das canaletas hidropônicas podem ser encontradas em pesquisas como a de KIM et al. (2010), que utiliza manta porosa evaporativa recobrando as canaletas de sistema hidropônico, para redução de temperatura do substrato irrigado.

¹⁵ Evaporação que acontece sem variação da pressão atmosférica através da troca de calor por passagem de estado físico.

FAUZAN (2021) implementou lógica Fuzzy¹⁶ para controle da temperatura em sistema de cultivo NFT utilizando ventilação forçada sobre os tubos de alimentação de solução nutritiva, composto de três ventiladores (12V; 0,15A) dispostos em paralelo para resfriar a temperatura da solução nutritiva com a convecção do ar ambiente a temperatura de $23,7 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Uma das soluções pesquisadas para redução dos gastos no controle ambiental e de temperatura foi obtida por JANS et al. (2019) com a construção de um cultivo indoor hidropônico subterrâneo para economia energética, principalmente devido à estabilidade das temperaturas em subsolo. Os dados não forneceram diferenças significativas entre o sistema e as técnicas de manejo empregadas do cultivo indoor não subterrâneo.

Segundo ORTEGA (2021), existem critérios para maior eficiência com maiores diferenças de temperatura na troca térmica evaporativa utilizando a vaporização em potes de barro. Dentre eles está a proporção entre altura e largura pequenas, base de suporte isolada para evitar evaporação e barriga volumosa o mais próximo possível do fundo.

Vários autores, como BARROS (2020), citam o resfriamento evaporativo com pote com resultados de troca térmica da ordem de 2°C a 5°C , a depender das condições físicas circundantes, dentre elas a umidade relativa do ar.

Segundo MITTAL et al. (2006), em experimentos de estado estacionário realizados em um ambiente com temperatura de 23°C , o efeito de resfriamento evaporativo reduziu a temperatura ambiente em $8,3^{\circ}\text{C}$ (a redução somente com convecção foi de $4,7^{\circ}\text{C}$) considerando, que a redução da umidade relativa seja de 60 para 15%. Em Calcutá, Índia, sob uma temperatura ambiente de $34,5$ a 35°C , o efeito de resfriamento atingiu um máximo de 7°C e $4,5^{\circ}\text{C}$.

MONTERO (1990) ressalta que outra forma de promover redução de temperatura por troca de calor mássica é a utilização de névoa por nebulização de água no ambiente da casa de vegetação. Considerando umidade de 85%, a queda obtida para temperatura do ar interna média foi de $3,0^{\circ}\text{C}$ e máxima em $5,0^{\circ}\text{C}$.

¹⁶ Lógica Fuzzy é uma técnica matemática da área de inteligência computacional, que se baseia no pensamento humano para modelar um problema de forma aproximada, considera que uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Sistemas geotérmicos

PENEYRA (2024) utilizou um sistema de resfriamento para cultivo aeropônico contrastando as produções usando resfriamento geotérmico e por compressão a gás, com maior produção no sistema de resfriamento à compressão.

Os sistemas de resfriamento geotérmico utilizam as variações de temperatura do solo em trocas térmicas vantajosas devido às distintas propriedades de condutância térmica com relação ao ar, propiciando inércia térmica suficiente para que o solo funcione como um acumulador ou dissipador térmico, como visto em SETHI (2013) e outros estudos relacionados a utilização de permutadores no solo e sua modelagem (SLIWA.T et. al 2016; TYABUT, 2021;WANG,2022; ZHU, at al., 2021; SANCHES,2023).

Segundo BRADY (2013), a temperatura de poucos centímetros superior do solo saturado é geralmente 3°C a 6 °C mais baixa que a do solo seco ou ligeiramente úmido podendo promover fonte fria para técnicas de geotermia. Segundo CARRIJO (2000), procedimentos de aterramento das tubulações hidropônicas ou do próprio reservatório já são medidas usuais na redução da temperatura.

As diferenças de temperatura no solo com relação à atmosfera sugerem possibilidade de utilização da geotermia em aplicações como a redução da temperatura da solução nutritiva hidropônica, haja vista comportamento singular das variações de temperatura do solo com relação ao ar. A medição dessa variação em vários trabalhos indica variações de temperatura no solo a 0,5 m de profundidade praticamente nulas ao longo do dia. Segundo FILHO (1988), que mediu a variação da temperatura do solo e as temperaturas do ar em vários locais do Nordeste brasileiro.

A exemplo, temperaturas medidas entre 30 cm e 60 cm evidenciam valores abaixo de 29,0 graus no solo para Localização Bebedouro PE, sob cobertura de milho e RAO (2005) mediu 31,8 °C a 50 cm de profundidade em Salvador BA enquanto que a temperatura do ar alcança patamar de 44,4°C. Segundo LAU (2004) as variações de temperatura entre solo tendem a estabilização à partir de 30 cm de profundidade

A utilização da troca de calor geotérmica para aquecimento de casas de vegetação foi estudada em trabalho de OZGENER (2005) na Universidade Ege,

Izmir, Turquia. O trabalho utilizou serpentina em solo com 50 m de profundidade × ¼” de diâmetro nominal. Neste trabalho, a energia geotérmica foi utilizada em uma troca de calor solo e ar.

MARTINS (2015) obteve trocas térmicas com trocador de calor em forma helicoidal no solo com rebaixamento de temperaturas de água de aproximadamente 50°C para 35°C e profundidade de 1,5 m, ou seja, as temperaturas do solo como fonte fria para as profundidades são menores que 35 °C.

Trocadores de calor com fluido refrigerante são utilizados em trabalhos com cultivo hidropônico. SULIT et al. (2023) testaram dois resfriadores da solução nutritiva de torres hidropônicas (aeroponia), utilizando dois tratamentos, um com trocador de calor de solo¹⁷ e outro sistema de resfriamento com chiller, com temperaturas médias de solução nutritiva de 25,6 °C e 23,2 °C, respectivamente; ambas medidas em pico foram às 15:00h. A análise de retorno financeiro mostrou que a solução nutritiva resfriada da zona radicular no 25º DAT é mais viável com relação benefício-custo de 1,73% do lucro líquido médio, e retorno do investimento de 23,39%, considerando período de retorno de 0,81 anos.

Sistemas emergentes e futuros

Alguns sistemas emergentes e futuros podem ser citados, como o princípio das bombas de calor, utilizadas no controle da temperatura em ambiente de cultivo protegido, citado por BENLI (2013); e utilizado por MORITANI (2023) tanto para resfriamento ou aquecimento na subirrigação de morango, sistema utilizado em pesquisa, por vezes como controle de congelamento ou redução de custos (HEU et al., 2020; SHIGEOKI et al., 2020)

Os sistemas que utilizam efeito peltier também são estudados e podem promover resfriamento de fluidos (ASTRAIN, 2005; SAHU et. al., 2019). THOLIB et al. (2021) aplicaram o princípio de efeito peltier para resfriamento de solução nutritiva da hidroponia variando a temperatura de 35 litros de solução entre 38,1 °C a 30,31 °C.

As pesquisas escassas sobre os sistemas de resfriamento no cultivo do coentro hidropônico, principalmente os que utilizam energia passiva, nortearam o

¹⁷ Trocadores de calor geotérmicos são chamados de Ground heat exchangers (GHE), tendo forma geralmente tubular.

atual estudo sobre as fontes térmicas disponíveis no ambiente protegido, que pudessem ser utilizadas para a redução das temperaturas das soluções nutritivas. A associação dos princípios da bomba de calor, geotermia e transferência de calor entre dia e noite (SOUZA,2024), são tecnicamente promissoras nas aplicações térmicas do cultivo protegido, foram aplicadas no trabalho, e ensejam mais pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDRABBOH, O.; MUAMMER K.; YUSUF B. Sustainable food development for societies in hot arid regions: Thermoeconomic assessment of passive-cooled soil-based and hydroponic greenhouses. **Journal of Cleaner Production**, v. 412, n. 137250, 1 august, 2023.

ALKHEDHAIR, A. I.; JAHN, H.; GURGENCI, Z.; GUAN, S. HE. Parametric study on spray cooling system for optimizing nozzle design with pre-cooling application in natural draft dry cooling towers. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 104, p. 448–460, June, 2016.

ALMEIDA, DIOGO. Reutilização de água residual em sistemas de hidroponia. Orientadora: Leonor Miranda Monteiro do Amaral. **Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia do Ambiente)** - Faculdade de ciências e Tecnologia, Nova universidade de Lisboa, 2020.

SUZART, A., Lucylia; SILVA, M. G.; RAJ GHEYI, H.; DA SILVA PAZ, V.; SOARES, T.; SEVERO R.; RAPHAELA M. Uso De Águas Salobras No Cultivo Da Chicória Em Condições Hidropônicas. **IRRIGA**, v. 24, n. 4, p. 758–769, 2019.

ANDI M. N; SYAMSUL F.; JAHJA M.; NUAYI A. Numerical Calculation Of Hydroponic Plants Thermal Performance As A Green Roof Base. **Journal of Harbin Institute of Technology**, Harbin Gongye Daxue Xuebao, v. 54, n.2, p. 90–99, February, 2022.

ASTRAIN, D.; VIÁN J.G.; ALBIZUA J. Computational model for refrigerators based on Peltier effect application. **Applied Thermal Engineering**, n. 25, p. 3149-3162, 2005.

BAEZA, E.; PEREZ J.; LOPEZ J.C. CFD simulation of natural ventilation of a parral greenhouse with a baffle device below the greenhouse vents. **Acta Horticulturae**, v. 801, p. 885-892, 2008. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.104>

BARROS, M. Resfriamento evaporativo da água em um refrigerador de vaso cerâmico: estudo experimental da transferência de calor e massa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, n. e20200124 , 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0124>

BEARD, T; ARTHUR, J.; CHILDS, D; FLETCHER, G. Passive solar cooling of an agricultural warehouse. **American Society Mechanical Engineering**, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, n. 83, November 17, 1983.

BENLI, H.A. A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump systems for a greenhouse heating in the mild climate Elaziğ, Turkey. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, n.1, p. 197-206, 2013.

BEZERRA, R. R.; SANTOS, J.; PESSOA, U.; SILVA, E. F.; OLIVEIRA, T.; NOGUEIRA, K.; SOUZA, E. Water Efficiency of Coriander under Flows of Application of Nutritive Solutions Prepared in Brackish Waters. **Water**, v. 14, n. 24, p. 4005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244005>

BLISKA, A. Distintos sistemas de produção, conservação e avaliação pós-colheita. ORIENTADOR: Sylvio L. Honório, **Dissertação de Mestrado (Mestrado em agronomia)**, Campinas, SP, Fevereiro de 1998.

BOUADILA, SALWA. Assessing heating and cooling needs of hydroponic sheltered system in mediterranean climate: A case study sustainable fodder production. **Energy**, v. 261, p. 125274, December, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125274>

BOURNET, P.; BOULARD, T. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 2, p. 195-217, 2010.

BRADY, N.; WEIL, R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. **Bookman**, Porto Alegre, p. 685, 2013.

BRODT, S.; SIX, J.; FEENSTRA, G.; INGELS, C.; CAMPBELL, D. Sustainable Agriculture. **Nature Education Knowledge**, v. 3, n. 10, p. 1, 2011.

BRUGGER, M.; MONTERO J; BAEZZ, E.; PÉREZ, J. Computational Fluid Dynamic Modelling to Improve to Design of the Spanish parral style Greenhouse. **Acta Horticulturae**. v. 691, p. 425-432, 2005.

BRUNINI, O. Temperatura-base para alface cultivar “white Boston”, em um sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Revista científica do Instituto Agrônômico do estado de São Paulo, v. 35, n. 19, p. 214, Campinas, SP, julho de 1976.

CAPLOW, T. Building-integrated greenhouse systems for low energy cooling. **2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century**, Crete island, Greece, v.1, p. 172-176, September 2007.

CARRIJO, OSMAR. Princípios de Hidroponia. **Circular técnica EMBRAPA**. v. 22, p.27, Novembro, 2000.

CASEY, LEANNE. Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. **Journal of Cleaner Production**, v.1, n. 369, p. 133214, 2022.

CHAMROON, C.; AUNGKURABRUT R. Performance evaluation of a small backyard hydroponics greenhouse using automatic evaporative cooling system. **IOP Conference Earth Environment**. v. 301, n. 012024, 2019.

COMETTI, N; DIENE M.; KARLA G.; LEONARDO R.; MARINALDO F. Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop. **Horticultura Brasileira**, v. 31,n. 2, p.287–292, 2013.DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000200018>

CLERCQ, DE; VATS, A.; BIEL, A. Agriculture 4.0: The Future of Farming Technology. **Oliver Wiman**, February, 2018. Disponível em: <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2021/apr/>

[agriculture-4-0-the-future-of-farmingtechnology.pdf](#), acessado em 20 março 2024.

DAWSON, P.; NORTH, J.; PLUMMER, E.; CURRAN, J. Forest ecosystem chlorophyll content: implications for remotely sensed estimates of net primary productivity.

International Journal of Remote Sensing, Wilmington, v. 24, n. 3, p. 611-617, 2003.

DESTA, Z.; JANSSENS, K.; BRECHT, VAN.; MEYERS, J.; BAELMANS, M.; BERCKMANS, D. CFD for model-based controller development. **Building and Environment**, v. 39, n. 6, p. 621-633, 2004.

DHURI, J; YATEEN K.; SHREYAS D.; PARTH A.; JEET S. Indoor Farming Hydroponic Plant Grow Chamber 3 Layer: A Research. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 11, n. IV, April, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50940>

FAUZAN, M. Implementation of fuzzy logic controllers to maintain water temperature in hydroponics NFT for lollo verde lettuce (*lactuca sativa* L.). **International Journal of Applied Pharmaceutics**, v. 13, n. 3, p. 23-27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22159/ijap.2021.v13s3.04>

FELTRIM, L.; CECÍLIO F.; ALVES R.; BRANCO, B. Produção de alface-crespa em solo e em hidroponia, no inverno e verão, em Jaboticabal - SP. **Científica**, Dracena, SP, v. 37, n. 1, p. 9–15, 2009.

FELTRIM, A.; CECÍLIO F.; BRANCO, R.; BARBOSA, J.; SALATIEL, L. Produção de alface americana em solo e em hidroponia, no inverno e verão, em Jaboticabal, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 505–509, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400010>

FILHO, J. Estrutura térmica de solos do nordeste do Brasil. Orientador: RAO, T. V., **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, 1988.

FRASETYA, B. The effect of hydroponics systems on the growth of lettuce. **The 5th Annual Applied Science and Engineering Conference (AASEC 2020)**, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v. 1098, n. 042115, 2020.

GHANI, A; EL-BIALY, E; BAKOCHRISTOU, F.; MOHAMMED R.; AYMAN M. Experimental and numerical investigation of the thermal performance of evaporative cooled greenhouses in hot and arid climates. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 26, n. 2, p. 141-160, 2019.

HAQ, U.; SHAHBAZ, P.; ABBAS, A.; ALOTAIBI, A.; NADEEM, N.; NAYAK, K. Looking up and going down: Does sustainable adaptation to climate change ensure dietary diversity and food security among rural communities?. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1142826>

HARISH. H. G.; GOWDA, K. Thermal Analysis of Clay Pot. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 3, n. 10, p. 45-57, October, 2014

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, B.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, M.; MAHMUD, A.; FUJITA, M.; FOTOPOULOS, V. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. **Antioxidants**, v. 9, p. 681, 2020.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ALAM, M.; ROYCHOWDHURY, R.; FUJITA, M. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Science**. v. 14, n. 5, p. 9643-9684, May 3, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms14059643>

HEU, C. S.; JANG, H.; JEON, J.; LEE, S.; KIM, R. Recent progress on developing antifrosting and anti-fouling functional surfaces for air source heat pumps. **Energy and Buildings**, n. 223, p. 110139, 2020.

HOOKS, T.; SUN, L.; KONG, Y.; MASABNI, J.; NIU, G. Effect of Nutrient Solution Cooling in Summer and Heating in Winter on the Performance of Baby Leafy Vegetables in Deep-Water Hydroponic Systems. **Horticulturae**, v. 8, p. 749, 2022.

HUANG, H; ULLAH, F.; ZHOU, DX; YI, M.; ZHAO, Y. Mechanisms of ROS Regulation of Plant Development and Stress Responses. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, n. 800, June, 2019. DOI: [10.3389/fpls.2019.00800](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00800)

IDDIO, E.; WANG, L.; THOMAS, Y.; MCMORROW, G.; DENZER, A. Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 1–15, 2020.

JANS, S.; FIDLER, M.; CHOUDHARY, R. Monitoring The Performance Of An Underground Hydroponic Farm. **International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)**, v. 1, p. 133-141, January, 2019.

JENSEN, MERLE. Hydroponic Culture For The Tropics: Opportunities and Alternatives. **Department of Plant Sciences University of Arizona**, Tucson, Arizona, 85721, U.S.A, 1985.

KARUPPANAPANDIAN, T.; JUN, M.; CHANGSOO, K.; KUMARIAH, M.; WOOK, K. Reactive oxygen species in plants: Their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms, **Mechanisms**, v.5, n. 6, p. 709-725, 2011.

KHAOUA, O.; BOURNET, E.; MIGEON, C.; BOULARD, T.; CHASSERERIAUX, G. Analysis of greenhouse ventilation based on computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 1, p. 83-98, 2006.

KHATRI, L.; ADHIRAJ, K.; DIPAK, RAJ. Hydroponics: Advantages And Challenges In Soilless Farming. **Big Data in Agriculture (BDA)**, v. 6, n. 2, p. 81-88, 2024.

KIM, KI-DONG; KWON, S.; PARK, J.; CHUNG, S. Development of temperature control technology of root zone using evaporative cooling methods in the strawberry hydroponics. **Journal of Bio-Environment Control**, v. 19, n. 4, p. 183-188, 2010.

KITTAS, C.; BARTZANAS, T.; JAFFRIN, A. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. **Biosystems Engineering**, v. 85, n.1, p. 87-94, 2003.

LAU, RATTAN. **Principles of soil physics**. The ohio state university, **Columbus**, 1th edition, Ohio, USA, Marcell Dekker, 2004.

LIRA, R.M.; SILVA, E.F.; SILVA, G.F.; SOARES, H.; WILLADINO, L. Growth, water consumption and mineral composition of watercress under hydroponic system with brackish water. **Horticultura Brasileira**, v. 36, n.1, p.13-19, 2018.

LUCCHESI, A. Fatores da produção vegetal. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa do Potássio e do Fosfato, p.1-10, 1987.

MACWAN, JEMIMA. Review on soilless method of cultivation: hydroponics. **International Journal of Recent Research**, v. 11, n. 1, p. 37122-37127, 2020.

MAGALHÃES, A.G. Caracterização de genótipos de alface (*Lactuca sativa* L.) em cultivo hidropônico sob diferentes valores de condutividade elétrica da solução

nutritiva. Orientador: Menezes Dimas, **Dissertação mestrado** (Mestrado em melhoramento genético), Recife, UFRPE. p. 95, 2006

MARTINS, WILLIAN. Análise Teórica e Experimental do Comportamento de um Trocador de Calor Geotérmico. Orientador: Mario Macagnan, **Dissertação mestrado** (Mestrado em engenharia mecânica), Unisinos, São Leopoldo, p.118, 2015.

MATTOS, K.; ANGELOCCI, R.; FURLANI, P. R.; NOGUEIRA, M. Temperatura do ar no interior do canal de cultivo e crescimento da alface em função do material de cobertura da mesa de cultivo hidropônico - NFT. **Bragantina**, v. 60, n. 3, p. 253–260, 2001.

MENEGAES, J. F.; FILIPETTO, J. E.; RODRIGUES, A. M. Produção sustentável de alimentos em cultivo hidropônico. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 3, p. 102–108, 2015.

MITTAL, A.; KATARIA, T.; DAS, K.; CHATTERJEE, S. G. Evaporative Cooling of Water in a Small Vessel Under Varying Ambient Humidity. **International Journal of Green Energy**, v. 3, n. 4, p. 347–368, 2006.

MOLINA-AIZ, F.; VALERA, L.; PEÑA, A.; GIL, A. Optimisation Of Almería-Type Greenhouse Ventilation Performance With Computational Fluid Dynamics. **Acta Horti**, v. 691, p. 433-440, 2005.

MONTERO, J.; ANTON, A.; BIEL, C.; FRANQUET, A. Cooling of greenhouse with compressed air fogging nozzles. **Acta Horticulturae**, v. 281, p. 199–209, 1990.

MORITANI, S; HIROTADA, N.; ATSUSHI, I. Heating and cooling methods for the subirrigation of strawberry plants using air and geothermal heat pumps. **Environment Development and Sustainability** , v. 26, p. 3, p. 1-19, February, 2023.

NETO, EGYDIO. Hidroponia. **Cadernos do Semiárido: riquezas & oportunidades**, Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco, v. 6, n. 6 , EDUFRPE, Recife, 2017.

NETO, EGYDIO; BARRETO, LEVY. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, Recife, v. 8 e 9, p.107-137, 2011/2012.

NISAR, M.; MAHMOOD, R.; TAYYAB, S.; ANEES, M.; NADEEM, F.; SONG ZHAO. Comparative efficacy of non-electric cooling techniques to reduce nutrient solution temperature for the sustainable cultivation of summer vegetables in open-air hydroponics. **Frontiers of plant science**, v.15, p.1340641, 2024.

OLIVEIRA, F.; COSTA, M.; OLIVEIRA M.; OLIVEIRA, M; SILVA R.T. Production and quality of pak choi grown in different hydroponic systems and electrical conductivities. **Revista Caatinga**, v. 37, p. 12436, 2024.

OLIVEIRA, J.R.; PAULO, M.W.; CORRÊA, R.M.; REIS, E.S.; CARVALHO, M.A.; REIS, M.M. Cultivos agrícolas utilizando telas coloridas e termo-refletoras. In: **I Jornada Científica e VI FIPA** do CEFET Bambuí, Bambuí, 2009.

ONGUN, B. K.; MASANORI, S.; BJARNE, OLESEN. Theoretical analysis of the performance of different cooling strategies with the concept of cool exergy. **Building and Environment**, v. 100, p. 102-113, 2016.

ORTEGA-CASANOVA. J. A primitive method for cooling water: does the shape matter?. **Case Studies in Thermal Engineering**, Elsevier, v. 26, p. 101022, 2021.

OZGENER, ONDER ; ARIF, HEPBASLI. Experimental performance of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. **Energy and Buildings** , v. 37, n. 1, p.101-110, January, 2005.

PADMASHREE. To Study the Correlation between the Traditional Techniques and Aeroponic System for Conservation of Water and Land. **IJEDR-International Journal of Engineering Development and Research**. v. 6, n. 3, p. 205-212, 2018.

PENEYRA, MARIBEL; PENEYRA, JOSUE. The effect on the growth and yield of green leaf Romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a vertical aeroponic system. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 26, n. 1, p. 162-172, 2024.

RAMADAN, FAWZY. Handbook of Coriander (*Coriandrum sativum*): Chemistry, Functionality, and Applications. **CRC Press**. p. 3, 2023.

RANDIMAL, MLDD. Effects of Temperature Control in Tropical Protected House on the Growth and Development of Lettuce in NFT Hydroponics. **International Symposium on Agriculture and Environment**, 2020.

RAO, R.; SILVA, B.; MOREIRA, A. Características térmicas do solo em Salvador, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 554–559, 2005.

REIS, AILTON ; LOPES, CARLOS. Doenças do coentro no Brasil. **Circular técnica Embrapa** 157, Brasília, DF, dezembro de 2016.

RODRIGUES, L. R. F. Técnicas de cultivo hidropônico e de controle ambiental no manejo de pragas, doenças e nutrição vegetal em ambiente protegido, **Jaboticabal: Funep**, 762p., 2002.

SAHU, S. ; SATISH, P. ; ABHISHEK, B. An Experimental Study of Sustainable Cooling using Peltier Effect. **International Journal Of Engineering Research & Technology (Ijert)** , v. 8, n. 9, p. 579-585, 2019.

SANCHES, E.; SANCHES, S.; JORDAN, R.; OMIDO, A.; MOTOMIYA, A.; BARBOZA, C. ; SANTOS, C.; ANTUNES, B. M. Heat transfer in Oxisol in heat storage process . **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 7, p. 512–520, 2023.

SANTOS J.V.B. ;SOUZA, E.M. Produção de coentro em sistemas hidropônico e aquapônico, **Revista Semiárido de Visu**, Petrolina, v. 8, n. 2, p. 367,378, 2020.

SAQIB, M.; MUHAMMAD, A.; RIAZ, A.; IQRA, Z.; SHAKEEL, A.; SAJJAD, H. Horticultural Crops as Affected by Climate Change. Building Climate Resilience in Agriculture. **Springer**, p. 95-109, 2022.

SETHI, V.P. Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. **Solar Energy**, v. 96, p. 56-82, October 2013.

SHARMA, G.; SHARMA, A.; SINHA, N.; OM, PRAKASH ;SINGH, A. Assessment of long-term climate variability and its impact on the decadal growth of horticultural crops in central India. **Ecology Process**, v. 11, p. 61 , 2022.

SHARMA; SHASHI KANT; AKHILESH H. A Concept of Hydroponic System in Horticultural Crops. **Asian Journal of Biology**, v. 20, n. 3, p. 1-6, 2024.

- SHIGEOKI, M.; KAZUYA, S.; KENJI, I. Development of low-cost evaluation method for coefficient of performance of heat pump for heating greenhouses. *Environment, Development and Sustainability*, v.22, n.7, p. 6877–6890, 2020.
- SHKLYAR, ALEXANDER; AVRAHAM ARBEL. Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 92, n. 12, p. 1039-1059, October 2004.
- SINGH, A.; AMIT, K; SUNITA, Y.; INDRAKANT, K. Reactive oxygen species-mediated signaling during abiotic stress. *Plant Gene*, v. 18, p. 100173, 2019.
- SILVA, M. G.; SOARES T. M; OLIVEIRA I., FREITAS T. Produção de coentro em hidroponia NFT com o uso de águas salobras para reposição do consumo evapotranspirado. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 9, n. 4, p. 246 - 258, 2015.
- SILVA, N.; ALVES, B.; SILVA, E. M.; SOUSA, G. M. Ocorrência de Ondas de Calor com Dados de Reanálises em áreas do Nordeste, Amazônia e Centro-Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira De Meteorologia*, v.37, n.4, p. 441–451, 2022.
- SILVA, M.G., SOARES, T.M., GHEYI, H.R., OLIVEIRA, M.; SANTOS, C. Hydroponic Cultivation Of Coriander Using Fresh And Brackish Waters With Different Temperatures Of The Nutrient Solution. *Engenharia agrícola*, Jaboticabal, v.40, n.6, p.674-683, nov./dec, 2020.
- SILVA, M. G.; SILVA, P. C.; COVA, A. M. W. ; GHEYI, H. R. ; SOARES, T. M. Experiências com o uso de águas salobras em hidroponia no Nordeste brasileiro. In **Cerqueira, P. R. S.** , 2022.
- SLACK, D.C.; FOX, F.A.; MARTIN, E.C.; CLARK, L.J. Growing-degree-day based crop coefficients for irrigation management. In: **Congresso nacional associacion mexicana de ingenieria agricola**, 4, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México, p. 7-13, 1994.
- SLIWA, TOMASZ; VYTYAZ T.; OLEG S.. Study on the efficiency of deep borehole heat exchangers. **SOCAR Proceedings**,p. 29-42, 2016.

SOARES, H. R.; SANTOS, J. A.; SILVA, E. F. F.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F. Water and physiological relationships of lettuce cultivated in hydroponics with brackish waters. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 2, p. 216-222, 2019.

SOUSA, R.D.; BRAGANÇA, L.; DA SILVA, M.V.; OLIVEIRA, R.S. Challenges and Solutions for Sustainable Food Systems: The Potential of Home Hydroponics. **Sustainability**, v.16, p.817, 2024.

SOUSSI, M.; CHAIBI, M.T.; BUCHHOLZ, M.; SAGHROUNI, Z. Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. **Agronomy**, v.12, p.626, 2022.

SOUZA, V.V.S; SOARES T. M.; SILVA M. G. Resfriamento de solução nutritiva hidropônica com permutador geotérmico horizontal. 2024. **(NÃO PUBLICADO)**

SULIT, M.F.; AGULTO, I.C.; CINENSE, M.M. Rootzone cooling, water productivity and economics of intensified vertical grown red butterhead lettuce (*Lactuca sativa* Linn). **Food Research** 7, v.2, p. 111 - 119 , 2023.

TEIXEIRA, L.D.D.; ZOTTARELLI, C.L.A.P.; KIMATI, H. Efeito da temperatura no crescimento micelial e patogenicidade de *Pythium* spp. que ocorrem em alface hidropônica. **Summa Phytopathologica**, v. 32, n.3, p.221-226, 2006.

THAKULLA, D.; DUNN, B.; HU, B.; GOAD, C.; MANESS, N. Nutrient Solution Temperature Affects Growth and °Brix Parameters of Seventeen Lettuce Cultivars Grown in an NFT Hydroponic System. **Horticulturae**, v.7, p. 321, 2021.

THOLIB, H.; AYU M.; HILYAH A. Automatic Water Temperature Control System In Hydroponic Plants With Peltier Tec1 12706 And Temperature Sensors DS18B20. **MULTIDISCIPLINE - International Conference 2021** , p. 438- 445, December 18th, 2021.

TOROXEL JL, SILVA SM. A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture. **Energies**, v.17, n.5, p. 1006, 2024.

TRİYONO, SUGENG; AHMAD, T.; AGUS, H.; ANDINI, P.; MARELI, T.; OKTAFRI, R. Cooling the high temperature nutrition solution to improve growth, yield and water productivity of hydroponic red lettuce (*Lactuca sativa* L Var Red rapids) in a tropical location. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v.23, n.1, p. 221–229, 2024.

TYABUT, ELIZAVETA; IVAN, RYZHENKOV. Analysis of ground thermal potential reduction and thermal interaction between boreholes during operation of ground source heat pump in Moscow city environments. **E3S Web of Conferences**. p. 289, 2021.

VARMORA, PARTH. Design and Development of Solar Powered Smart Hydroponic Greenhouse. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)** , v. 8, n.5, p. 95-98, 2018.

VELAZQUEZ, R.S.; GARCIA, G., VENTURA, E.; BARCEINAS, SANCHEZ; SOSA, S. A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations. **Agriculture**, v.12, n.5, p. 646, 2022.

VILLELA, J.; ARAÚJO, J. A. C. ; FACTOR, T. L. Análise do resfriamento da solução nutritiva para cultivo hidropônico do morangueiro. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 338-346, 2004.

WANG, C. F.; HAN, W.; XIN, J. S. Study on the Influence of Borehole Heat Capacity on Deep Coaxial Borehole Heat Exchanger. **Sustainability**, v.14. p. 2043, 2022.

ZHU, F.; ZHOU, Y.; ZHU, S. Experimental study on heat transfer in soil during heat storage and release processes. **Heat Mass Transfer**, v.57, p.1485–1497, 2021.

Capítulo 1

RESFRIAMENTO DE SOLUÇÃO NUTRITIVA HIDROPÔNICA USANDO ÁGUA COMO FLUIDO TÉRMICO

RESUMO

A temperatura da solução nutritiva é importante para a produtividade do cultivo hidropônico e os métodos de resfriamento atuais pouco utilizam energia passiva. O trabalho propõe que o próprio tubo de recalque de um sistema hidropônico NFT (nutrient film technique) seja utilizado como trocador de calor quando mergulhado em canal submerso de água resfriada em período noturno no interior do ambiente da casa de vegetação. Foram medidas as temperaturas do fluido no interior das canaletas, do ambiente e do canal com água de resfriamento. As medições foram feitas ininterruptamente, dia e noite, durante cinco dias, com aquisições a cada 15 segundos, nos meses de janeiro e fevereiro de 2024, em Cruz das Almas/BA. A frequência de irrigação foi de 5 min, com duração de 5 min. A curva de frequência acumulada da temperatura da solução nutritiva mostra que o sistema não resfriado foi mais quente que o resfriado em 40% das medições com máxima de 46 °C, enquanto que a temperatura máxima resfriada foi de 39 °C. Caso o sistema seja utilizado para aquecimento noturno, o aumento das temperaturas foi de 2°C em pelo menos 92% do período noturno. Os resultados indicam que o sistema de resfriamento tem 45% de rendimento máximo, reduzindo as temperaturas da solução nutritiva em até 5,1 °C, durante o dia, enquanto que no período noturno promove aumento máximo de 2,5 °C, caso a água não seja retirada do canal de resfriamento. Os resultados evidenciam que a fonte fria noturna reduz a temperatura da água de resfriamento, sendo eficaz na redução das temperaturas da solução nutritiva.

