

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

**TOLERÂNCIA AO ESTRESSE SALINO DA ALFACE E DA  
RÚCULA EM DIFERENTES SISTEMAS HIDROPÔNICOS**

**LEANDRO FERREIRA DA COSTA**

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA  
2024**

# **TOLERÂNCIA AO ESTRESSE SALINO DA ALFACE E DA RÚCULA EM DIFERENTES SISTEMAS HIDROPÔNICOS**

**LEANDRO FERREIRA DA COSTA**

Engenheiro Agrônomo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2018

Mestre em Engenharia Agrícola

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2020

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:** Dr. Tales Miler Soares.

**Coorientador:** Dr. André Dias de Azevedo Neto.

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA**

**2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

C837t

Costa, Leandro Ferreira da.

Tolerância ao estresse salino da alface e da rúcula em diferentes sistemas hidropônicos / Leandro Ferreira da Costa. \_ Cruz das Almas, BA, 2024.  
96f.; il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Tales Miler Soares.

Coorientador: Prof. Dr. André Dias de Azevedo Neto.

1.Hidroponia – Horticultura – Manejo. 2.Horticultura – Alface – Rúcula. 3.Condições hídricas – Salinidade – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.

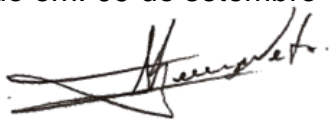
CDD: 631.585

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

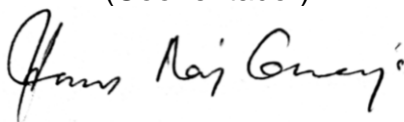
**TOLERÂNCIA AO ESTRESSE SALINO DA ALFACE E DA RÚCULA  
EM DIFERENTES SISTEMAS HIDROPÔNICOS**

Comissão examinadora da defesa de tese de  
Leandro Ferreira da Costa

Aprovado em: 09 de setembro de 2024.



Dr. André Dias de Azevedo Neto  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)  
(Coorientador)



Dr. Hans Raj Gheyi  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)  
(Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

MAIRTON GOMES DA SILVA  
Data: 01/11/2024 14:35:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Mairton Gomes da Silva  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)  
(Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

NILDO DA SILVA DIAS  
Data: 01/11/2024 10:43:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Nildo da Silva Dias  
Universidade Federal do Semiárido (UFERSA)  
(Examinador Externo)

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

ALIDE MITSUE WATANABE COVA  
Data: 01/11/2024 20:37:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.<sup>a</sup> Alide Mitsue Watanabe Cova  
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)  
(Examinador Externo)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que com suas bênçãos guiou o meu caminho e o iluminou para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço à minha avó Valquiria (*in memoriam*), ela que foi um dos maiores amores da minha vida, pelo amor incondicional, pelo apoio, paciência e por ficar ao meu lado em todos os momentos até quando Deus permitiu.

Agradeço também ao meu grande amor, à minha pequena filha Moara, por tornar minha vida mais agradável e feliz diariamente, e por todo amor e cuidado ao papai. Agradeço por terem sido meus pilares e sustentação. Essa vitória eu dedico a vocês, que são as protagonistas da minha vida.

Agradeço à minha companheira, Aline, por ter estado ao meu lado desde o começo dessa jornada, pelo apoio incondicional e por toda paciência nos momentos mais difíceis. E aos seus pais Nilda e Amaro por me acolherem tão bem na vida deles.

Expresso minha profunda gratidão ao meu coorientador, o Prof. Dr. André Dias de Azevedo Neto, extraordinário tanto em termos humanos quanto profissionais. Agradeço sinceramente por todos os preciosos ensinamentos e pela confiança dada a mim ao longo deste percurso acadêmico. Expresso também minha gratidão ao meu orientador, o Prof. Dr. Tales Miler Soares. Sua presença ao longo de toda a minha jornada acadêmica foi fundamental, orientando-me e oferecendo as mais acertados conselhos acadêmicos.

Agradeço aos meus amigos que a pós me proporcionou, Mairton, Igor Leonardo, Francisco Modesto, Alide, Paulo Vitor, Carlos Pugas, Lumi, Carol e Edilson (Boi), vocês contribuíram de maneira significativa para o meu trabalho e crescimento pessoal.

Agradeço aos estagiários e demais colaboradores: Carlos, Leke, Daniel, Welk, Laila, Ailton, Karine, Afonso, Bismarque e Andressa, que apoiaram a condução dos experimentos ao meu lado, com muita dedicação e apreço pelo trabalho.

A instituição UFRB e todos que a compõem. A CAPES, pelo apoio financeiro na concessão da bolsa. A INCTAGRIS pelo apoio financeiro.

Enfim, um muito obrigado a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para que eu chegasse até aqui.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por guiar e abençoar minha vida em todos os aspectos, e à minha filha Moara e à minha avó Valquiria (*in memoriam*) por todo amor e carinho.

## TOLERÂNCIA AO ESTRESSE SALINO DA ALFACE E DA RÚCULA EM DIFERENTES SISTEMAS HIDROPÔNICOS

**RESUMO:** A produção sustentável de alimentos com alta eficiência no uso da água é um desafio, especialmente em zonas áridas e semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é limitada e, frequentemente, de qualidade salobra. A hidroponia tem se destacado como uma alternativa promissora para o cultivo em condições salinas, proporcionando maior tolerância das plantas ao estresse salino e melhor eficiência no uso da água em comparação com métodos convencionais de cultivo. Este estudo teve como objetivo avaliar a produtividade, o consumo de água, os limites de salinidade e a tolerância ao sal, além de analisar o acúmulo de solutos inorgânicos e orgânicos na alface e na rúcula cultivadas nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia vertical com uso de águas salobras. Foram aplicados quatro níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva (2,0; 3,7; 5,4 e 7,1 dS m<sup>-1</sup>), com cinco repetições para cada nível. Os resultados mostraram que a produção de massa fresca e seca da parte aérea foi significativamente afetada pela salinidade, especialmente nos sistemas floating e NFT, enquanto a aeroponia não houve impactos significativos. O consumo hídrico foi reduzido em todos os sistemas, mas a eficiência do uso da água permaneceu estável na aeroponia, enquanto nos sistemas floating e NFT apresentou tendência de queda com o aumento da salinidade. As maiores produtividades de massa fresca foram observadas na aeroponia, onde a salinidade não influenciou negativamente as culturas. De modo geral, a análise de solutos revelou aumentos substanciais de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> com o aumento da salinidade em todos os sistemas hidropônicos, além de um aumento na razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> em ambas as culturas. O acúmulo de carboidratos solúveis e de prolina livre também aumentou com a salinidade. A aeroponia destacou-se por reter menores quantidades de íons tóxicos e por sua regulação mais eficiente de K<sup>+</sup>, indicando maior resistência das plantas ao estresse salino em comparação aos sistemas floating e NFT. Dessa forma, a aeroponia demonstrou ser a alternativa mais adequada para o cultivo de alface e rúcula sob estresse salino, não apenas por manter a produtividade estável sob elevados níveis de salinidade, mas também por promover melhor regulação da absorção de íons e favorecer o acúmulo de solutos orgânicos, como carboidratos solúveis e prolina, que auxiliam na resposta das plantas ao estresse. Esses fatores, aliados à eficiência no uso da água, tornam a aeroponia uma alternativa superior em comparação aos sistemas floating e NFT, que foram mais afetados pela salinidade, com reduções significativas na produção e no consumo hídrico.

**Palavras-chave:** aeroponia, estresse abiótico, produtividade, solutos inorgânicos, solutos orgânicos.

## SALT STRESS TOLERANCE OF LETTUCE AND ROCKET IN DIFFERENT HYDROPONIC SYSTEMS

**ABSTRACT:** Sustainable food production with high water use efficiency is a challenge, especially in arid and semi-arid zones where water availability is limited and often of brackish quality. Hydroponics has been highlighted as a promising alternative for cultivation in saline conditions, providing greater plant tolerance to saline stress and better water use efficiency compared to conventional cultivation methods. The aim of this study was to evaluate productivity, water consumption, salinity limits and salt tolerance, as well as to analyze the accumulation of inorganic and organic solutes in lettuce and rocket grown in floating, NFT and vertical aeroponic hydroponic systems using brackish water. Four levels of electrical conductivity were applied to the nutrient solution (2.0, 3.7, 5.4 and 7.1 dS m<sup>-1</sup>), with five replicates for each level. The results showed that the production of fresh and dry mass of the aerial part was significantly affected by salinity, especially in the floating and NFT systems, while aeroponics had no significant impact. Water consumption was reduced in all systems, but water use efficiency remained stable in aeroponics, while in floating and NFT systems it showed a downward trend as salinity increased. The highest fresh mass yields were observed in aeroponics, where salinity did not negatively influence the crops. In general, the analysis of solutes revealed substantial increases in Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> with increasing salinity in all hydroponic systems, as well as an increase in the Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> ratio in both crops. The accumulation of soluble carbohydrates and free proline also increased with salinity. Aeroponics stood out for retaining smaller quantities of toxic ions and for its more efficient regulation of K<sup>+</sup>, indicating greater plant resistance to saline stress compared to floating and NFT systems. Thus, aeroponics proved to be the most suitable alternative for growing lettuce and rocket under saline stress, not only for maintaining stable productivity under high levels of salinity, but also for promoting better regulation of ion absorption and favoring the accumulation of organic solutes, such as soluble carbohydrates and proline, which help the plants' response to stress. These factors, combined with water use efficiency, make aeroponics a superior alternative to floating and NFT systems, which were more affected by salinity, with significant reductions in production and water consumption.

**Keywords:** aeroponics, abiotic stress, productivity, inorganic solutes, organic solutes.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Ilustração do sistema DFT-floating com painéis flutuantes (fonte: Maucieri et al., 2019.).....	14
Figura 1.2.	Ilustração do sistema NFT (fonte: Maucieri et al., 2019.).....	15
Figura 1.3.	Ilustração da técnica de cultivo em aeroponia (fonte: Maucieri et al., 2019.).....	16
Figura 1.4.	Ilustração da aeroponia vertical (fonte: Schneider et al., 2021).....	17
Figura 2.1.	Aspectos gerais do ensaio (15 dias após o transplante) com alface em sistema do tipo floating.....	36
Figura 2.2.	Vista geral do ensaio (15 dias após o transplante) com cultivo da alface em sistema do tipo NFT.....	37
Figura 2.3.	Aspectos gerais do ensaio (20 dias após o transplante) com alface cultivada em sistema do tipo aeroponia vertical.....	38
Figura 2.4.	Valores médios da massa fresca da parte aérea (MFPA) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	42
Figura 2.5.	Valores médios da massa seca da parte aérea (MSPA) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	42
Figura 2.6.	Valores médios do teor de massa seca da parte aérea (TMS) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	43
Figura 2.7.	Média do número de folhas (NF) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	44
Figura 2.8.	Média do consumo hídrico (CH) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	45
Figura 2.9.	Média da produtividade da água (PRA) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	45
Figura 2.10.	Produtividade (PRT) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e torre aeropônica (▲) em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	46
Figura 2.11.	Produtividade relativa (RY) da alface nos sistemas floating (A) e NFT (B) e, da rúcula (C) e (D) nos respectivos sistemas em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	47

Figura 2.12.	Produção relativa de massa seca da parte aérea (PRMS) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating, NFT e aeroponia em função de diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	48
Figura 3.1.	Vista geral do cultivo da alface (A) e da rúcula (B) no sistema floating em casa de vegetação.....	70
Figura 3.2.	Vista geral do cultivo da alface (A) e da rúcula (B) no sistema NFT em casa de vegetação.....	71
Figura 3.3.	Vista geral do cultivo da alface (A) e da rúcula (B) no sistema aeroponia vertical em casa de vegetação.....	72
Figura 3.4.	Teores médios de $Cl^-$ nas folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	75
Figura 3.5.	Teores médios de $Na^+$ nas folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	76
Figura 3.6.	Teores médios de $K^+$ nas folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	77
Figura 3.7.	Razão $Na^+/K^+$ nas folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	79
Figura 3.8.	Teores médios de CS em folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	80
Figura 3.9.	Teores médios de PS em folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	82
Figura 3.10.	Teores médios de PL em folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	83
Figura 3.11.	Teores médios de AL em folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).....	84

## SUMÁRIO

RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
CAPÍTULO 1 .....	12
1.1 INTRODUÇÃO GERAL.....	12
1.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
1.2.1 Tipos de sistemas hidropônicos .....	13
1.2.2 Técnica do fluxo profundo do tipo floating .....	14
1.2.3 Técnica do fluxo laminar de nutrientes (NFT).....	15
1.2.4 Técnica em aeroponia .....	16
1.2.5 Efeito dos sais nas plantas .....	17
1.2.6 Acúmulo de solutos nas plantas sob estresse salino .....	18
1.2.7 O uso de água salina em cultivos hidropônicos como estratégia de tolerância das culturas à salinidade .....	20
1.2.8 Hortaliças folhosas .....	21
1.3 HIPÓTESES .....	23
1.4 OBJETIVOS .....	23
1.4.1 Objetivo geral.....	23
1.4.2 Objetivo específicos .....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
CAPÍTULO 2 .....	32
2.1 INTRODUÇÃO .....	34
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
2.2.1 Condições experimentais e tratamentos .....	35
2.2.2 Estruturas experimentais .....	37
2.2.2.1 Estruturas do sistema floating .....	37
2.2.2.2 Estruturas do sistema NFT .....	38
2.2.2.3 Estruturas do sistema em aeroponia vertical.....	39
2.2.3 Crescimento e produção .....	40
2.2.5 Produtividade e produção relativa.....	41
2.2.5 Análise estatística .....	42
2.3 RESULTADOS .....	43
2.3.1 Produção e crescimento.....	43
2.3.2 Consumo hídrico e produtividade da água .....	46
2.3.3 Produtividade, produção relativa e tolerância à salinidade.....	48
2.4 DISCUSSÃO .....	50

2.4.1 Produção e crescimento .....	50
2.4.2 Consumo hídrico, produtividade e tolerância salina.....	54
2.5 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
CAPÍTULO 3.....	67
3.1 INTRODUÇÃO .....	69
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	70
3.2.1 Condições experimentais e tratamentos.....	70
3.2.2 Estruturas experimentais.....	72
3.2.2.1 Estrutura do sistema floating .....	72
3.2.2.2 Estrutura do sistema NFT .....	72
3.2.2.3 Estrutura do sistema em aeroponia vertical .....	73
3.2.3 Coleta e preparo das amostras .....	74
3.2.3.1 Solutos inorgânicos .....	75
3.2.3.2 Solutos orgânicos.....	75
3.2.4 Análise estatística .....	75
3.3 RESULTADOS .....	76
3.3.1 Teores de solutos inorgânicos em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino .....	76
3.3.2 Teores de solutos orgânicos em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino .....	81
3.4 DISCUSSÃO .....	86
3.4.1 Teor de Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> e razão Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino .....	86
3.4.2 Teor de solutos orgânicos em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino .....	89
3.5 CONCLUSÕES.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97

## **CAPÍTULO 1**

### **1.1 INTRODUÇÃO GERAL**

A disponibilidade mundial de água de baixa salinidade é um dos fatores mais limitantes para o aumento da produção de alimentos, especialmente em regiões como o Nordeste brasileiro e em zonas áridas a semiáridas (Oliveira et al., 2017). Historicamente, o Nordeste tem sido visto como uma região de baixo potencial para investimentos em setores como a indústria e a agricultura, o que tem impactado negativamente o desenvolvimento econômico e social da sua população, especialmente no Semiárido, a área mais seca da região, onde a disponibilidade de água adequada para a agricultura e até para o consumo humano é um problema recorrente na época de estiagem.