Palavras-chave: cultivo sem solo, estresse térmico, geotermia

ABSTRACT

The temperature of the nutrient solution is important for the productivity of hydroponic cultivation and current cooling methods use little passive energy. This work proposes that the discharge tube of a NFT (nutrient film technique) hydroponic system be used as a heat exchanger when immersed in a submerged channel of cooled water at night inside the greenhouse environment. The temperatures of the fluid inside the channels, the environment and the channel with cooling water were measured. Measurements were made uninterruptedly, day and night, for five days, with acquisitions every 15 seconds, in January and February 2024, in Cruz das Almas/BA. The irrigation frequency was 5 min, with a duration of 5 min. The cumulative frequency curve of the nutrient solution temperature shows that the uncooled system was hotter than the cooled one in 40% of the measurements, with a maximum of 46 °C, while the maximum cooled temperature was 39 °C. If the system is used for nighttime heating, the temperature increase was 2°C in at least 92% of the night period. The results indicate that the cooling system has 45% maximum efficiency, reducing the temperature of the nutrient solution by up to 5.1°C during the day, while at night it promotes a maximum increase of 2.5°C, if the water is not removed from the cooling channel. The results show that the nighttime cold source reduces the temperature of the cooling water, being effective in reducing the temperature of the nutrient solution.

Palavras-chave: soilless cultivation, heat stress, geothermal

1. INTRODUÇÃO

Após a revolução verde surgem novos desafios produtivos, exigindo que a sustentabilidade seja uma variável agrícola (SILVA et al., 2022; BARRECA, 2024). A perspectiva dessa aplicação é fortemente influenciada por mudanças, como a climática, nos diversos tipos de cultivo, inclusive o hidropônico (BITTENCOURT et al., 2024). Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), os aumentos gradativos da temperatura do planeta podem causar redução das safras proporcionais a cada grau de aquecimento (IPCC, 2021).

Esse aumento da temperatura influencia a produtividade dos mais variados cultivos hidropônicos, como o pepino e a couve (AI-REWAHY et al., 2019)

O princípio de sustentabilidade energética e o uso de energia passiva em hidroponia tem sido tema de algumas pesquisas atuais em áreas correlatas das engenharias para tecnologias de pequeno e médio porte (SWAMINATHAN et al., 2022; RAJASEGER et al., 2023; VELAZQUEZ et al., 2022).

A avaliação dos ciclos energéticos e exergéticos¹⁸, em busca de sustentabilidade tornar-se-á tema recorrente inclusive na agricultura, a exemplo das tecnologias de controle de temperatura das casas de vegetação (HERCHER et al., 2020; DING, 2024).

As tecnologias mais utilizadas no controle da temperatura da solução nutritiva NFT são as que usam energia elétrica, através do trabalho de compressão-expansão, como no caso de pesquisas no cultivo de espinafre a 22 °C e de alface entre 22°C e 32°C (HOOKS et al., 2022; TRIYONO et al., 2024).

As estratégias de energia passiva minimizam o dispêndio de equipamentos elétricos ou mecânicos, otimizando o consumo de energia (BALALI et al., 2023; WANG et al., 2023).

Existem trabalhos em diversas frentes, como o de OLIVEIRA et al. (2009), que relatam sobre o uso de tela termo-refletora gera precocidade na formação de mudas citrícolas, CAPLOW (2007) que apresenta medidas de controle térmico em casas de vegetação através de energia passiva, KITTAS et al. (2003), sobre o sistema de resfriamento evaporativo que pode reduzir a temperatura interna de uma casa de vegetação em 3 °C, e GHANI et al. (2019) que usa princípio de redução da radiação no Qatar, através de telhados verdes (“Green roofs”).

¹⁸ Exergia é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente (atinge o estado morto).

A utilização da energia passiva térmica na agricultura é bastante empregada na redução das temperaturas das casas de vegetação, como o caso das coberturas de solo para resfriamento de superfície (WANG et al., 2024) ou a utilização de telas de sombreamento para aquecimento ou resfriamento (XU et al., 2022 ; SINGH et al., 2023).

BELLOUFI et al. (2016) descrevem o uso de tubos no solo como trocador de calor ar-solo, modelo que pode ser adaptado para controle da temperatura em casas de vegetação.

PASCUAL et. al. (2019), ao cultivarem morango em casa de vegetação sob resfriamento passivo com permutador de calor geotérmico (GHE-Ground heat exchanger), mantiveram temperaturas de resfriamento do ar em 26,75 °C, apenas 2,61°C acima de um sistema de ar condicionado em cultivo aeropônico.

A variação das temperaturas entre dia e noite também pode ser utilizada em aplicações agrônômicas das mais diversas, inclusive no resfriamento de casas de vegetação, com unidades de armazenamento térmico (SOUSSI et al., 2022; GORJIAN et al., 2021).

A literatura sobre a utilização de energias passivas especificamente para o resfriamento de soluções nutritivas em hidroponia é escassa.

A proposição do trabalho é a avaliação das temperaturas da solução nutritiva hidropônica com ou sem sistema de resfriamento, utilizando como fonte fria/quente, canal de água de resfriamento disposta em canaleta no solo, durante o dia e a noite.

O estudo das variações das temperaturas que se apresentam no circuito hidropônico pode indicar novas formas de aproveitamento de alguma fonte fria existente. As diferenças nas temperaturas na recirculação influenciam a eficiência do permutador na aplicação, apresentando um caminho alternativo de inserção dos estudos de sustentabilidade térmica no cultivo hidropônico e controle das temperaturas da solução nutritiva.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram desenvolvidos em casa de vegetação no Núcleo de Engenharia de Água e Solo/PPGEA, na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/UFRB, no município de Cruz das Almas, Bahia (12° 40' 19" de latitude Sul, 39° 06' 23" e altitude média de 220 m), no período de 25/02/2024 a 16/03/2024.

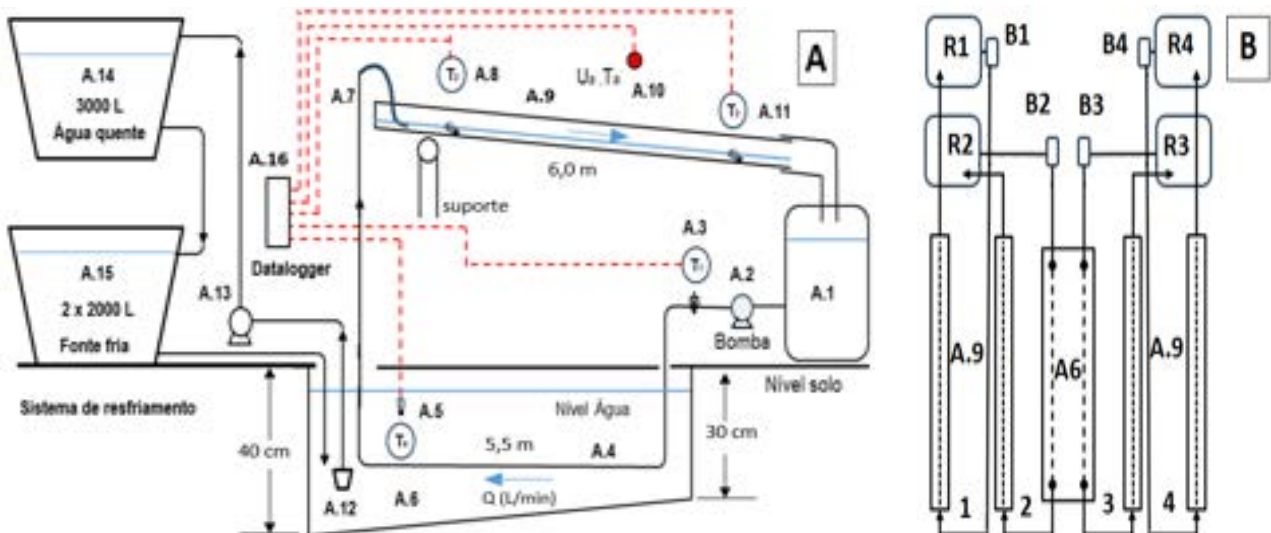
As dimensões da casa de vegetação são de 7,0 m de largura por 24,0 m de comprimento. O teto é coberto por filme plástico, anti-UV, de 150 micrometros, sem manta

refletora interna, orientação Leste-Oeste. A estrutura da casa de vegetação foi de aço galvanizado, com paredes laterais e frontais confeccionadas com tela escura com 50% de sombreamento e pé direito de 4 metros. O solo da casa de vegetação é composto por Latossolo Amarelo Distrocoeso (SANTOS et al., 2018), sem revestimento.

A estrutura experimental foi composta por 4 parcelas, formadas por 4 canaletas de cultivo NFT comerciais próprias para a finalidade de cultivo profissional, duas com sistema de resfriamento.

Na Figura 1 podemos observar a seção transversal da estrutura que foi utilizada para as parcelas com resfriamento (A) e superior (B) das parcelas utilizadas no experimento. As parcelas sem resfriamento não apresentaram os tubos passando pelo canal de resfriamento.

Figura 1. Croqui do sistema. a) sistema de cultivo e resfriamento e b) vista superior do sistema mostrando as 4 canaletas e o canal de resfriamento no centro (A.6)



Os componentes do sistema representados na Figura 1 são: Reservatório de solução nutritiva de 50 L (A.1), bomba centrífuga de 34W e 127V para recirculação (A.2), sensores de temperatura digital DS18B20 Dallas semiconductor com encapsulamento TO-92 com conexões revestidas por massa epoxi, range de -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$, com tolerância de $0,5^{\circ}\text{C}$ (A.3; A.5; A.8 e A.11), temperatura de entrada no permutador (T_1); temperatura da água no canal de resfriamento (T_a); Temperatura da superfície interna inferior da canaleta (T_2); Temperatura da superfície interna do sinal da canaleta (T_3); canaleta hidropônica comercial com 24 furos, 6,0 m de comprimento e inclinação de 7% (A.9); tubo permutador de $\frac{1}{2}$ " (A.4); Válvula de pé e crivo (A.12); bomba de esvaziamento dos canais de resfriamento $\frac{1}{2}$ CV 127V, única (A.13); reservatório de 3000

L (A.14), reservatórios de 50 L na Figura B.R1, B.R2, B.R3 e B.R4 ; e reservatório de água fria de 2000 L (A.15); Instrumentação e datalogger (A.16).

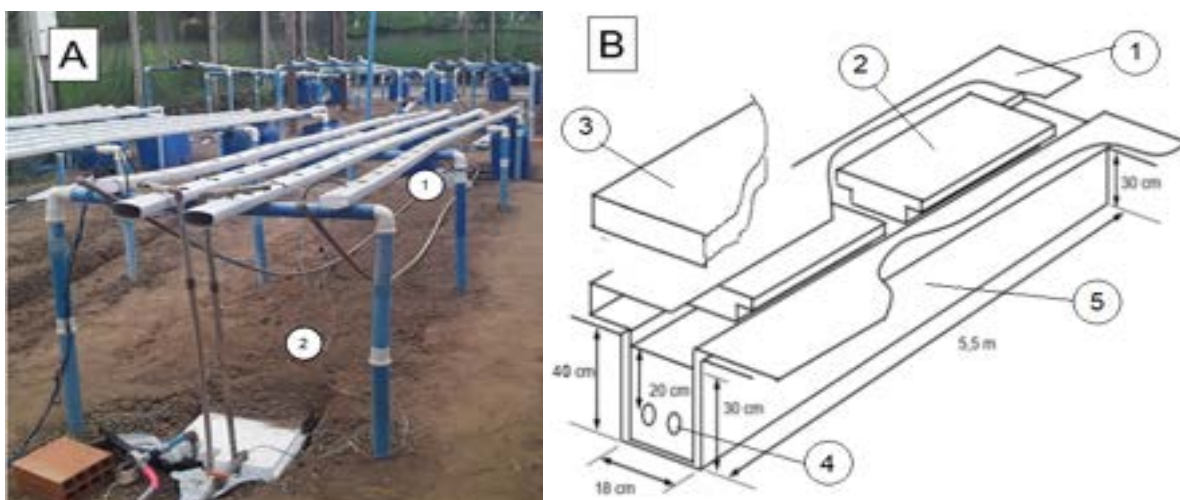
Na Figura 1.B é mostrada vista superior da bancada de experimentos com as 4 bombas de recirculação (B1 ,B2 ,B3 e B4, referentes ao item A.2), as canaletas de cultivo (A.9), o canal de resfriamento (A.6), microtubo de irrigação (A.7), mostrando o caminho dos fluxos das 4 parcelas, com parcelas 2 e 3 sendo resfriadas/aquecidas dentro do canal de água (linha pontilhada) e as parcelas 1 e 4 não resfriadas.

Para determinação da fonte fria noturna foi necessário o acompanhamento da temperatura do ar (t_{ar}) e umidade relativa (U_a), medidas por termo-higrômetro DHT22 Figura A.10;

Os dados foram registrados e gravados através de um PLC Arduino Mega 2560 R3, associado a um módulo acoplado a módulo de cartão SD (armazenamento de dados) e módulo RTC DS3231 (relógio de sistema em tempo real).

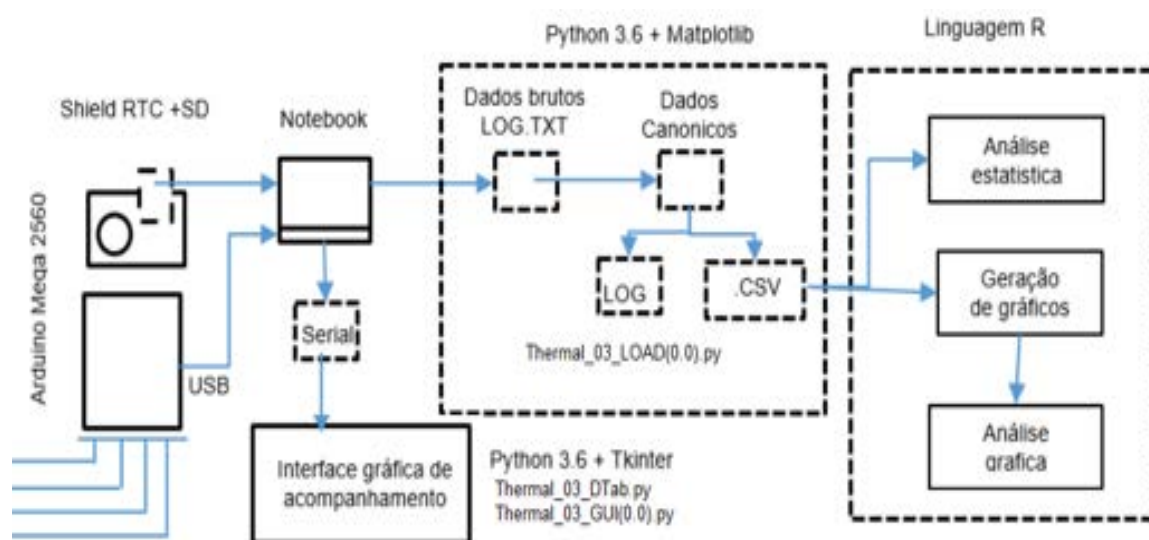
Os sensores de temperatura foram distribuídos segundo a Figura 02.a. A Figura 2.(a.1) mostra as 4 parcelas, o canal de água de resfriamento recoberto com camada de solo, tubulações de saída visíveis (A.2). A Figura 2.b) mostra croqui interno do canal de resfriamento, composto por lona plástica 0,5 mm (B.1); tampas de poliuretano (B.2); cobertura de solo (B.3), tubos das parcelas 2 e 3 (B.4) e água de resfriamento (B.5). O canal de resfriamento foi coberto com tampas de poliestireno de 5 cm de espessura com cobertura de 5 cm de solo retirado do próprio canal Figura 2.b).

Figura 2. a) Foto do canal de água utilizado para resfriamento da solução nutritiva e b) croqui do canal de resfriamento, mostrando dimensões e a lona de PVC desdobrada sobre placas tampas feitas de Polipropileno.



Para acompanhamento da atuação dos sensores em campo, com vistas a identificar eventuais falhas na medição, foi construída interface gráfica específica para pesquisa utilizando linguagem python 3.0 e módulo pyserial com recepção de dados através da porta USB. A interface nomeada de HydroThermal.01.9.02-Painel (próprio autor), recebe sinal do microcontrolador Arduíno Mega 1620, reconhece o protocolo da linha impressa na porta USB e separa cada instrumento segundo uma tabela de lista de instrumentos. O diagrama de blocos do processo da alocação dos dados em tela a cada 15 segundos se encontra na Figura 3.

Figura 3. Diagrama de blocos da interface gráfica e aquisição de dados utilizada no trabalho (HydroThermal.01.9.02-Painel)



Ensaio anteriores no mesmo local nortearam o processo decisório de escolha do sistema de resfriamento com canal de água, a citar: utilização de tubo enterrado diretamente no solo a profundidade de 20 cm, 30 cm , 40 cm e 60 cm resultou em rebaixamento de temperatura da ordem de aproximadamente 2,1 °C durante o período mais quente do dia (13:00 h), considerado insuficiente para aplicação de cultivo futuro; a utilização de cobertura plástica opaca fixada a 20 cm de altura com relação ao solo, restrita a área inferior aos canais, também foi utilizada com o objetivo de reduzir radiação incidente sobre a superfície, obtendo redução de temperatura em 0,5 °C no horário de pico térmico; procedeu-se com a manutenção de solo permanentemente saturado com água, aliado a cobertura. O ensaio ocasionou o consumo cerca de 50 L de água diários em latossolo amarelo distrocoeso, com redução máxima de temperaturas de 3,2 °C às 13:00 h¹⁹ ;

¹⁹ Ver experimentos preliminares e medições das temperaturas do solo do experimento preliminar na Figura 3. do APÊNDICE B3

Por conseguinte optou-se pelo experimento utilizando o sistema de resfriamento com canal de água de 5,5 m, 30 cm de profundidade e 16 cm de largura (150 L efetivo). O volume de água necessário ao resfriamento foi calculado considerando o mesmo volume circulado no ciclo de irrigação no período de 12 horas, com vazão do sistema de $Q=2,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e $C_p=4,184 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$. Os resultados das vazões utilizadas foram os mesmos para os quatro circuitos, cerca de $2,45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, mantidas constantes nos cinco dias através de restrição e aferidas através de 3 medições nos dias 1º, 3º e 5º, com proveta plástica de 2,0 L graduada $\pm 10 \text{ mL}$ e cronômetro digital.

Para avaliação da disponibilidade de fonte fria, foram medidas as variações das temperaturas no canal de resfriamento, caso o volume de água no interior não fosse movimentado no decorrer do dia.

Considerando a termodinâmica dos sistemas com trocadores de calor, para que haja redução de temperatura de um permutador em serviço, necessita-se de uma fonte fria (FF)²⁰ com valores menores que a temperatura requerida (INCROPERA, 2003; ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

A medição das temperaturas da água depositada em reservatórios de polietileno de 2000 L dentro da casa de vegetação, durante o período noturno, evidenciaram valores semelhantes a temperatura do ar (Figura 3), na ordem de $27 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_{ar}), decidindo-se assim, pela a utilização da água armazenada e resfriada no período noturno no interior do canal de resfriamento, servindo como fonte fria para a redução das temperaturas da solução nutritiva.

O sistema de resfriamento foi então composto de 08 canais escavados no solo (um canal a cada 4 parcelas), centralizados abaixo das canaletas, e cheios de água através das quais foram submersos 2 dos 4 tubos de reciclo advindos dos reservatórios de solução nutritiva, Figura 1 b). Os canais foram impermeabilizados com lona plástica de 0,5 mm de espessura, com face preta e branca; A cobertura dos canais foi feita com poliestireno expandido com espessura de 5 cm x 40 cm, com dobradura da lona com a face branca voltada para cima com o objetivo de reduzir o aquecimento radiativo. As canaletas foram cheias de água até nível marcado de 10 cm abaixo do nível do solo.

A água de resfriamento foi bombeada diariamente para resfriamento em dois reservatórios de 2000 litros (caixas de água fria, resfriadas em período noturno, A.15 da Figura 1) internos a casa de vegetação, com tampa e acondicionados sob tela termorrefletora malha aberta 50%;

²⁰ Fonte fria: Conceito utilizado em engenharia térmica que representa a fonte “sumidouro” de calor de um sistema térmico, ou seja, a de temperatura mais baixa.

Fora da casa de vegetação foi montada uma caixa auxiliar de polietileno de 3000 litros (A.14 da Figura 1), chamada de caixa de água quente, na qual a água quente posterior ao resfriamento foi acondicionada antes de ser transferida para caixa de água fria, para resfriamento em noite anterior a utilização no canal de resfriamento.

O sistema de resfriamento necessitou de três passos para o deslocamento de fonte fria da superfície para os canais submersos:

a) Esvaziamento dos canais às 16:00h: Conexão da mangueira na bomba e no reservatório intermediário, verificação da escorva, mantendo uma coluna no reservatório intermediário para garantir a escorva. O esvaziamento foi feito até o volume residual de 10 cm na seção mais baixa e que tornam imersíveis os tubos do permutador;

b) Enchimento das caixas de água fria para resfriamento noturno às 17:00 h. Procedimento feito imediatamente após etapa a);

c) Enchimento dos canais do solo com água fria às 10:30 h: Bloqueou-se a caixa externa e abriu-se a válvula do circuito de distribuição até que os tubos estejam com 20 cm de submersão. No trabalho foi considerado como temperatura requerida da solução nutritiva ($T_{ref} \leq 31^{\circ}\text{C}$).

A análise energética desempenha um papel importante na avaliação do desempenho térmico geral dos sistemas GSHP²¹; NAILI et al. (2015) e GAOYANG et al. (2022) apresentaram metodologia de análise energética para GHEs horizontais. A taxa de transferência de calor é :

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}C_p(T_a - T_1) \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (3)$$

Onde \dot{Q} , é a taxa de transferência de calor (kW); \dot{m} é a taxa de fluxo de massa de água circulante ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), C_p é o calor específico da água a pressão constante ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), \dot{Q}_{max} é a taxa máxima de transferência de calor; com T_a é a temperatura da água de resfriamento; T_1 é a temperatura de entrada no permutador ($^{\circ}\text{C}$) e T_2 é a temperatura da superfície inferior interna inicial da canaleta ($^{\circ}\text{C}$) igual a temperatura da solução nutritiva quando em circulação.

²¹ GSHP (Ground Source Heat Pump)

Ao combinar as duas equações (1) e (2) em (3); a eficiência térmica η_{th} (adimensional), pode ser expressa como equação (4):

$$\eta_{th} = \frac{T_2 - T_1}{T_a - T_1} \quad (4)$$

Para a avaliação estatística das temperaturas foram utilizadas curvas de densidade probabilística cumulativa com os dados integrais das temperatura disponíveis, obtidas a partir dos de medição a cada 15 segundos, comparando assim a probabilidade da obtenção das temperaturas resultantes maiores e menores que a temperatura requerida pela cultura (T_{ref}).

Em trabalho anterior, SILVA et al. (2020) com cultivo hidropônico do coentro verdão, obteve produtividade da ordem de 40,02 g.maço⁻¹ na massa fresca de coentro, com temperatura de 32°C respectivamente, em 20 DAT, sem salinidade. Sendo assim foi escolhida temperatura de referência de $T_{ref} = 31^\circ\text{C}$ para o limite de estresse térmico.

A variação das temperaturas do canal de água com e sem manobra de esvaziamento influencia na disponibilidade de calor pela fonte fria, ocorrendo de acordo com as trocas térmicas das superfícies de controle, notadamente do solo, da solução nutritiva aquecida e do ar, ver Figura 6.a).

A variação da temperatura da fonte fria foi medida diretamente no interior do canal de resfriamento, determinando-se assim a manobra de menor gradiente térmico efetivo, com o objetivo de otimizar a fonte fria, não sendo necessária medição das contribuições de transferência de calor do solo ou do ar para o fluido de troca térmica.

As temperaturas no interior do canal de fonte fria (água resfriada na superfície em período noturno pode ter dois tipos de comportamento na variação da temperatura, que depende do tipo de manobra aplicada, reposição diária da água da fonte fria acompanhada ou não de esvaziamento da canaleta ou permanência da água no canal sem reposição com T_{ar} (temperatura do ar); T_a (Temperatura do canal de resfriamento) e T_1 (Temperatura inicial da canaleta). Devido ao comportamento produzido pela manobra, procedeu-se com esvaziamento do canal e reabastecimento diário, reduzindo a absorção de calor do solo durante o período noturno aliado ao resfriamento em superfície.

As variações das temperaturas da solução nutritiva são variáveis resposta que representam a eficiência do sistema de resfriamento, e que são modificadas quando passam pelo permutador em contato com a água de resfriamento.

A temperatura no ponto T_1 , Temperatura do reservatório na entrada no permutador, pode ser considerada como a temperatura efetiva da solução nutritiva quando aquecida, pois são as temperaturas de entrada no permutador, posteriores ao reservatório de reciclo e imediatamente posteriores a bomba de reciclo.

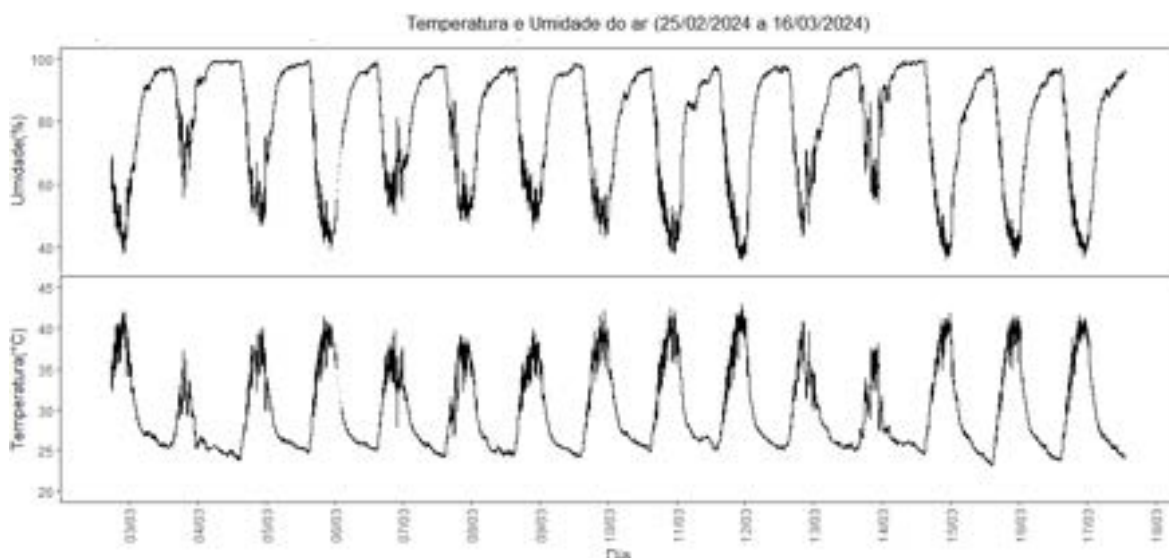
A medição das menores temperaturas dos sensores no interior das canaletas (T_2) indica o resfriamento efetivo da solução nutritiva que varia a cada ciclo, e apresenta valores entre a temperatura da superfície inferior interna da canaleta e a da solução nutritiva circulada no momento da irrigação. Por conseguinte $T_2 - T_1$, representa a variação de temperatura no permutador, $T_3 - T_2$ é a variação da temperatura da canaleta e da solução nutritiva no tempo.

A variação das temperaturas nas canaletas foi medida na superfície interna inferior da canaleta pode ser considerada representativa das temperaturas da zona de raiz (TZR), haja vista que a disposição das plantas no cultivo NFT nas canaletas, ficam entre os furos iniciais e finais das parcelas, assim foram medidas as temperaturas T_2 (Entrada na canaleta a 20 cm) e T_3 (Saída da canaleta a 20 cm), ambas na superfície inferior interna das canaletas. Os valores da temperatura T_2 são os da solução nutritiva antes de receber calor das canaletas hidropônicas e T_3 , foram as finais, após aquecimento dentro da canaleta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições de temperatura e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação utilizada na pesquisa estão mostradas na Figura 4..

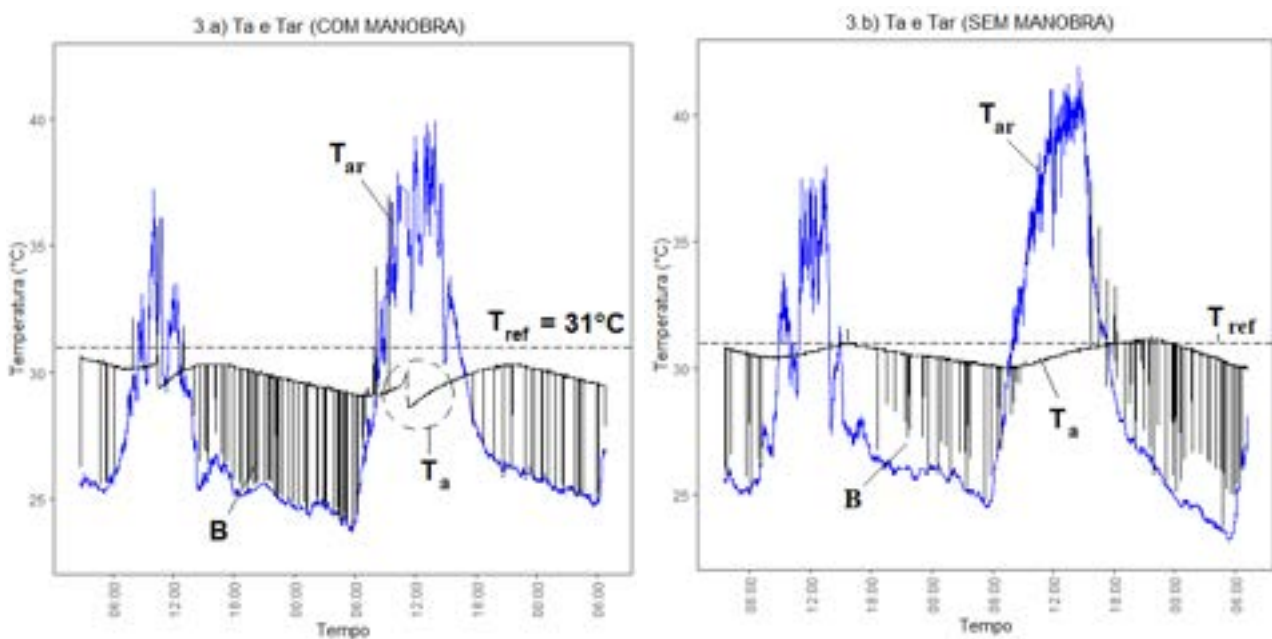
Figura 4. Variação da temperatura e umidade relativa do ar no período do experimento.



As temperaturas mínima, média e máxima do período foram de 23,3°C, 32,5 °C e 41,2°C, respectivamente.

Na Figura 5.a) são mostrados os resultados de aumento da temperatura na água de resfriamento entre os dias 12/03/2024 e 16/03/2024, resultando temperaturas acima de 30°C durante todo o dia, alcançando patamares de 32 °C em período noturno devido à transferência de calor do solo, a letra (A) mostra a redução de temperatura T_a , que foi obtida pela manobra, o trecho hachurado (B) mostra a diferença entre a temperatura da água de resfriamento (T_a) e do ar (T_{ar}). A linha pontilhada é $T_{ref} = 31^\circ\text{C}$.

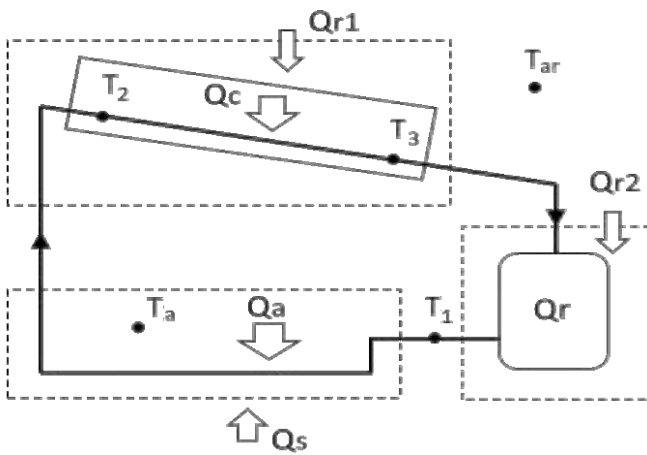
Figura 5. Temperatura do ar e do canal de resfriamento. a) Variação de temperatura na fonte fria considerando permanência da água no canal. b) manobra de substituição de água e posterior esvaziamento nos dias 06/03/2024 e 16/03/2024.