Essa zona climática se caracteriza por uma variabilidade espacial e temporal das chuvas, altas temperaturas e uma elevada demanda evaporativa da atmosfera (Moura et al., 2007). Além disso, há limitações de origem geológica, como a presença de solos rasos e um embasamento cristalino composto por rochas ricas em minerais que podem salinizar a água (Silva, 2003a). Essas características edafoclimáticas contribuem para agravar a escassez de água para uso agrícola, pois as águas subterrâneas geralmente são ricas em sais, especialmente sódio, tornando-as inadequadas para irrigação no sistema de cultivo típico da região e elevando o risco de salinização secundária do solo (Viana, 2017).

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias e estratégias que possibilitem o uso dessas águas subterrâneas na produção agrícola no Semiárido torna-se indispensável. A hidroponia, por exemplo, emerge como uma técnica de cultivo sem solo em ambiente protegido que pode ser viável, pois proporciona uma melhor resposta das plantas ao estresse salino e melhora consideravelmente a eficiência de uso da água. Embora diversas pesquisas tenham sido realizadas usando águas salobras para preparar soluções nutritivas em cultivos hidropônicos, principalmente no sistema tipo Nutrient Film Technique (NFT), a aeroponia, uma variante ainda pouco explorada, especialmente em estudos que utilizam águas de qualidade inferior, surge como uma alternativa promissora para o cultivo vertical.

As pesquisas com águas salobras em hidroponia geralmente focam nos efeitos dos sais sobre aspectos morfofisiológicos, bioquímicos, nas interações nutricionais e na identificação de genótipos de plantas tolerantes à salinidade. No entanto, a maioria

desses estudos se concentra quase exclusivamente na hidroponia tipo NFT, o que destaca a relevância de realizar e comparar estudos com outras variantes da hidroponia para um conhecimento mais profundo das respostas das plantas aos efeitos dos sais em diferentes sistemas hidropônicos, como na aeroponia com uso de águas salobras, um problema frequente na Região Semiárida.

Essa proposta de estudo visa oferecer uma alternativa adicional aos esforços existentes que tratam a hidroponia como uma aliada para o cultivo em condições de baixa disponibilidade de água de baixa salinidade e presença de águas salobras. Como uma tecnologia inovadora, a proposta tem o potencial de promover mudanças positivas no Semiárido, como o reaproveitamento de milhares de poços tubulares profundos atualmente abandonados devido à salinidade e à baixa vazão diária. Além disso, um novo sistema de cultivo sem solo pode abrir possibilidades para que os produtores escolham um sistema de cultivo viável e adequado à sua realidade, contribuindo para a geração de renda e a melhoria da qualidade de vida.

No Brasil, especialmente no Semiárido, ainda não há registros de estudos sobre o uso do sistema em aeroponia em culturas hortícolas. Em escala global, a maioria dos estudos encontrados na literatura compara apenas os sistemas de cultivo em NFT, DFT e sistemas semihidropônicos com substratos. Dessa forma, são necessárias pesquisas que explorem formas eficientes de cultivo de hortaliças sob estresse salino, como alface e rúcula, cujas respostas a sistemas de cultivo sem solo diferentes dos já estabelecidos na hidroponia convencional, como o sistema aeropônico, são pouco conhecidas.

## **1.2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **1.2.1 Tipos de sistemas hidropônicos**

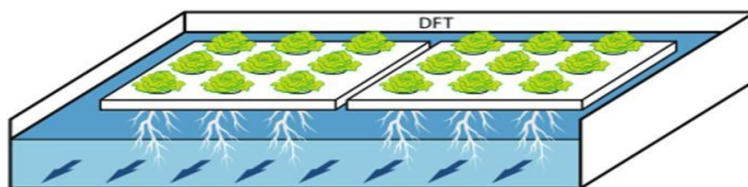
Um dos maiores desafios da atualidade é erradicar a fome e a pobreza, tornando a agricultura e os sistemas produtivos mais sustentáveis. Produzir alimentos limpos e frescos para a crescente população global é uma preocupação crucial, especialmente diante da pressão sobre os recursos naturais, como solo, água e ar (Lakhari et al., 2018; Malhi et al., 2021). No entanto, cerca de um quarto das terras aráveis do mundo foi declarado improdutivo devido à salinização do solo, má gestão da irrigação, mudanças climáticas, urbanização rápida, e outros fatores (Popp et al., 2014).

Nesse contexto, a pesquisa em novas tecnologias agrícolas propõe a implementação de sistemas de cultivo controlado como solução (Sardare; Admane, 2013). A hidroponia, em especial, destaca-se como uma alternativa viável ao cultivo convencional, sendo uma estratégia eficaz para o uso de águas subterrâneas com altos teores de sais, como é comum no semiárido brasileiro (Costa et al., 2020). As principais técnicas hidropônicas incluem o sistema NFT, o DFT - floating e a aeroponia.

### 1.2.2 Técnica do fluxo profundo do tipo floating

A técnica de fluxo profundo de nutrientes (DFT) consiste no cultivo de plantas em suportes flutuantes ou suspensos, como jangadas, painéis de isopor ou tábuas, colocados em recipientes preenchidos com uma solução nutritiva de 10 a 30 cm de profundidade. As plantas são fixadas em furos feitos nesses painéis, utilizando espuma de poliuretano para sustentação. As diferentes formas de aplicação do DFT variam principalmente na profundidade e volume da solução nutritiva, bem como nos métodos de recirculação e oxigenação (van Os et al., 2019).

O sistema floating é uma variante do DFT, que geralmente utiliza tanques com profundidade entre 20 e 30 cm, construídos com materiais diversos e impermeabilizados com filmes de polietileno. As plantas são sustentadas por plataformas flutuantes, permitindo que as raízes penetrem na solução nutritiva (Figura 1.1). Este sistema é vantajoso pela sua simplicidade e baixos custos de operação, especialmente em culturas de ciclo curto, como a alface. O controle da solução nutritiva é menos complexo, necessitando de reposições apenas ao final de cada ciclo, com monitoramento periódico principalmente do oxigênio dissolvido (Venter et al., 2017; Maucieri et al., 2019).

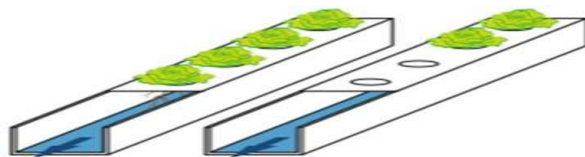


**Figura 1.1.** Ilustração do sistema de cultivo Técnica do fluxo profundo DFT-floating com painéis flutuantes (Fonte: Maucieri et al., 2019.).

Os níveis de oxigênio na solução nutritiva devem ser mantidos na faixa de 4 – 5 mg L<sup>-1</sup> para evitar deficiências nutricionais, que podem ocorrer devido ao desempenho reduzido da absorção de nutrientes pelo sistema radicular na falta de oxigênio. A circulação da solução ou aeração, por meio de compressores, ajuda a renovar o oxigênio necessário. Alternativamente, sistemas Venturi podem ser usados para aumentar amplamente os níveis de oxigênio no sistema. Isso é especialmente crucial quando a temperatura da solução atinge altos níveis, já que temperaturas elevadas podem causar desordens fisiológicas nas plantas, como o espigamento da alface e o surgimento de patógenos oportunistas como o *pythium* (Goddek et al., 2019).

### 1.2.3 Técnica do fluxo laminar de nutrientes (NFT)

Considerada a técnica mais difundida de cultivo sem solo no Brasil e no mundo, a técnica do fluxo laminar de nutrientes (NFT) é vista como a hidroponia clássica. Neste sistema, uma solução nutritiva flui em uma fina lâmina sobre calhas fixadas em bancadas (Figura 1.2), com uma inclinação geralmente entre 3% e 5%, podendo ser maior em regiões mais quentes. A circulação da solução nutritiva ocorre geralmente em ciclos de 15 minutos (Furlani et al., 1999a; Van Os et al., 2019).



**Figura 1.2.** Ilustração do sistema da Técnica do fluxo laminar de nutrientes - NFT (Fonte: Maucieri et al., 2019.).

A recirculação da solução nutritiva e a ausência de substrato no sistema NFT facilitam a automação, reduzindo custos de mão de obra e permitindo uma gestão mais eficiente da densidade de plantas ao longo do ciclo de cultivo. Contudo, a falta de substrato torna o sistema vulnerável a falhas de bombas, problemas de temperatura e doenças por patógenos oportunistas (Goddek et al., 2019).

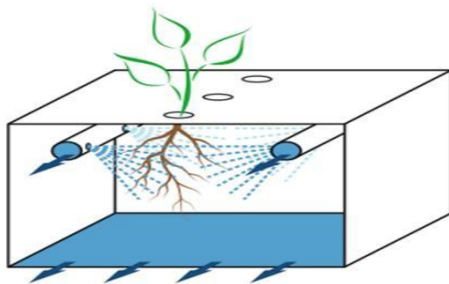
No NFT, o desenvolvimento radicular pode ser comprometido, pois a porção de raízes expostas ao ar tende a envelhecer e perder funcionalidade rapidamente,



especialmente se o fluxo de solução for interrompido. Isso representa um desafio para culturas de ciclos longos (mais de 4-5 meses) e pode não ser o sistema mais adequado para regiões com altos níveis de radiação e temperatura (Hussain et al., 2014; Maucieri et al., 2019).

#### 1.2.4 Técnica em aeroponia

O cultivo em aeroponia é uma técnica de cultivo sem solo em que as raízes das plantas ficam suspensas no ar e são pulverizadas periodicamente com finas gotas de solução nutritiva (Figura 1.3). Essa técnica não utiliza substratos como lã de rocha, terra ou perlita, e sua principal vantagem é a excelente aeração das raízes (Lakhiar et al., 2018). As pulverizações ocorrem a cada poucos minutos, sendo necessário um temporizador de ciclo curto, diferentemente de sistemas como o NFT, onde a bomba opera por períodos mais longos (Gaikwad; Maitra, 2020).

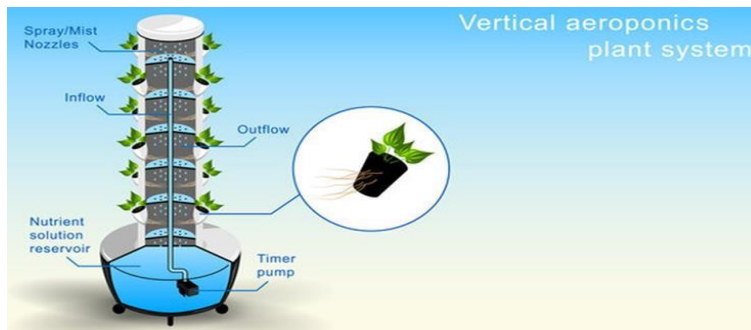


**Figura 1.3.** Ilustração da técnica de cultivo em aeroponia (Fonte: Maucieri et al., 2019.).

A aeroponia é especialmente adequada para o cultivo de hortaliças de menor porte, embora sua adoção ainda seja limitada devido ao elevado investimento inicial e aos custos de manejo. As plantas são sustentadas por painéis de plástico ou poliestireno, que podem ser dispostos horizontalmente ou em superfícies inclinadas dentro das caixas de cultivo. Essas caixas são formadas por uma estrutura feita de materiais inertes, como plástico ou aço revestido, proporcionando um ambiente fechado para o desenvolvimento do sistema radicular suspenso (Ghorbel et al., 2021).

Além disso, a aeroponia pode ser adaptada para cultivo vertical (Figura 1.4), semelhante à aquaponia e outros sistemas hidropônicos. Essa abordagem é particularmente vantajosa para expandir cultivos em áreas que tradicionalmente apresentam desafios ou são inacessíveis para a produção agrícola. A principal

vantagem da aeroponia vertical é a otimização do uso do espaço, resultando em maior produtividade por unidade de área (Schneider et al., 2021).



**Figura 1.4.** Ilustração da aeroponia vertical (Fonte: Schneider et al., 2021).

A aeroponia, por ser conduzida no ar, onde as raízes das plantas são constantemente expostas a uma solução nutritiva rica em oxigênio, permite o cultivo de quase qualquer tipo de planta, que pode completar seu ciclo de vida nesse sistema. Comercialmente, há uma crescente preferência por sistemas aeropônicos em relação a outros métodos hidropônicos, principalmente porque a maior oxigenação das raízes estimula o crescimento das plantas e ajuda na prevenção de patógenos (Stoner; Clawson, 1998).

### 1.2.5 Efeito dos sais nas plantas

O problema de solos salinos afeta 7% da superfície terrestre, atingindo 20% das terras cultivadas e 33% das irrigadas no mundo, ocorrendo principalmente em terras secas áridas e semiáridas (Pedrotti et al., 2015; Machado; Serralheiro, 2017). O baixo índice pluviométrico, alta demanda atmosférica, drenagem inadequada e uso de água de alta salinidade contribuem para solos ricos em sais (Holanda et al., 2007).

Altas concentrações de sais no solo criam um ambiente hostil, limitando o desenvolvimento e a produtividade das plantas (Flowers; Colmer, 2008; Esteves; Suzuki, 2008). No semiárido nordestino, entender os efeitos dos sais é crucial, especialmente em cultivos com irrigação de água salina.

Em solos salinos, as plantas sofrem prejuízos no crescimento e produção. Segundo Dias et al. (2016), a salinidade afeta as plantas em três fases: (1) efeito

osmótico, dificultando a absorção de água; (2) efeito tóxico, com acúmulo de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ ; (3) desbalanço nutricional, como o antagonismo entre  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ .

Para absorver água em solos salinos, as plantas devem manter um potencial hídrico inferior ao do solo, compartimentalizando sais ou sintetizando solutos orgânicos (Roy et al., 2014). A adaptação à salinidade depende da capacidade de manter um potencial hídrico inferior e tolerar ou excluir sais na zona radicular (Reddy et al., 2015; Nematí et al., 2011).

A curto prazo, o excesso de sal reduz a taxa fotossintética por limitações estomáticas, diminuindo a assimilação de  $\text{CO}_2$  (Parida; Das, 2005). Isso pode interromper o crescimento em poucas horas de exposição ao estresse salino (Hernández; Almansa, 2002). Se a tolerância à salinidade falha, o crescimento e a produção são prejudicados pela menor absorção de água e alta concentração de íons no fluxo transpiratório (Munns, 2005). Os estômatos se fecham, reduzindo a taxa fotossintética e afetando o desenvolvimento das plantas (Pedrotti et al., 2015).

A longo prazo, a salinidade afeta a fotossíntese devido ao acúmulo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  nas folhas jovens e à redução de íons essenciais como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (Netondo et al., 2004; Moradi; Ismail, 2007; Duarte et al., 2013). Os efeitos adversos sobre a fotossíntese estão ligados ao acúmulo de sais nos tecidos, afetando atividades enzimáticas e acelerando a senescência celular, o que prejudica o crescimento (Munns, 2002).