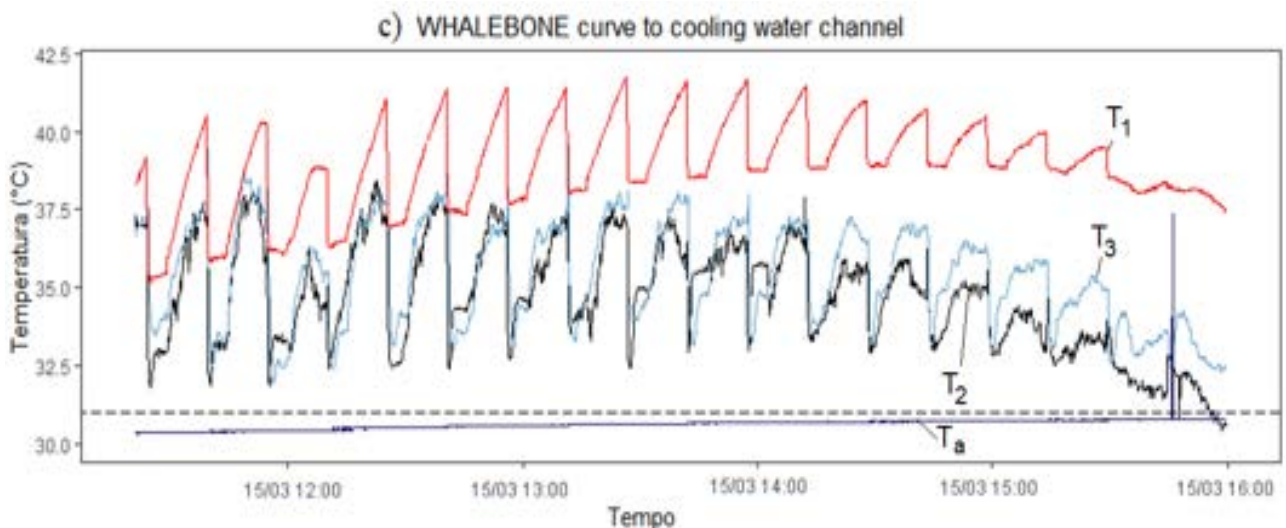
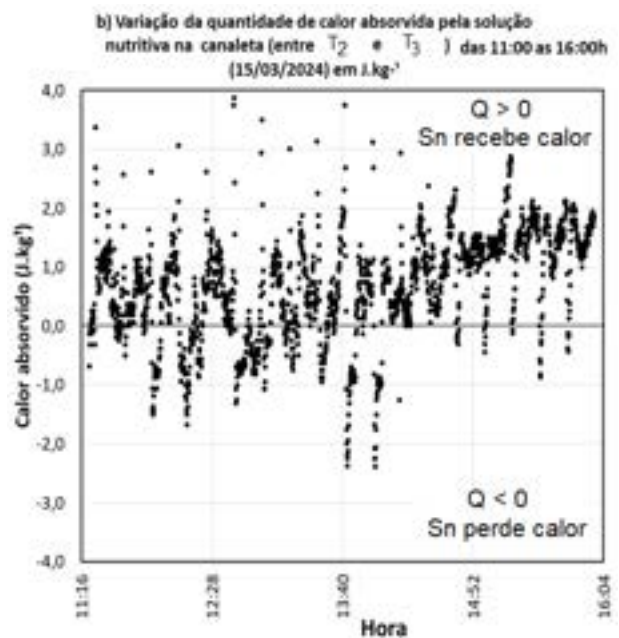
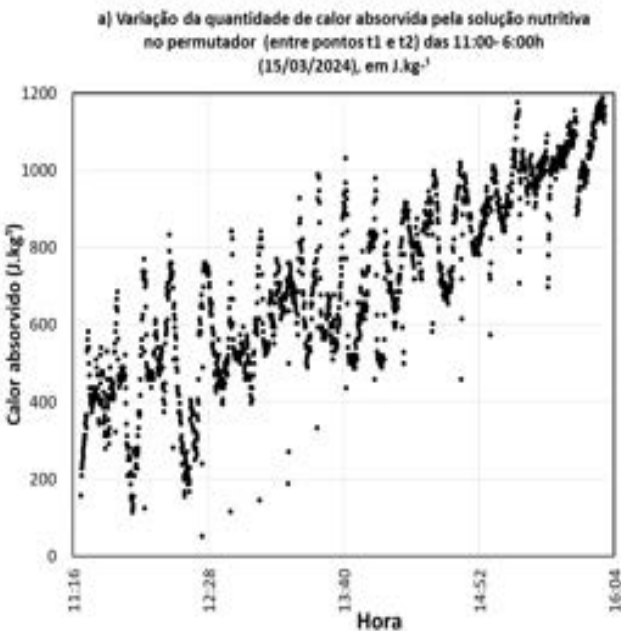
Para evitar o comportamento de temperaturas mais altas da Figura 5.b) procedeu-se com manobra de esvaziamento e transferência citada na metodologia, testada entre os dias 04/03/2024 e 05/03/2024, com temperaturas máximas de 30°C, Figura 5.a), evidenciando que a manobra de retirada da água de resfriamento e manutenção do canal vazio a partir das 16:00h minimiza a troca térmica entre o solo e a água de resfriamento, com reduções maiores do que 2°C na temperatura do canal de água (T_a).

O comportamento termodinâmico pode ser simplificado pelo balanço de calor da Figura 6 a), e a absorção de calor na solução nutritiva na Figura 6.b) e 6.c), com os valores das temperaturas em 6.d).

Figura 6.a) Croqui do balanço térmico do sistema de resfriamento; 6.b) variação de calor absorvida pela solução nutritiva, 6.c) variação de calor absorvido pela canaleta e 6.d) Curva WB com T_1 , T_2 , T_3 e T_a .



Onde:
 Q_s = Calor transferido pelo solo;
 Q_a = Calor transferido da água a SN;
 Q_c = Calor transferido pela região interna a canaleta para a SN.
 Q_{r1} = Calor transferido para canaleta pela radiação solar;
 Q_{r2} = Calor transferido para o reservatório de SN;
 t_1 = Temperatura de entrada no permutador;
 t_2 = Temperatura do início da canaleta;
 t_3 = Temperatura no fim da canaleta;
 t_{ar} = Temperatura do ar



Segundo a Figura 4, o período noturno, no interior da casa de vegetação, tem temperaturas médias abaixo das temperaturas durante o período de exposição, com médias de $T_{ar} \leq 27$ °C.

Meios líquidos como a água apresentam valores de capacidade térmica que podem servir como acopladores térmicos, quando se deseja transferir calor disponível entre o dia e a noite no interior da casa de vegetação, ou seja, a água do canal pode ser resfriada durante o período noturno, sendo utilizada como fonte fria para a solução nutritiva durante o período de picos térmicos diurnos ou servir como fonte quente durante a queda de temperatura noturna.

No trabalho, o valor de T_a esteve entre 28°C e 30°C entre as 6:00 e 12:00h. Parte do calor obtido no intervalo noturno pode ser utilizado, em hipótese, como amortizador da transferência de calor nos intervalos de recirculação hidropônica, fazendo com que o ambiente da RZT (Root thermal zone) não sofra variações tão pronunciadas das temperaturas entre ciclos de irrigação.

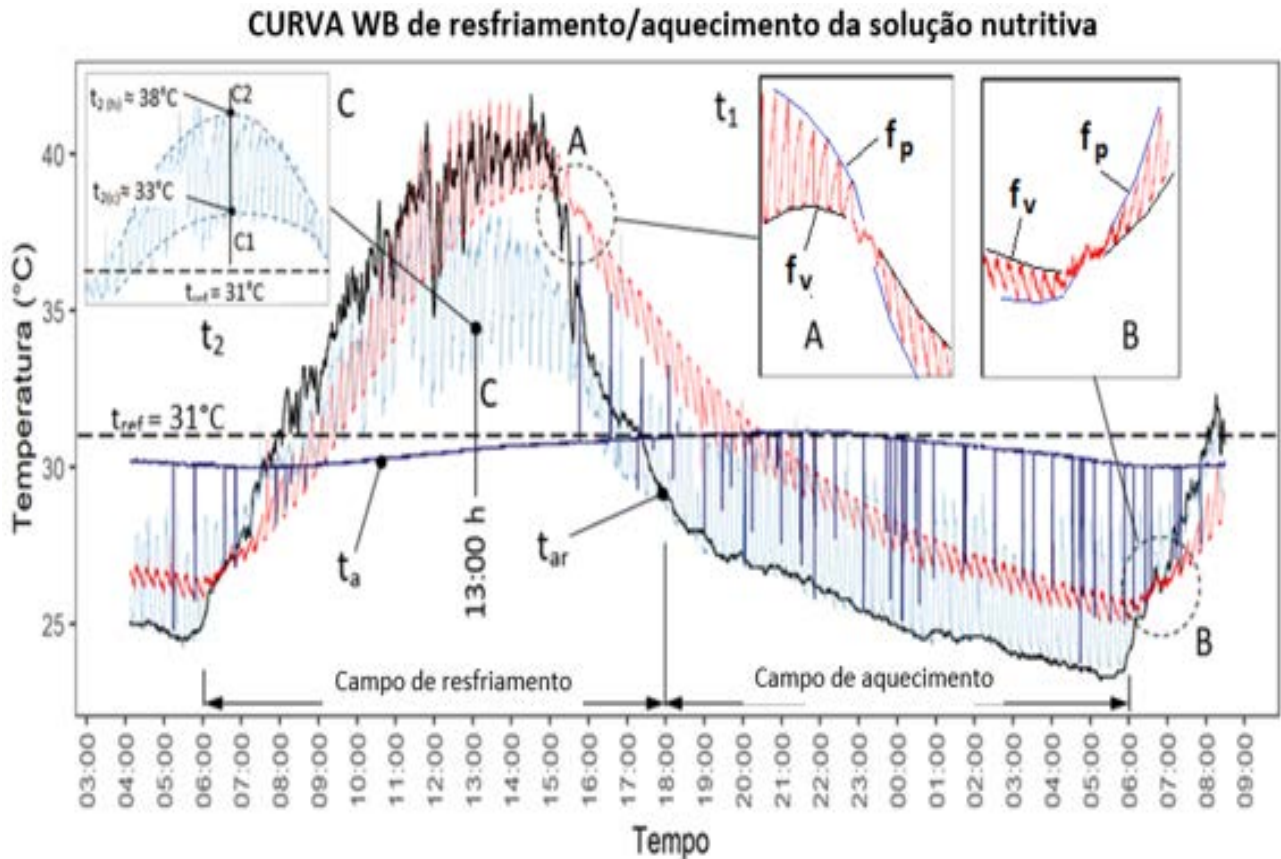
As variações da temperatura do canal (T_a), temperatura da solução nutritiva (T_1), temperatura do ar (T_{ar}), canaletas hidropônicas durante dia e noite (T_2), podem ser representadas em curva diária específica, chamada de WB (Whalebone curve) por SOUZA (2024), e mostra o comportamento da variação das temperaturas de T_a , T_{ar} , T_1 e T_2 da aplicação hidropônica.

A curva WB tem ciclo diário e é governado pelas características térmicas da fonte fria (T_a) do permutador utilizado, pela baixa vazão hidropônica, intermitência de recirculação e diferenças cíclicas na temperatura do ar, das canaletas e do solo.

As variações de temperatura em canal de água resfriada em reservatório no ambiente interno da casa de vegetação em período noturno, têm temperaturas menores que a superfície dos canais de cultivo no pico das temperaturas, entre as 9:00 h as 16:00 h, representa o campo de resfriamento da Figura 5.a), ponto B; Essa temperatura mais baixa possibilita a criação de um campo de resfriamento mostrado na Figura 7, bem como um campo de aquecimento no ciclo diário.

A análise da curva WB evidencia as regiões distintas de comportamento das temperaturas do ar, da fonte fria, da solução nutritiva antes do permutador e quando em contato com a canaleta hidropônica, de forma que as oportunidades de transferência sejam avaliadas. As curvas WB devem ser feitas para cada condição específica devido ao grande número de variáveis envolvidas.

Na Figura 7 é apresentada a curva WB referente ao dia 15/03/2024 do experimento. Figura 7. Curva Whalebone do experimento e referente ao dia 15/03/2024 do experimento sem manobra.



Primeiramente quanto às faixas de temperatura superiores a T_{ref} , que se encontram entre os pontos A e B da Figura 7, o governo térmico entre A-B se refere a possibilidade de resfriamento da solução nutritiva ($T_1 > T_a$) enquanto o trecho compreendido entre B-C, apresenta possibilidade de aquecimento da solução ($T_1 < T_a$).

O comportamento de inversão da aplicação do permutador em solo, entre resfriamento e aquecimento, se deve à variação das fontes quente e fria durante os ciclos diurno e noturno. Na curva da Figura 7, os campos de aplicação são apresentados através de intervalos, para o caso específico, de resfriamento das 6:00 h às 18:00 h, e de aquecimento entre as 18:00 e 6:00. A estimativa dos campos na curva dependem da temperatura de referência escolhida (T_{ref}), mostrada em linha horizontal pontilhada, da Figura 7. O encontro da linha de temperatura de referência nas curvas de temperatura da fonte fria e quente determinam o início e fim dos campos de aplicação.

Durante o ciclo diurno a variação das temperaturas T_2 (canaletas) são limitadas ao valor da fonte fria (T_a) e quente (T_1), enquanto que no período noturno a fonte fria é representada pela temperatura do ar (T_{ar}) e a fonte quente pela temperatura da água do canal (T_a), ver (A.6).

Outro comportamento visível na curva WB é o da inversão do gradiente da temperatura da solução na entrada do permutador (T_1), que durante as recirculações, se torna invertido as 6:00h e 16:00; Inversões em destaque na Figura 7, pontos A e B, ocasionadas pela mudança de gradiente das fontes quente e fria disponíveis, ar e canal resfriado. Os intervalos com pontos de reversão dos gradientes foram das 6:00 h às 18:00 h e 18:00h às 6:00h, indicando influência da disponibilidade solar no comportamento.

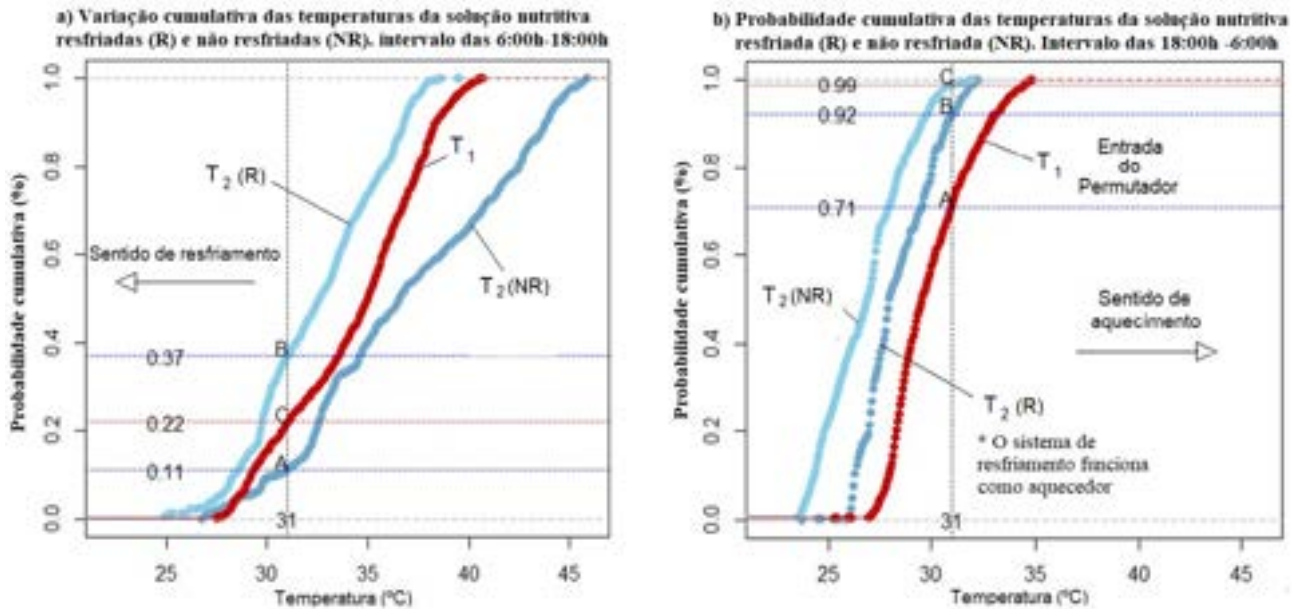
A variação das temperaturas nas canaletas apresenta dois pontos de inflexão (Figura 7, detalhes A e B), referentes às temperaturas antes e durante a recirculação da solução nutritiva. Como as medições foram feitas a cada 15 segundos, foi possível detectar o comportamento em formato de onda ascendente exponencial seguida de queda abrupta, formando um padrão repetitivo, de acordo com os intervalos de recirculação. Chamada por TOYOSUMI (2023) de “rampa de temperatura”, o comportamento também é encontrado nas variações das temperaturas durante o ciclo hidropônico da solução (fluxos de densidade de calor), a partir de T_1 , e apresenta duas funções distintas, as funções de pico (f_p) e de vale (f_v), essa variação é provocada pela absorção de calor no volume do reservatório, comportamento não submetido a análise no trabalho. A inversão das funções f_p e f_v , às 16:00 (A) e às 6:00 (B) sugerem mudança de gradiente térmico entre as fontes frias e quentes, limitadas por T_a e T_{ar} e que se invertem no decorrer do ciclo diário.

A curva WB, apesar de explicitar as regiões de inflexão do comportamento térmico no ciclo diário hidropônico e os limites de resfriamento e aquecimento, não é apropriada para a estimativa da temperatura ótima na recirculação hidropônica, principalmente porque trata das variações das temperaturas ponto a ponto, dificultando modelagem.

Por essa razão, as curvas de probabilidade acumulada de temperatura são utilizadas no trabalho para analisar as faixas de temperatura na solução nutritiva na canaleta (T_2), com e sem permutador, durante período diurno e noturno. A comparação entre as curvas de frequência acumulada é um método estatístico de análise de dados usado inclusive em aplicações de irrigação (SILVA, 2006).

A variação das temperaturas das soluções nutritivas e do permutador em T_1 , T_2 são mostradas na Figura 8, sendo avaliadas através da curva cumulativa de temperaturas com relação a $T_{ref}=31$ °C, em comportamento típico, diurno e noturno no dia 15/03/2024 e 16/03/2024, parcelas com e sem resfriamento.

Figura 8. Variação das temperaturas de entrada do permutador (T_1) e temperatura da canaleta resfriadas T_2 (R) e não resfriadas T_2 (NR) a) período diurno (6:00h e as 18:00h); b) período noturno (18:00h-6:00h), em 15/03/2024 (probabilidades acumuladas).



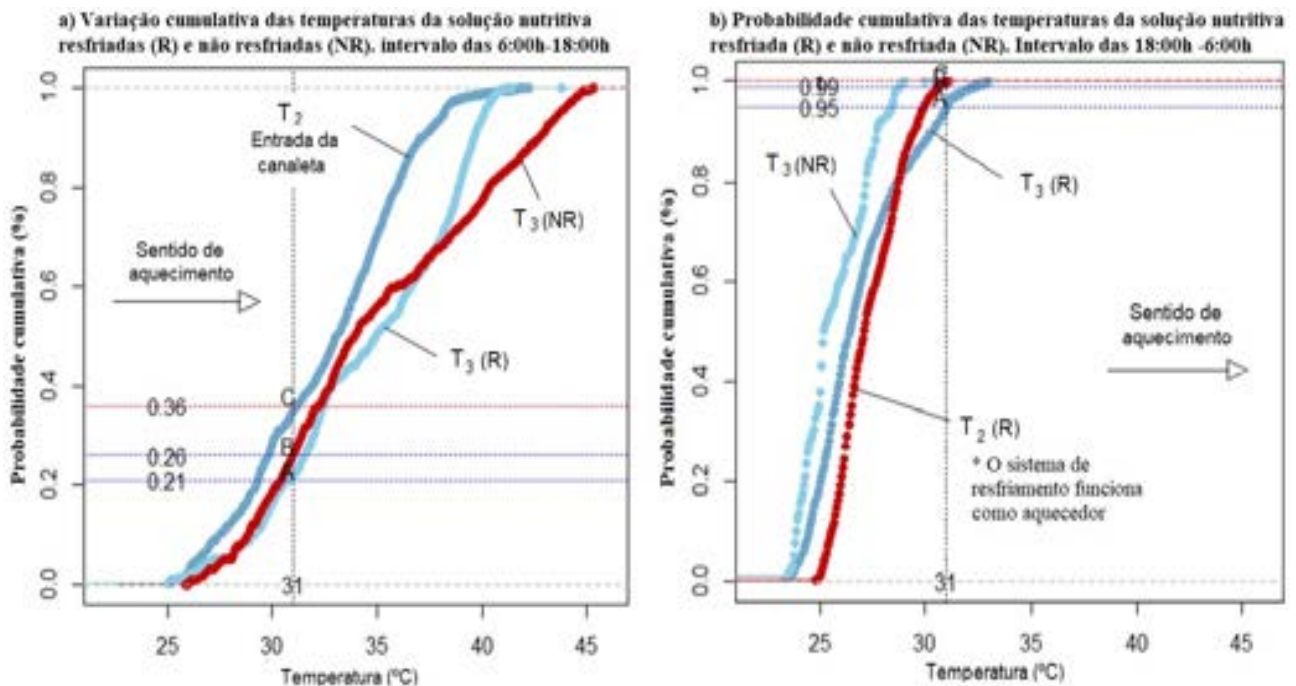
A linha vertical nas Figuras 8.a) e 8.b) se refere ao valor de $T_{ref} = 31^{\circ}\text{C}$, evidenciando que a temperatura diurna de temperatura da canaleta (T_2), após o resfriamento pelo permutador, apresentou probabilidades acumuladas de 37% das temperaturas abaixo de T_{ref} (ponto B, Figura 8.a), enquanto as temperaturas de entrada T_1 no permutador (disponíveis no reservatório de reciclo) tem apenas 11 % das temperaturas abaixo de T_{ref} (ponto A, Figura 8.a), evidenciando eficiência do permutador na redução da temperatura da solução nutritiva durante o período mais quente do dia entre as 10:00h e as 16:00h.

Quando avaliado o período noturno entre as 18:00-6:00 (Figura 8.b), percebe-se que o permutador atua como aquecedor, T_1 apresenta cerca de 99% das temperaturas abaixo de T_{ref} (ponto C, Figura 8.b) com 7% das temperaturas abaixo de T_2 (ponto B, Figura 8.b).

O resultado demonstra aplicações distintas entre aquecimento e resfriamento da solução nutritiva durante dia e noite, respectivamente; o experimento em questão utilizou recirculação de 5 em 5 minutos, mesmo em período noturno, diferente do intervalo noturno de recirculação utilizado na hidroponia comercial, com baixa circulação noturna com cerca de 15 min a cada 2 h, ou seja, para aplicação como aquecedor noturno, torna-se necessária manutenção da recirculação em intervalos menores.

Quanto à diferença das temperaturas entre início e fim da canaleta ($T_3 - T_2$), para o período diurno, as curvas cumulativas são mostradas na Figura 9.a) e 9.b).

Figura 9. Variação das temperaturas da solução nutritiva no início (T_2) e fim da canaleta (T_3). a) período diurno (6:00h e as 18:00h) e b) noturno (18:00h-6:00h), com e sem resfriamento para ambos.



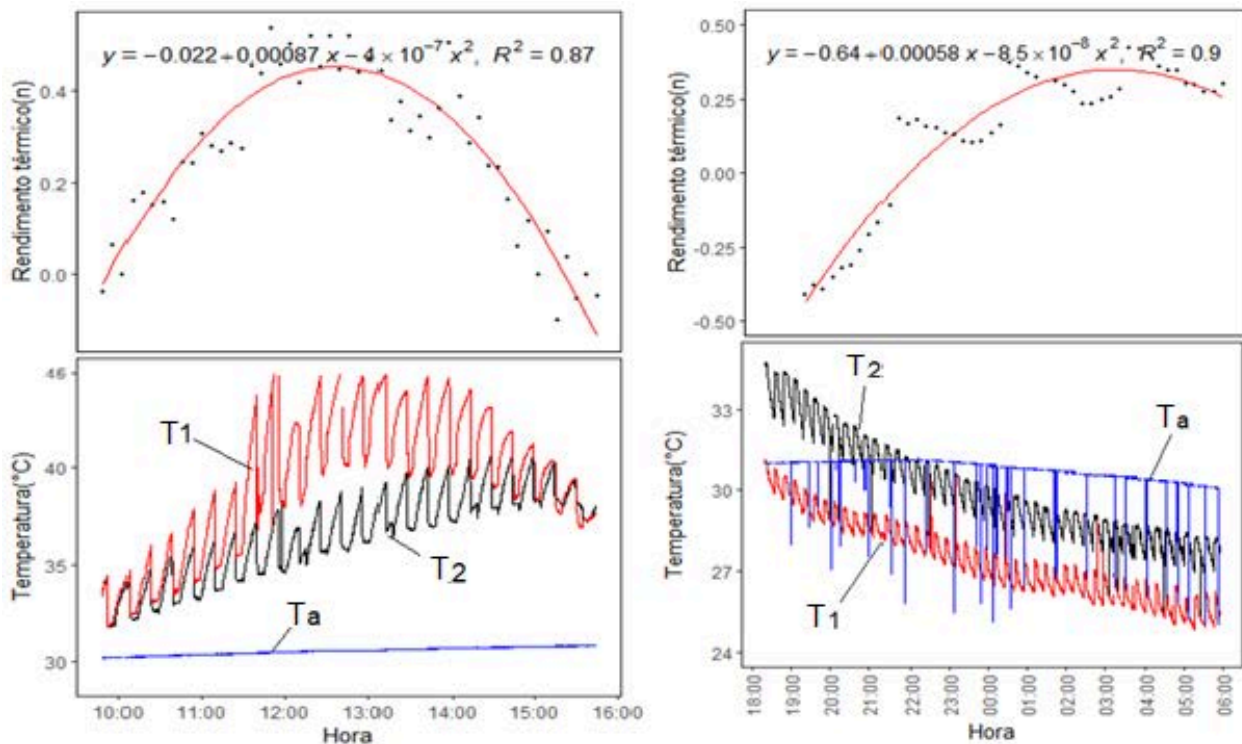
Os resultados mostram que as temperaturas (T_3 e T_2) antes e depois do resfriamento apresentam 15% das temperaturas menores que 31°C , com $T_3 < T_2$, durante o período diurno; enquanto (T_3 e T_2) no período noturno as temperaturas apresentam 5% de probabilidade de serem menores que T_{ref} .

Nota-se existir trecho da Figura 9.a), círculo E, na qual a temperatura T_3 (R) entre 33°C e 37°C tem probabilidade cumulativa menor que T_3 (NR), esse comportamento se deve a turbulência do fluido na canaleta que propicia troca de calor por evapotranspiração na superfície do instrumento durante curto período de tempo na transição da irrigação, mas não mandatório em ampla faixa de probabilidade cumulativa.

A eficiência do permutador é calculada pela equação (1). Como os resultados encontrados variam ponto a ponto a partir dos valores de T_1 , T_2 e T_a , torna-se necessário representar um intervalo de tempo, nesse caso o de maior temperatura da solução nutritiva, entre 10:00h e 16:00h do dia 15/03/2024.

A Figura 10.a) apresenta a variação das temperaturas da solução nutritiva em T_1 , T_2 e T_a , e na Figura 10.b) a variação da eficiência no mesmo intervalo de tempo do dia 15/03/2024.

Figura 10. Variações das temperaturas dos fluidos quente e frio no permutador (a.1).
Eficiência do permutador (a.2), e noturna (b.1) e (b.2) em 15/03/2024.



Os resultados da eficiência térmica (η_{th}) do permutador indicam máxima de 42% entre 12:00 e 13:00h (Figura 10.a.1), com característica quadrática, decaindo proporcionalmente a diferença entre fonte fria (água no canal) e quente (solução nutritiva), a máxima diferença de temperatura encontrada foi de 5,1 °C às 13:00 (Figura 10.a.2), com calor recebido pela fonte fria, de 1100,2 J kg⁻¹ (Figura 6.b). O permutador apresenta rendimento como resfriador até as 15:00 h (Figura 10.a.2), período a partir do qual existe inversão do fluxo térmico na casa de vegetação.

Durante o período noturno a solução nutritiva apresenta aquecimento máximo de cerca de 2,5 °C às 21:00h (Figura 10.b.2), com rendimento máximo de 27% às 3:00h (Figura 10.b.1).

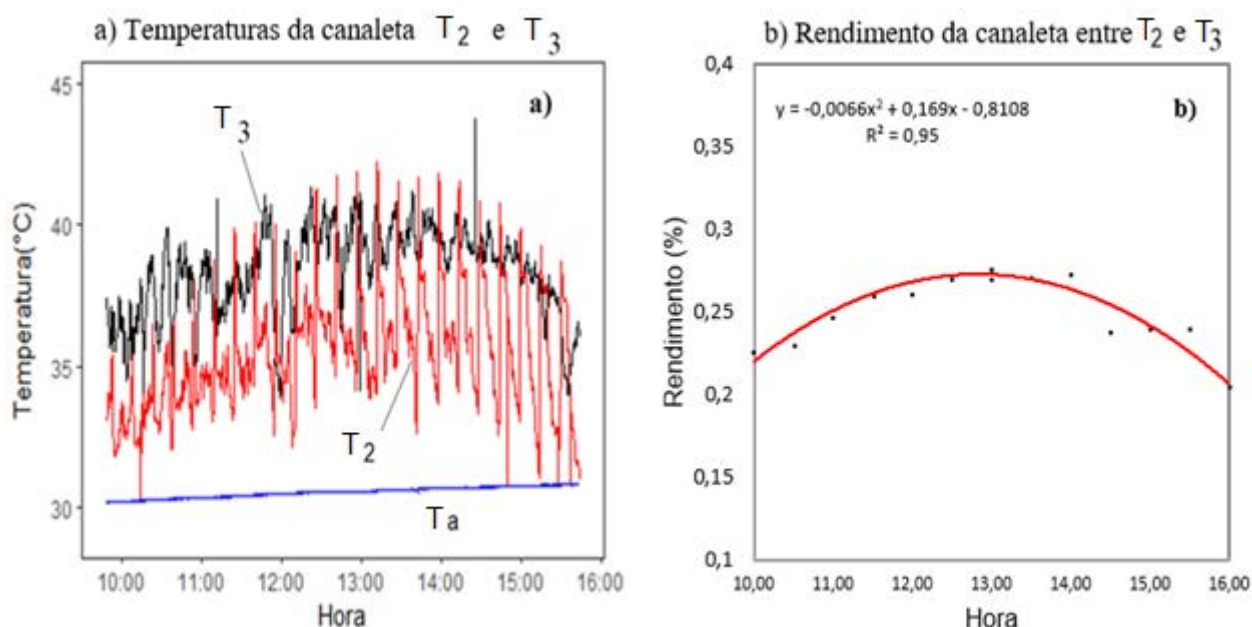
As variações de temperatura no início (T_2) e fim da canaleta (T_3) tiveram grande variabilidade devido às transmissões de interface água-ar e turbulência, dificultando a obtenção de análise gráfica estável. As variações são mostradas na Figura 11.a) e se referem ao dia 15/03/2024. Como existe variação de temperaturas entre T_3 e T_2 , pode-se calcular a eficiência da própria canaleta como um permutador, utilizando de forma simplificada a equação (1).

Pode-se observar na Figura 11.b) a curva de rendimento térmico da canaleta, evidenciando rendimento de 27,5% às 13:00h.

A transmissão de calor se deve a área de absorção e efeito estufa na canaleta, exposta permanente a radiação na casa de vegetação, funcionando como um concentrador térmico. O calor máximo transferido da canaleta para a SN foi de $3,1 \text{ J kg}^{-1}$ de solução (Figura 6.c).

O comportamento de aumento da temperatura do reservatório de solução foi documentado em alguns trabalhos de hidroponia (MATTOS, 2001; SILVA, 2019) e tem fonte térmica primária o calor absorvido pela solução nutritiva na canaleta somado ao calor absorvido pelo reservatório no ambiente da casa de vegetação, de menor valor quando comparado com as contribuições dos canais de cultivo.