Sob estresse salino, as plantas usam diversos mecanismos para combater o sal na zona radicular. O ajuste osmótico é essencial, acumulando solutos para manter a homeostase celular, permitindo a absorção de água e continuidade do crescimento (Silveira et al., 2010; Munns; Gilliam, 2015).

### **1.2.6 Acúmulo de solutos nas plantas sob estresse salino**

O ajuste osmótico pode resultar do aumento da síntese de solutos orgânicos, da mobilização desses solutos ou da absorção e migração de solutos inorgânicos como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  (Silveira et al., 2010). O acúmulo de  $\text{Na}^+$  nas células interfere em processos metabólicos, competindo com  $\text{K}^+$  e rompendo a homeostase, afetando gravemente o metabolismo das raízes e folhas (Almeida et al., 2017).

Estudos mostram que o aumento da salinidade reduz os níveis de  $K^+$  em vários órgãos das plantas (Siddiqi et al., 2011; Mendes et al., 2011). Em plantas de arroz e cevada, o aumento de  $K^+$  atenuou os efeitos do acúmulo de  $Na^+$  em condições salinas (Ishikawa; Shabala, 2019).

As plantas respondem diferentemente ao acúmulo de  $Na^+$  e  $Cl^-$ , com sistemas de transporte e maquinaria genética específicos (Shelke et al., 2019). Enquanto ambos os íons são tóxicos em altas concentrações, para algumas culturas, como cevada e feijão fava, a maior concentração de  $Cl^-$  está relacionada à tolerância à salinidade (Rajendran et al., 2009; Tavakkoli et al., 2010; Guan et al., 2012). O cloro é um micronutriente essencial, atuando na fotossíntese, regulação estomática e atividades enzimáticas (Franco-Navarro et al., 2016).

As plantas utilizam dois mecanismos principais para regular  $Na^+$  e  $Cl^-$ : compartimentalização desses íons no vacúolo e exclusão para o meio extracelular (Apse; Blumwald, 2007; Flowers et al., 2015). Quando esses mecanismos falham, a planta sintetiza osmólitos compatíveis para ajustar o potencial hídrico (Ketehouli et al., 2019).

Osmólitos como prolina, glicina betaína, manitol e trealose desempenham funções de ajuste osmótico e proteção em plantas sob estresse salino (Silveira et al., 2010; Monteiro et al., 2014). A prolina é particularmente sensível ao estresse, podendo aumentar em até 100 vezes (Verbruggen; Hermans, 2008; Ahanger et al., 2014). O nível de prolina varia nos órgãos da planta, sendo maior nos reprodutivos (Lehmann et al., 2010).

A prolina tem múltiplas funções sob estresse, como manutenção do equilíbrio redox, sinalização mitocondrial, remoção de radicais hidroxila, estabilização de proteínas e membranas, e desintoxicação de  $NH_4^+$  (Azevedo Neto; Silva, 2015; Dar et al., 2016; Giordano et al., 2021). O aumento de prolina pode contribuir para a tolerância à salinidade, representando até 80% do teor total de aminoácidos em células de tabaco sob estresse (Mansour; Ali, 2017).

Em alface sob estresse salino, a prolina aumentou com a redução de carboidratos solúveis (Kohler et al., 2009; Mahmoudi et al., 2011). No entanto, a maior quantidade de  $Na^+$  na parte aérea de alfaces tolerantes sugere que o mecanismo de tolerância pode envolver a inclusão de  $Na^+$  nos tecidos (Bartha et al., 2015).

Em repolho, o aumento de prolina ocorreu com o aumento de sacarose, mas isso não estimulou o crescimento da planta (Sahin et al., 2018). O acúmulo de solutos é fundamental para manter a integridade celular sob estresse salino, sendo crucial para o desenvolvimento e a produtividade. Pesquisas sobre solutos em condições de estresse são essenciais para entender a tolerância das plantas à salinidade.

### **1.2.7 O uso de água salina em cultivos hidropônicos como estratégia de tolerância das culturas à salinidade**

A busca por técnicas de cultivo que utilizem água de forma mais eficiente e maximizem a produção de alimentos tem aumentado significativamente, com a hidroponia se destacando como uma das principais alternativas. Nesse método de cultivo, a economia de água e nutrientes é maior comparada ao cultivo convencional, tornando-o uma opção sustentável para a agricultura (Asaduzzaman et al., 2015; Santos, 2018).

Além disso, a hidroponia permite o uso de águas salobras com menos riscos, já que as plantas, nesse sistema, respondem melhor à salinidade. Isso ocorre porque o potencial matricial é praticamente nulo, e a planta precisa lidar apenas com o potencial osmótico da solução nutritiva, facilitando a absorção de água e nutrientes (Soares et al., 2010; Silva et al., 2013; Costa et al., 2020).

Diversos estudos apoiam a hidroponia como uma técnica viável para o cultivo de hortaliças usando águas salobras. A maioria dessas pesquisas foca no sistema hidropônico NFT, amplamente utilizado no Brasil para fins comerciais (Lira et al., 2015; Silva et al., 2016; Martins et al., 2019; Modesto et al., 2019; Costa et al., 2020; Bione et al., 2021).

Ao comparar a produção de alface em sistemas NFT e floating com água salobra, Santos et al. (2011) observaram que o sistema floating proporcionou maior acúmulo de massa fresca e seca da parte aérea. A vantagem do sistema floating pode estar relacionada ao fato de as raízes estarem constantemente em contato com uma solução nutritiva oxigenada.

Em estudo sobre o teor de solutos inorgânicos em alfaces cultivadas com água salobra, Cova et al. (2017) identificaram que o estresse salino reduziu a massa seca da parte aérea, com uma diminuição de 45% no sistema NFT em comparação ao DFT.

Além disso, houve aumento nos teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  e redução nos teores de  $\text{K}^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , independentemente do sistema hidropônico utilizado.

Rodríguez-Ortega et al. (2019) estudaram as respostas do tomateiro cultivado em diferentes sistemas de cultivo sem solo e encontraram que a produtividade comercial foi influenciada tanto pelo sistema de cultivo quanto pela salinidade da água. O sistema DFT foi o mais produtivo, seguido pela perlita e pelo NFT.

Li et al. (2018) compararam o crescimento de duas cultivares de alface em sistemas de aeroponia, NFT e substrato, e concluíram que o sistema NFT resultou em maior crescimento da parte aérea, enquanto a aeroponia favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular.

Tafesse et al. (2021) avaliaram as relações hídricas e a absorção de  $\text{NO}_3^-$  no cultivo aeropônico do tomateiro sob estresse salino, observando uma redução significativa no consumo hídrico com o aumento da salinidade, embora a absorção de  $\text{NO}_3^-$  tenha sido limitada principalmente pela sua disponibilidade.

Apesar dos avanços, há uma carência de estudos comparativos sobre a produção de plantas em diferentes sistemas de cultivo sem solo usando águas salobras. Especificamente, a escassez de pesquisas sobre o sistema em aeroponia sublinha a necessidade de mais investigações sobre o desempenho agrônômico, as respostas fisiológicas e bioquímicas, e a tolerância à salinidade das hortaliças nesse sistema.

### **1.2.8 Hortaliças folhosas**

As hortaliças desempenham um papel fundamental na alimentação devido ao seu alto valor nutritivo, especialmente por serem ricas em vitaminas, além de apresentarem um sabor delicado, pequeno porte e rápido crescimento (Henz; Alcântara, 2009). No Brasil, a região Nordeste se destaca pela diversidade de condições edafoclimáticas, o que favorece a produção de uma grande variedade de hortaliças folhosas, inflorescências e frutos ao longo de todo o ano, desde que as necessidades climáticas de cada espécie e cultivar sejam atendidas (Brainer, 2021).

As hortaliças folhosas, em particular, são plantas de ciclo curto e de fácil cultivo, características que as tornam ideais para pequenos produtores. Além disso, essas hortaliças oferecem boa rentabilidade por área cultivada, o que é crucial em regiões

como o Semiárido brasileiro, onde as propriedades agrícolas tendem a ser de tamanho reduzido (Melo; Araújo, 2016; Brainer, 2021).

De acordo com o Censo Agropecuário de 2017, o Nordeste é a região com a maior concentração de estabelecimentos de horticultura no Brasil, representando cerca de 41,0% do total nacional. As principais hortaliças folhosas cultivadas nessa região são o coentro (27,1%), a alface (24,0%) e a cebolinha (22,8%) (IBGE, 2017). Isso demonstra a importância econômica e social dessas culturas para a região.

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma hortaliça anual, pertencente à família Asteraceae, tem como centro de origem a região Asiática e o Mediterrâneo, e foi introduzida no Brasil pelos portugueses no século XVI. Atualmente, é considerada uma das hortaliças folhosas mais consumidas no Brasil e no mundo. Tem como características morfológicas o porte herbáceo com folhas alternas presas a um caule curto (Henz; Suinaga, 2009; Colariccio; Chaves, 2017). A alface é delicada e sensível às condições climáticas como temperatura extrema e luminosidade. Possui níveis consideráveis de cálcio, potássio, fósforo, ferro, magnésio, flúor e vitaminas A, B1, B2 e C, boa quantidade de fibras e baixas calorias (Colariccio; Chaves, 2017).

Além do seu consumo *in natura*, existem algumas utilidades menos comuns para a alface, as quais englobam o cigarro sem nicotina, feito a partir de suas folhas secas, óleo comestível extraído a partir da prensagem das sementes, medicamentos indutores do sono, e sedativos feitos a partir do látex seco contido nas hastes e outros tecidos da planta (Ryder, 2002).

A alface tem tido grande destaque no mercado hortifruti nacional, com maior produção concentrada na região sudeste do país, com volume produzido de 575,5 mil toneladas, enquanto em todo território nacional essa produção foi de 908,2 toneladas. Os maiores polos da cultura, são Ibiúna e Mogi das Cruzes, no Estado de São Paulo, com respectivos 21,3 e 13,8 mil hectares, seguidos de Teresópolis, no Rio de Janeiro, Mário Campos e Caeté, em Minas Gerais (Kist et al., 2019).

A rúcula (*Eruca sativa*) é uma hortaliça herbácea anual, originária do Mediterrâneo, pertencente à família das Brássicas, assim como o brócolis, a couve-flor e, dentre outras hortaliças de agregado valor econômico. É uma hortaliça de pequeno porte, apresentando geralmente altura entre 15 e 20 cm, com folhas verdes e recortadas (Vieira Filho et al., 2017).

Além de ser uma fonte alimentar, a rúcula possui propriedades nutraceuticas, sendo um bom depurativo, fonte de vitamina C e de ferro. Na sua composição, em cada 100 g de matéria fresca, há em média 91,7 g de água; 2,58 g de proteína; 1,6 g de fibra; 160 mg de cálcio; 1,40 mg de ferro; 47 mg de magnésio; 52 mg de fósforo; 369 mg de potássio; 27 mg de sódio; 0,47 mg de zinco; 15 mg de vitamina C; 0,044 mg de tiamina; 0,086 mg de riboflavina; 0,305 mg de niacina; 0,437 mg de ácido pantotênico e 0,073 mg de vitamina B<sub>6</sub> (Aguiar et al., 2014).

Nos últimos anos, a rúcula tem mostrado grande destaque, tanto no seu cultivo, quanto no seu consumo. Estima-se que a área cultivada no Brasil seja de mais de 20 mil ha/ano e que, sua produção seja de aproximadamente 40 toneladas anuais, sendo que a maior produção se concentra no sudeste e sul do país (IBGE, 2017).

### **1.3 HIPÓTESES**

- O tipo de sistema hidropônico de cultivo influencia a produção da alface e da rúcula;
- A tolerância à salinidade das duas hortaliças folhosas varia em função do sistema de cultivo;
- A produtividade da alface e da rúcula na aeroponia é superior à dos demais sistemas, independentemente das condutividades elétricas da solução nutritiva.
- O consumo hídrico e a produtividade da água variam de acordo com o sistema de cultivo hidropônico utilizado;
- Os teores de solutos na alface e na rúcula são influenciados pelo tipo de cultivo hidropônico.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo geral**

Avaliar os aspectos produtivos, bioquímicos e a tolerância salina da alface e da rúcula cultivadas nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia sob diferentes condutividades elétricas da solução nutritiva.

#### **1.4.2 Objetivo específicos**



- Avaliar parâmetros de crescimento das culturas: massas fresca e seca da parte aérea, número de folhas e teor de massa seca;
- Avaliar o consumo hídrico e a produção da água nos diferentes sistemas;
- Avaliar a produtividade, as produções relativas de massas fresca e seca e a salinidade limiar em todos os sistemas de cultivo;
- Avaliar os teores de solutos inorgânicos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e orgânicos (carboidratos solúveis, proteínas solúveis, prolina livre e aminoácidos livres) em folhas e raízes de ambas as culturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S. A.; CASTRO, C. E. F. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 7. Ed. Campinas: IAC, 452p., 2014.
- AHANGER, M. A.; TYAGI, S. R.; WANI, M. R.; AHMAD, P. Tolerância à seca: papel dos osmólitos orgânicos, reguladores de crescimento e nutrientes minerais. *In: Mecanismos fisiológicos e estratégias de adaptação em plantas em ambientes em mudança*. Springer, Nova York, NY, p. 25-55, 2014.
- MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1318, 2021.
- ALMEIDA, D. M.; OLIVEIRA, M. M.; SAIBO, N. J. M. Regulation of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants. **Genetics and molecular biology**, v. 40, p. 326-345, 2017.
- APSE, M. P.; BLUMWALD, E. Na<sup>+</sup> transport in plants. **FEBS letters**, v. 581, n. 12, p. 2247-2254, 2007.
- ASADUZZAMAN, M.; SAIFULLAH, M.; MOLLICK, A. S. R.; HOSSAIN, M.; HALIM, G.; ASAO, T. **Soiless culture: Use of substrates for the production of quality horticultural crops**. BoD–Books on Demand, 2015.
- AZEVEDO NETO, A. D.; SILVA, E. C. Physiology and biochemistry of salt stress tolerance in plants. *In: Abiotic stresses in crop plants*. Wallingford UK: CABI, 2015. p. 81-101.
- BARTHA, C.; FODORPATAKI, L.; MARTINEZ-BALLESTA, M. C.; POPESCU, O.; CARVAJAL, M. Sodium accumulation contributes to salt stress tolerance in lettuce cultivars. **Journal of applied botany and food quality-angewandte botanik**, v. 88, p. 42-48, 2015.
- BIONE, M. A. A.; SOARES, T. M.; COVA, A. M. W.; PAZ, V. P. S.; GHEYI, H. R.; RAFAEL, M. R. S.; MODESTO, F. J. N.; SANTANA, J. A.; NEVES, B, S, L. Hydroponic production of 'Biquinho'pepper with brackish water. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106607, 2021.
- BRAINER, M. S. C. P. **Produção de hortaliças na área de atuação do BNB**. 2021.
- COLARICCIO, A.; CHAVES, A. L. R. **Aspectos fitossanitários da cultura da alface**. São Paulo: Instituto Biológico, n. 29, p.1-126, jul. 2017. ISSN 2594-6080.
- COSTA, L. F.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G.; MODESTO, F. J. N.; QUEIROZ, L. A.; PEREIRA, J. S. Cauliflower growth and yield in a hydroponic system with brackish water. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 1060-1060, 2020.