Figura 11. Variações das temperaturas no interior das canaletas entre o início (T_2) e fim da canaleta (T_3). durante o dia no dia 15/03/2024.



A variação das temperaturas da solução nutritiva em T_2 e T_3 , durante o dia Figura 10.a), resultou no aquecimento médio de $2,5^\circ\text{C}$, entre as 10:00h e 16:00.

Durante o período noturno as diferenças entre o início das canaletas (T_2) e o fim das canaletas (T_3) são muito variáveis e tem variações médias de $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, devido a turbulência, na teoria tenderiam a zero, impossibilitando assim, levantamento das curvas de rendimento.

A fonte fria representada pelo ar noturno, associado à área de absorção da canaleta, faz com que ela funcione como “sumidouro” térmico, reduzindo as temperaturas da solução nutritiva, verificar a variação noturna de T_{ar} , da Figura 7.

Estudo futuro poderá avaliar o calor transferido entre os diversos volumes de controle do ciclo de irrigação na hidroponia, podendo ser calculado através da equação (1) a partir da capacidade calorífica da água, vazão do sistema e das diferenças de temperatura obtidas pela análise das temperaturas, complementando os rendimentos encontrados e compondo o balanço de energia do sistema da Figura 6.a).

4. CONCLUSÃO

O permutador proposto foi capaz de resfriar solução nutritiva hidropônica com 26% das temperaturas abaixo das encontradas nas parcelas sem resfriamento, em relação a temperatura de referência para estresse térmico de 31 °C, com eficiência térmica máxima de 45%, reduzindo as temperaturas em até 5,1 °C durante o período diurno entre as 6:00 as 18:00; As temperaturas máximas para superfície da canaleta foram de 39°C e 46°C, com e sem resfriamento respectivamente. Durante o período noturno das 18:00 h às 6:00 h, o permutador aqueceu a solução nutritiva em até 2,5 °C, obtendo 25% de eficiência. As diferenças encontradas viabilizam a utilização do método na redução das temperaturas da solução nutritiva para a hidroponia.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece a contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical (INCT AgriS) e da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) na figura do Nucleo de água e solo (NEAS) do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), por prover o suporte estrutural para conduzir o presente estudo.

6. REFERÊNCIAS

AGUIAR, R. S.; ZACCHEO, P. V. C.; STENZEL, N. M. C.; SERA, T.; NEVES, C. S. V. J. Produção e qualidade de frutos híbridos de maracujazeiro-amarelo no norte do paraná. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, n. 1, p. 130-137, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-012/14>

AL-RAWAHY, M.; AL-RAWAHY, S.; AL-MULLA, Y.; NADAF, S. Influence of Nutrient Solution Temperature on Its Oxygen Level and Growth, Yield and Quality of Hydroponic

Cucumber. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n.3, p. 75, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n3p75>

BALALI, A.; AKILU YUNUS K.; RODGER E. A systematic review of passive energy consumption optimization strategy selection for buildings through multiple criteria decision-making techniques, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 171, p.113013 , 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113013>.

BARRECA, F. Sustainability in Food Production: A High-Efficiency Offshore Greenhouse. **Agronomy**, v. 14, p. 518, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030518>

BELLOUFI, Y. A. BRIMA, R. ATMANI, N. MOUMMI, F. AISSAOUI. Theoretical and experimental study of air refresh by a geothermal heat exchanger air / ground. **Larhyss Journal**, n. 25, p. 121-137, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.098>

BITTENCOURT, R.; SILVA, J.; SAMPAIO, M. G., BITTENCOURT, E. C. F.; SANTOS, R. I. N.; COELHO, A. D.; FIGUEIREDO, S. P. R.; BITTENCOURT, I. C. Morphophysiology and postharvest quality of hydroponic lettuce cultivars grown under high temperature . **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, p. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n5e277774>

CAPLOW, T. Building-integrated greenhouse systems for low energy cooling. **2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century**, Crete island, Greece, p.172-176, September 2007.

ÇENGEL, YUNUS A.; GHAJAR, AFSHIN J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. **AMGH**, São Paulo, 2012.

DING, DING. Design strategies of passive solar greenhouses: A bibliometric and systematic review, **Ain Shams Engineering Journal**, v.15, n.5, p. 102680, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102680>.

GAOYANG, A. ; HESSAM, T.; YING, S.; WEI JIANG, A.; DIYI, CHEN. A systematic review on optimal analysis of horizontal heat exchangers in ground source heat pump systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 154, p. 111830, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111830>

GHANI S.; ESMAIL, M. A.; FOTEINI, BAKOCHRISTOU; MOHAMMED, RASHWAN; ABDELHALIM, AYMAN; ISMAIL, SALMAN; BEN, PRATHEESH. Experimental and numerical investigation of the thermal performance of evaporative cooled greenhouses in hot and arid climates. **Science and Technology for the Built Environment**, v.26, n.2, p. 141-160, 2019. DOI: 10.1080/23744731.2019.1634421

GORJIAN, S.; CALISE, F.; KANT, K.; AHAMED, M.S.; COPERTARO, B.; NAJAFI, G.; ZHANG, X.; AGHAEI, M.; SHAMSHIRI, R.R. A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, v. 285, p. 124807, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124807>

HERCHER, J.; LOISEAU, E.; SINFORT, C. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v.40, p.29 , 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2>

HOOKS, T.; SUN, L.; KONG, Y.; MASABNI, J.; NIU, G. Effect of nutrient solution cooling in summer and heating in winter on the performance of baby leafy vegetables in deep-water hydroponic systems. **Horticulturae**, v. 8, p. 749, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080749>

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 5a edição, **LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.**, R.J. 2003.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Cambridge University Press**, 2021.

KITTAS, C.; BARTZANAS T.; JAFFRIN A. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. **Biosystems Engineering**, v.85, n.1, p. 87–94, 2003. DOI:10.1016/ S1537-5110(03)00018-7

MATTOS, K.; ANGELOCCI, L.; FURLANI, P.; NOGUEIRA, M. Temperatura do ar no interior do canal de cultivo e crescimento da alface em função do material de cobertura da mesa de cultivo hidropônico - NFT. **Bragantia**, v.60, n.3, p. :253–60, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000300013>

NABIHA, NAILI; MAJDI, HAZAMI; SAMI, KOOLI; ABDELHAMID, F. Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia. **Geothermics**, v. 53, p. 270–280, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.004>.

OLIVEIRA, J.R.; PAULO, M.W.; CORRÊA, R.M.; REIS, E.S.; CARVALHO, M.A.; REIS, M.M. Cultivos agrícolas utilizando telas coloridas e termo-refletoras. In: **I Jornada Científica e VI FIPA do CEFET Bambuí**, v.1, p.42, 2009.

PASCUAL, C. S; AGULTO, C.;ESPINO, JR.; MALAMUG, V. U. Effect of ground heat exchanger for root-zone cooling on the growth and yield of aeroponically-grown strawberry plant under tropical greenhouse condition . IOP Conf. Series: **Earth and Environmental Science**, v.301, n. 012006, 2019. DOI :10.1088/1755-1315/301/1/012006

RAJASEGER, G.; CHAN, K; YEE, K.; RAMASAMY S.; KHIN, M; AMALADOSS, A; KADAMB, H. P. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. **Bioinformation**, v.19, n.9, p.925-938, Sep 30, 2023. DOI: 10.6026/97320630019925.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5ed. Brasília: **Embrapa**, 356p, 2018.

SILVA, E.; LIMA, J.; RODRIGUES, L.; AZEVEDO, J. A. Comparação de modelos matemáticos não-lineares empregados na análise de desempenho de sistemas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p. 1049–1052, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000600022>

SILVA, M. G.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, M. G. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different temperatures of the nutrient solution. **Engenharia agrícola**, v.40, n.6, p. 674–683, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n6p674-683/2020>

SILVA, M. G. Coentro hidropônico sob diferentes condições de cultivo relacionadas à solução nutritiva: temperatura, salinidade e recirculação. Orientador: Tales Miler Soares, **TESE DE DOUTORADO** (Doutorado em Engenharia agrícola), Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola- UFRB, 2019.

SILVA, S.; ROSE, F.; RICARDO, L. Sustentabilidade na Agricultura: Histórico e Evolução de Práticas Agrícolas. **Pesquisas agrárias e ambientais**, Volume XIV, Nova Xavantina-MT: Pantanal, p. 25-26, 2022. DOI:10.46420/9786581460761cap2.

SOUSSI, M.; CHAIBI, M.; BUCHHOLZ, M.; SAGHROUNI, Z. Comprehensive Review on

Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. **Agronomy**, v.12, n.3, p.626, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030626>.

SOUZA, V. V. S., SOARES, T.M; SILVA, M. G. Resfriamento de solução nutritiva hidropônica com permutador geotérmico horizontal, PPGEA-UFRB, 28 pgs, 2024. (NÃO PUBLICADO)

SWAMINATHAN, G.; SAURAV, G. Development of Sustainable Hydroponics Technique for Urban Agrobusiness. **EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy**, v.9, n.3, p. 629-635, September, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5109/4842519>.

SINGH, H.; DUNN, B.; FONTANIER, C.; SINGH, H.; KAUR, A.; ZHANG, L. Shade Nets Reduced Growth, Nutrition, and Sugars of Hydroponic Lettuce and Basil. *HortScience*, v.58, n.11, p. 1383-1392,2024. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17252-23>

TOYOSUMI, IUMI T. Produtividade da água de irrigação e uso da renovação do ar na superfície na determinação da demanda hídrica do maracujazeiro amarelo no sudoeste da Bahia. Orientador: Maurício Antonio Coelho Filho, **TESE DE DOUTORADO** (Doutorado em Engenharia Agrícola) Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola- UFRB, 2023.

TRIYONO, S.; ANDINI P. R.; OKTAFRI R.; MARELI T. Cooling the high temperature nutrition solution to improve growth, yield and water productivity of hydroponic red lettuce (*Lactuca sativa* L Var Red rapids) in a tropical location. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v.23, n.1, p. 221-229 2024. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.1.2016>

VELAZQUEZ, G.; ROBERTO, G.; ADRIAN, ZAPATA; ELSA, SANCHEZ, JOSE, S. A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations. **Agriculture**, v.12, p. 646, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>.

WANG, L.; LI, Y.; SUN, Z.; MENG, S.; LI, T.; LIU, X. Utilization of Surplus Air Thermal Energy by a Water Cycle System in a Chinese-Type Solar Greenhouse. **Agronomy**, v.14, n. 2, p. 270, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14020270>

WANG, X.; GUOCHEN, SUN; ZHANG, L.; WENJUN, L. Application of green energy in smart rural passive heating: A case study of indoor temperature self-regulating greenhouse of winter in Jinan. **Energy**, China, v. 278, n. 127770, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127770>

XU, W.; GUO, H.; MA, C. An active solar water wall for passive solar greenhouse heating. **Applied Energy**, v.308, p.118270, February 15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118270>.

Capítulo 2

**RESFRIAMENTO PASSIVO NO CULTIVO HIDROPÔNICO DE COENTRO
“Verdão” SOB CONDIÇÕES SALINAS**

RESUMO

A temperatura e a salinidade da solução nutritiva influenciam na produtividade do cultivo hidropônico. O trabalho utiliza um permutador de calor horizontal para redução das temperaturas da solução nutritiva, feito com tubo pvc 1/2", submerso em um canal de água resfriada com 5,5 m; O experimento foi repetido nos meses de maio e junho de 2024, com 18 e 10 plantas por parcela, respectivamente. A análise estatística foi a de componentes principais (ACP), com e sem resfriamento e 4 salinidades 0,38 dS.m⁻¹; 2,0 dS.m⁻¹; 4,0 dS.m⁻¹ e 6,0 dS.m⁻¹. Foram utilizadas 32 parcelas e 4 repetições por tratamento, em canaletas hidropônicas comerciais retangulares com 6 m de comprimento; A água foi resfriada em reservatório superficial, em período noturno do dia anterior. A temperatura da solução nutritiva foi reduzida entre 2,5 °C e 5,1 °C . A covariância por duas componentes principais, revelam que CP1 (>95,7%) se refere a salinidade e tem covariância negativa comparativamente aos não resfriados; Enquanto a componente CP2(2,5%), indica a influência do resfriamento e indica que C1NR tem maior produtividade que C1NR, com inversão no tratamento C4R com relação ao C4NR para ambos experimentos. A análise estatística dos grupos por Kruskal-Wallis, no entanto, não indica aumento de produtividade entre as parcelas resfriadas e não resfriadas, somente entre C1 e C4. O aumento da salinidade influenciou negativamente as médias entre T1 e T4 em (1) e (2), resultando MSPA de -32%(1) e -49%(2), MFPA de -44,8%(1) e -54%(2) e AP de -15%(1) e -24,6%(2), em relação ao controle T1. A comparação da produtividade entre as parcelas dos mesmos tratamentos C1NR e C1R, C2NR e C2R, C3NR e C3NR, C4NR e C4R, não foram significativas em (1) e (2), considerando p<0,05. O trabalho oportuniza novas proposições de utilização da energia passiva no controle das temperaturas na hidroponia, haja vista, a redução da temperatura da solução nutritiva e as covariâncias sugestivas encontradas na ACP.

Palavras-chave: Resfriamento passivo, cultivo sem solo, hidroponia.

ABSTRACT

The temperature and salinity of the nutrient solution influence the productivity of hydroponic cultivation. This study uses a horizontal heat exchanger to reduce the temperatures of the nutrient solution, made with a ½" PVC pipe, submerged in a 5.5 m chilled water channel; The experiment was repeated in May and June 2024, with 18 and 10 plants per plot, respectively. The statistical analysis was the principal components analysis (PCA), with and without cooling and 4 salinities 0.38 dS.m⁻¹; 2.0 dS.m⁻¹; 4.0 dS.m⁻¹ and 6.0 dS.m⁻¹. A total of 32 plots and 4 replicates per treatment were used, in 6 m long rectangular commercial hydroponic channels; The water was cooled in a surface reservoir, at night the previous day. The temperature of the nutrient solution was reduced between 2.5 °C and 5.1 °C. The covariance by two principal components reveals that CP1 (>95.7%) refers to salinity and has negative covariance compared to non-cooled plots; while the CP2 component (2.5%) indicates the influence of cooling and indicates that C1NR has higher productivity than C1R, with inversion in the C4R treatment in relation to C4NR for both experiments. The statistical analysis of the groups by Kruskal-Wallis, however, does not indicate an increase in productivity between the cooled and non-cooled plots, only between C1 and C4. The increase in salinity negatively influenced the means between T1 and T4 in (1) and (2), resulting in MSPA of -32% (1) and -49% (2), MFPA of -44.8% (1) and -54% (2) and AP of -15% (1) and -24.6% (2), in relation to the T1 control. The comparison of productivity between the plots of the same treatments C1NR and C1R, C2NR and C2R, C3NR and C3R, C4NR and C4R, were not significant in (1) and (2), considering p<0.05. The work provides new proposals for the use of passive energy in temperature control in hydroponics, given the reduction in the temperature of the nutrient solution and the suggestive covariances found in the PCA.

Keywords: Passive cooling, soilless cultivation, hydroponics.

1. INTRODUÇÃO

O *Coriandrum sativum* (coentro) é uma erva comestível da família *Apiaceae*. As folhas, frutos e caules do coentro são usados como tempero culinário ao redor do mundo (SOBHANI et al., 2022). Diversos são os pesquisadores que estudam aspectos interferentes na produção do coentro hidropônico, desde a posição das plantas nos perfis, usos de águas salobras no cultivo, extração de N-P-K, produtividade e temperatura da solução (LUZ, 2012; PESSOA, 2020; CRESPO, 2017; CAVALCANTE, 2016; SANTOS, 2019; SILVA, 2022).

A concentração de sais na solução nutritiva é um dos fatores preponderantes na produtividade de muitas culturas em hidroponia, como o tomate, alface e o coentro (MADUGUNDU, 2023; ALVES et al., 2011; SILVA, 2020).

O aumento das temperaturas mundiais impacta o metabolismo das plantas, estando entre os fatores limitantes da produção vegetal devido à influência no estresse térmico e sua consequente atenuação metabólica (SIDDIQUI et al., 2018; FAHAD et al., 2017).

O estresse por calor resulta em uma exposição dos cloroplastos a grandes quantidades de energia, as quais agem como um gatilho para a síntese exacerbada de espécies reativas de oxigênio (ERO) que atuam na aclimatação das plantas a estímulos ambientais (MARUTANI et al., 2012; HASANUZZAMAN et al., 2020). Caso o calor seja acima do tolerável, há superprodução de ERO resultando em estresse oxidativo com posterior dano celular (SIDDIQUI et al., 2018).

Entre os complexos antioxidantes não enzimáticos destacam-se as clorofilas e os carotenoides (ANTONIO & VIERA, 2020). Eles realizam a desintoxicação celular, atuando a nível bioquímico, impactando o funcionamento da planta em condição de estresse (BARBOSA et al., 2014; APEL & HIRT, 2004). De acordo com SILVA et al. (2020), em altas temperaturas, há uma redução na disponibilidade de oxigênio dissolvido na solução, podendo ocorrer um aumento da incidência do *Pythium sp.*, prejudicando o crescimento e desenvolvimento das plantas.

SILVA et al. (2022) relacionaram variações de temperatura e salinidade da solução nutritiva em quatro tratamentos com coentro combinado com rúcula, submetidos a dois níveis de condutividade elétrica da água (CEa 0,3 e 6,5 dS m⁻¹) com duas temperaturas da zona radicular TZR (ambiente: < 25 °C e constante a 30 °C). O coentro foi mais tolerante do que a rúcula, quando submetido aos estresses combinados de temperaturas altas e salinidade. Para os estresses isolados houve maior redução na

produção de ambas as culturas em função da salinidade do que pelo estresse térmico. Segundo FREITAS et al. (2021), o efeito da temperatura sobre a condutividade elétrica da solução nutritiva (CESol), ocasiona aumento na dissociação dos sais na solução e consequente variação das amplitudes diurnas reais para maior, com o aumento da temperatura.

Dentre os métodos emergentes de resfriamento em culturas que utilizam casas de vegetação se encontram o das energias renováveis, as passivas, como a geotérmica, o evaporativo e outros como deslocamento de fonte fria dia e noite (HOYOUNG et al., 2024; LACHHEB et al., 2024; PAN et al., 2020; SINGH et al., 2024; NISAR, 2024).

Apesar das pesquisas escassas sobre os métodos de resfriamento passivo específicos para hidroponia, alguns deles, como a ventilação natural, sombreamento ou reflexão, ventilação forçada, ventiladores e nebulizadores, são utilizados em casas de vegetação (FARVARDIN et al., 2024).

O trabalho avaliou a redução das temperaturas da solução nutritiva de um sistema hidropônico com coentro “Verdão”, utilizando água resfriada ao ar, em período noturno, aplicando princípios de energia passiva para amenização dos efeitos das temperaturas elevadas e salinidade na produtividade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram feitos em casa de vegetação no Núcleo de Engenharia de Água e Solo/NEAS, na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/UFRB, no município de Cruz das Almas, Bahia (12° 40' 19" de latitude Sul, 39° 06' 23" de longitude Oeste), nos meses de maio (Experimento 1) e junho de 2024 (Experimento 2).

A estrutura da casa de vegetação foi feita em aço galvanizado, cobertura em arco tipo túnel e as paredes laterais e frontais recobertas com tela preta com 50% de sombreamento. As dimensões da casa de vegetação são de 7,0 m de largura por 24,0 m de comprimento e pé direito de 4,0 m, orientação Leste-Oeste, teto filme plástico, anti-UV, de 150 micrometros, sem manta refletora interna e com mureta de 50 cm.

No período dos experimentos, a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) foram medidas no interior do ambiente da casa de vegetação, os valores diários da radiação global ($W.m^2$) foram obtidos em estação agroclimatológica da UFRB.

A estrutura experimental foi constituída por 32 parcelas hidropônicas em sistema NFT, com 12 e 10 maços em cada parcela, nos experimentos (1) e (2), respectivamente. Em cada parcela foram colhidos 3 maços, totalizando 96 maços.

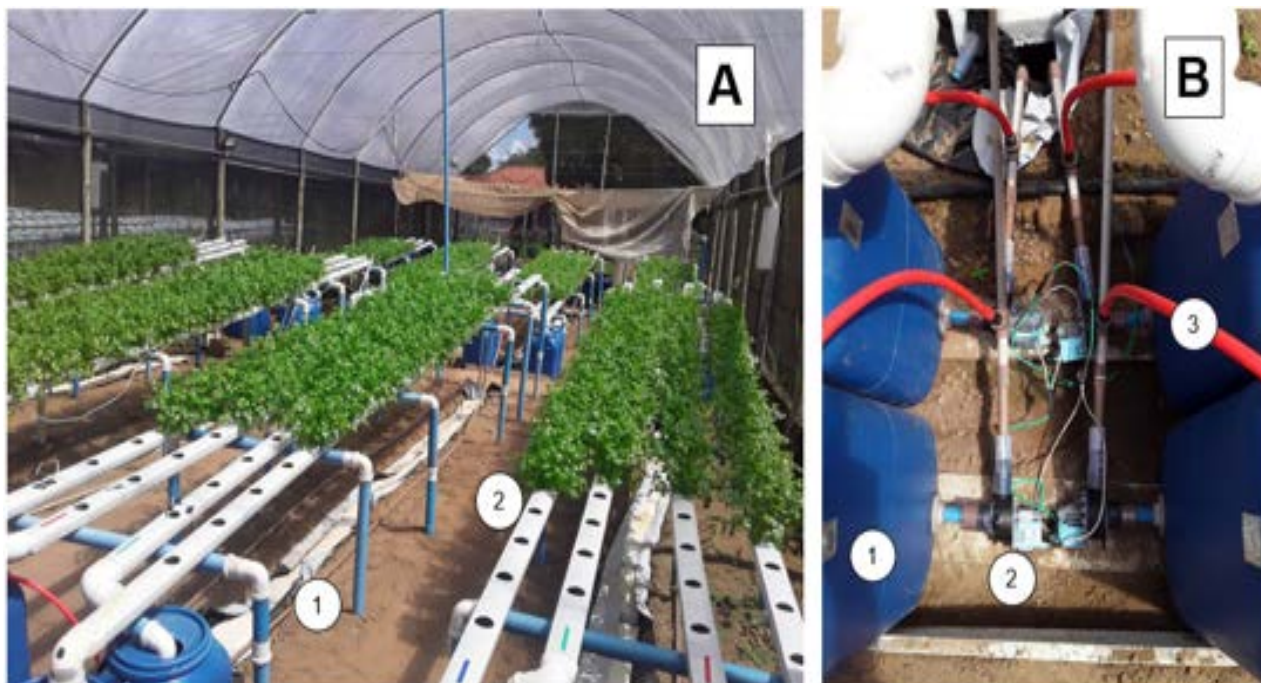
Foram utilizados 4 tratamentos com níveis salinos de $C1=2,0 \text{ dSm}^{-1}$; $C2=4,0 \text{ dSm}^{-1}$; $C3=5,5 \text{ dSm}^{-1}$ e $C4=7,4 \text{ dSm}^{-1}$ (Tabela 1) com resfriamento (R) e sem (NR), em esquema fatorial 4×2 e 4 repetições²².

Foram utilizados reservatórios individuais de 50 litros em cada parcela (Figura 1 B.1). Os perfis hidropônicos utilizados foram os comerciais retangulares (Figura 1 B.2), em polipropileno com comprimento de 6 m e com 24 furos de diâmetro 10 cm, apoiados em estruturas de tubos de PVC 50 mm com inclinação de 7%, montados no sentido longitudinal da casa de vegetação.

A estrutura é dotada de 8 canais de resfriamento localizados abaixo das canaletas e responsáveis pelo resfriamento de 16 canaletas hidropônicas (Figura 1.A.1). Cada parcela possuía reservatório e bomba de reciclo de 127V, 36W (Figura 1.B.2).

Nas descargas das bombas foram montadas mangueiras para reciclo de $\frac{1}{2}$ " x 2 mm, na cor vermelha para evitar propagação de algas e garantir a oxigenação da solução nutritiva no reservatório (Figura 1.b.3 e Figura 2). A vazão no cultivo em cada parcela foi de $1,6 \pm 0,1 \text{ L.min}^{-1}$.

Figura 1.a) Distribuição das 32 parcelas NFT, b) Agrupamento de 4 parcelas.



²² Disposição dos tratamentos na casa de vegetação se encontra na Figura C.1 do APÊNDICE C.

O experimento (1) foi conduzido utilizando esquema fatorial desbalanceado em C1NR²³, C2R e C3R, comparando as três amostras de C1NR (1 repetição) aos tratamentos C2, C3 e C4, os tratamentos C1R com 7 repetições e C3NR com 5 repetições. O experimento (2) foi feito em fatorial aleatorizado e balanceado, com 4 salinidades (0,34 dS.m⁻¹; 2,0 dS.m⁻¹; 4,0 dS.m⁻¹ e 6,0 dS.m⁻¹). Cada um dos tratamentos teve quatro repetições.

Na análise estatística das amostras foram utilizados dois métodos. Primeiramente, uma análise descritiva dos dados através de componentes principais (ACP) comparando as covariâncias entre os grupos de tratamento de ambos experimentos, esse tipo de análise relaciona os grupos em seus atributos, identificando tendências.

A análise descritiva dos dados pelo método das componentes principais (ACP) tem natureza multivariada, e utiliza a decomposição espectral da matriz de covariância, encontrando os autovetores da matriz, que são as direções principais, enquanto os autovalores representam a magnitude da variação nessas direções.

Essa metodologia de análise dados é utilizada inclusive em hidroponia para determinar as variáveis de maior influência (BESSA et. al, 2016; ZELJKOVIĆ et. al. , 2022).

Após a análise por componentes principais foi utilizada uma análise inferencial com teste não paramétrico multivariado de Kruskal-Wallis do conjunto de amostras, com $p < 0,05$, devido a não normalidade dos tratamentos MSPA em C1NR(2); C2R(2) e C3NR(2); e de MFPA, C1R(2) e AP em C3NR(1), C2R(1), C1R(1), avaliada por teste de Shapiro-Wilk. Foi utilizado teste de comparação múltipla de Dunn como post hoc²⁴.

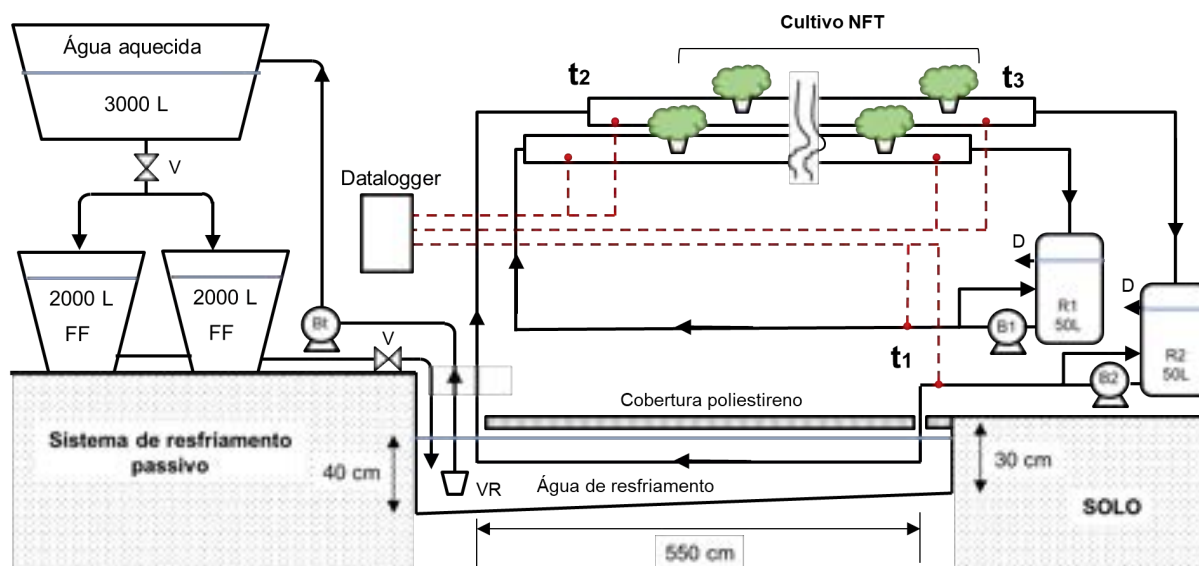
A análise ACP e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis não exigem que o experimento esteja balanceado, tratando-se da comparação multivariada entre os tratamentos. Para realizar as análises estatísticas foi utilizado o programa R Core Team Versão 4.4.0.

Na Figura 2, os fluxos da irrigação nas canaletas de cultivo e o fluxo no sistema de resfriamento envolvidos nas parcelas não resfriadas (reservatório R1, Figura 2.R1) e resfriadas (reservatório R2, Figura 2.R2).

²³ Imprecisão do p_value com Kruskal-Wallis no grupo C1NR do experimento (1), número de amostras menor que 5.

²⁴ “post hoc” são testes estatísticos realizados após a conclusão de um experimento, com o objetivo de explorar questões ou hipóteses adicionais, no caso a significância entre os tratamentos.

Figura 2. Montagem experimental detalhamento o sistema de cultivo, resfriamento e instrumentação utilizada na pesquisa



Os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação foram obtidos através de sensor DHT22-AM2302, com precisão de $\pm 2,0\%$ UR para umidade e $\pm 0,5$ °C para temperatura, conectado a um datalogger²⁵, constituído por um arduino ATmega2560 associado ao módulo RFID PN532 SD card, enquanto as temperaturas da solução nutritiva foram medidas por sensores digitais DS18B20 TO-92, a cada 15 segundos, os sensores foram revestidos com epoxi. Para recepção dos sinais foi necessário protoboard com leds indicadores de operação, gravação de dados em cartão SD e resistores pull-up de $2,0$ k Ω para os sensores de temperatura. Para acompanhamento dos sinais foi construída uma interface gráfica em linguagem de programação Python 3.8 (Thermal_03_GUI.py²⁶ do próprio autor), responsável pela aquisição dos dados, visualização e tratamento preliminar dos dados.

O acionamento elétrico das bombas foi feito com 2 temporizadores analógicos G-light TMA-BR-10-3B, sincronizados entre si (cada temporizador acionou 16 bombas, 127 V, 36 W). Os intervalos de acionamento foram de 15 minutos desligado/ligado, durante o período diurno (6:00 as 18:00) e no período noturno (18:00 as 6:00 h), de 15 minutos a cada 2 horas.

O sistema de resfriamento utilizou água resfriada em noite anterior (no ambiente da própria casa de vegetação) como fonte fria disposta em canal abaixo das parcelas, ver “água de resfriamento” da Figura 2. Os canais foram cheios com água de

²⁵ Componentes do datalogger (APÊNDICE A.1)

²⁶ O diagrama de blocos da interface gráfica na Figura 3 do Capítulo 1-MATERIAL E MÉTODOS

resfriamento somente das 10:00 h as 16:00 h, sendo esvaziados em período noturno, segundo SOUZA (2024)²⁷. Para a avaliação das temperaturas do sistema de resfriamento, foram instalados em 8 parcelas, com 3 sensores DS1820 cada, totalizando 24 sensores de temperatura, mostrados na Figura 2 (T_1 , T_2 , T_3), e um sensor termo-higrômetro DTH-22 no centro do cultivo a 2,5 m de altura. Os sensores foram dispostos de forma a contemplar canaletas submetidas ao resfriamento (R) e as não resfriadas (NR).

Quanto à salinização da solução nutritiva utilizada para o coentro, as concentrações das soluções nutritivas desejadas no experimento (1) e (2), foram obtidas pela adição de cloreto de sódio (NaCl) em 750 L de água com CE_a 0,38 $dS\ m^{-1}$. A Tabela 1 mostra a concentração de cloreto de sódio (NaCl), condutividade elétrica da água (CE_a) e condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sn}) aplicadas aos diferentes tratamentos.

Tabela 1. Concentração de Cloreto de sódio (NaCl), condutividade elétrica da água (CE_a) e condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sn}) para os diferentes tratamentos aos quais foram submetidas as plantas de coentro.

Tratamento	NaCl($g.l^{-1}$)	Experimento I -maio		Experimento II- junho	
		$CE_a(dS.m^{-1})$	$CE_{sn}(dS.m^{-1})$	$CE_a(dS.m^{-1})$	$CE_{sn}(dS.m^{-1})$
C1NR	0,00	0,38	2,24	0,38	2,03
C1R	0,00	0,38	2,24	0,38	2,03
C2NR	1,17	2,08	4,03	2,04	3,81
C2R	1,17	2,08	4,03	2,04	3,81
C3NR	2,34	4,02	5,56	4,03	5,70
C3R	2,34	4,02	5,56	4,03	5,70
C4NR	3,10	6,08	7,43	6,09	7,20
C4R	3,10	6,08	7,43	6,09	7,20

Após a obtenção da água salobras, foram adicionados os sais fertilizantes empregando-se a formulação de nutrientes de FURLANI et al. (1999) para hortaliças folhosas em volume de 750 L de água com 0,38 dSm^{-1} , para cada tratamento: Nitrato de cálcio (562,5 g), Nitrato de Potássio (375,0 g), Fosfato Mono Atômico (112,5), Sulfato de Magnésio (300,0), Micronutrientes PLANTTPAR GRENN EQUILIBRE (1,50 g em 100 L) com Fe_{sol} água 6,422%; Co_{sol} 0,102%; B_{sol} água 2,089%, Cu_{sol} água 1,329%; Mn_{sol} água 2,089%; Mo_{sol} água 0,417%; Ni_{sol} água 0,263% e Zn_{sol} água 0,835%, mostradas na Tabela 2 como CE_{sn} . As soluções foram distribuídas no sistema NFT, no volume de 45 litros úteis em cada uma das 32 parcelas.

²⁷ A manobra é mostrada no Capítulo 1-MATERIAL E MÉTODOS

A produção de mudas para ambos experimentos utilizou como substrato a fibra do mesocarpo de cascas de coco para uso agrícola e florestal. As sementeiras foram feitas no dia 21/04/2024 e 20/05/2024, no experimento (1) e (2), respectivamente, sendo irrigadas com água 0,38 dS m⁻¹ duas vezes ao dia até o início do processo de germinação. As sementes utilizadas foram as do Coentro “Verdão” FELTRIM. Foram postas 40 sementes a partir de um dosador feito com um cap de pvc ½”, e posteriormente semeadas em copos descartáveis de polietileno branco de 80 ml. O transplântio foi feito no 10° DAT (dia após transplântio) para os experimentos (1) e (2). Antes do transplântio foi feito desbaste nos maços, de forma que cada um tivesse 18 plantas por maço no experimento (1) e 12 plantas no experimento (2), conforme SILVA et. al. (2024).

Após o transplântio, os copos com os maços foram postos nas canaletas hidropônicas, 18 e 10 maços por tratamento, respectivamente no experimento (1) e (2). A medição do consumo hídrico e do pH foi feita diariamente nos reservatórios com posterior reposição utilizando água a 0,38 dS.m⁻¹, até a cota referência (Figura 2. item D). As medições de CE (condutividade elétrica) e pH da solução nutritiva dos reservatórios foram feitas em todas as parcelas com 3 medições semanais, a partir de alíquotas de 50 mL e medidas em laboratório com condutivímetro e pHmetro de bancada digital Ip-11c Impac.

As temperaturas das soluções nutritivas foram acompanhadas nos pontos mostrados na Figura 02, em T₁ (Temperatura da solução nutritiva na entrada do permutador), T₂ (Temperatura da solução nutritiva no início da canaleta, superfície interna inferior) e T₃ (Temperatura da solução nutritiva no fim da canaleta, superfície interna inferior) e T_{ar} (Temperatura do ar), 8 parcelas foram instrumentadas, 4 não resfriadas (NR) e 4 resfriadas (R) em ambos experimentos²⁸. As mudas foram colhidas 03 maços por parcela, totalizando 96 coletas, no 20° DAT, nos experimentos (1) e (2).

As temperaturas da solução nutritiva em T₁ (entrada no permutador) e T₂ (solução nutritiva no início das canaletas hidropônicas) foram avaliadas no período de maior pico térmico das 10:00 h às 16:00 h.

Para avaliar o efeito do estresse térmico sobre a produtividade foi convencionalizada a temperatura de referência (T_{ref}) cujo valor foi estimado segundo pesquisa anterior, feita com o coentro no mesmo local. Segundo SILVA et al. (2020), o coentro “Verdão” foi cultivado em temperaturas de 32 °C, sem salinização, mas com efeitos de redução da produtividade da ordem de 40,02 g.maço⁻¹ na massa fresca. Sendo assim

²⁸ Distribuição dos instrumentos na Figura 1 do APÊNDICE C

convencionou-se valor de $T_{ref} = 31^{\circ}\text{C}$ para o limite de estresse térmico, ou seja, temperaturas T_2 maiores que T_{ref} , indicariam influência do estresse térmico na produtividade.

Os valores de T_2 , podem ser considerados representativos das temperaturas das zonas de raiz (TZR), haja vista que os maços foram agrupados em número de 18 e 10 na região central das parcelas, entre os pontos de medição de T_2 e T_3 nas canaletas. A temperatura T_2 se refere a da solução nutritiva antes de receber calor das canaletas hidropônicas e T_3 são as finais, após aquecimento dentro da canaleta. Para quantificar o impacto das variações de temperatura foi considerada a probabilidade cumulativa das temperaturas medidas em T_2 maiores que T_{ref} adotada, comparando assim as curvas entre as temperaturas da solução nutritiva quando resfriadas e não resfriadas; Procurando evidenciar o efeito das variações das temperaturas nos tratamentos.

A produtividade do coentro foi determinada através da medição da altura da planta (AP), da massa de matéria fresca no maço de plantas (MFPA) e da matéria seca da parte aérea do maço de plantas (MSPA), sendo um maço representado por todas as plantas contidas no copo. Imediatamente após a pesagem das plantas, o material fresco foi acondicionado em sacos de papel, posteriormente inserido em estufa de circulação forçada, a 65°C , até atingir massa constante, para se quantificar MSPA. As medidas da AP foram feitas a partir do nível do substrato até a extremidade das folhas mais altas com uma fita métrica e superfície de contraste milimetrada²⁹, sobre a qual a amostra foi posta e feito registro fotográfico.

A partir dos valores de MSPA e MFPA foi determinado o teor de água nas folhas (TA), calculado em função da massa fresca, em %, através da equação (1).

$$TA = 100 \cdot \frac{(MFPA - MSPA)}{MFPA} \quad (1)$$

A concentração dos pigmentos fotossintéticos nas plantas, como a clorofila a, clorofila b e os pigmentos acessórios como os carotenoides, podem representar a eficácia na aquisição da biomassa líquida da planta, influenciando na MSPA (LENARDIS, 2000). Então, como análise complementar foram medidos os teores de clorofila a (Cla), clorofila b (Clb) e carotenoides (Car) da MSPA, sendo determinados por espectrofotometria a 664,1 nm; 648,6 nm e 470 nm, e extrato etanólico a 95%, conforme metodologia descrita por LICHTENTHALER E BUSCHMANN (2001).

²⁹ No APÊNDICE F encontram-se fotografias referentes a 1 amostra de cada tratamento 20 DAT dos experimentos (1) e (2).

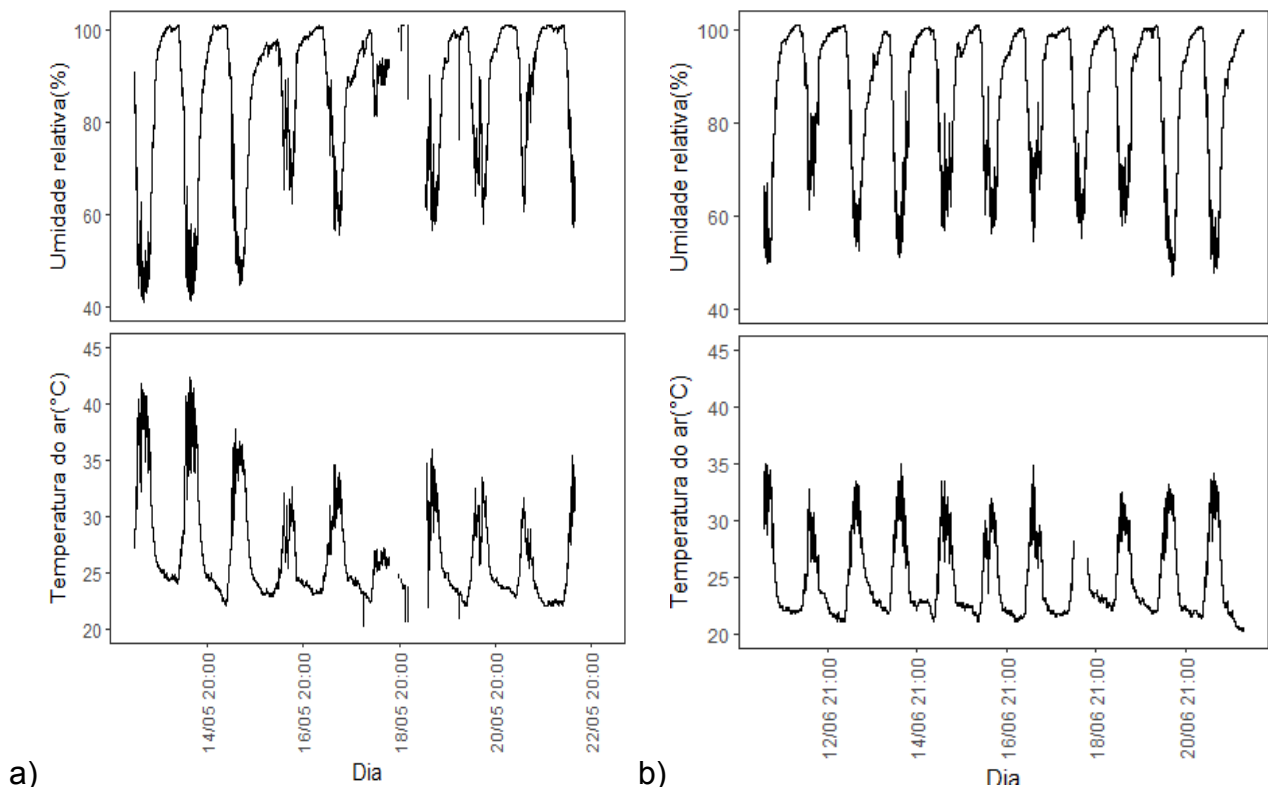
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de umidade relativa do ar e temperatura do ar no interior da casa de vegetação, no período do experimento (1) e (2), se encontram na Figura 3.

As temperaturas máxima e mínima no experimento (1) foram de 37,5 °C, 22,5 °C, com média de 28,6 °C, enquanto no experimento (2) foram de 35,1 °C, 20,5 °C e média de 27,8 °C. O valor médio e máximo da radiação global foram de 204,41 W.m² (1) e 1110,70 W.m² (1); 201,7 W.m² (2) e 1018,80 W.m² (2), para o experimentos (1) e (2) respectivamente. Os dados indicam maior disponibilidade de radiação solar e temperaturas mais altas durante o experimento (1).

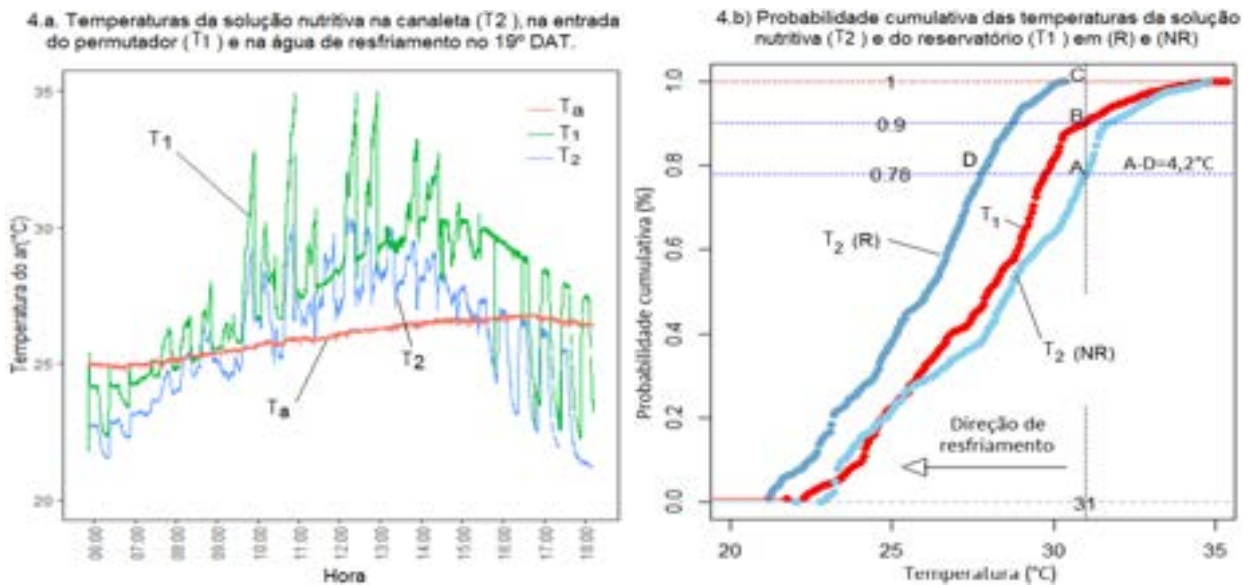
Como as temperaturas que provocam estresse térmico são concentradas durante o período diurno, procedeu-se com a avaliação das temperaturas entre 6:00 h e 18:00 h. Foram considerados os dados integrais das temperaturas de 3 dias mais quentes de cada experimento (condição mais restritiva de serviço do sistema de resfriamento), representando a integridade dos dados através de uma curva de probabilidade cumulativa das temperaturas, essa curva é mostrada na Figura 4.

Figura 3. Variação das temperaturas, umidades relativas do ar no período dos experimentos (1) e (2) em maio e junho de 2024, respectivamente.



Na Figura 4.b) podem ser vistas as temperaturas T_1 e T_2 e T_a dos dias, 6º DAT, 15º DAT e 19º DAT, para o experimento (1) e (2), com e sem resfriamento.

Figura 4. Variação das temperaturas da solução nutritiva (T_2) e da temperatura (T_1), no 19º DAT do experimento (2) 6:00-18:00 h. a) Variação de temperatura da solução nutritiva (T_2), Temperatura de solução na saída do reservatório (T_1) e a temperatura da água de resfriamento (T_a); com e sem resfriamento; b) Frequência cumulativa de T_1 , T_2 em circuito resfriado e não resfriado.



A Figura 4.b) mostra que 100 % das temperaturas das canaletas estão abaixo de T_{ref} , enquanto a solução não resfriada apresenta apenas 76 % abaixo do limite T_{ref} , com diminuição de T_1 em 4,2°C (segmento A-D).

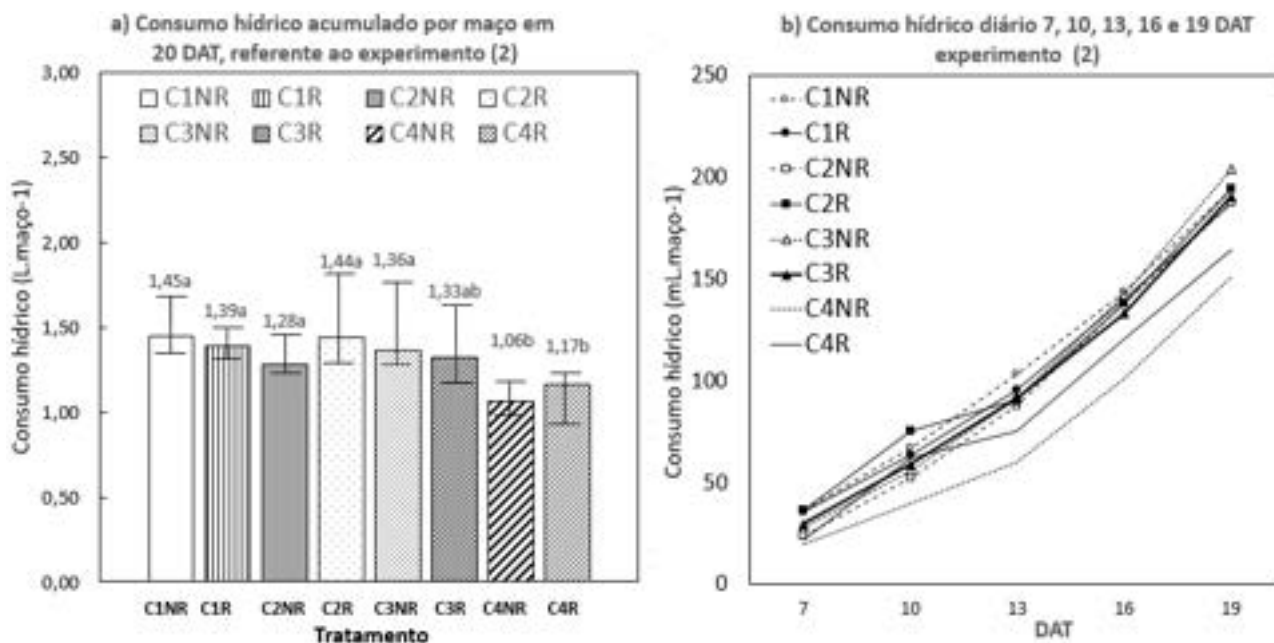
O experimento (1) apresentou dados coerentes quanto às variáveis produtivas, apesar das limitações nas medições de consumo hídrico, os valores das CE medidos entre o 1º DAT e 19º DAT foram de 7,43 e 5,9 dSm^{-1} em C4; 5,56 e 4,2 dSm^{-1} em C3; 4,03 e 3,1 dSm^{-1} em C2; e 2,24 a 1,5 dSm^{-1} em C1.

As variações de CE encontradas para o experimento (2) foram de 7,31 a 5,7 dSm^{-1} em C4; 5,49 a 4,3 dSm^{-1} em C3; 3,71 a 3,02 dSm^{-1} em C2; e 2,11 a 1,4 dSm^{-1} em C1. As variações de pH tiveram valores máximos das parcelas, entre 5,83 e 5,08 pH, medidas entre 3 DAT e 19 DAT.³⁰

O consumo hídrico acumulado (CHA) do experimento (2), 20º DAT dos tratamentos está na Figura 5.a), com C1, C2, C3 e C4, resfriados (R) e não resfriados (NR).

³⁰ No APÊNDICE D.1 e D.2. se encontram as variações de CE e pH em cada parcela, entre resfriadas e não resfriadas do experimento (2).

Figura 5. a) Consumo hídrico acumulado (DAT 20) por maço de coentro em condições de cultivo sob salinidade, com e sem resfriamento no experimento (2). b) Consumo hídrico diário por maço nos dias 7, 10, 13, 16 e 19 dias após transplante, de acordo com os tratamentos do experimento (2).



* As letras distintas em a) indicam as diferenças significativas com ($p < 0,05$, ANOVA)

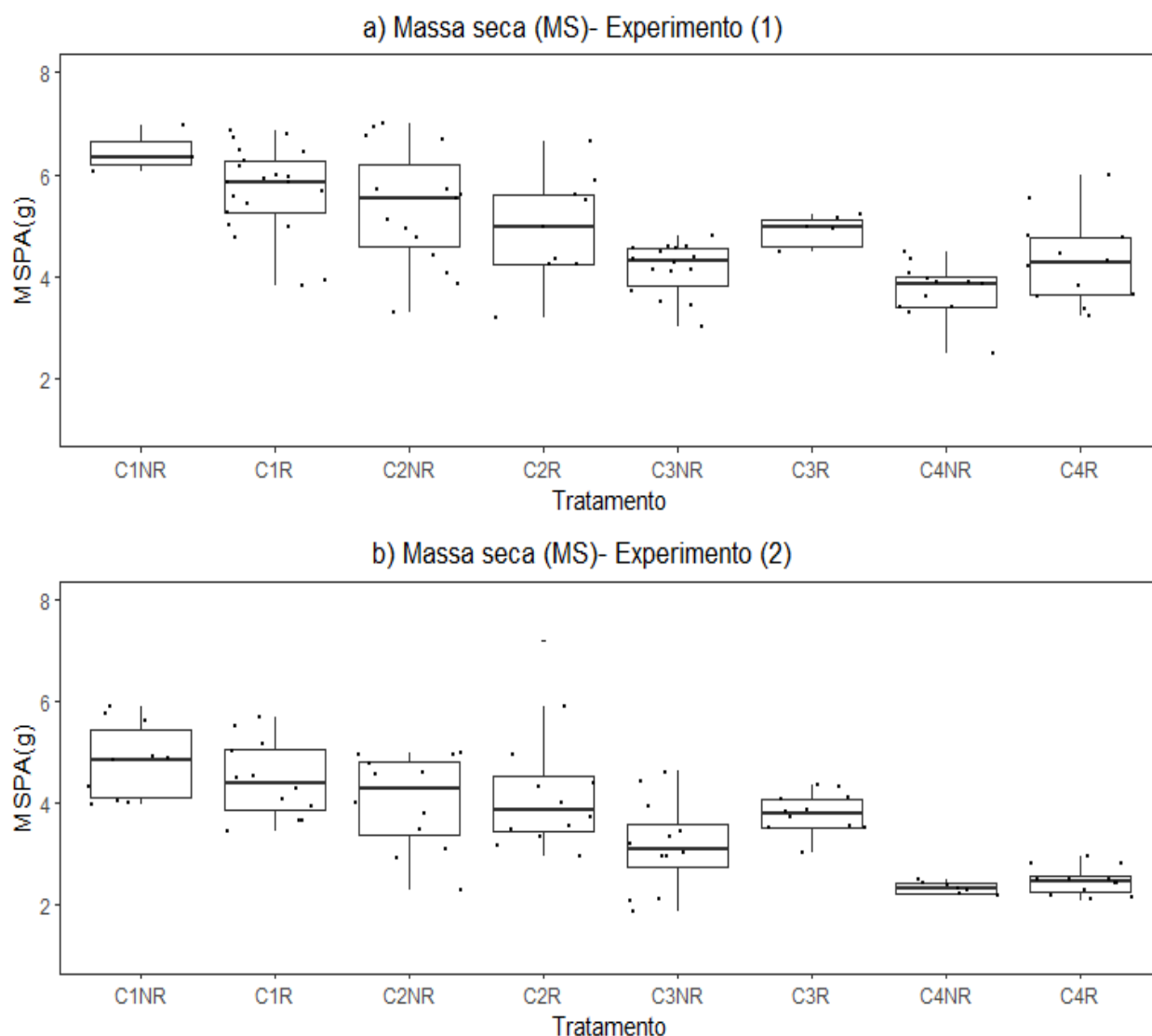
Os valores do CHA do experimento (2) no 20º DAT, indicam redução de consumo acumulado proporcional ao aumento da salinidade C1NR e C1R com 1,45 L.maço⁻¹ e 1,39 L.maço⁻¹, enquanto houve diminuição de CHA nas parcelas não resfriadas de C4NR e C4R, com 1,11 L.maço⁻¹ e 1,04 L.maço⁻¹. Os valores encontrados estão em concordância com outros estudos com o coentro, no mesmo local em diferentes épocas. SILVA et al. (2018) relataram consumo de 1,45 L.maço⁻¹ (no verão) e 0,89 L (no inverno), com DFT, em 24º DAT, haja vista, que os experimentos citados tiveram 24º e 25º DAT, período fenológico de maior consumo hídrico.

A variação do consumo hídrico diário por maço nos dias 7, 10, 13, 16 e 19 DAT de acordo com os tratamentos do experimento (2) se encontra na Figura 5.b), as taxas de consumo linear médio no intervalo de 7º DAT ao 19º DAT foi, em C1 de 12,8 mL.dia⁻¹, em C2 de 15,6 mL.dia⁻¹, em C3 de 13,4 mL.dia⁻¹ e em C4 com a menor taxa de 11,75 mL.dia⁻¹. Os valores indicam a menor taxa de consumo hídrico sob influência do estresse salino crescente entre C1 e C4. Concentrações altas de sais dissolvidos na zona das raízes geram um potencial osmótico mais negativo, reduzindo o potencial hídrico total e afetando o desenvolvimento das culturas, ocasionando menor transpiração pelas plantas à medida que se aumenta a salinidade do meio de cultivo (SILVA et al., 2013).

Quando comparado o consumo hídrico entre as amostras resfriadas e não resfriadas, não houve diferença significativa, considerando 0,05%, na variação das taxas de consumo hídrico no intervalo.

Os dados de produtividade são mostrados nos boxplots da Figura 6³¹, e apresentam diferenças entre a massa seca da parte aérea (MSPA), altura da planta (AP) e massa fresca da parte aérea (MFPA)³², a citar: o aumento das salinidades em C1, C2, C3 e C4 é acompanhado pelo menor valor de MSPA, MFPA e AP nos experimentos (1) e (2) sejam resfriados ou não; A AP e a MFPA apresentaram aumento quando resfriados, exceto em C1 do experimento (2).

Figura 6. Resultados das coletas de massa seca da parte aérea (MSPA) nos experimentos (1) e (2). os valores mostrados no boxplot se referem às medianas .



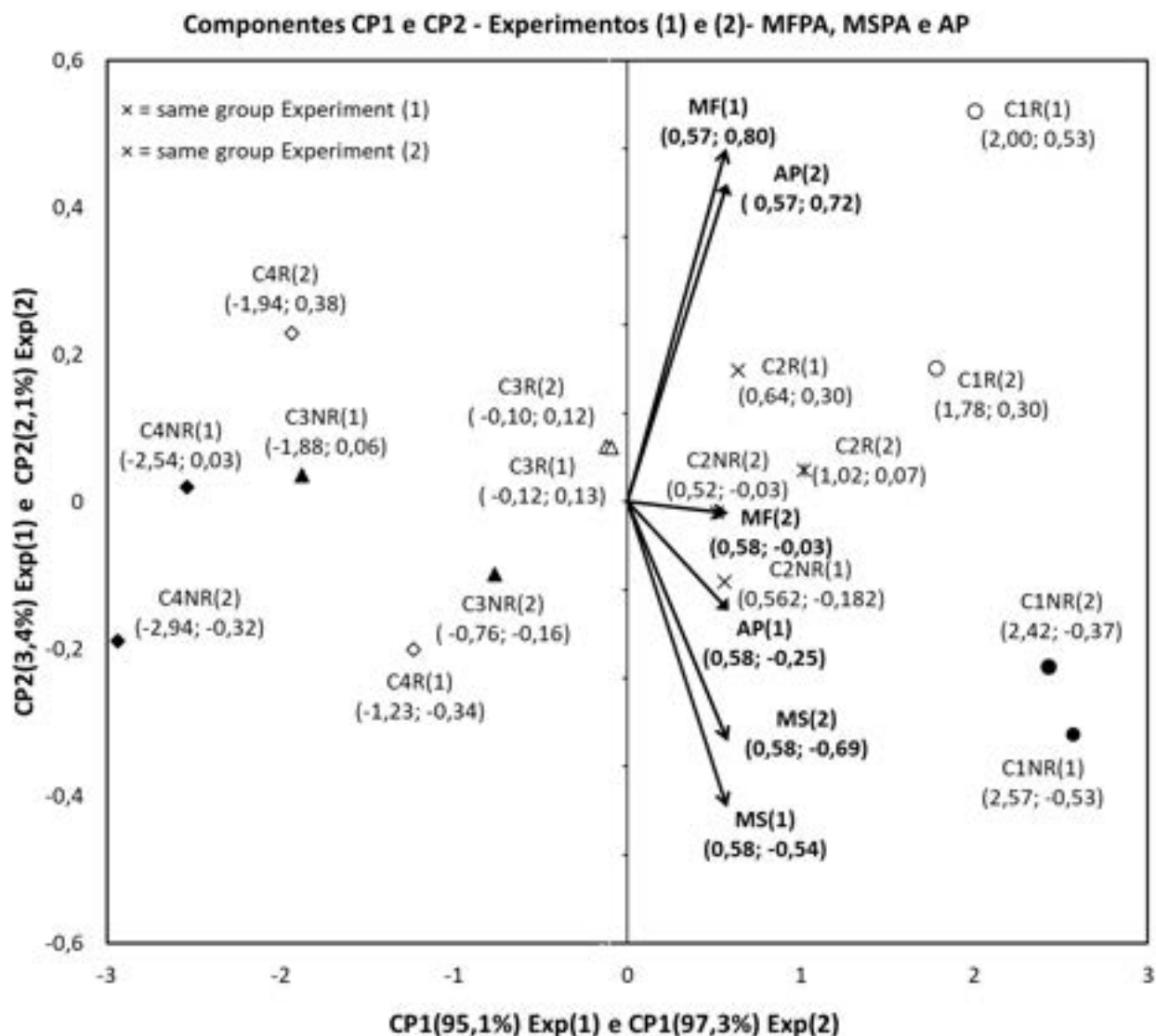
³¹ Os boxplots referentes a massa fresca da parte aérea (MFPA) e Altura da planta (AP) podem ser vistos no APÊNDICE G.

³² No APÊNDICE E podem ser vistas fotografias dos experimentos (1) e (2) antes da colheita.

As variações dos parâmetros MFPA, MSPA e AP foram avaliadas através de um método multivariado com características de covariância entre os grupos na Figura 7 e posteriormente com método estatístico inferencial, na Figura 8, com objetivo de evidenciar ou não diferenças significativas entre as parcelas não resfriadas (NR) e as resfriadas (R).

O resultado das análises dos componentes principais dos experimentos (1), (2) em C1; C2; C3 e C4, (R) ou (NR) , é mostrado na Figura 9, em biplot sobreposto de (1) e (2).

Figura 7. Biplot das componentes principais sobrepostas da ACP nos experimentos (1) e (2) dos tratamentos.



Os resultados das componentes do experimento (1) avaliadas pelo R Core Team (2022), evidenciam a existência de 7 grupos (clusters) nos 8 tratamentos (C1R, C1NR, C2R, C2NR, C3R, C3NR, C4R, C4NR). resultando em contribuições de CP1 (95,1%) e CP2 (3,4%), ou seja, as duas componentes representam 98,5% do comportamento, segundo RENCHER (2002), valores acima de 80% são representativos para análise das covariâncias entre os fatores. Os tratamentos C2R e C2NR formam um só cluster, ou seja, não há variação das componentes MFPA, AP e MSPA.

O tratamento C1NR (controle) e C1R apresentaram covariância positiva, com C1 apresentando covariância positiva, semelhante para MFPA, AP e MSPA. Considerando a covariância de MSPA na componente CP1 em +2,0; +2,57; 0,64; 1,0; -0,12; -0,88; -2,54 e -1,23, respectivamente em C1R, C1NR, C2R; C2NR; C3R; C3NR; C4R e C4NR.