COVA, A. M. W.; FREITAS, F. T. O.; VIANA, P. C.; RAFAEL, M. R. S.; AZEVEDO NETO, A. D.; SOARES, T. M. Content of inorganic solutes in lettuce grown with brackish water in different hydroponic systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 150-155, 2017.

DAR, M. I.; NAIKOO, M. I.; REHMAN, F.; NAUSHIN, F.; KHAN, F. A. Proline accumulation in plants: roles in stress tolerance and plant development. In: Osmolytes and plants acclimation to changing environment: emerging omics technologies. New Delhi: **Springer**, 2016. p. 155-166.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; NETO, O.; N. S.; QUEIRZO, Í, S. R. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. In: **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. GHEYI, H. R. et al. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, Cap. 11, p. 151-162, 2016.

DUARTE, B.; SANTOS, D.; MARQUES, J. C.; CAÇADOR, I. Ecophysiological adaptations of two halophytes to salt stress: photosynthesis, PS II photochemistry and anti-oxidant feedback—implications for resilience in climate change. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 67, p. 178-188, 2013.

ESTEVES, B. S.; SUZUKI, M. S. Efeito da salinidade sobre as plantas. **Oecologia Australis**, v.12, n. 4, p. 662-679, 2008.

FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Salinity tolerance in halophytes. **New Phytologist**, v. 179, n. 4, p. 945-963, 2008.

FLOWERS, T. J.; MUNNS, R.; COLMER, T. D. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. **Annals of Botany**, v. 115, n. 3, p. 419-431, 2015.

FRANCO-NAVARRO, J. D.; BRUMOS, J.; ROSALES, M. A.; CUBERO-FONT, P.; TALON, M.; COLMENERO-FLORES, J. M. Chloride regulates leaf cell size and water relations in tobacco plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 873-891, 2016.

FURLANI, P.R.; BOLONHEZI, P; SILVEIRA, L.C.P; FAQUIN, V. Nutrição mineral de hortaliças, preparo e manejo de soluções nutritivas. **Informe Agropecuário**, v.20, n.200/201, p.90-98, 1999a.

GAIKWAD, D. J.; MAITRA, S. Hydroponics Cultivation of Crops. **Protected Cultivation and Smart Agriculture**, p. 279-287, 2020.

GHORBEL, R.; CHAKCHAK, J.; MALAYOGLU, H. B.; ÇETIN, N. S. Hydroponics “Soilless Farming”: The Future of Food and Agriculture—A. In: **5th International Students Science Congress Proceedings Book**. 2021. p. 45.

GODDEK, S.; JOYCE, A.; KOTZEN, B.; BURNELL, G. M. **Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future**. Springer Nature, 2019.

GUAN, Z.; CHEN, S.; CHEN, F.; LIU, Z.; FANG, W.; TANG, J. Comparison of stress effect of NaCl, Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> on two Chrysanthemum species. **Acta Horticulturae**, n. 937, p. 369-375, 2012.

HENZ, G. P.; ALCÂNTARA, F. A. **Hortas: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 237 p.: il. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

HENZ, G. P.; SUINAGA, F. A. **Tipos de alface cultivados no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2009. (Comunicado Técnico, n. 75).

HERNÁNDEZ, J. A.; ALMANSA, M. S. Short-term effects of salt stress on antioxidant systems and leaf water relations of pea leaves. **Physiologia Plantarum**, v. 115, n. 2, p. 251-257, 2002.

HOLANDA, A. C.; SANTOS, R. V.; SOUTO, J. S.; ALVES, A. R. Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em ambientes degradados por sais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n.1, p. 39-50, 2007.

HUSSAIN, A.; IQBAL, K.; AZIEM, S.; MAHATO, P.; NEGI, A. K. A review on the science of growing crops without soil (soilless culture)-a novel alternative for growing crops. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 7, n. 11, p. 833, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 out. 2022.

ISHIKAWA, T.; SHABALA, S. Control of xylem Na<sup>+</sup> loading and transport to the shoot in rice and barley as a determinant of differential salinity stress tolerance. **Physiologia plantarum**, v. 165, n. 3, p. 619-631, 2019.

KETEHOU, T.; CARTHER, K. F. I.; NOMAN, M.; WANG, F. W.; LI, X. W.; LI, H. Y. Adaptation of plants to salt stress: characterization of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> transporters and role of CBL gene family in regulating salt stress response. **Agronomy**, v. 9, n. 11, p. 687, 2019.

KIST, B. B.; SANTOS, C. E.; CARVALHO, C.; BELING, R. R. **Anuário Brasileiro da horti&fruti 2019**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 88 p., 2019.

KOHLER, J.; HERNANDEZ, J. A.; CARAVACA, F.; ROLDAN, A. Induction of antioxidant enzymes is involved in the greater effectiveness of a PGPR versus AM

fungi with respect to increasing the tolerance of lettuce to severe salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2-3, p. 245-252, 2009.

LAKHIAR, I. A.; GAO, J.; SYED, T. N.; CHANDIO, F. A.; BUTTAR, N. A. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. **Journal of plant interactions**, v. 13, n. 1, p. 338-352, 2018.

LEHMANN, S.; FUNCK, D.; SZABADOS, L.; RENTSCH, D. Proline metabolism and transport in plant development. **Amino acids**, v. 39, n. 4, p. 949-962, 2010.

LI, Q.; LI, X.; TANG, B.; GU, M. Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics, and substrate culture. **Horticulturae**, v. 4, n. 4, p. 35, 2018.

LIRA, R. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, G. F.; SANTOS, A. N.; ROLIM, M. M. Production, water consumption and nutrient content of Chinese cabbage grown hydroponically in brackish water. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, p. 497-505, 2015.

MACHADO, R. M. A.; SERRALHEIRO, R. P. Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. **Horticulturae**, v. 3, n. 2, p. 30, 2017.

MAHMOUDI, H.; KADDOUR, R.; HUANG, J.; NASRI, N.; OLFA, B.; M'RAH, S.; HANNOUFA, A.; LACHAAL M.; OUERGHI, Z. Varied tolerance to NaCl salinity is related to biochemical changes in two contrasting lettuce genotypes. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 33, n. 5, p. 1613-1622, 2011.

MANSOUR, M. M F.; ALI, E. F. Evaluation of proline functions in saline conditions. **Phytochemistry**, v. 140, p. 52-68, 2017.

MARTINS, J. B.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SILVA JÚNIOR, F. J.; SILVA, G. F.; MEDEIROS, S. S. Production of parsley in hydroponic conditions under isosmotic brackish nutrient solutions. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019.

MAUCIERI, C.; NICOLETTO, C.; VAN OS, E.; ANSEEUW, D.; HAVERMAET, R. V.; JUNGE, R. Hydroponic technologies. **Aquaponics food production systems**, v. 77, 2019.

MELO, P. C. T.; ARAÚJO, T. H. **Olericultura: planejamento da produção, do plantio à comercialização**. 2016.

MENDES, B. S. S.; WILLADINO, L.; CUNHA, P. C.; OLIVEIRA FILHO, R. A.; CAMARA, T. R. Mecanismos fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 71-77, 2011.

MODESTO, F. J. N.; SANTOS, M. A. C. M.; SOARES, T. M.; SANTOS, E. P. M. Crescimento, produção e consumo hídrico do quiabeiro submetido à salinidade em condições hidropônicas. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 86-97, 2019.

MONTEIRO, J. G.; CRUZ, F. J. R.; NARDIN, M. B.; SANTOS, D. M. M. Crescimento e conteúdo de prolina em plântulas de guandu submetidas a estresse osmótico e à putrescina exógena. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 18-25, 2014.

MORADI, F.; ISMAIL, A. M. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ROS-scavenging systems to salt stress during seedling and reproductive stages in rice. **Annals of botany**, v. 99, n. 6, p. 1161-1173, 2007.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 239-250, 2002.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. **New phytologist**, v. 167, n. 3, p. 645-663, 2005.

MUNNS, R.; GILLIHAM, M. "Salinity tolerance of crops—what is the cost?." **New phytologist** 208, no. 3 (2015): 668-673.

NEMATI, I.; MORADI, F.; GHOLIZADEH, S.; ESMAEILI, M. A.; BIHAMTA, M. R. The effect of salinity stress on ions and soluble sugars distribution in leaves, leaf sheaths and roots of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Plant, Soil and Environment**, v. 57, n. 1, p. 26-33, 2011.

NETONDO, G. W.; ONYANGO, J. C.; BECK, E. Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. **Crop Science**, v. 44, p. 806-811, 2004.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 60, n. 3, p. 324- 349, 2005.

PEDROTTI, A., CHAGAS, R. M., RAMOS, V. C., PRATA, A. P., LUCAS, A. A. T., SANTOS, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1308-1324, 2015.

POPP, J.; LAKNER, Z.; HARANGI-RAKOS, M.; FARI, M. The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 32, p. 559-578, 2014.

RAJENDRAN, K.; TESTER, M.; ROY, S. J. Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals. **Plant, cell & environment**, v. 32, n. 3, p. 237-249, 2009.

REDDY, P. S.; JOGESWAR, G.; RASINENI, G. K.; MAHESWARI, M.; REDDY, A. R.; VARSHNEY, R. K.; KISHOR, P. B. K. Proline over-accumulation alleviates salt stress

and protects photosynthetic and antioxidant enzyme activities in transgenic sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 94, p. 104-113, 2015.

RODRÍGUEZ-ORTEGA, W. M.; MARTÍNEZ, V.; NIEVES, M.; SIMÓN, I.; LIDÓN, V.; FERNANDEZ-ZAPATA, J. C.; MARTINEZ-NICOLAS, J. J.; CÁMARA-ZAPATA, J. M.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F. Agricultural and physiological responses of tomato plants grown in different soilless culture systems with saline water under greenhouse conditions. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2019.

RYDER, E.J. The new salad crop revolution. In **Proceedings of the Fifth National Symposium Trends in New Crops and New Uses**, Atlanta, GA, USA, 10–13 November 2002; pp. 408–412.

SAHIN, U.; EKINCI, M.; ORS, S.; TURAN, M.; YILDIZ, S.; YILDIRIM, E. Effects of individual and combined effects of salinity and drought on physiological, nutritional and biochemical properties of cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata). **Scientia Horticulturae**, v. 240, p. 196-204, 2018.

SANTOS, A. A. Sistema de cultivo hidropônico. **SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga**, v. 4, n. 1, p. 14, 2018.

SANTOS, A. N.; SILVA, Ê. F. F.; SOARES, T. M.; DANTAS, R. M.; SILVA, M. M. Produção de alface em NFT e Floating aproveitando água salobra e rejeito da dessalinização. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, p. 319-326, 2011.

SARDARE, M. D.; ADMANE, S. V. A review on plant without soil-hydroponics. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 2, n. 3, p. 299-304, 2013.

SCHNEIDER, P.; ROCHELL, V.; PLAT, K.; JAWORSKI, A. Circular Approaches in Small-Scale Food Production. **Circular Economy and Sustainability**, p. 1-25, 2021.

SHELKE, D. B.; NIKALJE, G. C.; NIKAM, T. D.; MAHESHWARI, P.; PUNITA, D. L.; RAO, K. R. S. S.; KISHOR.; SUPRASANNA, P. Chloride (Cl<sup>-</sup>) uptake, transport, and regulation in plant salt tolerance. **Molecular plant abiotic stress: biology and biotechnology**, p. 241-268, 2019.

SIDDIQI, E. H.; ASHRAF, M.; QURAINY, F. A.; AKRAM, N. A. Salt-induced modulation in inorganic nutrients, antioxidant enzymes, proline content and seed oil composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 15, p. 2785-2793, 2011.

SILVA, F. V.; DUARTE, S. N.; LIMA, C. J. G. S.; DIAS, N. S.; SANTOS, R. S. S.; MEDEIROS, P. R. F. Cultivo hidropônico de rúcula utilizando solução nutritiva salina. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 476-482, 2013.

SILVA, M. G.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, I. S.; SILVA FILHO, J. A.; CARMO, F. F. Frequências de recirculação de solução nutritiva no cultivo hidropônico de coentro com água salobra. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 447-454, 2016.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. L. F.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In: **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 1. Ed. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 161-18.

SOARES, T. M.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F.; JORGE, C. A. Combinação de águas doce e salobra para produção de alface hidropônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 7, p. 705-714, 2010.

STONER, R. J.; CLAWSON, J. M. A high performance, gravity insensitive, enclosed aeroponic system for food production in space. **Principal Investigator, NASA SBIR NAS10-98030**, 1998.

TAFESSE, E. G.; AIDOO, M. K.; LAZAROVITCH, N.; RACHMILEVITCH, S. Aeroponic systems: A unique tool for estimating plant water relations and NO<sub>3</sub> uptake in response to salinity stress. **Plant direct**, v. 5, n. 4, p. e00312, 2021.

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; McDONALD, G. K. High concentrations of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 15, p. 4449-4459, 2010.

VAN OS, E. A.; GIELING, Th H.; LIETH, J. Heinrich. Technical equipment in soilless production systems. In: **Soilless culture**. Elsevier, 2019. p. 587-635.

VENTER, G. Different types of hydroponic systems: Farming for tomorrow. **Farmer's Weekly**, v. 2017, n. 17009, p. 26-27, 2017.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. *Amino acids*, v. 35, n. 4, p. 753-759, 2008.

VIEIRA FILHO, P. S.; OLIVEIRA, G. Q. DE; BISCARO, G. A.; MOTOMIYA, A. V. A.; GEISENHOFF, L. O. Fertirrigação com nitrogênio na cultura da rúcula. **Revista Agrarian**, v. 10, n. 38, p. 304-310, 2017.



## CAPÍTULO 2

### Produtividade e tolerância salina da alface e da rúcula em diferentes sistemas hidropônicos com águas salobras

**RESUMO:** Este estudo teve como objetivo avaliar a produtividade da água e a tolerância ao estresse salino da alface e da rúcula em diferentes sistemas hidropônicos utilizando águas salobras. Os experimentos foram realizados em ambiente protegido de forma independente e inteiramente casualizada nos sistemas floating, NFT (nutrient film technique) e aeroponia, aplicando quatro níveis de salinidade da solução nutritiva com cinco repetições: 2,0 (controle), 3,7, 5,4 e 7,1 dS m<sup>-1</sup>. Os resultados mostraram que a produção de massa fresca e seca da parte aérea foi significativamente afetada pela salinidade tanto na alface quanto na rúcula cultivadas nos sistemas floating e NFT. Em contrapartida, na aeroponia, a salinidade não apresentou impacto significativo sobre a produção de massa fresca. O consumo hídrico foi reduzido para ambas as culturas em todos os sistemas, enquanto a produtividade da água na alface apresentou tendência de queda nos sistemas floating e NFT à medida que a salinidade aumentou, mas permaneceu estável na aeroponia. Para a rúcula, a produção da água não foi significativamente afetada nos sistemas floating e NFT, mas aumentou na aeroponia. De modo geral, as maiores produtividades de massa fresca da parte aérea foram observadas na aeroponia, onde a salinidade não influenciou negativamente nenhuma das culturas. Nos sistemas floating e NFT, a produtividade diminuiu com o aumento da salinidade. Os limites salinos para a produção sem perdas significativas foram ligeiramente melhores no floating (3,06 para a alface e 3,7 dS m<sup>-1</sup> para a rúcula) do que no NFT (2,52 para a alface e 1,44 dS m<sup>-1</sup> para a rúcula) para ambas as culturas, enquanto na aeroponia não foi possível estabelecer um limiar, uma vez que a produtividade não diminuiu nos níveis salinos testados. As produções relativas de massa seca da parte aérea da alface e da rúcula apresentaram as maiores reduções nos sistemas floating e NFT, enquanto na aeroponia, observou-se menores quedas ou até mesmo aumentos na produção. Esses resultados ressaltam a potencialidade da aeroponia para otimizar a resposta da alface e da rúcula ao estresse salino, tendo como consequência a melhoria da produção em geral, especialmente quando se utilizam águas ricas em sais no preparo da solução nutritiva.