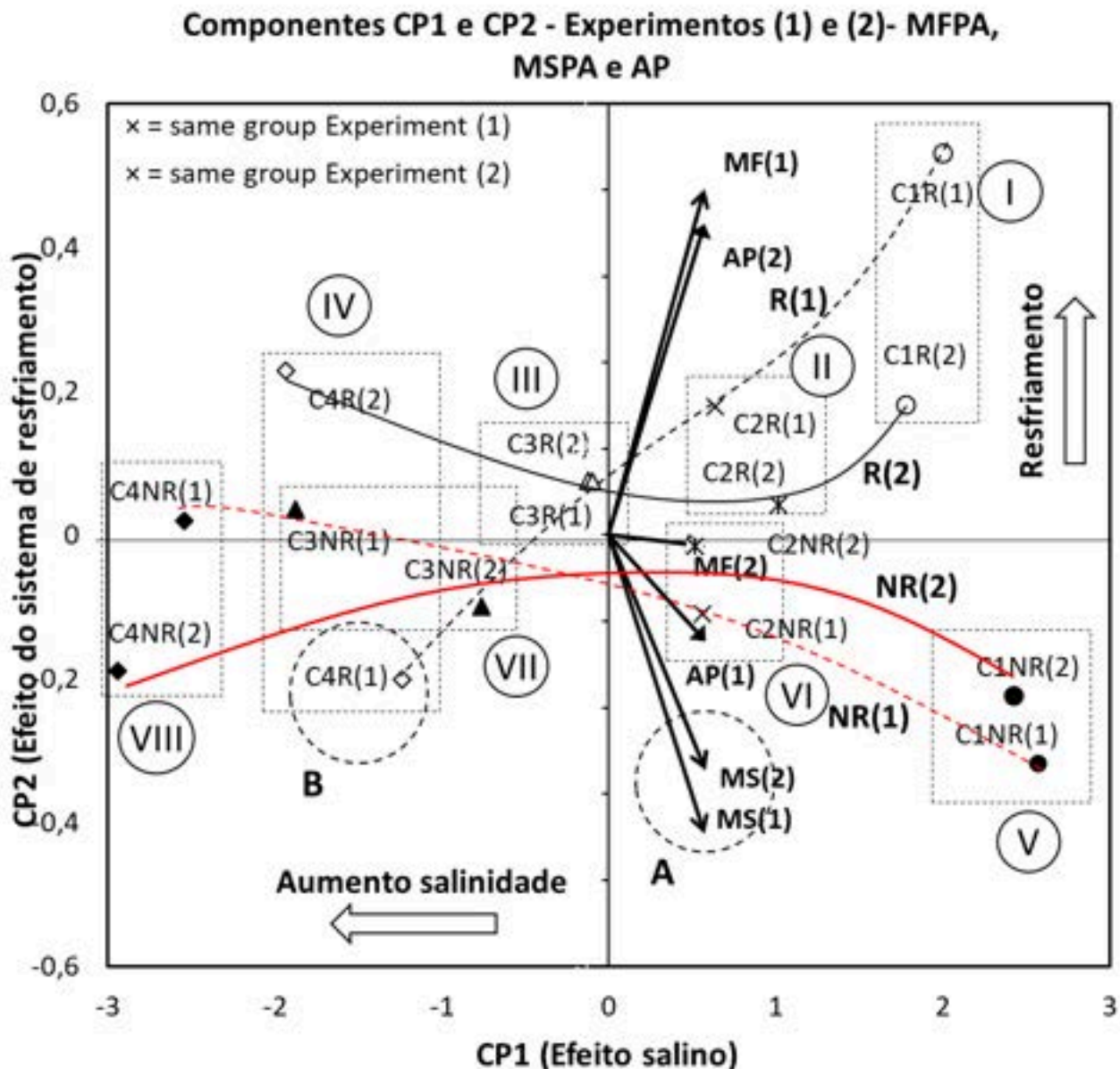
No experimento (2), semelhante ao experimento (1), existem 7 grupos, C2R tem o mesmo agrupamento de C2NR. O resfriamento também não influenciou diferentemente C2, ou seja, como não há incremento das componentes MFPA, AP e MSPA entre C2R e C2NR, pode-se afirmar que o sistema de resfriamento não modificou os parâmetros produtivos em C2.

A componente CP1 contribui com 97,1% e a componente CP2 com (2,1%), totalizando 99,2% das relações entre as variáveis, grande parte da variabilidade dos dados. As covariâncias em CP2 tem baixa representatividade percentual e intervalo de covariância ser de $\pm 0,6$ enquanto CP1 é de $\pm 3,0$, fator cerca de cinco vezes maior que CP2. A avaliação de CP1 com 95,1% e 97,1%, nos experimentos (1) e (2), tem autovetores em CP1 de MFPA, MSPA e AP, em negrito na Figura 9, com magnitudes de: MFPA(1)=+0,57; MFPA(2)=+0,58; MSPA(1)=+0,57; MSPA(2)=+0,57; AP(1)=+0,58; AP(2)= +0,57.

Pode-se afirmar que CP1 se refere às covariâncias provocadas pela salinidade, enquanto CP2 se refere a influência do resfriamento, haja vista que as parcelas submetidas a maiores salinidades apresentam scores negativos e as de menores salinidades, positivas, ou seja, no campo positivo de CP1 se encontram as parcelas C1, C2, C3 e C4 em ordem decrescente de covariância. Quando avaliada a componente CP2, as resfriadas (R) têm scores positivos e as não resfriadas (NR), negativos, indicando que a disposição das parcelas submetidas ao resfriamento se encontram no campo superior de CP2. O comportamento encontrado no biplot pode ser utilizado para determinação dos campos de influência I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII, consequência do resfriamento e salinidade mostrados na Figura 8.³³

³³ Os escores das covariâncias e matrizes dos componentes se encontram no APÊNDICE I.

Figura 8. Campos de aplicação entre salinidade e temperatura na hidroponia na ACP (Análise de componentes principais)



Os valores dos autovetores da massa seca mostrados no detalhe A da Figura 8, tem covariância negativa com relação resfriamento das parcelas C1R(1) campo I, em comparação a C1NR (1), campo V e C1R (2), campo I em comparação a C1NR(2), campo V; A covariância negativa do resfriamento sobre a MSPA, apesar de não esperada, devido ao tratamento C1 ser o controle, menos salino ($0,3 \text{ dSm}^{-1}$) e a diminuição da temperatura em C1R ser da ordem de cerca de 4°C em 78% do período das 6:00-18:00 (Figura 4.b), pode ser justificada através de comportamentos similares aos da literatura de menor obtenção de massa seca em cultivos hidropônicos submetidos a variações de temperatura na RZT (root zone temperature).

AZLIL et. al. (2024) registraram que flutuações de 5°C na temperatura da TZR, causa estresse nas plantas, inibindo o crescimento; NGUYEN (2020), afirma que a combinação de um pré-tratamento da temperatura da zona da raiz (TZR) médio (25 °C) com TZR baixo (15 °C ou 20 °C) ou alto (30 °C ou 35 °C) por um curto período (3 ou 6 dias) aplicado ao coentro hidropônico antes da colheita, reduz a massa seca sob estresse térmico cíclico na TZR.

O comportamento de inversão da covariância de -0,34 em C4R(1) e 0,38 em C4R(2), em CP2, se comparado ao autovetor da massa seca (MSPA) em CP2, de -0,54(1) e -0,69(2), pode ser ocasionado pela dispersão nos dados das amostras ou por um efeito na componente de temperatura (CP2) que acontece com covariâncias de impacto inverso nas variáveis de produtividade, entre os experimentos (1) e (2), provável influência das temperaturas em (1), causando menor massa seca devido ao estresse térmico em C4R(2) com relação a C4R(1) ou causada por outlier em C4R(1), ver figura 6.a). A covariância negativa das parcelas resfriadas (R) sobre a MSPA se apresenta também entre os campos II e VI, III e VII. Em C4R(2) a covariância continua negativa como os outros campos de aplicação.

A consequência do aumento da salinidade na variação dos co-valores em cada tratamento entre resfriados(CP2) e salinidade(CP1) pode ser acompanhado através das linhas de tendência R(1), R(2), NR(1) e NR(2) na Figura 8 e Apêndice H.

A covariância dos autovetores MS(1), MS(2), AP(1), AP(2), MF(1) e MF(2) com relação a CP1 (Salinidade) apresentam as mesmas direções, diferentemente das covariâncias provocadas em CP2 (Resfriamento). O campo de resfriamento I, II, III, IV contribui positivamente com MF(1), devido a amenização das temperaturas médias (T_m) do experimento (1) e AP(2), devido a presença de menor disponibilidade luminosa (L) no experimento (2); enquanto que negativamente com MF(2), devido às menores temperaturas já existentes no experimento (2) e AP(2) devido ao estresse térmico provocado pela variação do próprio resfriamento.

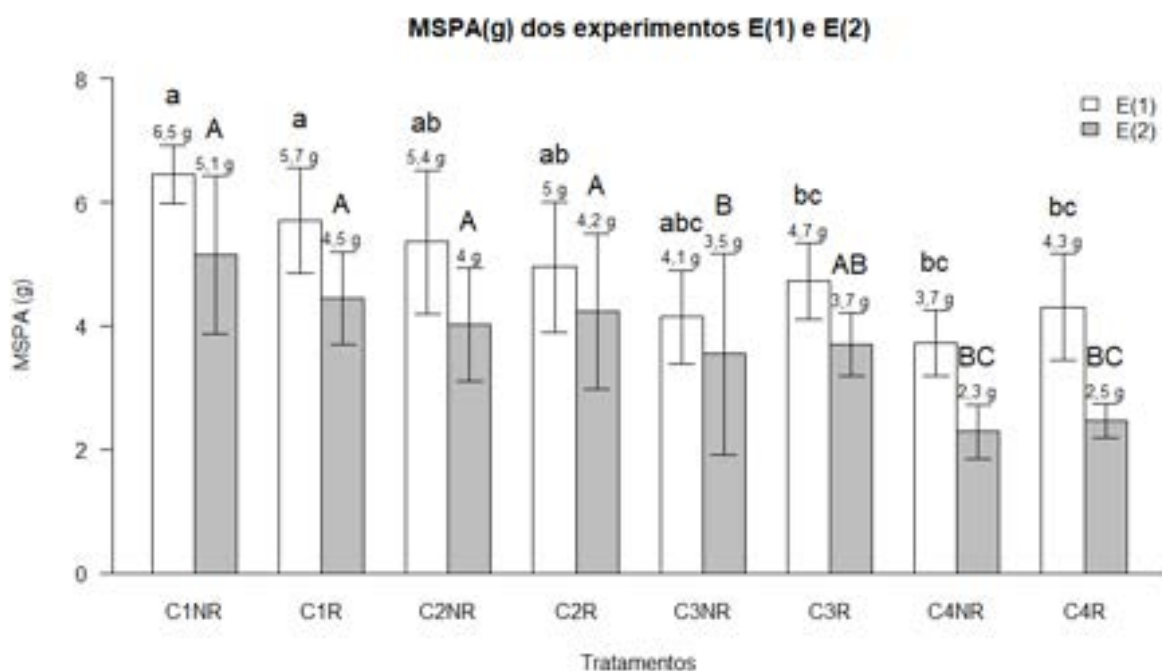
Presume-se haver fatores sobrepostos e distintos abióticos (FA) de estresse térmico provocado pelo experimento; o primeiro de covariância constante e negativa com relação à MSPA provocado pela intermitência do impacto térmico da irrigação com variação da amplitude térmica (A_t), e um segundo com covariância positiva, remediando a influência do aumento da salinidade na ação deletéria a aquisição da massa seca, e relacionado a interferência da amplitude da temperatura média menor (T_m) durante a irrigação, não associado a efeitos diversos (O_{th}), esse efeito pode ser semelhante ao encontrado no mecanismo de fadiga de alto ciclo e baixa intensidade, empregado na

ciência dos materiais (SCHIJVE, 2003; KIM, 2019), para conclusões definitivas torna-se necessário estudos específicos não contemplados no trabalho.

Os resultados de Kruskal-Wallis indicaram significância na variação das medianas dos grupos ($p < 0,05$) no agrupamento C1R e C1NR; C2R e C2NR; C3R e C3NR; C4R e C4NR para MSPA, MFPA e AP, assim foi aplicado teste post hoc de Dunn (1964)³⁴, com objetivo de avaliar a interação entre os grupos.

Os resultados se encontram resumidos na Figura 9 com aplicação dos níveis de significância $p < 0,05$ por Kruskal-wallis nas variáveis MSPA, MFPA e AP, com e sem resfriamento nos experimentos (1) e (2).³⁵ Os algarismos a, b, c nas barras de desvio, se referem aos resultados das significâncias para cada grupo de tratamentos (R) e (NR), nos experimentos (1) e (2). As funções de regressão utilizadas são polinomiais de segunda ordem.

Figura 9. Curvas de regressão de MSPA, MFPA e AP. a) MSPA (1); b)MSPA (2); c) MFPA (1); d) MFPA (2); e) AP (1);f) AP(2). As letras representam a significância dos grupos por Kruskal-Wallis $p < 0,05$, letras iguais significam mesmo grupo de dados.³⁶

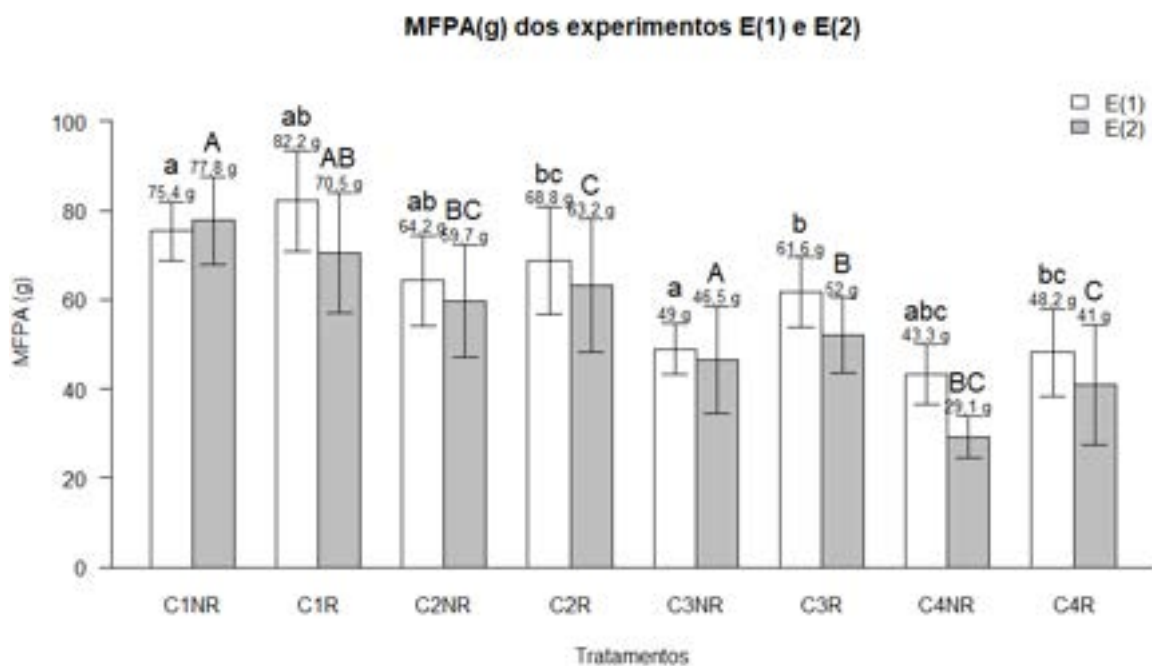


a)

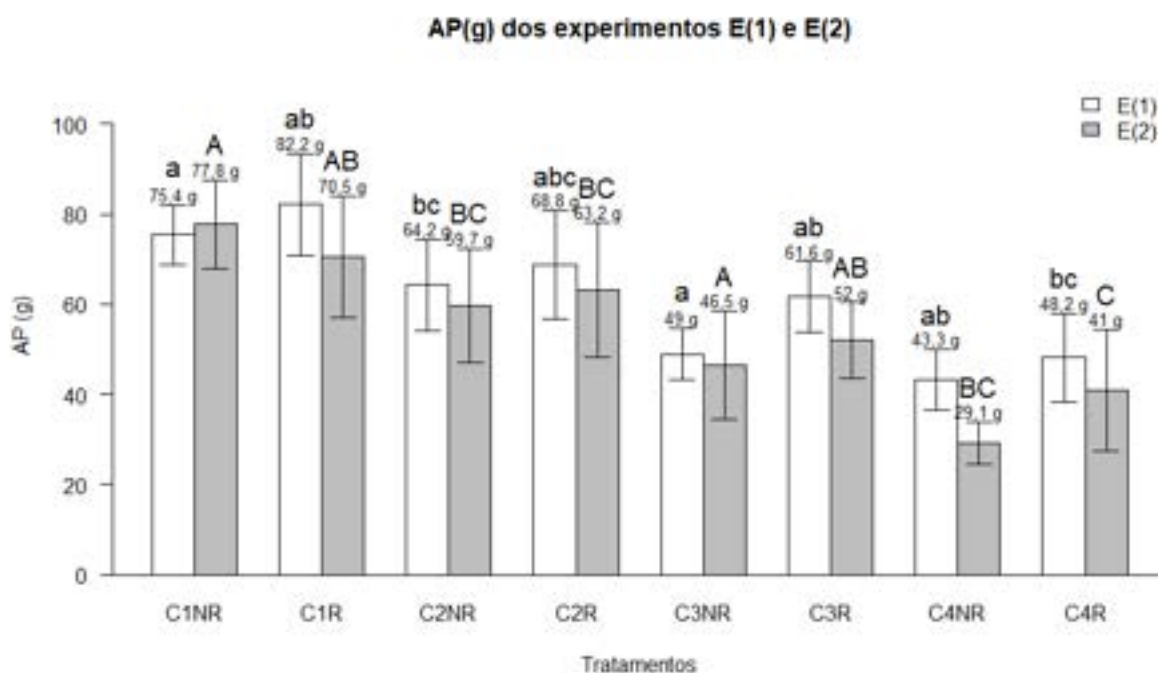
³⁴ O resultados da significância das interações entre os grupos, se encontram no APÊNDICE J

³⁵ As fotos referentes a uma amostra de cada parcela dos experimentos (1) e (2) se encontram no Apêndice F, em ordem dos tratamentos concomitantes à da Figura 8.

³⁶ As curvas de tendência entre os comportamentos (R) e (NR) para cada CE se encontram no APÊNDICE H.



b)



c)

Nos resultados da Figura 9, existem diferenças significativas entre os tratamentos C1 e C4 em todas as variáveis MSPA, MFPA e AP, tanto no experimento (1) quanto no experimento (2).

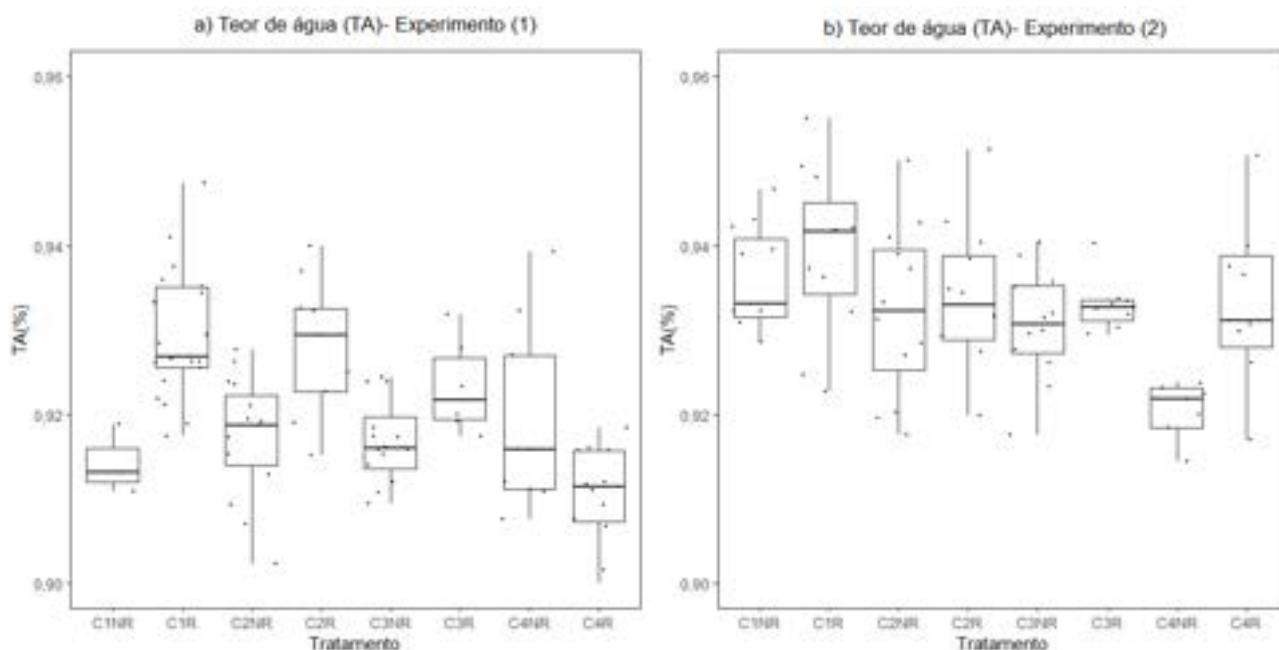
As médias das variáveis MSPA, MFPA e AP apresentaram redução entre (1) e (2). Quando nos referimos ao tratamento C1, foram da ordem de 17% em MSPA, 7% em MFPA e de 5% na AP; e quando nos referimos a C4, foram de 37% em MSPA, 16% em MFPA e de 13% na AP em C4.

A menor produtividade entre os experimentos (1) e (2) foi causada principalmente pela menor disponibilidade de radiação solar global no intervalo do experimento 201,7 W.m² (2), enquanto que no experimento (1) foi de 204,41 W.m². Quando comparados os coeficientes angulares entre o experimento (1) e (2), o experimento (2), apresentou maiores reduções entre C1 e C4.

A redução de produtividade de C4 com relação a C1 foi ocasionada pelo estresse salino, influenciando negativamente os coeficientes angulares das curvas de regressão e proporcional ao aumento de salinidade nos experimentos (1) e (2) individualmente, Figura 10.

Apesar da análise de ACP indicar diferentes covariâncias das variáveis de produtividade de MSPA, MFPA e AP, quando comparadas às parcelas resfriadas (R) com as não resfriadas (NR), os resultados de níveis de significância não indicaram influência do resfriamento em nenhum dos tratamentos (R) com relação aos (NR) internos aos tratamentos, considerando Kruskal-Wallis com $p < 0,05$.

Figura 10. Valores de TA encontrados nos tratamentos (R) e (NR) a) Experimento (1)³⁷ b) Experimento (2)³⁸ b)



Os níveis de significância ocorreram somente entre os tratamentos C1 a C4, devido ao aumento da salinidade sobre a redução no valor das variáveis MSPA, MFPA e AP, mas não significativo entre as parcelas resfriadas e não resfriadas.

³⁷ Kruskal-Wallis, p-value = 1.573e-07, diferenças no APÊNDICE J (AT)

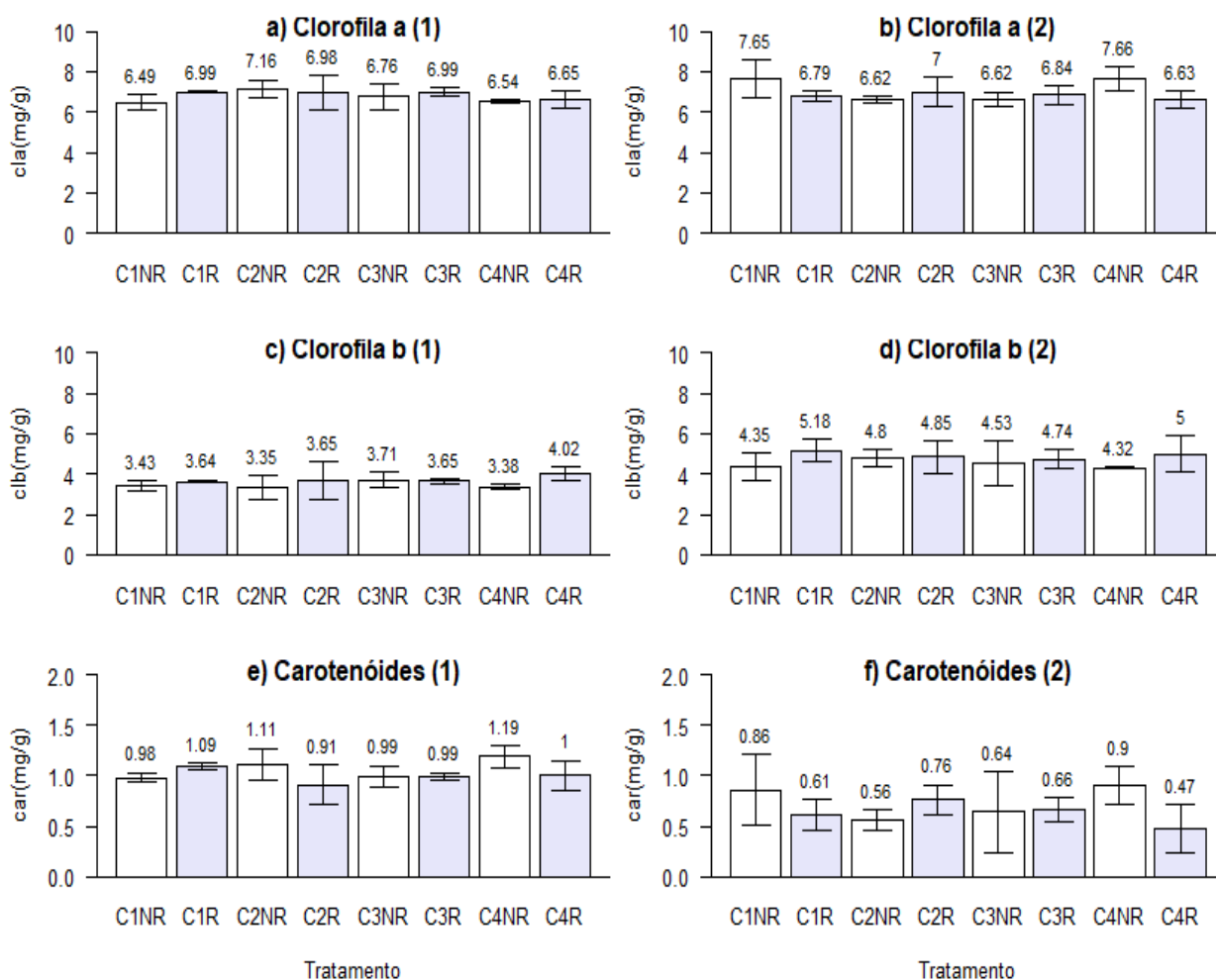
³⁸ Kruskal-Wallis, p-value = 0.07757 (não há diferenças entre os grupos) em (2)

Os resultados dos teores de água (TA) dos experimentos (1) e (2), Figura 14, concluem que não houve diferenças significativas para nenhum dos tratamentos no experimento (2), enquanto no experimento (1) existem diferenças significativas entre C1R e C2NR; C1R e C3NR; C1NR e C4R; C1NR e C4NR; C2R e C4R, ratificando a influência da salinidade no teor de água, Figura 9.a e 9.b).

O resultado alcançado no experimento (2) indica que não houve efeito salino significativo nos teores de água dos tratamentos devido, principalmente, às condições mais amenas no intervalo do experimento (2).

A quantidade de pigmentos fotossintéticos pode indicar estresse salino (PAULUS et al., 2010; PAN et al., 2020), ou ação antioxidante dos carotenoides a salinidade ou temperatura (DAVISON, 2002; POKLUDA et al., 2016). Resultados dos experimentos (1) e (2) mostrados na Figura 11.

Figura 11. massas (mg/g) de clorofila a, clorofila b e carotenoides. a) massas do experimentos (1); b) massas do experimento (2)



A variação nas massas da clorofila b (clb) em mg.g^{-1} de MSPA de $0,8 \text{ mg.g}^{-1}$ (18% em massa) quando comparados os tratamentos C4R com C4NR, não sendo encontrado aumento significativo. As massas dos carotenoides (cr) e clorofila (cla) também não apresentaram variações significativas, com $p < 0,05$, entre as parcelas resfriadas e não resfriadas, ou seja, os resultados não indicam variações. Diante dos resultados, sugere-se mais estudos específicos sobre as variações encontradas nos pigmentos fotossintéticos, variando as formas de resfriamento para vincular causa a efeito em outras condições.

Apesar da não significância estatística do sistema de resfriamento proposto, a busca de formas mais sustentáveis de controle de temperatura dos sistemas hidropônicos, como a das energias passivas, deve ser, diante dos desafios energéticos, premissa nas novas propostas da engenharia agrícola.

4. CONCLUSÃO

O coentro “Verdão” produzido com e sem resfriamento, teve a temperatura da solução nutritiva reduzida entre $2,5^{\circ}\text{C}$ e $5,1^{\circ}\text{C}$ com relação a do ambiente, oportunizando aproveitamento de energias passivas na redução da temperatura da solução nutritiva. A análise por componentes principais CP1, é referente a salinidade, com representação maior que 95,1% e CP2, referente ao resfriamento, maior que 2,1%, nos experimentos (1) e (2). Não houve aumento significativo de produtividade entre as parcelas resfriadas (R) e não resfriadas (NR) dentro dos tratamentos com $p < 0,05$ quando analisado por Kruskal-Wallis. A salinidade influenciou negativamente as médias de C1 e C4 nas variáveis, MSPA, MFPA e AP, em relação ao controle C1. Torna-se necessário ensaios em condições de temperaturas diversas para teorização da influência do sistema de resfriamento proposto.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece a contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical e da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), mediante o Núcleo de Engenharia, Água e Solo (NEAS) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), por prover o suporte estrutural para conduzir o presente estudo.

6. REFERÊNCIAS

ALVES, M. S.; SOARES, T. M.; SILVA, L. T.; FERNANDES, J. P.; OLIVEIRA, M. L. A.; PAZ, V. P. S. Estratégias de uso de água salobra na produção de alface em hidroponia NFT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p. 491–498, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500009>

PÉREZ-GÁLVEZ, A.; VIERA, I.; ROCA, M. Carotenoids and Chlorophylls as Antioxidants. **Antioxidants (Basel)**, v.9, n.6, p. 505, June, 2020. DOI: 10.3390/antiox9060505

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v.55, p. 373–399, 2004. DOI: 10.1146/annu.rev.arplant.55.031903.141701

LACHHEB, A.; MAROUANI, R.; MAHAMAT, C.; SKOURI, S.; BOUADILA, S. Fostering Sustainability through the Integration of Renewable Energy in an Agricultural Hydroponic Greenhouse. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v.14, n.2, p. 13398-13407, April, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.6939>

AZLIL, W. F.; ROSDI, N. S. I.; AHMAD, A. Evaluating temperature variation of nutrient solution in Nutrient Film Technique (NFT) cooling system for temperate vegetable. **Journal of Tropical Resources and Sustainable Science (JTRSS)**, v.12, n.1, p. 47–50, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47253/jtrss.v12i1.1364>

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. DE A.; WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v.44, n.3, p. 453–460, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300011>

BESSA, LAYARA; MOREIRA, MARIALVA; SILVA, FABIANO; SEHNEN, CLENILSO; VITORINO, LUCIANA. Growth, nutrient concentration and principal component analysis of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) seedlings grown in nutrient solution. **Australian Journal of Crop Science**, v.10, p.425-433, 2016. DOI: 10.21475/ajcs.2016.10.03.p7477

CAVALCANTE, A. R.; SANTOS J. A.; GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; PAZ, V. P. S. Produção e composição mineral do coentro em sistema hidropônico de baixo custo. **Irriga**, v.21,n.4, p. 685–696, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n4p685-696>

CRESPO, E. C.; CHULIM, Á. C.; ROSALES, L. J. L.; BENÍTEZ, G. A.; PINEDA, J. P. ;
MONTROYA, R. B. Extracción de N-P-K en *Coriandrum sativum* 'Pakistan' en hidroponia.
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, v.8, n.2, p. 355–367, 2017. DOI:
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.56>

DAVISON, P.A.; HUNTER, C.N.; HORTON, P. Overexpression of beta-carotene
hydroxylase enhances stress tolerance in *Arabidopsis*. **Nature**, v.418, p.203–206, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature00861>

FAHAD, S.; BAJWA, ALI; NAZIR, USMA; ANJUM, S.; FAROOQ, AYESHA; ZOHAIB,
ALI; SADIA, SEHRISH; NASIM, WAJID; ADKINS, STEVE; SAUD, S.; IHSAN, Z.
;ALHARBY, HESHAM; WU, CHAO; WANG, DEPENG; HUANG, JIANLIANG .Crop
Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options,
Frontiers in Plant Science, v. 8, n. 1147, 2017. DOI:
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>

FARVARDIN, M.; TAKI, M.; GORJIAN, S.; SHABANI, E.; SOSA-SAVEDRA, J.C.
Assessing the Physical and Environmental Aspects of Greenhouse Cultivation: A
Comprehensive Review of Conventional and Hydroponic Methods. **Sustainability**, v.16,
n. 1273, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031273>

FREITAS, F. T. O.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G.; RAFAEL, M. R. S. Cultivo de alface
sob intervalos de recirculações das soluções nutritivas em sistemas hidropônicos usando
água salobra. **Irriga , Edição Especial – Nordeste**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 67-96, junho,
2021. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n1p67-96>

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. Cultivo hidropônico de
plantas. **Boletim Técnico**, Campinas: Instituto Agronômico, v.180, p.52, 1999. Acesso
em 15/12/2024. http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/hidroponiap3/index.htm

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S.; MAHMUD,
J.; FUJITA, M., FOTOPOULOS V. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in
Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator.
Antioxidants, v.9, n.8, p. 681, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>

HOYOUNG, KIM; KIM I.; SEO, W. ; KO, J. Smart Farm for Hydroponic Cultivation Using
Integrated Renewable Energy Systems. in **IEEE Sensors Journal**, v.4, n.21, p.
35386-35393, 2024. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3449344

KIM, HO SUNG. Prediction of S-N curves at various stress ratios for structural materials, **Procedia Structural Integrity**, v.19, p. 472-481, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.051>

LENARDIS, A.; FUENTE, E. L.; GIL, A.; TUBÍA, A. Response of Coriander (*Coriandrum sativum* L.) to Nitrogen Availability. **Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants**, v.7, n.4, p. 47–58, 2000. DOI: https://doi.org/10.1300/J044v07n04_06

LICHTENTHALER, HARTMUT K.; BUSCHMANN, CLAUS. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, v.4, n.1, November, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>

LUZ, J. M. Q.; ANDRADE, L. V. de; DIAS, F. F.; SILVA, M. A. D.; HABER, L. L.; OLIVEIRA, R. C. de. Produção hidropônica de coentro e salsa cressa sob concentrações de solução nutritiva e posições das plantas nos perfis hidropônicos . **Bioscience Journal**, Uberlândia, MG, v. 28, n. 4, p. 589–597, 2012. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/12544>. Acesso em: 15 dec. 2024.