**Palavras-chave:** aeroponia, cultivo sem solo, estresse salino, produção da água, otimização agrícola.

## Productivity and salt tolerance of lettuce and rocket in different hydroponic systems with brackish water

**ABSTRACT:** The aim of this study was to evaluate the water productivity and tolerance to salt stress of lettuce and rocket in different hydroponic systems using brackish water. The experiments were carried out in a protected environment in an independent and entirely randomized manner in floating, NFT (nutrient film technique) and aeroponic systems, applying four levels of salinity to the nutrient solution with five repetitions: 2.0 (control), 3.7, 5.4 and 7.1 dS m<sup>-1</sup>. The results showed that the production of fresh and dry mass of the aerial part was significantly affected by salinity in both the lettuce and rocket grown in the floating and NFT systems. On the other hand, salinity had no significant impact on fresh mass production in aeroponics. Water consumption was reduced for both crops in all systems, while water productivity in lettuce showed a downward trend in floating and NFT systems as salinity increased, but remained stable in aeroponics. For rocket, water yield was not significantly affected in floating and NFT systems, but increased in aeroponics. In general, the highest yields of fresh shoot mass were observed in aeroponics, where salinity did not negatively influence any of the crops. In the floating and NFT systems, productivity decreased as salinity increased. The salinity thresholds for production without significant losses were slightly better in floating (3.06 for lettuce and 3.7 dS m<sup>-1</sup> for rocket) than in NFT (2.52 for lettuce and 1.44 dS m<sup>-1</sup> for rocket) for both crops, while in aeroponics it was not possible to establish a threshold, since productivity did not decrease at the salinity levels tested. The relative dry mass yields of the aerial part of lettuce and rocket showed the greatest reductions in the floating and NFT systems, while in aeroponics, smaller drops or even increases in production were observed. These results highlight the potential of aeroponics to optimize the response of lettuce and rocket to salt stress, resulting in improved production in general, especially when using water rich in salts to prepare the nutrient solution.

**Keywords:** aeroponics, soilless cultivation, saline stress, water production, agricultural optimization.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Diante das mudanças climáticas e/ou de fenômenos climáticos periódicos, a disponibilidade de água baixa salinidade para necessidades básicas humanas e, principalmente, para a produção agrícola tem sido motivo de grande preocupação global. Além disso, outros fatores como a salinidade do solo e da água e os problemas relacionados impõem grandes restrições para a produção de alimentos, sendo particularmente mais críticos em zonas áridas e semiáridas, onde se predomina fontes de águas subterrâneas ricas em sais para irrigação (Cova et al., 2017; Minhas et al., 2020). Em ambientes salinos, as plantas podem apresentar redução no crescimento e no rendimento produtivo em virtude das desordens fisiológicas e metabólicas resultantes dos efeitos osmóticos e iônicos provocados pelos sais (Pereira et al., 2020; Correia et al., 2021; Rosca et al.; 2023).

Apesar do uso de águas subterrâneas ser crucial em áreas onde as chuvas e águas superficiais são escassas, como no semiárido brasileiro, diversas regiões do mundo enfrentam um rápido esgotamento das reservas subterrâneas de água (Costa et al., 2020; Mukherjee et al., 2021).

Um estudo avaliou a qualidade físico-química das águas dos aquíferos subterrâneos em mais de 40 países, os quais abrangem cerca de 75% das captações globais (Jasechko et al., 2024) e, os autores observaram uma diminuição de 71% nos níveis dessas águas entre os anos 2000 e 2022 em aproximadamente 2000 sistemas aquíferos, e destacaram que muitos desses aquíferos em declínio estão localizados em terras áridas e semiáridas. Diante dessas circunstâncias, torna-se crucial adotar tecnologias e técnicas de cultivo que permitam não apenas a viabilidade do uso de águas ricas em sais na produção de alimentos, mas que também garanta boa qualidade e uso eficiente dos recursos, especialmente da água.

Como alternativa tecnológica para enfrentar os desafios relacionados à escassez de água e à qualidade da mesma, têm sido propostas técnicas de cultivo sem solo em ambiente protegido (Bione et al., 2021), destacando-se principalmente as técnicas de "hidroponia" (Fussy; Papenbrock, 2022). O cultivo em sistemas hidropônicos tem crescido globalmente nos últimos anos devido ao uso mais eficiente da água e dos fertilizantes e controle mais preciso sobre pragas e fatores climáticos (Kumari et al., 2018). Adicionalmente, a hidroponia mitiga os riscos do uso de águas ricas em sais para as plantas, solo e meio ambiente (Cova et al., 2017), contribuindo

para elevar a qualidade e produtividade das colheitas, resultando em maior competitividade e ganhos econômicos.

Dentre as diferentes técnicas de cultivo hidropônico, o nutrient film technique (NFT) é o mais comum para a produção bem-sucedida de vegetais folhosos em todo o mundo, especialmente no Brasil. Enquanto isso, o floating e a aeroponia são mais utilizados em países líderes em tecnologia hidropônica, como Holanda, Austrália, Inglaterra, Canadá, EUA e Israel, com destaque para a aeroponia vertical, que tem crescido rapidamente, principalmente no cenário dos cultivos urbanos, por sua maior produtividade (Sharma et al., 2018).

Nesse contexto, é oportuna a concepção de estudos que investiguem o desempenho de culturas que apresentem alto potencial de mercado em diferentes sistemas hidropônicos sob condições salinas. Dentre elas, destacam-se as hortaliças folhosas como a alface, folhosa mais produzida hidroponicamente, e a rúcula que tem ganhado espaço no mercado consumidor. Nessa perspectiva, estudos têm evidenciado ampla diferença de produtividade e de produção da água para hortaliças quando comparados os cultivos em diferentes sistemas hidropônicos (Rosa-Rodríguez et al., 2020; Fayeizadeh et al., 2021).

Segundo Ó et al. (2022), a tolerância à salinidade varia entre espécies e genótipos vegetais. No entanto, há escassez de trabalhos que busquem definir a tolerância das hortaliças em diferentes sistemas de cultivo sem solo. Trabalhos como o de Cova et al. (2017) apontam claramente para essa possibilidade, evidenciando diferenças na tolerância da alface ao estresse salino se cultivada nos sistemas NFT ou DFT.

O objetivo desse estudo foi avaliar a produção e a produtividade, da água, os limites de salinidade e a tolerância à salinidade das hortaliças folhosas alface e rúcula, cultivadas em diferentes sistemas hidropônicos com águas salobras.

## **2.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.2.1 Condições experimentais e tratamentos**

O estudo com a alface foi realizado no período de 02 a 27 de julho de 2022, enquanto que o estudo com a rúcula foi realizado de 22 de agosto a 11 de setembro do mesmo ano, ambos em casa de vegetação localizada na Universidade Federal do

Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas, Bahia, Brasil (12° 40' 1" Latitude Sul, 39° 06' 2" Longitude Oeste, com altitude média de 220 m). Segundo a classificação de Köppen, o clima local é tropical quente e úmido (Af) (Alvares et al., 2013).

Conforme os dados climatológicos coletados no interior da casa de vegetação durante o período experimental da alface, os valores mínimos, máximos e médios de temperatura e umidade relativa do ar foram, respectivamente, 19,16; 26,96 e 22 °C e 54,45, 93,21 e 80,16%. Para a rúcula os valores mínimos, máximos e médios de temperatura e umidade relativa do ar foram, respectivamente, 18,55; 26,6 e 21,64 °C e 53,4, 92,32 e 77,68%. A evapotranspiração de referência média foi de 2,4 mm dia<sup>-1</sup> para a alface e 2,6 mm dia<sup>-1</sup> para a rúcula.

As culturas estudadas foram a alface (*Lactuca sativa* L.) do grupo varietal crespa cv. 'Jade' da empresa Sakata sementes® e a rúcula (*Eruca sativa*) do grupo varietal folha larga cv. 'Folha Larga' da empresa Feltrin sementes®. O semeio foi realizado em espuma fenólica (0,02 x 0,02 x 0,03 m). No semeio da alface foi colocada uma semente por célula e, no semeio da rúcula quatro sementes por célula de espuma fenólica. Após a germinação, as mudas de alface e de rúcula foram levadas ao berçário e receberam solução nutritiva a 50% até o desenvolvimento de 4 folhas definitivas e, aos 20 dias pós-semeadura, plantas de alface e de rúcula foram submetidas a quatro níveis de condutividade elétrica da água (CE<sub>a</sub>) utilizada para o preparo da solução nutritiva (SN). Os diferentes níveis de CE<sub>a</sub> foram obtidos mediante a adição de NaCl na água de abastecimento local (CE<sub>a</sub> = 0,30 dSm<sup>-1</sup>), com as quantidades calculadas com base na metodologia proposta por Richards (1954) foram obtidas as seguintes condutividades elétricas de águas salobras: 1,7; 3,4 e 5,1 dS m<sup>-1</sup>. Em seguida, foram adicionados sais fertilizantes a essas águas, utilizando-se a formulação recomendada por Furlani et al. (1999a) para hortaliças folhosas. Após a adição dos sais fertilizantes, as condutividades elétricas dos tratamentos salinos foram 2,01; 3,73; 5,44 e 7,11 dS m<sup>-1</sup> para a alface e 2,01; 3,71; 5,41 e 7,06 dS m<sup>-1</sup> para a rúcula.

Para cada hortaliça foram realizados três ensaios simultâneos, em três tipos de sistemas de cultivos hidropônicos: floating, nutrient film technique (NFT) e aeroponia vertical. Ao longo dos ensaios as condutividades elétricas dos tratamentos foram monitoradas periodicamente, mantendo-as numa faixa de condutividade elétrica de ±0,2 dS m<sup>-1</sup>, mediante reposição de nutrientes quando necessária. Os quatro

tratamentos salinos foram distribuídos em cinco repetições inteiramente casualizadas, dispostos longitudinalmente na casa de vegetação e ocupando 20 parcelas experimentais para o NFT e aeroponia, enquanto para o floating foram utilizadas seis repetições, totalizando 24 parcelas experimentais.

Com o monitoramento periódico da condutividade elétrica dos tratamentos foi possível obter as seguintes condutividades elétricas médias ponderadas no tempo para os ensaios com a alface e com a rúcula: 1,8; 3,7; 5,4 e 6,9 dS m<sup>-1</sup>. Estes valores de condutividades elétricas foram utilizados para a análise estatísticas dos tratamentos.

A reposição da água consumida em todos os tratamentos foi feita com água de abastecimento local ( $CE_a = 0,30 \text{ dS m}^{-1}$ ) com auxílio de uma proveta graduada com capacidade de 1000 mL. Todos os tratamentos tiveram reposição de nutrientes a cada 3 dias mediante a adição de solução nutritiva padrão concentrada, a fim de manter a condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ) estabelecida inicialmente para cada tratamento. Esta manutenção foi realizada utilizando o critério de variação máxima de 25% da  $CE_{SOL}$  inicial dos tratamentos.

## **2.2.2 Estruturas experimentais**

### **2.2.2.1 Estruturas do sistema floating**

Em bancadas de mesas do tipo tela foram dispostos 24 recipientes plásticos com capacidade para 10 L de SN, espaçados 0,25 m entre si. Cada recipiente representou uma parcela experimental contendo três plantas. Os painéis flutuantes deste sistema foram feitos com isopor comercial de 0,02 m de espessura com diâmetro de 0,42 m. Cada painel possuía três orifícios com 0,05 m de diâmetro, espaçados em 0,40 m com disposição triangular em pontos equidistantes para a alocação das plantas (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Aspectos gerais do ensaio (15 dias após o transplante) com alface em sistema do tipo floating.

A aeração do sistema foi feita com compressor de ar do tipo turbina, acoplado em um sistema de distribuição de ar confeccionado em tubo PVC de 0,02 m. Das 06:00 às 18:00 horas, a aeração foi realizada durante 15 minutos em intervalos de uma hora; e das 18:00 às 06:00 horas do dia seguinte, durante 15 minutos em intervalos de 2 horas.

#### **2.2.2.2 Estruturas do sistema NFT**

Foi utilizado o sistema hidropônico nutrient film technique (NFT) em tubos de PVC (0,075 m de diâmetro, tipo irrigação) com vinte plantas por tubo. Os canais de cultivo foram instalados com declividade de 6% (a fim de aumentar a velocidade de escoamento da lâmina e garantir uma melhor oxigenação da SN). O espaçamento foi de 0,25 m entre plantas de uma mesma parcela e de 0,50 m entre parcelas. As parcelas experimentais foram dispostas duas a duas sobre armações de PVC posicionadas a 0,87 e 0,51 m de altura do solo nas cotas superior e inferior, respectivamente (Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Vista geral do ensaio (15 dias após o transplante) com cultivo da alface em sistema do tipo NFT.

Cada parcela foi representada por um canal hidropônico independente, sendo composta também por um reservatório de plástico (capacidade de 50 L) e uma eletrobomba (32 W) para recalcar a SN do reservatório para o canal hidropônico.

A circulação da SN foi realizada durante 5 minutos em intervalos de 5 minutos, das 06:00 às 18:00 horas; e das 18:00 às 06:00 horas do dia seguinte, durante 5 minutos em intervalos de 2 horas. Essa programação foi aplicada tanto para o sistema NFT quanto para a aeroponia vertical.

### **2.2.2.3 Estruturas do sistema em aeroponia vertical**

A unidade de cultivo deste sistema foi constituída por uma torre 1,5 m de altura de tubo PVC (0,15 m de diâmetro), com 1,2 m útil, e 0,3 m inserido na base de sustentação (para melhor estabilidade), um reservatório de solução nutritiva (capacidade 18 L) e eletrobomba (32 W) para elevar a solução do reservatório até a parte superior da torre (Figura 2.3).





**Figura 2.3.** Aspectos gerais do ensaio (20 dias após o transplante) com alface cultivada em sistema do tipo aeroponia vertical.

Cada torre consistiu em uma parcela experimental, tendo quatro faces úteis dispostas equidistantemente, perfazendo o total de 18 orifícios, espaçados em 0,25 m de uma mesma face. As torres foram dispostas em três fileiras espaçadas a 1,0 m, com espaçamento de 0,60 m entre parcelas da mesma fileira. Esse espaçamento resultou em uma área de 0,60 m<sup>2</sup> por torre de cultivo.

A distribuição da SN para as plantas foi realizada por meio de uma eletrobomba (34W) conectada a uma mangueira fixada em um recipiente com furos, permitindo a distribuição da solução em um fluxo tipo chuveiro no interior do tubo. Dessa forma, o sistema radicular das plantas foi irrigado. Os reservatórios das estruturas foram construídos com baldes plásticos com capacidade para 18L de SN.

Ao longo dos ensaios; não foram verificadas necessidades de troca da SN dos tratamentos, sendo feita apenas a reposição de nutrientes com base nas leituras de CE da SN dos tratamentos.

### **2.2.3 Crescimento e produção**

A colheita foi realizada aos 25 dias após o transplante (DAT) no estudo com alface, e aos 20 DAT no estudo com rúcula em todos os sistemas de cultivo. No cultivo floating foram coletadas três plantas por parcela, no NFT quatro plantas centrais por parcela, e na aeroponia vertical uma planta de cada face no terço médio de cada torre,

totalizando 4 plantas. Imediatamente foram determinadas a massa fresca da parte aérea (MFPA) e o número de folhas (NF) por planta.

Após a colheita, o material foi condicionado em sacos de papel e armazenados em estufa de circulação forçada a 65°C por 72 horas, para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA). O teor de matéria seca da parte aérea foi determinado conforme a equação 1.

$$TMS = \left( \frac{MSPA}{MFPA} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde, TMS é o teor de massa seca da parte aérea, %; MSPA é a massa seca da parte aérea, g/planta; e a MFPA é a massa fresca da parte aérea, g/planta.

#### 2.2.4 Consumo hídrico (CH) e produtividade da água

Para cada sistema, o volume diário evapotranspirado em cada parcela foi medido com proveta (1000 mL). O consumo hídrico (CH) acumulado por planta foi calculado dividindo-se o volume evapotranspirado total do ciclo pelo número de plantas contidas na parcela. A produtividade da água (PRA) foi calculada a partir da relação da produção de massa fresca da parte aérea e do CH acumulado (PRA = massa fresca da parte aérea/consumo hídrico).

#### 2.2.5 Produtividade e produção relativa

A produtividade das culturas por unidade de área em cada sistema de cultivo foi determinada com base no cálculo da área média ocupada por unidade de cultivo, segundo as dimensões de espaçamentos descritas anteriormente.

Com base nas médias das produções dos tratamentos (em termos de MFPA por planta), determinou-se para cada nível de  $CE_{SOL}$  a produção relativa, conforme equação 2.

$$RY = \left( \frac{MFPA_{Tratamento}}{MFPA_{Controle}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde,  $RY$  é a produção relativa, %;  $MSPA_{Tratamento}$  é a massa fresca da parte aérea de um dado tratamento salino, g/planta; e a  $MSPA_{Controle}$  é a massa fresca da parte aérea da testemunha, g/planta.

A salinidade limiar da alface e da rúcula foi determinada utilizando-se os valores das produtividades relativas para a produção total de massa fresca da parte aérea. O modelo matemático adotado foi o proposto por Maas e Hoffman (1977), conforme equação 3.

$$Y_{e,r} = \begin{cases} 1; & 0 \leq CE_{SOL} \leq CE_{SOLL} \\ 1 - b \times (CE_{SOL} - CE_{SOLL}); & CE_{SOLL} < CE_{SOL} < CE_{SOL0} \\ 0; & CE_{SOL} \geq CE_{SOL0} \end{cases} \quad (3)$$

Onde,  $Y_{e,r}$  é a produtividade relativa, kg/kg;  $b$  é o coeficiente de perda de produtividade por acréscimo unitário da condutividade elétrica além do limiar, %;  $CE_{SOL}$  é uma condutividade elétrica da solução nutritiva,  $dS\ m^{-1}$ ;  $CE_{SOLL}$  é a condutividade elétrica limiar (o limite a partir do qual há queda de produção),  $dS\ m^{-1}$ .

A produção relativa de massa seca da parte aérea foi determinada com base nos valores de massa de matéria seca da parte aérea (g/planta) de alface e de rúcula, de acordo com a equação 4.

$$PRMS = 1 - \left[ \left( \frac{MSPA_{Controle} - MSPA_{Tratamento}}{MSPA_{Controle}} \right) \times 100 \right] \quad (4)$$

Onde,  $PRMS$  é produção relativa da massa seca da parte aérea (%);  $MSPA_{Controle}$  é produção de massa seca da parte aérea controle (g/planta);  $MSPA_{Tratamento}$  é produção de massa seca da parte aérea sob tratamento salino (g/planta).

### 2.2.5 Análise estatística

Os três sistemas de cultivo foram avaliados independentemente. A significância dos tratamentos foi avaliada mediante aplicação da análise de variância do teste F. Quando significativa, a  $CE_{SOL}$  foi avaliada mediante análise de regressão,

selecionando-se os modelos na significância de seus termos, no valor do coeficiente de determinação e no significado agrônômico do desempenho da cultura. O programa estatístico utilizado foi o SISVAR 5.6 (Ferreira, 2019). Os limites de salinidade foram obtidos mediante a minimização dos erros aplicados via Solver (Excel 2016) no modelo de tolerância descrito na metodologia.

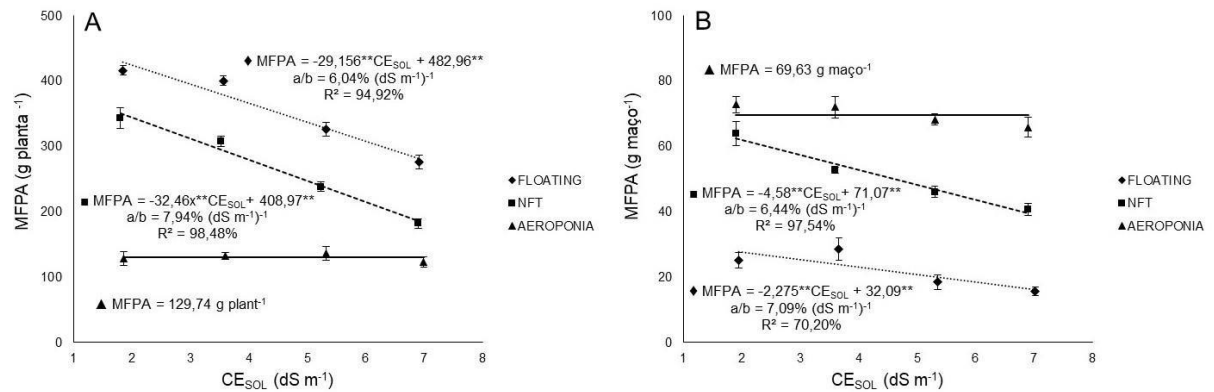
## 2.3 RESULTADOS

### 2.3.1 Produção e crescimento

Os resultados deste estudo mostraram diferentes respostas em cada sistema de cultivo para ambas as espécies. De acordo com os modelos de regressão obtidos para a alface (Figura 2.4A), a massa fresca da parte aérea (MFPA) apresentou redução linear de 6,04 e 7,94% por aumento unitário da  $CE_{SO_4}$  para o floating e NFT, respectivamente. Com base nos valores de MFPA estimados pelos modelos, no maior nível de  $CE_{SO_4}$  em relação à testemunha, observaram-se reduções de 34,4 e 47,23% para o floating e NFT, respectivamente. Já na aeroponia, não houve significância para os tratamentos testados, apresentando média geral de MFPA de 129,74 g planta<sup>-1</sup> (Figura 2.4A).

Além disso, as maiores médias de MFPA da alface foram registradas para o floating, independente da salinidade, seguido pelo NFT e aeroponia. Comparando-se a MFPA da testemunha do floating com a do NFT e da aeroponia, observa-se um rendimento superior para o floating em 17,6 e 69,2%, respectivamente.

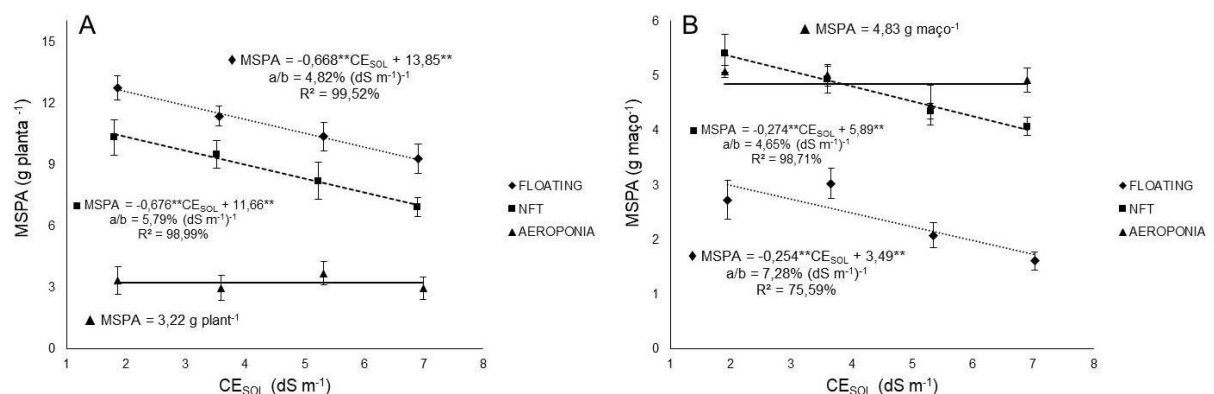
Para o experimento com rúcula, o cultivo em floating apresentou o menor rendimento de MFPA (Figura 2.4B), independentemente da salinidade testada, seguido pelo NFT, ambos apresentando reduções estimadas de MFPA de 41,7 e 36,7%, respectivamente, entre o controle e a maior salinidade. Por outro lado, o melhor desempenho produtivo foi verificado para a aeroponia vertical, que não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, com média geral de 69,63 g maço<sup>-1</sup>.



**Figura 2.4.** Valores médios da massa fresca da parte aérea (MFPA) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

A produção de massa seca da parte aérea (MSPA) da alface seguiu a mesma tendência da MFPA para os três sistemas de cultivo, mostrando decréscimo linear por aumento unitário da CE<sub>SOL</sub> de, respectivamente, 4,82 e 5,79%, para o floating e NFT e sem significância para a aeroponia, com uma média geral de 3,22 g planta<sup>-1</sup> (Figura 2.5 A).

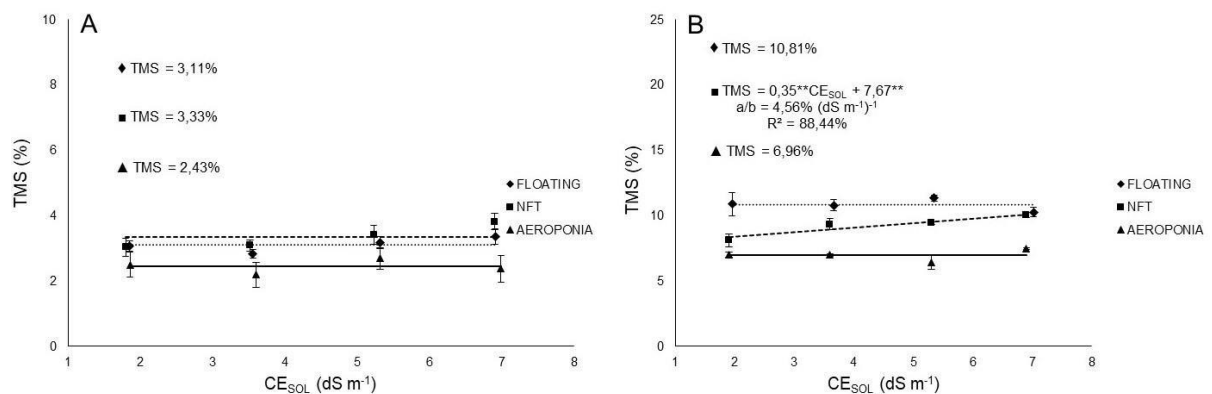
Para a rúcula, os maiores decréscimos de MSPA em função da salinidade foram registrados para o floating e NFT, com reduções lineares de 7,28 e 4,65% por acréscimo de unidade da CE<sub>SOL</sub>, enquanto a aeroponia não mostrou efeito significativo, com média geral de 4,83 g maço<sup>-1</sup> (Figura 2.5B).



**Figura 2.5.** Valores médios da massa seca da parte aérea (MSPA) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

O teor de massa seca da parte aérea (TMS) da alface não foi influenciado significativamente pelos tratamentos salinos, independentemente do sistema de cultivo, apresentando uma média geral de 3,11 para o floating, 3,33 para o NFT e 2,43% para a aeroponia (Figura 2.6A).

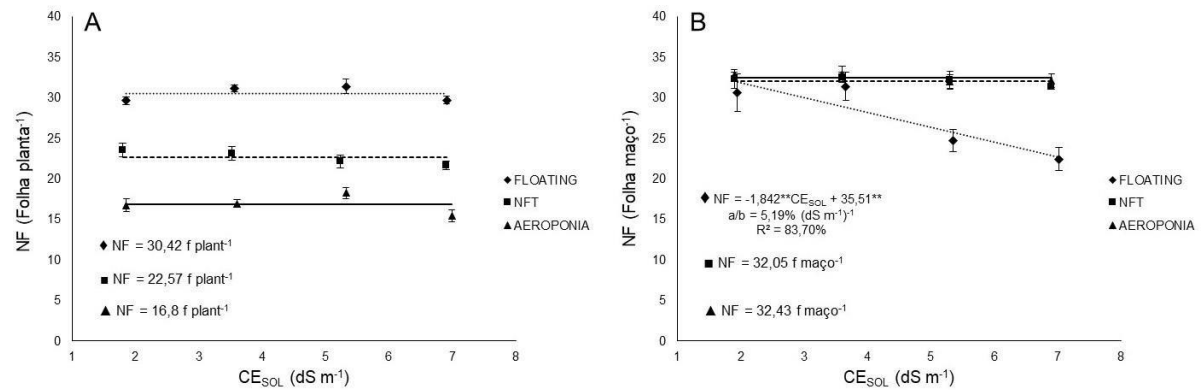
Para a rúcula, o TMS não mostrou efeito significativo da salinidade para os sistemas floating e aeropônico, que tiveram médias de 10,81 e 6,96%, respectivamente (Figura 2.6B). No entanto, para o NFT a salinidade aumentou o TMS em 17,35%, quando comparados o tratamento controle com o maior nível salino.



**Figura 2.6.** Valores médios do teor de massa seca da parte aérea (TMS) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

Para o número de folhas (NF) da alface não foi verificado efeito significativo da salinidade, embora possa ser observado que esta variável foi distinta entre os sistemas hidropônicos, com maior NF para o floating, seguido do NFT e aeroponia (Figura 2.7A). Comparando o valor médio do NF do floating com os valores dos demais sistemas, observa-se que este apresentou maior NF em 34,8 e 81,1% com relação ao NFT e aeroponia, respectivamente.

No experimento com rúcula, a salinidade diminuiu em 29,2% o NF no floating, comparando-se o controle e o maior nível salino. Para o NFT e aeroponia não houve efeito significativo dos tratamentos, ambos mostrando uma média geral do NF na ordem de 32 (Figura 2.7B).