MADUGUNDU, RANGASWAMY; AL-GAADI, K.A.; TOLA, ELKAMIL; PATIL, V.C.; SIGRIMIS, N. The Impact of Salinity and Nutrient Regimes on the Agro-Morphological Traits and Water Use Efficiency of Tomato under Hydroponic Conditions. **Applied Sciences**, v.13. p.9564, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179564>

MARUTANI Y, YAMAUCHI Y, KIMURA Y, MIZUTANI M, SUGIMOTO Y. Damage to photosystem II due to heat stress without light-driven electron flow: involvement of enhanced introduction of reducing power into thylakoid membranes. **Planta**, v.236, n.2 p.753-761, Agosto de 2022. DOI: 10.1007/s00425-012-1647-5

NISAR, M.; MAHMOOD, R.; TAYYAB, S.; ANEES, M; NADEEM, F; BIBI, S; WASEEM, F.; AHMED, N; LI, J; SONG, Z. Comparative efficacy of non-electric cooling techniques to reduce nutrient solution temperature for the sustainable cultivation of summer vegetables in open-air hydroponics. **Frontiers of Plant Science**, v.1, n.15, p.134064, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1340641

NGUYEN, D.T.P.; LU, N.; KAGAWA, N.; KITAYAMA, M.; TAKAGAKI, M. Short-Term Root-Zone Temperature Treatment Enhanced the Accumulation of Secondary

Metabolites of Hydroponic Coriander (*Coriandrum sativum* L.) grown in a Plant Factory. **Agronomy**, v.10, p.413, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10030413>

PAN, S.; KONG, Y.; CHEN, C.; PANG, Z.; WANG, J. Optimization of the utilization of deep borehole heat exchangers. **Geothermal Energy**, v.8, n.1, p.6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40517-020-0161-4>

PAULUS, D.; DOURADO, N.; FRIZZONE, J. A.; SOARES, T. M. Produção e indicadores fisiológicos de alface sob hidroponia com água salina. **Horticultura Brasileira**, v.28 n.1, p. 29–35, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000100006>

PESSOA, U. C. M. Uso de águas subterrâneas salobras do semiárido pernambucano para produção de coentro em sistema hidropônico NFT. Orientador: ênio Farias de França e Silva, **Master Thesis (Mestrado em Engenharia agrícola)**, Universidade Federal Rural de Pernambuco UFPE, 2020. Acesso em 15/12/2024, 17:30: http://pgea.ufrpe.br/sites/ww3.pgea.ufrpe.br/files/documentos/dissertacao_uriel_calisto_moura_pessoa.pdf.pdf

RENCHER, A.C. Methods of Multivariate Analysis. **A JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION**, 2ed. , p.727, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118391686>

SANTOS, C.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G.; OLIVEIRA, M. G. B.;GHEYI, H. R. Uso de água salobra no cultivo hidropônico do coentro com temperatura da solução nutritiva controlada. **Proceedings of the Seminário de Pesquisa em Engenharia de Água e Solo**, Cruz das Almas, Brasil, 2019.

SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. **International Journal of Fatigue**. v. 25, n. 8, p. 679–702, 2003. DOI:10.1016/S0142-1123(03)00051-3

SIDDIQUI, M. H.; SAUD A.; MUTAHHAR Y.; AL-KHAISHANY, M.; AL-QUTAMI, A.; HAYSSAM M.; AL-WHAIBI M.; MONA S.; HESHAM F. Mitigation of adverse effects of heat stress on *Vicia faba* by exogenous application of magnesium. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 7, p. 1393-1401, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.09.022>.

SILVA, M. G.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, M. G. B.; SANTOS, C. C. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different

temperatures of the nutrient solution. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n.6, p. 674–683, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n6p674-683/2020>.

SILVA, M. G.; SILVA, P. C. C.; COVA, A. M. W.; GHEYI, H. R.; SOARES, T. M. Experiências com o uso de águas salobras em hidroponia no Nordeste brasileiro. In **Cerqueira, P. R. S.**, 2022.

SILVA, M. G.; GHEYI, H. R.; LESQUEVES, L.; COSTA, P. T.; SANTOS, M. R.; ANDRADE, L.; SANTOS, T. S. Plant density to compensate for coriander production losses caused by isolated and/or combined effects of salt and root-zone temperature stresses. **Water resources and irrigation management- WRIM**, v.13 , n. 3, p.32-59, 2024. DOI: <https://doi.org/10.19149/wrim.v13i1-3.3582>

SILVA, M. G.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, M. G.; SANTOS, C. C. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different temperatures of the nutrient solution. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 6, p. 674-683, November, 2020. DOI: [10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n6p674-683/2020](https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n6p674-683/2020)

SILVA, M. G.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; SANTOS, C.; OLIVEIRA, M. Hydroponic cultivation of coriander intercropped with rocket subjected to saline and thermal stresses in the root-zone. **Revista Ceres**. v.69, p. 148-157, 2022. DOI: [10.1590/0034-737x202269020004](https://doi.org/10.1590/0034-737x202269020004)

SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. D. S.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; SANTANA, G. D. O.; PINHO, J. D. S. Growth, production and water consumption of coriander in hydroponic system using brackish waters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 8, p. 547-552, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p547-552>

SINGH, S. K.; GUPTA, G.; PATIL, A. K.; DWIVEDI, P. N.; PATHAK, P. K.; KAUTKAR, S.; SATPUTE, A. N. Climate-smart hydroponic chamber for efficient green fodder production under resource deficit conditions of semi-arid region. **Journal of Plant Nutrition**, v.47, n.17, p. 2799–2810, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2369067>

SOBHANI, Z.; MOHTASHAMI, L.; AMIRI, M.S.; RAMEZANI, M.; EMAMI, S.A.; SIMAL-GANDARA, J. Ethnobotanical and phytochemical aspects of the edible herb *Coriandrum sativum*. **Journal of Food Science**, v.87, n.4, p. 1386–1422, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16085>

SOUZA, V. V. S.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G. Resfriamento de solução nutritiva hidropônica usando água como fluido térmico. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, **Programa de pós-graduação em Engenharia agrícola**, 2024. (NÃO PUBLICADO).

ZELJKOVIĆ, S. C.; AUCIQUE-PEREZ C. E.; NIKOLA, S.; NURIA, D. Optimizing growing conditions for hydroponic farming of selected medicinal and aromatic plants. **Food Chemistry**, v.375, n.131845, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131845>

Considerações Finais

Para melhorias futuras complementares ao trabalho, sugere-se aplicação do método de resfriamento em culturas com menor tolerância a temperaturas altas, como a alface, com o objetivo de avaliar a eficiência do sistema de resfriamento.

A manobra de retirada da água dos canais durante o período noturno pode ser minimizada nas aplicações práticas com um só canal de resfriamento, abertura de válvula de enchimento e acionamento automático da bomba, no ambiente de pesquisa foram necessários 8 canais isolados.

O canal subterrâneo pode ser substituído, caso o reservatório de solução nutritiva seja colocado no interior de uma caixa com água de resfriamento, esse volume maior de água externo ao reservatório servirá como fonte fria durante os períodos quentes do dia, recebendo calor. O volume pode ser calculado para absorver o calor da solução nutritiva e transferir para o ambiente durante a noite.

Sugere-se pesquisas futuras quanto a influência das variações das temperaturas da irrigação hidropônica, avaliando se existe estresse térmico por causa da amplitude e do número de ciclos intermitentes em outros períodos do ano.

Sugere-se incremento da fonte fria através da inclusão de pequena torre de resfriamento no reservatório da fonte fria (duto sobre a caixa de água quente ou fria), com o objetivo de utilizar outro mecanismo de troca térmica (evaporativa) para redução da temperatura da fonte fria, conveniente em locais com umidade relativa do ar abaixo de 70%.

O mapeamento dos perfis das variações das temperaturas nos ciclos podem nortear soluções de resfriamento que atuem somente quando as temperaturas excederem a temperatura referência de estresse térmico, reduzindo o gasto energético do sistema.

Como uma das fontes de calor dos sistemas hidropônicos provêm da absorção de calor através do efeito estufa no interior das canaletas, sugere-se estudos na mudança da forma dos canais com o objetivo de proteger a zona de raiz das temperaturas do interior da canaleta, soluções como as de mudança de forma ou inserção de aletas intermediárias com direcionamento do fluxo de calor do interior para os furos das canaletas.

Por fim, percebe-se que a utilização de técnicas de energia passiva necessitam ainda de muitas pesquisas de aplicações em diversas áreas, inclusive hidroponia, com o objetivo de aumentar a eficiência dos sistemas de cultivo.

APÊNDICES

APÊNDICE A. DETALHAMENTO MONTAGEM EXPERIMENTAL

Figura A1. a) Shield SD card e Módulo RTC DS3231; b) Arduino Mega 2560 R3; c) Temporizador analógico (G-light TMA-BR-10-3B) d) Sensor de temperatura DS18B20; e) Sensor de umidade e temperatura DHT22; f) Protoboard de acionamento e sinalização; g) Bomba centrífuga de 34W, 127 V; h) relé de acionamento 5V; i) Sensor DSB18S20 encapsulado e j) Protoboard de acionamento dos relés.

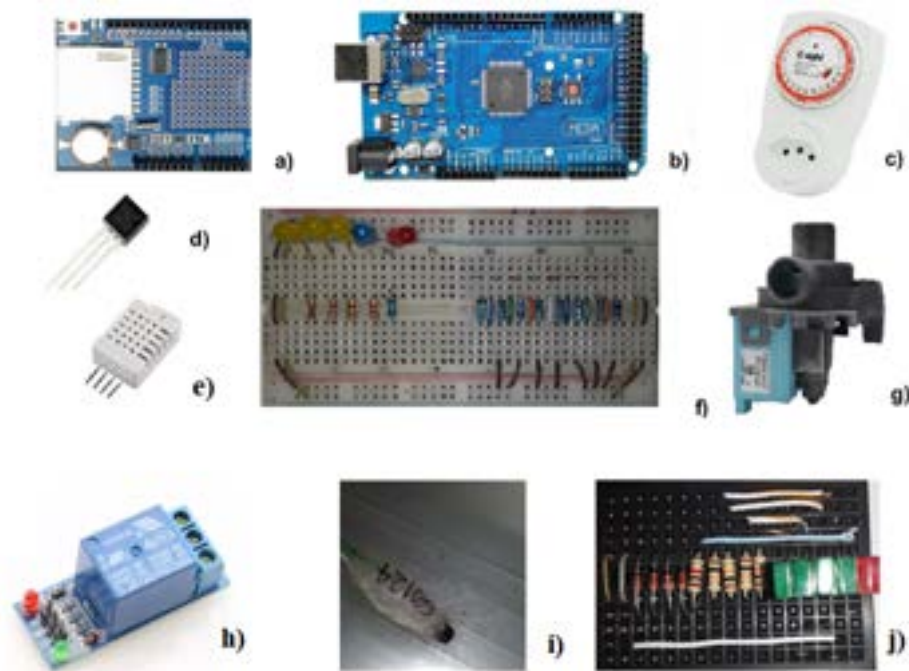


Figura A.2. a) Reservatórios de solução nutritiva para parcelas e reservatórios de água fria de 2000 L; b) Reservatório intermediário de água aquecida.



a)



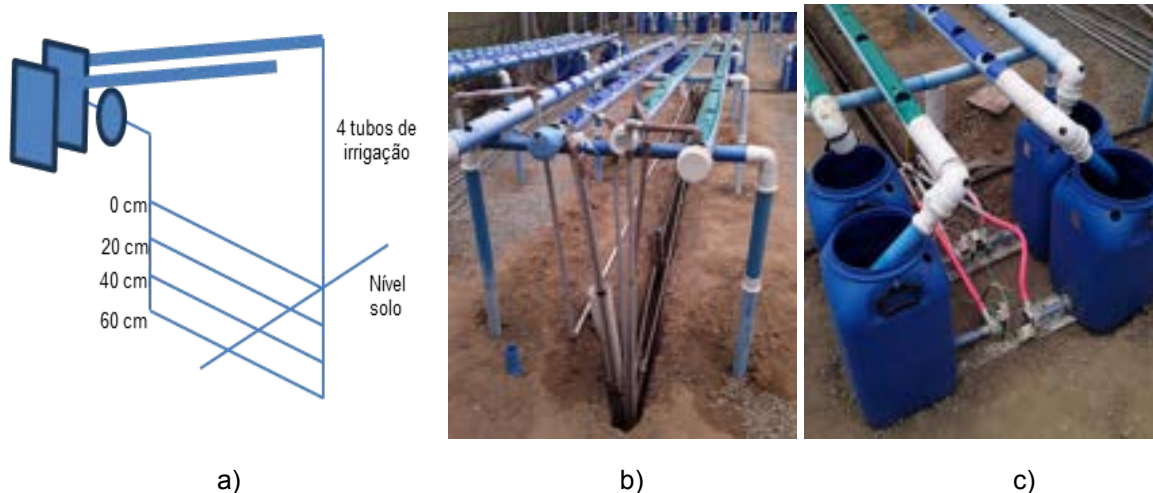
b)

APÊNDICE B. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS PRELIMINARES

B.1) Experimento preliminar 01 (Permutador geotérmico)

Foi ensaiado um permutador linear horizontal de 5,5m, feito pelo mesmo tubo de reciclo enterrado com reposição do mesmo solo da escavação (Latossolo amarelo distrocoeso). A escavação foi feita no centro das parcelas, abaixo das canaletas hidropônicas. Durante o período de 15/01/2024 até 28/01/2024 foram postos em teste quatro trocadores de calor composto de tubos de PVC ½ horizontais de passe único e enterrados a profundidades de 0 cm(superfície), 20 cm, 40 cm e 60 cm como Figura B1.

Figura B.1. a) Croqui do experimento; b) Canal escavado e canaletas; c) Sistema de bombeamento com reservatórios e sem reciclos



Foram utilizados quatro tubos de irrigação azuis, de 75 mm (Figura B.1.b). Foi avaliada a eficiência de uma proposta do uso da geotermia para rebaixamento da temperatura da solução nutritiva. Foram utilizadas 04 sondas de solo com medições de temperatura (DS18B20), 01 instrumento de medição de temperatura e umidade do ar (DHT22) e outros 16 sensores nos fluidos de reciclo, totalizando 33 sensores de temperatura no experimento.

B.2) Experimento preliminar 02 (Geotermia com molhamento e cobertura)

Feito durante o período de 16/02/2024 até 19/02/2024. A partir do experimento preliminar 1 foi feito molhamento da superfície entre os dias 09/02 a

15/02 com objetivo de estabilização da umidade na subsuperfície 5 cm de profundidade.

No dia 16/02/2024. Adicionou-se uma cobertura plástica VINIL 150 micrometros branca com cor preta em verso a 20 cm da superfície do solo com área igual à ocupada pelos suporte do conjunto de quatro canaletas (1 m de largura x 6,0 m de comprimento), com o objetivo de minimizar a incidência de radiação vertical (Figura B.2). O sistema de molhamento foi composto por reservatório de 50 L e quatro trechos de mangueira de irrigação de irrigação perfuradas a cada 0,4 m e de mesma distância entre si, para medição da umidade foi utilizado um sensor de umidade capacitivo Capacitive soil moisture sensor V2.0, responsável pela medição de umidade subsuperficial a 5 cm de profundidade.

A instrumentação do primeiro experimento foi mantida com os 33 sensores de temperatura da solução e solo nas três profundidades.

Figura B2. Ensaio com saturação do solo e medição das temperaturas nas profundidades de 0,2, 40 e 60 cm, sem cobertura plástica B2 a), b) e c); e com a cobertura plástica B2 d), e) e f).

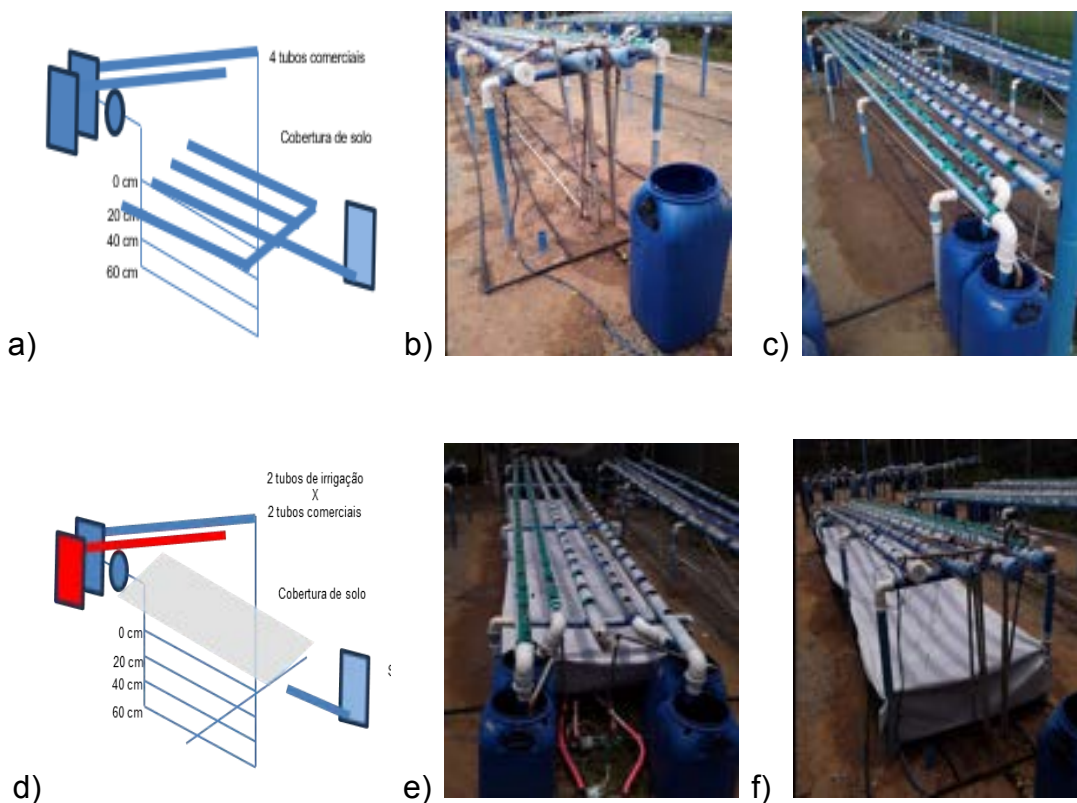
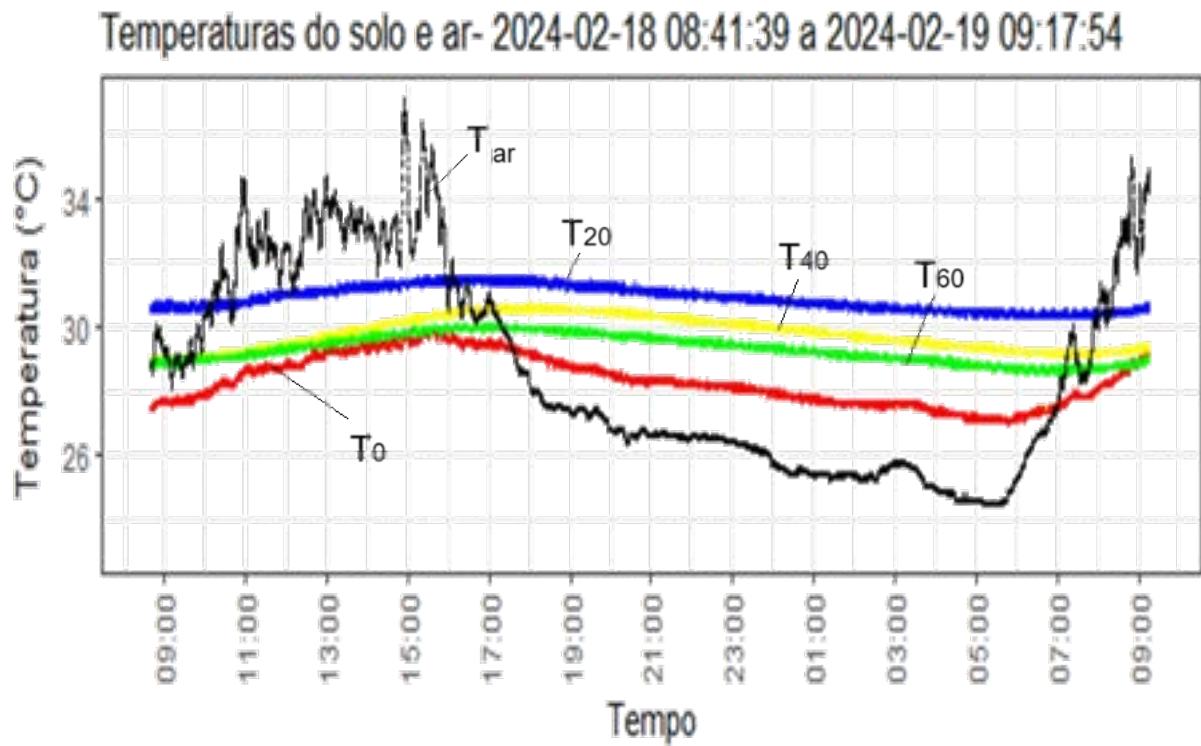


Figura B3. Resultados das medições das temperaturas nas quatro profundidades em solo superficialmente saturado, após a cobertura plástica. T₀ (0,5 cm); T₂₀(20 cm); T₄₀(40 cm) e T₆₀ (60 cm).



B.3) Experimento preliminar 03 (Canal de resfriamento)

A avaliação da redução de temperatura obtida através dos métodos aplicados em B.1 e B.2 sugeriram baixa eficácia em rebaixamento da temperatura para aplicação devido a alta temperatura da fonte fria (29°C) em solo.

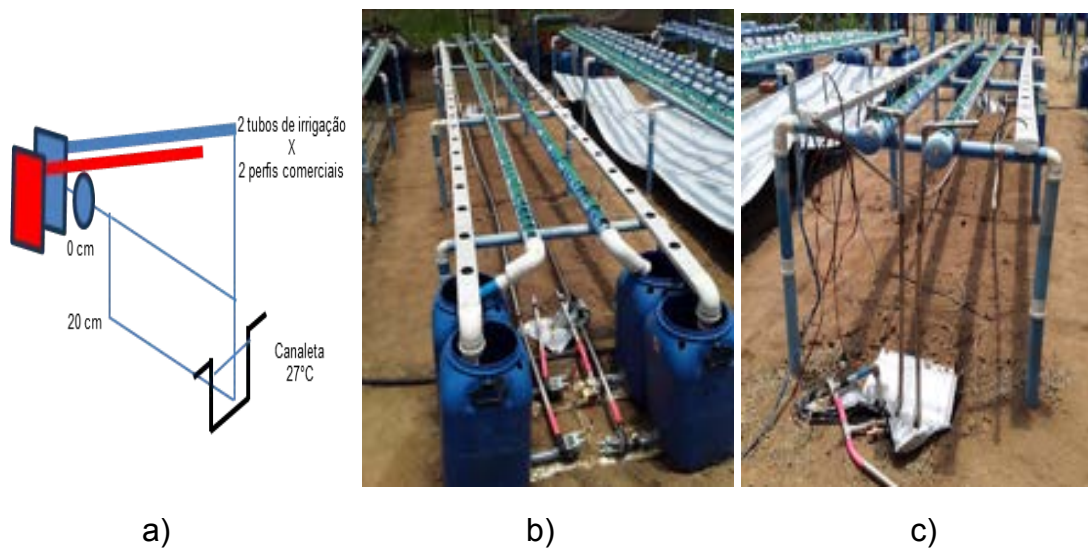
Procedeu-se com identificação de outras fontes frias disponíveis na casa de vegetação, sendo identificado valores de temperatura da ordem de 27 °C, do ambiente, durante o período noturno, somado ao tempo de resfriamento de 12 horas (18:00 as 6:00 h) as temperaturas dos reservatórios expostos a essa ambiente atingiram equilíbrio.

Como a água tem calor específico³⁹ da ordem de 4,184 J/(g °C), procedeu-se, em 20/02/2023 com escavação de canaleta molhada com dimensões de 40 cm x 20 cm (40 cm no ponto de drenagem) e comprimento de 5.5 m, com o objetivo de utilizar fonte fria de água exposta à atmosfera em dia anterior, como absorvedor de calor no período diário posterior.

³⁹ Calor específico: É a quantidade de calor sensível cedida ou recebida por unidade de massa ou de volume de um solo quando este varia a temperatura em 1°C.

O volume de água foi calculado em função da quantidade de solução nutritiva que sofre recirculação durante o período com temperaturas acima de 30°C , comumente das 10:30 às 16:30 (6 horas). A canaleta recebeu tampa de Poliestireno (5 cm de espessura), coberta com 2 cm com o próprio solo retirado da canaleta. (Figura B.4)

Figura B4. Experimento preliminar com canaleta preenchida com água resfriada.



Foram utilizados 2 tubos comerciais, durante o período de 26/02/2024 a 06/03/2024 em 2 canais de cultivo comerciais e duas canaletas de tubo de irrigação de 75 mm. Com vazões de reciclo de 2,5 L/min, 2,4 L/min, 2,5 L/m e 2,6 L/min respectivamente, as bombas foram montadas sem retorno de fluxo.

As canaletas receberam instrumentação com 3 instrumentos de medição de temperatura DS1820 cada, a citar: Temperatura do fluido na descarga da bomba (T_1), temperatura do fluido no início da canaleta (t_2) e temperatura do fluido no final da canaleta (T_3), temperatura do ar (T_{ar}) e umidade do ar (U_a). O solo não foi submetido a molhamento, permanecendo com umidade relativa residual de 17 % a 5 cm de profundidade.

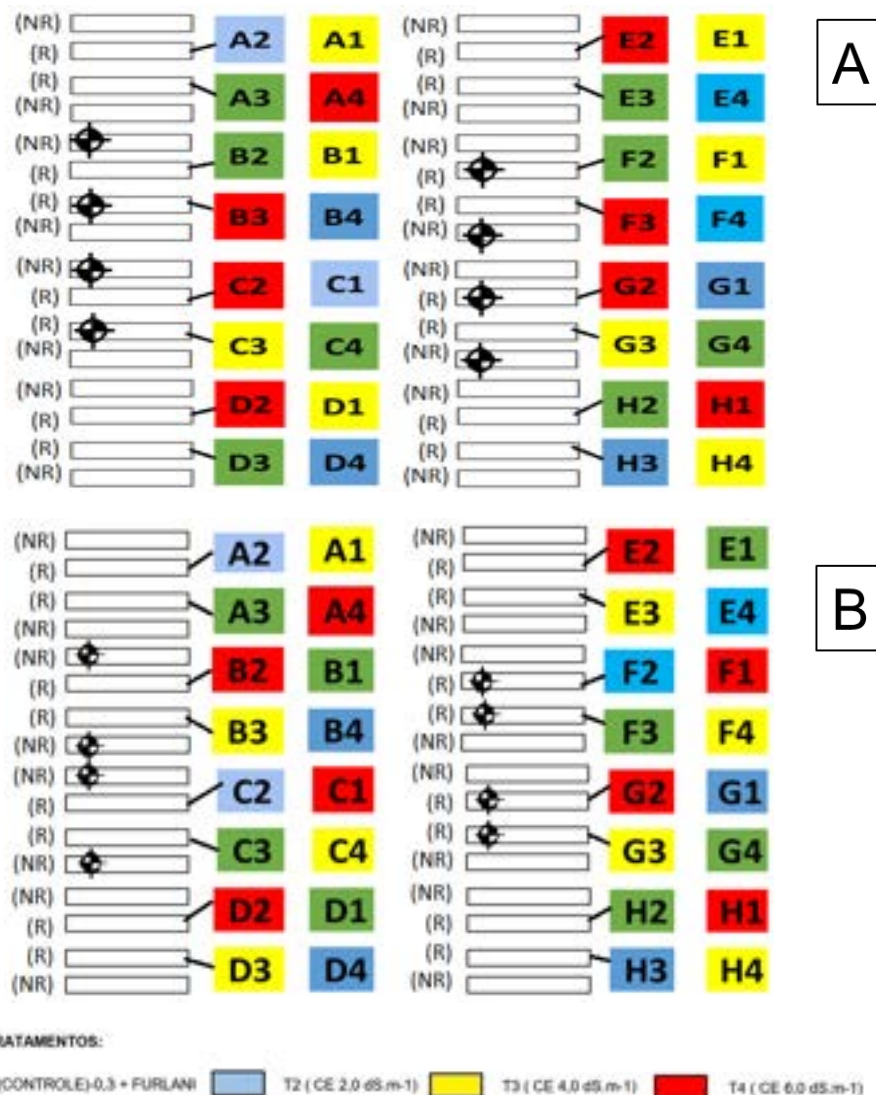
APÊNDICE C. TRATAMENTOS NOS EXPERIMENTOS (1) E (2)

Tabela C.1. Tratamentos utilizados nos Experimentos I, II e disposição das parcelas maio e junho de 2024

Experimento I- Outono-maio		Experimento II-Outono-junho	
Tratamento	Parcelas	Tratamento	Parcelas
C1NR (testemunha)	G4	C1NR (testemunha)	B1,D1,E1,G4
C1R	A3,B2,C3,D3,E3,F2,H2	C1R	A3,C3,F3,H2
C2NR	B4,D4,E4,F4,G1	C2NR	B4,D4,E4,G1
C2R	A2,C2,H3	C2R	A2,C2,F2,H3
C3NR	A4,C4,D1,E1,F1,H4	C3NR	A1,C4,F4,H4
C3R	B3,G3	C3R	B3,D3,E3,G3
C4NR	A1,B1,C1,H1	C4NR	A4,C1,F1,H1
C4R	D2,E2,F3,G2	C4R	B2,D2,E2,G2

C1NR-Tratamento em condição não salina e não resfriada ;C2NR, C3NR e C4NR- Tratamentos em condição salina não resfriados; C1R-Tratamento em condição não salina e resfriada; C2R, C3R e C4R- Tratamentos em condição salina e resfriados;

Figura C.1. Distribuição dos tratamentos nas parcelas. a) Experimento 01; b) Experimento 02.



APÊNDICE D. VARIAÇÕES DE CE E PH DOS TRATAMENTOS

Figura D.1) Variação das CEs para o experimento (2), C1R e C1NR, C2R e C2NR, C3R e C3NR, C4R e C4NR

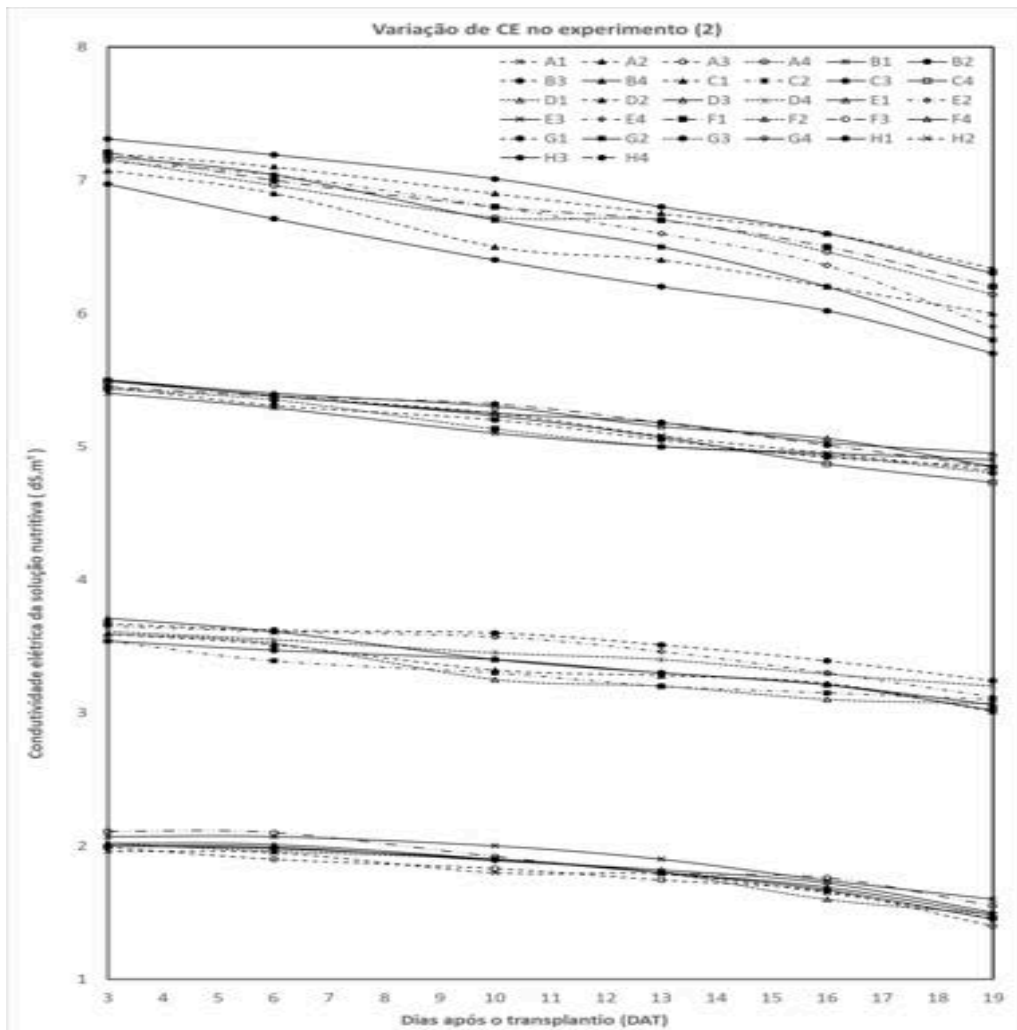
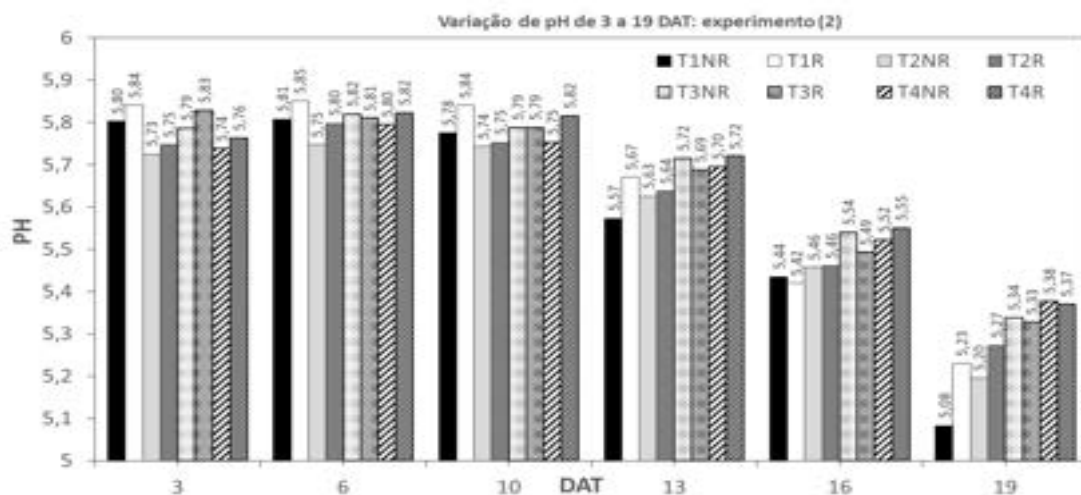


Figura D.2) Variação do pH (médias) nas soluções nutritivas nos tratamentos C1R,C1NR, C2R,C2NR, C3R,C3NR, C4R e C4NR, no experimento (2). * Escala entre 5.0 pH e 6.0 pH.



APÊNDICE E. REGISTRO FOTOGRÁFICO COLHEITA (1) e (2) -20 DAT

Figura E.1. a) Fotografias do sistema em cultivo em 22 de maio (experimento 1) e b) Dia 16 de junho de 2024 (experimento 2), e sintomas visuais do dia 8 DAT. experimento (1) e (2) respectivamente



A



B



Observação: A análise de sintomas visuais indicou entre o 8° e 9° DAT, nos tratamentos T3 e T4, a presença de folhas velhas sintomáticas (queima dos bordos foliares) devido ao efeito salino, sintoma desapareceu a partir do 14° DAT indicando aclimação do cultivo, em ambos experimentos, mais acentuada no experimento (1).

APÊNDICE F. FOTOGRAFIAS REFERENTES A UMA AMOSTRA DE (1) e (2).

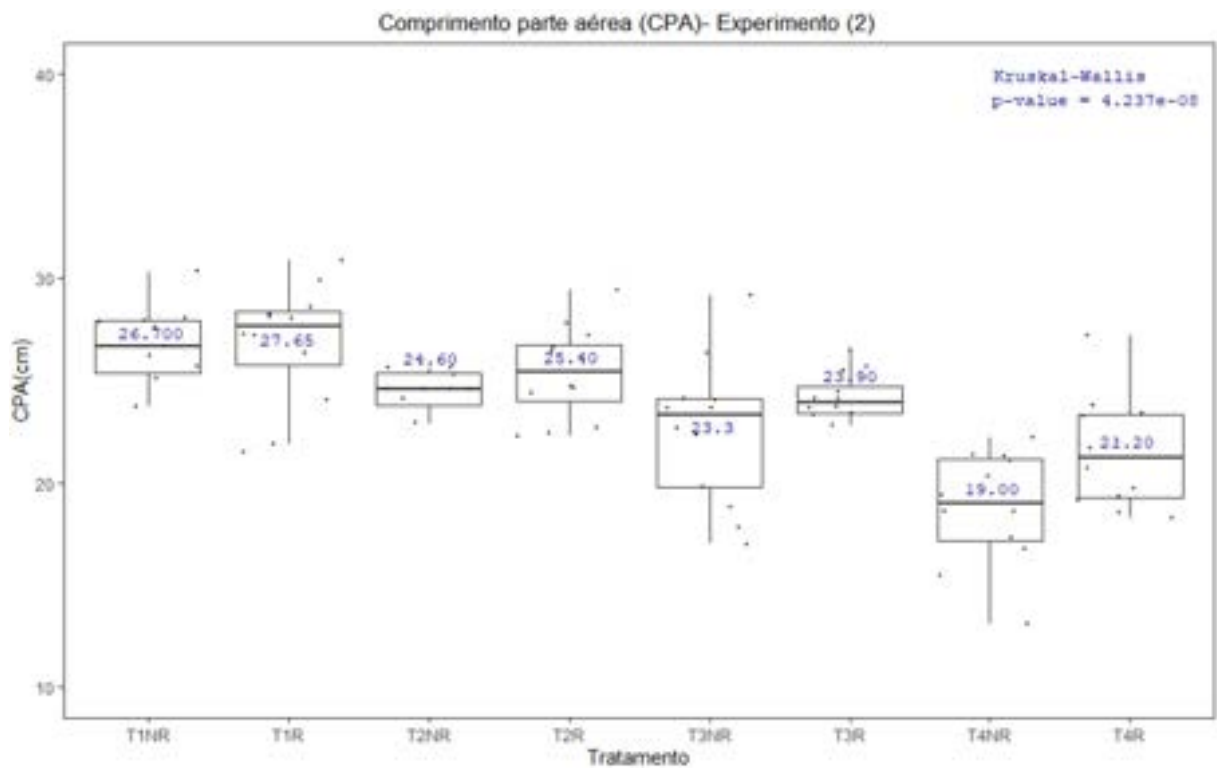
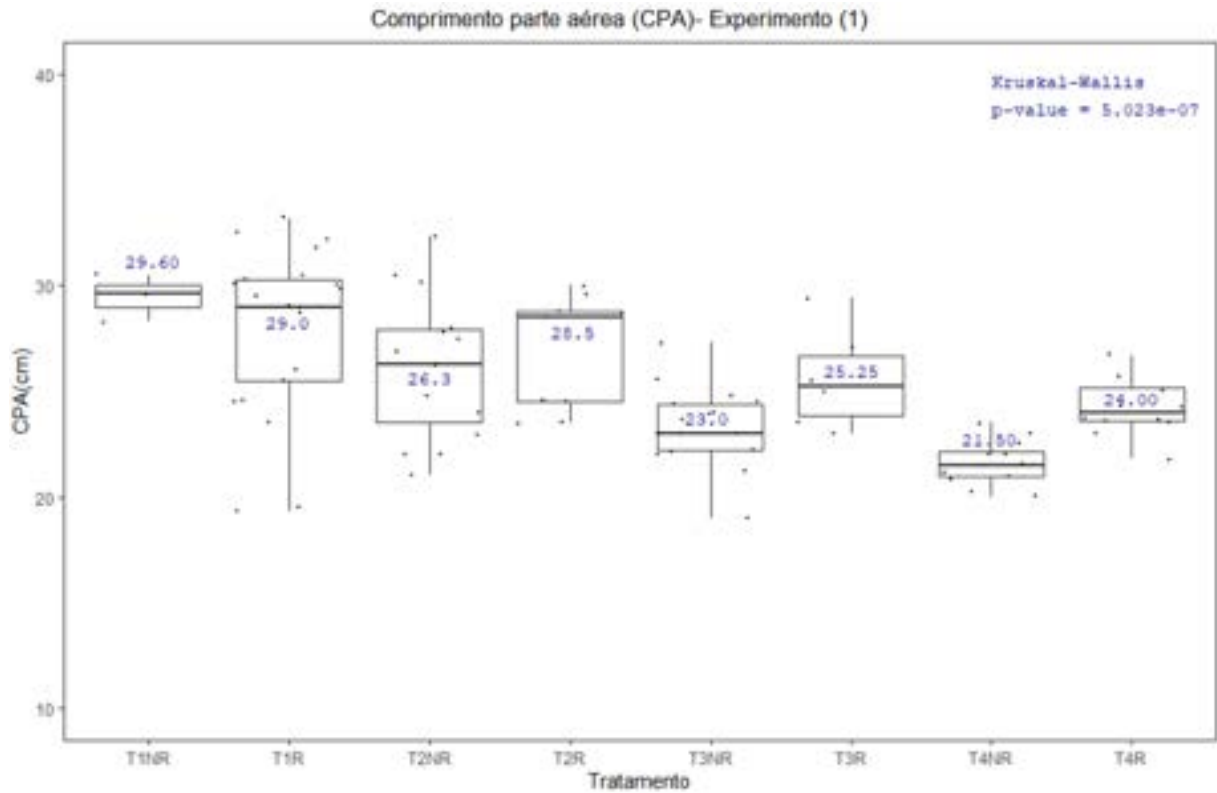
a) Experimento (1) - maio de 2024



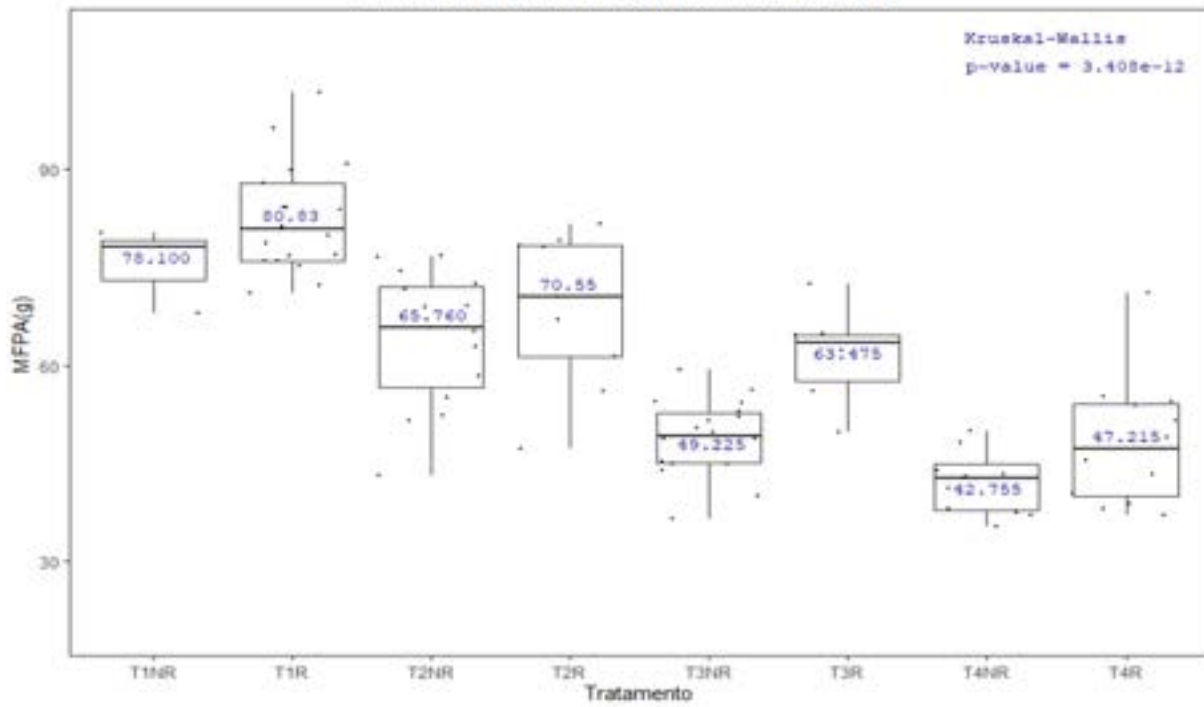
b) Experimento (2) - junho de 2024



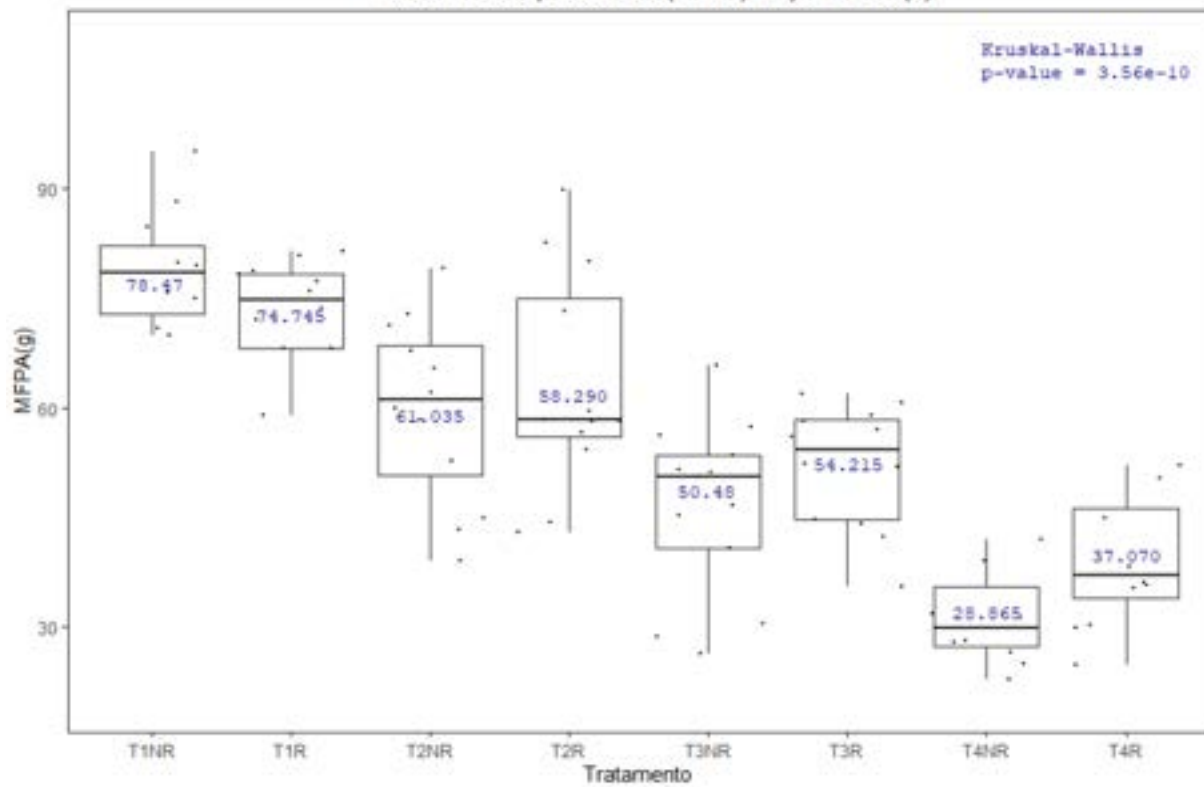
APÊNDICE G. BOXPLOT DE MFPA E AP



Massa fresca parte aérea (MFPA)- Experimento (1)

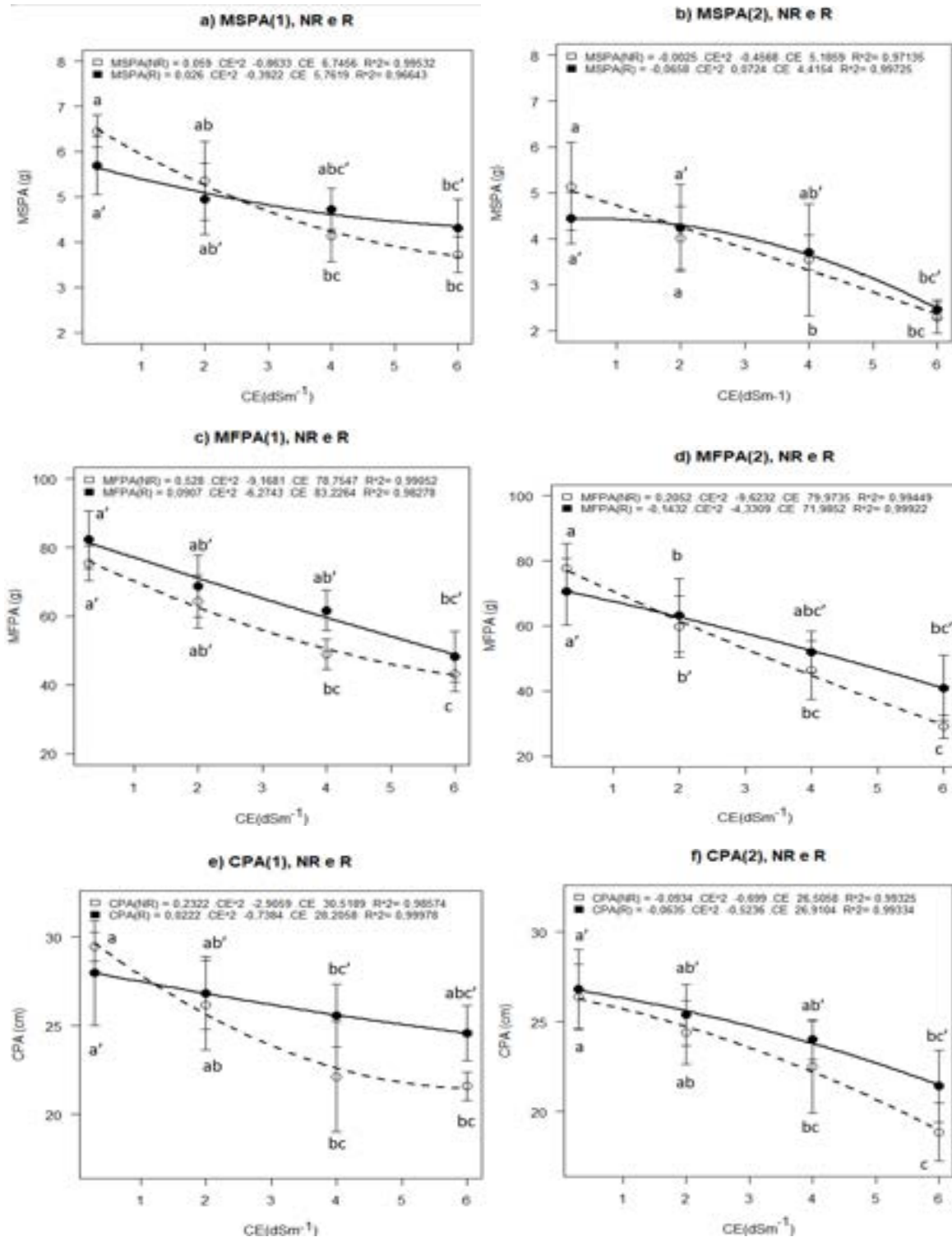


Massa fresca parte aérea (MFPA)- Experimento (2)



APÊNDICE H. CURVAS DE TENDÊNCIA, TRATAMENTOS (R) E (NR).

Figura H.1. Curvas de tendência de MSPA, MFPA e AP. a) MSPA (1); b) MSPA (2); c) MFPA (1); d) MFPA (2); e) AP (1); f) AP (2). As letras representam a significância dos grupos por Kruskal-Wallis $p < 0,05$, letras iguais significam mesmo grupo de dados. (') indica somente a referência ao grupo da parcela não resfriada.



APÊNDICE I. MATRIZ DE VARIÂNCIA, AUTOVALORES DA ACP.

MASSA SECA (MSPA)							
EXPERIMENTO (1)	MS-R(1)	CP1	CP2	EXPERIMENTO (2)	MS-R(2)	CP1	CP2
		MS(1)	0,57799			-0,54460	MS(2)
		2,002	0,531			1,778	0,3031
		0,64	0,297			1,0172	0,0708
		-0,122	0,125			-0,095	0,1228
		-1,234	-0,335			-1,9351	0,3816
	MS-NR(1)	2,568	-0,527		MS-NR(2)	-2,424	-0,3725
		0,562	-0,182			0,5151	-0,0252
		-1,876	0,059			-0,7648	-0,16464
		-2,539	0,033			-2,9396	-0,3161

MASSA FRESCA (MFPA)							
EXPERIMENTO (1)	MF-R(1)	CP1	CP2	EXPERIMENTO (2)	MF-R(2)	CP1	CP2
		MF(1)	0,57194			0,80156	MF(2)
		2,002	0,531			1,778	0,3031
		0,64	0,297			1,0172	0,0708
		-0,122	0,125			-0,095	0,1228
		-1,234	-0,335			-1,9351	0,3816
	MF-NR(1)	2,568	-0,527		MF-NR(2)	-2,424	-0,3725
		0,562	-0,182			0,5151	-0,0252
		-1,876	0,059			-0,7648	-0,16464
		-2,539	0,033			-2,9396	-0,3161

COMPRIMENTO PARTE AÉREA							
EXPERIMENTO (1)	CPA-R(1)	CP1	CP2	EXPERIMENTO (2)	CPA-R(2)	CP1	CP2
		CPA(1)	0,58208			-0,24682	CPA(2)
		2,002	0,531			1,778	0,3031
		0,64	0,297			1,0172	0,0708
		-0,122	0,125			-0,095	0,1228
		-1,234	-0,335			-1,9351	0,3816
	CPA-NR(1)	2,568	-0,527		CPA-NR(2)	-2,424	-0,3725
		0,562	-0,182			0,5151	-0,0252
		-1,876	0,059			-0,7648	-0,16464
		-2,539	0,033			-2,9396	-0,3161

APÊNDICE J. RESULTADO DO TESTE POST HOC, DUNN(1964)

Experimento (1)										
		MS(1) Kruskal-Wallis chi-squared = 42.726, df = 7, p-value = 3.767e-07		MF(1) Kruskal-Wallis chisquared = 68.2, df = 7 p-value = 3.408e-12		CPA(1) Kruskal-Wallis chi-squared = 42.07, df = 7, p-value = 5.023e-07		TA(1) chisquared = 44.686, df = 7, p- value = 1.573e-07		
g1	g2	p	p.adj.signif	p	p.adj.signif	p	p.adj.signif	p	p.adj.	p.adj.
T1NR	T1R	0,325	1,00000 (ns)	0,671	1,00000 (ns)	0,482	1,00000 (ns)	0,0116	0,326	ns
T1NR	T2NR	0,130	1,00000 (ns)	0,278	1,00000 (ns)	0,150	1,00000 (ns)	0,515	1,00000	ns
T1NR	T2R	0,053	1,00000 (ns)	0,570	1,00000 (ns)	0,292	1,00000 (ns)	0,0373	1,00000	ns
T1NR	T3NR	0,002	0,04985 (*)	0,009	0,25026 (ns)	0,004	0,11038 (ns)	0,761	1,00000	ns
T1NR	T3R	0,047	1,00000 (ns)	0,253	1,00000 (ns)	0,151	1,00000 (ns)	0,130	1,00000	ns
T1NR	T4NR	0,000	0,00496 (**)	0,001	0,03520 (*)	0,000	0,00844 (**)	0,915	1,00000	ns
T1NR	T4R	0,004	0,10177 (ns)	0,008	0,22633 (ns)	0,047	1,00000 (ns)	0,604	1,00000	ns
T1R	T2NR	0,299	1,00000 (ns)	0,005	0,14116 (ns)	0,159	1,00000 (ns)	0,000702	0,0196	*
T1R	T2R	0,086	1,00000 (ns)	0,107	1,00000 (ns)	0,500	1,00000 (ns)	0,671	1,00000	ns
T1R	T3NR	2,99E-05	0,00084 (***)	0,000	0,00000 (****)	0,000	0,00061 (***)	0,0000206	0,000577	***
T1R	T3R	0,086	1,00000 (ns)	0,021	0,58225 (ns)	0,209	1,00000 (ns)	0,293	1,00000	ns
T1R	T4NR	5,48E-07	1,53E-05 (****)	0,000	0,00000 (****)	0,000	0,00000 (****)	0,0000390	0,00109	**
T1R	T4R	0,000	0,01263 (*)	0,000	0,00000 (****)	0,019	0,53152 (ns)	0,00000170	0,00000477	****
T2NR	T2R	0,428	1,00000 (ns)	0,467	1,00000 (ns)	0,623	1,00000 (ns)	0,0206	0,576	ns
T2NR	T3NR	0,005	0,12957 (ns)	0,007	0,19283 (ns)	0,011	0,31066 (ns)	0,525	1,00000	ns
T2NR	T3R	0,357	1,00000 (ns)	0,801	1,00000 (ns)	0,828	1,00000 (ns)	0,172	1,00000	ns
T2NR	T4NR	0,000	0,00450 (**)	0,000	0,00872 (**)	0,000	0,00667 (**)	0,376	1,00000	ns
T2NR	T4R	0,018	0,49516 (ns)	0,008	0,22945 (ns)	0,336	1,00000 (ns)	0,0539	1,00000	ns
T2R	T3NR	0,108	1,00000 (ns)	0,002	0,06086 (ns)	0,007	0,20421 (ns)	0,00333	0,0931	ns
T2R	T3R	0,834	1,00000 (ns)	0,416	1,00000 (ns)	0,554	1,00000 (ns)	0,547	1,00000	ns
T2R	T4NR	0,011	0,29501 (ns)	0,000	0,00314 (**)	0,000	0,00609 (**)	0,00277	0,0777	ns
T2R	T4R	0,185	1,00000 (ns)	0,003	0,07129 (ns)	0,188	1,00000 (ns)	0,0000932	0,00261	**
T3NR	T3R	0,247	1,00000 (ns)	0,081	1,00000 (ns)	0,097	1,00000 (ns)	0,0615	1,00000	ns
T3NR	T4NR	0,206	1,00000 (ns)	0,225	1,00000 (ns)	0,151	1,00000 (ns)	0,746	1,00000	ns
T3NR	T4R	0,848	1,00000 (ns)	0,832	1,00000 (ns)	0,167	1,00000 (ns)	0,159	1,00000	ns
T3R	T4NR	0,042	1,00000 (ns)	0,011	0,30269 (ns)	0,008	0,23439 (ns)	0,0450	1,00000	ns
T3R	T4R	0,343	1,00000 (ns)	0,071	1,00000 (ns)	0,592	1,00000 (ns)	0,00492	0,138	ns
T4NR	T4R	0,184	1,00000 (ns)	0,362	1,00000 (ns)	0,010	0,28215 (ns)	0,323	1,00000	ns

Experimento (2)

		MS(2) Kruskal-Wallis chi-squared = 52.292, df = 7, p-value = 5.113e-09		MF(2) Kruskal-Wallis chi-squared = 58.13, df = 7, p-value = 3.56e-10		CPA(2) Kruskal-Wallis chi-squared = 47.61, df = 7, p-value = 4.237e-08		TA(2) chisquared = 12.783, df = 7, p- value = 0.07757		
g1	g2	p	p.adj.signif	p	p.adj.signif	p	p.adj	p	p.adj	signif
T1NR	T1R	0,414	1,00000 (ns)	0,452	1,00000 (ns)	0,855	1,00000 (ns)	0,739	1,00000	ns
T1NR	T2NR	0,102	1,00000 (ns)	0,030	0,83846 (ns)	0,155	1,00000 (ns)	0,469	1,00000	ns
T1NR	T2R	0,100	1,00000 (ns)	0,071	1,00000 (ns)	0,460	1,00000 (ns)	0,590	1,00000	ns
T1NR	T3NR	0,001	0,02176 (*)	0,001	0,00101 (**)	0,004	0,11013 (ns)	0,130	1,00000	ns
T1NR	T3R	0,020	0,57135 (ns)	0,001	0,03279 (*)	0,066	1,00000 (ns)	0,277	1,00000	ns
T1NR	T4NR	0,000	0,00001 (****)	5E-09	0,00000014 (****)	0,000	0,00002 (****)	0,00696	0,192	ns
T1NR	T4R	0,000	0,00000 (****)	0,000	0,00005 (****)	0,000	0,00622 (**)	0,751	1,00000	ns
T1R	T2NR	0,404	1,00000 (ns)	0,147	1,00000 (ns)	0,101	1,00000 (ns)	0,279	1,00000	ns
T1R	T2R	0,397	1,00000 (ns)	0,281	1,00000 (ns)	0,346	1,00000 (ns)	0,372	1,00000	ns
T1R	T3NR	0,010	0,27099 (ns)	0,001	0,01610 (*)	0,002	0,04718 (*)	0,0576	1,00000	ns
T1R	T3R	0,125	1,00000 (ns)	0,011	0,30161 (ns)	0,039	1,00000 (ns)	0,146	1,00000	ns
T1R	T4NR	0,000	0,00032 (****)	0,000	0,00001 (****)	0,000	0,00000 (****)	0,00213	0,0396	ns
T1R	T4R	0,000	0,00018 (****)	0,000	0,00110 (**)	0,000	0,00209 (**)	0,506	1,00000	ns
T2NR	T2R	0,991	1,00000 (ns)	0,709	1,00000 (ns)	0,484	1,00000 (ns)	0,850	1,00000	ns
T2NR	T3NR	0,083	1,00000 (ns)	0,050	1,00000 (ns)	0,143	1,00000 (ns)	0,426	1,00000	ns
T2NR	T3R	0,484	1,00000 (ns)	0,272	1,00000 (ns)	0,671	1,00000 (ns)	0,711	1,00000	ns
T2NR	T4NR	0,000	0,01062 (*)	0,000	0,00478 (**)	0,000	0,00811 (**)	0,0384	1,00000	ns
T2NR	T4R	0,000	0,00666 (**)	0,008	0,21884 (ns)	0,020	0,56992 (ns)	0,677	1,00000	ns
T2R	T3NR	0,085	1,00000 (ns)	0,019	0,53316 (ns)	0,029	0,81865 (ns)	0,323	1,00000	ns
T2R	T3R	0,491	1,00000 (ns)	0,141	1,00000 (ns)	0,261	1,00000 (ns)	0,576	1,00000	ns
T2R	T4NR	0,000	0,01107 (*)	0,000	0,00100 (**)	0,000	0,00043 (****)	0,0248	0,693	ns
T2R	T4R	0,000	0,00695 (**)	0,002	0,06765 (ns)	0,003	0,07084 (ns)	0,821	1,00000	ns
T3NR	T3R	0,307	1,00000 (ns)	0,399	1,00000 (ns)	0,302	1,00000 (ns)	0,676	1,00000	ns
T3NR	T4NR	0,059	1,00000 (ns)	0,061	1,00000 (ns)	0,026	0,72146 (ns)	0,170	1,00000	ns
T3NR	T4R	0,044	1,00000 (ns)	0,454	1,00000 (ns)	0,369	1,00000 (ns)	0,223	1,00000	ns
T3R	T4NR	0,004	0,12079 (ns)	0,008	0,21884 (ns)	0,001	0,03858 (*)	0,0842	1,00000	ns
T3R	T4R	0,003	0,08200 (ns)	0,119	1,00000 (ns)	0,058	1,00000 (ns)	0,432	1,00000	ns
T4NR	T4R	0,904	1,00000 (ns)	0,272	1,00000 (ns)	0,192	1,00000 (ns)	0,0141	0,384	ns