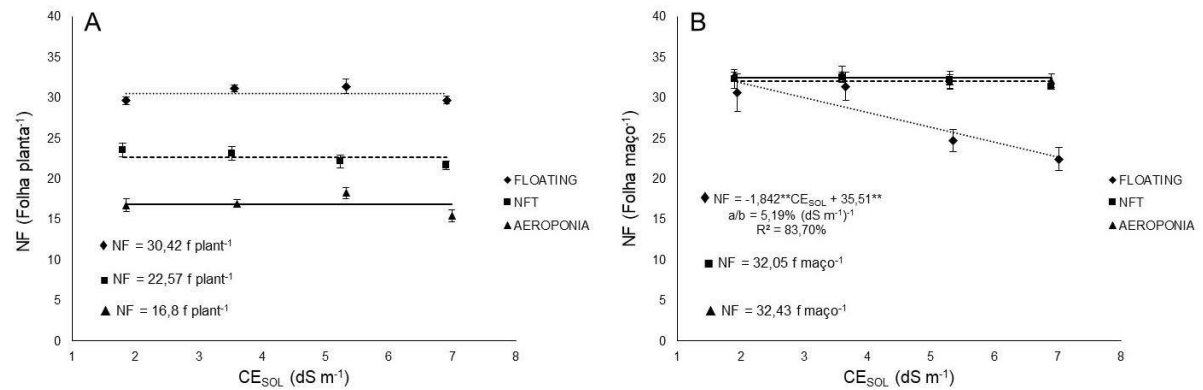


**Figura 2.7.** Número médio de folhas (NF) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (♦), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

### 2.3.2 Consumo hídrico e produtividade da água

De modo geral, o CH da alface diminuiu significativamente em todos os sistemas de cultivo com o aumento da CE<sub>SOL</sub>. Esta redução foi similar para o floating e NFT, apresentando decréscimos na ordem de 6,68 e 6,88% por acréscimo unitário da CE<sub>SOL</sub>, respectivamente, enquanto para a aeroponia houve redução de 4,03% por acréscimo unitário da CE<sub>SOL</sub> (Figura 2.8A). Com base nos valores estimados, a magnitude de redução do CH entre a maior CE<sub>SOL</sub> e a testemunha nos três sistemas foi de 38,7% para o floating, 40,2% para o NFT e 22,22% para a aeroponia.

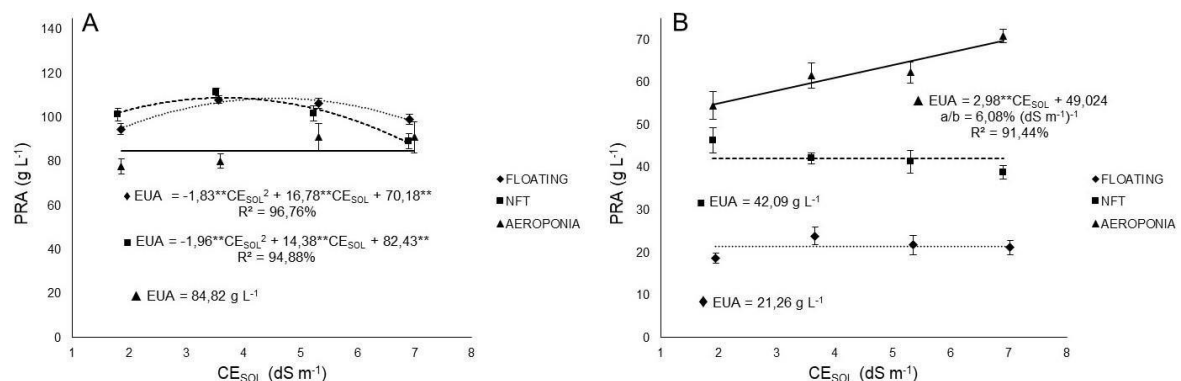
Para a rúcula, o CH foi similar nos três sistemas desde o controle até o segundo nível salino, a partir do qual as diferenças foram mais pronunciadas, com redução linear significativa em função da salinidade, com decréscimos de 7,87% no floating, 4,46% no NFT e 5,3% na aeroponia (Figura 2.8B). De modo geral, os sistemas apresentaram redução relativa do CH entre o controle e o maior nível salino na ordem de 47,2, 24,4 e 29,5%, respectivamente.



**Figura 2.8.** Consumo hídrico médio (CH) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

A produtividade da água (PRA) da alface foi influenciada significativamente pela salinidade nos sistemas hidropônicos floating e NFT, enquanto para a aeroponia não houve significância entre os tratamentos (Figura 2.9A). O aumento da CE<sub>SOL</sub> resultou em incremento da PRA no floating até a CE<sub>SOL</sub> 4,58 dS m<sup>-1</sup>, a partir do qual a PRA decresceu. Para o NFT, o aumento da CE<sub>SOL</sub> gerou um incremento máximo da PRA até a salinidade de 3,66 dS m<sup>-1</sup>, com posterior decréscimo. Enquanto isso, na aeroponia a PRA apresentou uma média geral de 84,82 g de massa fresca L<sup>-1</sup>.

No experimento com rúcula, os tratamentos salinos não alteraram de modo significativo a PRA nos sistemas floating e NFT, que apresentaram uma média geral na ordem de 21,26 e 42,09 g L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 2.9B). Porém, na aeroponia houve incremento linear da PRA com o aumento da salinidade. De acordo com o modelo obtido, a magnitude de aumento da PRA entre a testemunha e o maior nível salino na aeroponia foi de 28%.

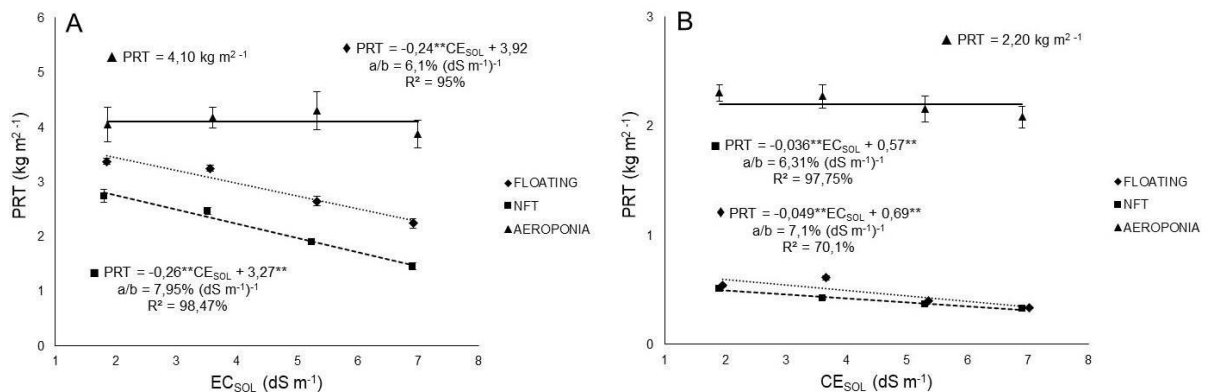




**Figura 2.9.** Produtividade média da água (PRA) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).

### 2.3.3 Produtividade, produção relativa e tolerância à salinidade

Para a produção da alface por unidade de área (PRT), verificou-se redução significativa em função do aumento da salinidade nos sistemas floating e NFT, enquanto na aeroponia não houve efeito significativo dos tratamentos. Comparando-se os tratamentos da testemunha e do maior nível salino nos sistemas floating e NFT, observou-se queda na PRT de  $1,2 \text{ kg m}^{-2}$  (35%) e  $1,3 \text{ kg m}^{-2}$  (47,3%), respectivamente. Já na aeroponia, foi registrada uma média geral de  $4,1 \text{ kg m}^{-2}$  (Figura 2.10A). Entre os sistemas, a maior produtividade foi registrada para a aeroponia, seguida pelo floating e NFT. A produtividade da aeroponia em maior nível salino da solução nutritiva foi 45 e 64% superior às verificadas para o floating e NFT, respectivamente, enquanto a produtividade do floating foi 34,7% maior que a verificada para o NFT para a mesma comparação.



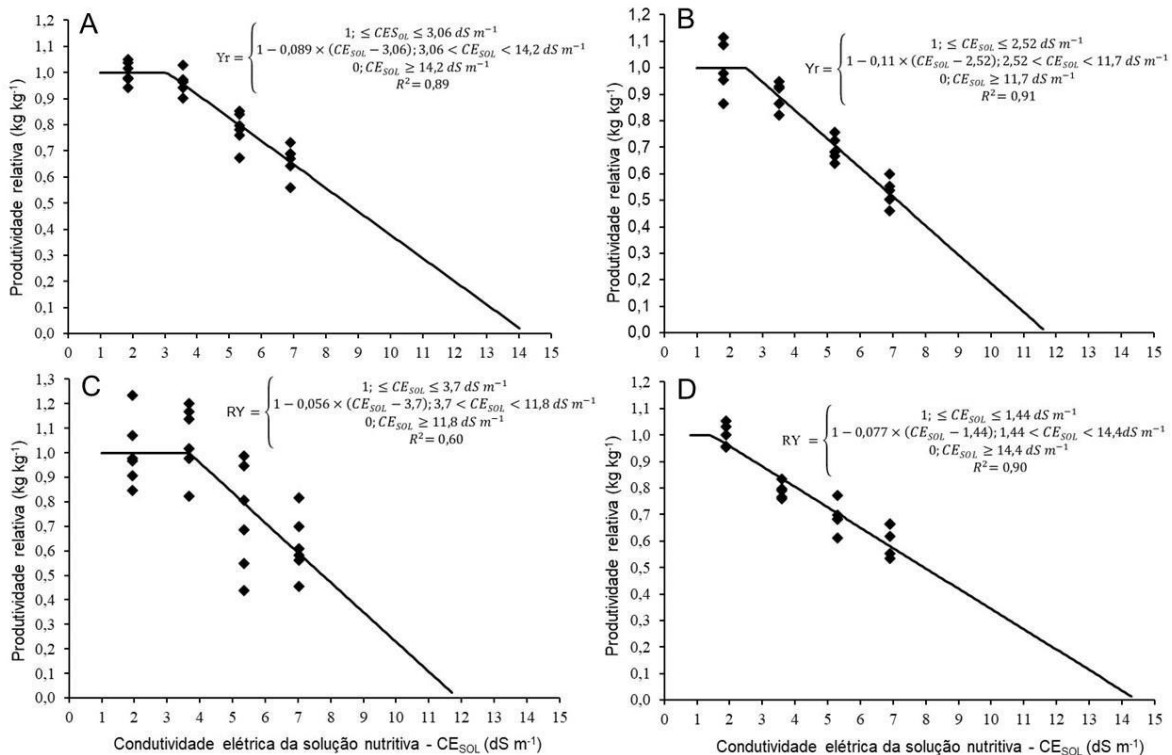
**Figura 2.10.** Produtividade (PRT) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating (◆), NFT (■) e aeroponia (▲) em função de condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).

A produtividade da rúcula também apresentou redução em função da salinidade nos sistemas floating e NFT, e sem qualquer efeito dos tratamentos sobre a aeroponia. Assim como para o cultivo da alface, o melhor desempenho produtivo de rúcula foi verificado para a aeroponia ( $2,2 \text{ kg m}^{-2}$ ), enquanto o floating e NFT tiveram

produtividades abaixo de  $0,5 \text{ kg m}^{-2}$ . Quando comparado os tratamentos de menor e maior nível salino, o efeito negativo da salinidade representou decréscimos da PRT na ordem de 40,6 e 35,9%, para o floating e NFT, enquanto para a aeroponia registrou-se uma média geral de  $2,2 \text{ kg m}^{-2}$  (Figura 2.10B).

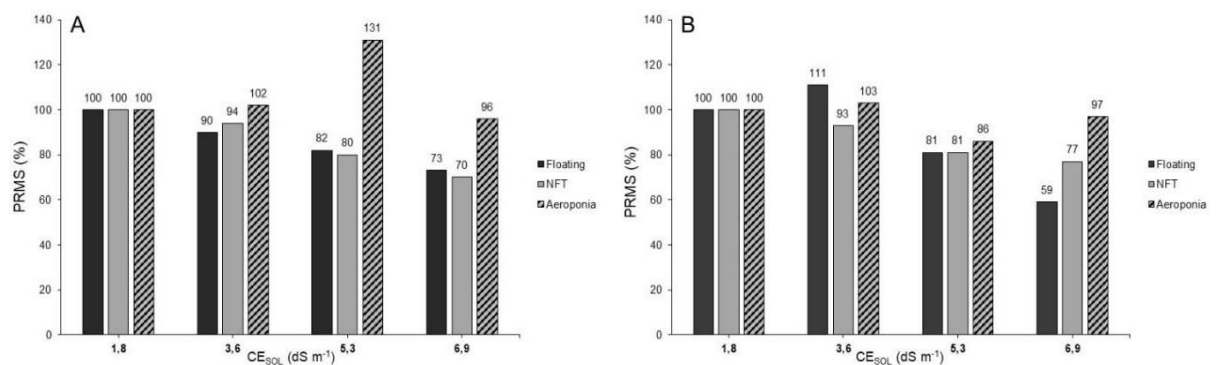
Com base no modelo utilizado como indicador de tolerância ao sal, os limiares de salinidade da SN para a produção relativa de massa fresca da parte aérea da alface nos sistemas floating e NFT foram de  $3,06$  e  $2,52 \text{ dS m}^{-1}$ . A partir destes limites, observam-se decréscimos lineares de 8,9 e 11%, respectivamente, por acréscimo unitário de  $CE_{\text{sol}}$  (Figura 2.11A e 2.11B). Por outro lado, para a aeroponia não houve um ajuste para este modelo de tolerância, visto que o rendimento da massa fresca da parte aérea da alface não foi influenciado significativamente pelas salinidades testadas.

Já para a rúcula foram estimados limiares de salinidade de  $3,7$  e  $1,44 \text{ dS m}^{-1}$ , para o floating e NFT, respectivamente e, a partir destes, reduções lineares 5,6 e 7,7% por aumento unitário da  $CE_{\text{sol}}$  (Figura 2.11C e 2.11D). Assim como observado para a alface, não houve ajuste do modelo para a rúcula cultivada na aeroponia.



**Figura 2.11.** Produtividade relativa (RY) da alface nos sistemas floating (A) e NFT (B) e, da rúcula (C) e (D) nos respectivos sistemas em função de condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).

A produção relativa de massa seca da parte aérea (PRMS) mostrou que na maior salinidade da solução nutritiva, para a alface, no floating, NFT e aeroponia a PRMS foi de 73, 70 e 96%, respectivamente, conforme Figura 2.12A. Adicionalmente, na aeroponia, até a salinidade de  $5,3 \text{ dS m}^{-1}$ , a PRMS da alface foi de 131%. Para a rúcula na maior salinidade da SN, a PRMS no floating, NFT e aeroponia foi de 59, 77 e 97%, respectivamente, (Figura 2.12B).



**Figura 2.12.** Produção relativa de massa seca da parte aérea (PRMS) da alface (A) e da rúcula (B) nos sistemas floating, NFT e aeroponia em função de condutividades elétricas da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).

## 2.4 DISCUSSÃO

### 2.4.1 Produção e crescimento

O efeito deletério do estresse salino sobre o rendimento de massa fresca da parte aérea é um comportamento amplamente registrado em diversos trabalhos com alface (Soares et al., 2015; Flores et al., 2019; Silva et al., 2020) e rúcula (Oliveira et al., 2013; Schiattone et al., 2017; Campos Júnior et al., 2018). No presente estudo, a produção de MFPA tanto da alface quanto da rúcula mostrou sensibilidade similar nos três sistemas de cultivo avaliados. Houve reduções significativas com o aumento da salinidade nos sistemas floating e NFT, enquanto não se observou efeito significativo da salinidade na aeroponia para ambas as culturas.

Isso sugere que, na aeroponia, os efeitos adversos da salinidade sobre a produção podem ser mitigados. Além disso, é importante destacar que a produção de MSPA da alface e da rúcula também apresentou comportamento semelhante ao verificado para a MFPA, com reduções percentuais devido ao acréscimo da salinidade nos sistemas floating e NFT, enquanto na aeroponia não houve qualquer efeito salino sobre a produção de MSPA da alface e da rúcula.

Estes resultados, podem representar um grande avanço para o cultivo de hortaliças folhosas em regiões com disponibilidade águas de baixa qualidade (ricas em sais), principalmente, devido à possibilidade de obtenção de um produto semelhante ao que se obteria usando água doce para o preparo da solução nutritiva.

Estas diferenças na resposta das plantas de alface à salinidade se deram em função dos sistemas de cultivo, o que influenciou o potencial produtivo da cultura. Assim, estes resultados sugerem que o tipo de sistema de cultivo hidropônico interfere diretamente no modo em que as plantas de alface lidam com o estresse salino. De acordo com Santos et al. (2011), a superioridade na produção da alface no sistema floating em relação ao NFT pode ser atribuída às características do sistema, no qual as raízes estão sempre providas com solução nutritiva oxigenada. Para Petropoulos et al. (2016), umas das principais vantagens deste sistema é a maior uniformidade de desenvolvimento das plantas. Além disso, Santos et al. (2011) afirmam que, no sistema NFT, apesar da alta frequência de irrigação, existe um período de restrição hídrica para as plantas, que parece constituir uma fonte de estresse para as raízes, com repercussão na transpiração e absorção de nutrientes, principalmente com uso de águas ricas em sais. Além disso, no sistema NFT uma porção significativa do sistema radicular é exposta com frequência ao processo de secamento e umedecimento, gerando estresse e perda de função radicular.

Em se tratando da MFPA da rúcula, além de não apresentar efeito significativo da salinidade o sistema aeropônico mostrou o melhor desempenho produtivo, enquanto o NFT e floating tiveram sua produção reduzida pelo aumento da salinidade. Além do mais, o floating registrou a menor produção de MFPA em comparação aos demais sistemas, independentemente do nível salino. A redução da MFPA causada pelo estresse salino também foi observada em outros trabalhos com rúcula (Oliveira et al., 2013; Schiattone et al., 2017; Campos Júnior et al., 2018), e com outras brássicas, como brócolis (Giuffrida et al., 2013), couve-chinesa (Lira et al., 2015) e

couve-flor (Costa et al., 2020). Esta tendência pode resultar da desordem múltipla decorrente do estresse salino que afeta o estado fisiológico das plantas. A diminuição na taxa de fotossíntese, a modificação na condutância estomática, a perturbação no equilíbrio nutricional e diversos outros fatores vinculados a esse estresse abiótico são apenas alguns exemplos dos numerosos processos impactados adversamente pela salinidade (Petretto et al., 2019).

De acordo com Souza Neta et al. (2013), o efeito da salinidade sobre as características produtivas da rúcula depende do substrato usado na hidroponia. No presente trabalho, este efeito parece depender do tipo de sistema de cultivo empregado, uma vez que cada um proporciona uma condição diferente de distribuição da solução nutritiva para as raízes das plantas, o que resultou em respostas diferentes para a MFPA da rúcula sob estresse salino.

Outra hipótese que pode ter contribuído para a menor produção de MFPA da rúcula no sistema floating, conforme observado no presente estudo, é a baixa densidade populacional de plantas nas parcelas. Isso pode não ter sido favorável para o conforto térmico da cultura, uma vez que a rúcula é sensível a variações de temperatura. Além disso, a condição de umidade constante do floating (em bacias) pode ser limitante para a cultura, especialmente porque a solução nutritiva é mais suscetível ao aquecimento devido ao tamanho e volume dos recipientes. Dessa forma, no floating, as plantas de rúcula podem ter sido submetidas, não intencionalmente, a múltiplas condições de estresse, prejudicando a absorção de água e nutrientes. Isso pode justificar a restrição no acúmulo de biomassa e o comprometimento do desenvolvimento da cultura no floating, quando comparado aos outros dois sistemas.

Considerando o teor percentual de matéria seca da parte aérea (TMS) da alface e da rúcula como indicador de déficit hídrico, foi possível verificar que na alface não houve diferenças de grande magnitude entre os três sistemas hidropônicos. Isso sugere que, em geral, a cultura não enfrentou um déficit hídrico acentuado, independentemente do sistema de cultivo e da salinidade da solução nutritiva. Por outro lado, para a rúcula, as diferenças no TMS foram muito maiores entre os três sistemas hidropônicos, sem efeito significativo da salinidade no floating e na aeroponia vertical. No entanto, no sistema NFT, o TMS aumentou à medida que a salinidade cresceu, indicando que as plantas de rúcula experimentaram um déficit hídrico crescente com o aumento do estresse salino. Além disso, embora a rúcula no floating

estivesse em condições de umidade constante na região radicular, o maior TMS nesse sistema sugere que a cultura esteve sob um déficit hídrico moderado, sem murchamento aparente, o que justifica a produção de MFPA muito baixa observada nesse sistema em comparação com as produções do NFT e da aeroponia.

Para expandir a compreensão dos resultados obtidos no presente estudo, é pertinente mencionar que Brés et al. (2022) registraram acréscimo no TMS da alface sob altas concentrações salinas no meio de cultivo. Segundo os autores, esse aumento no teor de matéria seca sob estresse salino deve-se a uma maior deposição de lignina na parede celular e ao aumento da síntese de celulose para a manutenção da integridade da parede celular e da pressão de turgor celular, visando manter o crescimento celular contínuo sob baixo potencial hídrico. Nesse sentido, os resultados do TMS da alface do presente estudo sugerem que nenhum nível de salinidade testado foi suficientemente estressante para as plantas utilizarem o mecanismo de proteção da parede celular descrito pelos autores mencionados. Assim como verificado para a rúcula no NFT, um aumento no TMS resultante do aumento da salinidade também foi relatado em outros trabalhos com a rúcula (Souza Neta et al., 2013; Campos Júnior et al., 2018).

Considerado como variante de crescimento, o número de folhas (NF) parece ser uma variável pouco sensível à salinidade da solução nutritiva tanto para a alface quanto para a rúcula nos sistemas do presente trabalho. Neste contexto, sabe-se que a reação das plantas ao estresse salino pode variar de acordo com as espécies, suas características genéticas e as condições do meio de cultivo, podendo cultivares diferentes apresentarem respostas distintas à salinidade, ou a mesma cultivar responder de forma diferente sob condições de cultivo distintas (Mehta; Vyas, 2023).

Esses resultados são corroborados pelos observados por Pessoa et al. (2023) em cultivo semi-hidropônico da alface, mas diferem dos encontrados de Paulus et al. (2012), que relataram efeito negativo da salinidade sobre o NF da alface cultivada no sistema hidropônico NFT. Resultados similares de efeito não significativo da salinidade sobre o NF da rúcula cultivada em sistemas hidropônicos também foram reportados em outros trabalhos sob estresse salino (Oliveira et al., 2013; Campos Júnior et al., 2018; Santos et al., 2018). Em contrapartida, o efeito significativo da salinidade sobre o NF da rúcula no floating, principalmente em relação ao NFT e à aeroponia vertical, pode ser atribuído às diferenças entre os sistemas de cultivo, especialmente à

densidade populacional de plantas cultivadas, o que parece ter influenciado o conforto da cultura e refletido tanto em variáveis de produção, como MFPA, quanto nas de crescimento, como o NF.

#### **2.4.2 Consumo hídrico, produtividade e tolerância salina**

O consumo hídrico (CH) de plantas de alface e de rúcula foi similarmente impactado pela salinidade da solução nutritiva, resultando em reduções por acréscimo unitário de salinidade na ordem de 0,3 L no floating, de 0,23 L no NFT e de 0,07 L na aeroponia para a alface, com diferenças de pequena magnitude entre os três sistemas para a rúcula. Estes resultados estão de acordo com estudos anteriores sobre folhosas submetidas à salinidade, em que Paulus et al. (2012) e Soares et al. (2015) também verificaram redução do CH para alface, e Campos Júnior et al. (2018) constataram o mesmo para a rúcula.

A redução do CH pelas plantas é esperada com o aumento da salinidade do meio de cultivo devido à dificuldade das raízes em manter a absorção sob baixo potencial osmótico. Este é um efeito inevitável sob condições salinas, pois tanto no cultivo convencional quanto em cultivos sem solo, o CH é uma variável de impacto primário do efeito osmótico dos sais sobre diversas culturas. Isso é particularmente destacado em folhosas como couve chinesa, agrião, manjeriço, chicória, couve-flor e coentro (Lira et al., 2015; Lira et al., 2018; Santos et al., 2019; Silva et al., 2020; Costa et al., 2020; Bezerra et al., 2022).

Para a produtividade da água (PRA) da alface, apesar do efeito quadrático de aumento desta variável nos sistemas floating e NFT, não foram notadas diferenças substanciais entre os tratamentos salinos nesses sistemas. Na aeroponia vertical, não houve qualquer efeito dos tratamentos. De modo similar, para a rúcula, os valores de PRA no floating e no NFT não foram afetados pela salinidade, indicando que, em ambas as culturas, o efeito do estresse salino sobre a fixação de carbono foi de mesma magnitude que na evapotranspiração. A exceção foi a rúcula na aeroponia vertical, que mostrou um efeito não significativo da salinidade sobre a fixação de carbono, refletindo no aumento da sua PRA. Este comportamento de crescimento da PRA da alface em resposta ao aumento da salinidade até certo nível também foi observado em outros trabalhos com alface (Soares et al., 2019).

De acordo com Bezerra et al. (2022), em cultivos sob condições salinas, a PRA pode ser influenciada negativamente pela redução da evapotranspiração e pelo prejuízo à fixação de carbono, resultante de altas concentrações de íons nocivos aos processos metabólicos. Nesse contexto, embora a salinidade tenha reduzido o CH da alface e da rúcula na aeroponia vertical, o efeito salino parece não ter influenciado significativamente o processo de fixação de carbono. Isso se deve ao fato de que, mesmo sob redução do CH, a produção de MFPA não foi afetada nesse sistema.

Ainda nesse sentido, é importante destacar que, para a rúcula, a aeroponia vertical aumentou a produtividade da água (PRA) com o aumento da salinidade da solução nutritiva, registrando acréscimos de até 30%. Por outro lado, nos sistemas floating e NFT, foram observadas médias gerais de PRA de 42,09 e 21,26 g L<sup>-1</sup>, respectivamente. Diferente do presente estudo, outros trabalhos hidropônicos têm relatado efeitos severos da salinidade sobre o rendimento da PRA da rúcula. Campos Júnior et al. (2018) relataram perdas de PRA de até 75% na faixa salina estudada; Silva et al. (2012) verificaram reduções ainda mais pronunciadas com o aumento unitário da condutividade elétrica da solução.

A produtividade (PRT) é o atributo econômico afetado mais severamente pelos sais presentes na água de irrigação utilizada nos cultivos (Gama et al., 2023). Embora a presença dos sais seja um problema para o uso dessas águas, a hidroponia se destaca devido à ausência do potencial matricial presente no solo, que por sua vez causa maior dificuldade à absorção de água pelas plantas quando na presença do potencial osmótico decorrente dos sais. Desse modo, a PRT das hortaliças tende a ser maior na hidroponia, pois as plantas lidam com uma menor resistência à absorção de água e nutrientes (Costa et al., 2020).

Conforme Joshi et al. (2024), embora o ambiente protegido favoreça a produção agrícola ao longo do ano, o microclima gerado dentro da casa de vegetação é influenciado por fatores da planta (como a arquitetura da planta) e do manejo de cultivo (como a densidade populacional). Nesse contexto, é possível inferir que a maior densidade populacional de plantas de alface e rúcula cultivadas na aeroponia vertical parece criar um microclima que proporciona maior conforto ambiental para as plantas sob estresse salino. Isso pode explicar a mitigação dos efeitos da salinidade sobre a produção de MFPA e, conseqüentemente, uma maior PRT da alface e da



rúcula em comparação aos sistemas floating e NFT, que mostraram redução da PRT à medida que a salinidade da solução nutritiva aumentou.

Avaliando a PRT da alface sob diferentes níveis salinos da água de irrigação em ambiente protegido e em campo, Silva et al. (2020) verificaram redução da produtividade com o aumento da salinidade. Este efeito é semelhante ao observado na presente pesquisa nos sistemas floating e NFT, tanto para a alface quanto para a rúcula.

Por se tratar de um sistema de cultivo vertical, a aeroponia do presente estudo pode acomodar um maior número de plantas por  $m^2$ , tendo como resultado uma alta densidade de plantas no espaço e, conseqüentemente uma maior produtividade. Com isso, a PRT da torre ainda pode ser maior, caso sejam utilizadas torres de maior altura.

Ainda segundo Silva et al. (2020), tanto no campo quanto em ambiente protegido as maiores PRT foram registradas para a menor salinidade, com médias na ordem de 11,59 e 9,21  $t\ ha^{-1}$ , respectivamente. Comparando os valores de PRT da alface nos três sistemas de cultivo com os de Silva et al. (2020), verifica-se que mesmo na maior salinidade os três sistemas hidropônicos tiveram produtividade superior, independentemente do ambiente de cultivo. É válido destacar que, apenas os valores convertidos da testemunha dos sistemas foram equivalentes à PRT de 34,7  $t\ ha^{-1}$  para o floating, 28  $t\ ha^{-1}$  para o NFT e 41  $t\ ha^{-1}$  para a aeroponia.

Para a rúcula, a produtividade foi superior em 92% e 77% na aeroponia em relação aos sistemas floating e NFT, respectivamente, seguindo a mesma tendência observada na produção de massa fresca da parte aérea. A magnitude desses valores reforça que a aeroponia vertical é um sistema eficiente para otimizar a área de produção de hortaliças, especialmente para o cultivo da rúcula. Adicionalmente, a literatura corrobora os efeitos deletérios da salinidade sobre a produtividade de espécies brássicas, independentemente do sistema de cultivo utilizado, especialmente para a rúcula (Di Gioia et al., 2018; Seyfipour et al., 2021; Yang et al., 2021).

Com base na produtividade relativa da MFPA, as plantas de alface e rúcula apresentaram diferentes limiares de salinidade nos três sistemas hidropônicos. Para a alface, no sistema floating, a salinidade limiar foi de 3  $dS\ m^{-1}$ , com produção relativa acima de 65% para a maior salinidade da SN. No cultivo NFT, esse limiar foi de 2,5

dS m<sup>-1</sup>, com produção relativa mínima acima de 51% no maior nível salino da SN. Além disso, a perda de produtividade por incremento unitário da CE<sub>SOL</sub> acima do limiar de salinidade foi menor no floating e maior no NFT, indicando que no sistema floating a alface pode ser cultivada sob maiores níveis de salinidade da solução com menores perdas de produtividade em comparação ao NFT.

Para a produtividade relativa da rúcula, o limiar da solução nutritiva foi de 3,7 dS m<sup>-1</sup>, com perda de produtividade por incremento unitário da CE<sub>SOL</sub> de 6% além deste limite. No NFT, o limiar foi de 1,4 dS m<sup>-1</sup>, com queda de produtividade de 8% por aumento unitário da CE<sub>SOL</sub> acima do limiar. Embora o limiar da rúcula no floating seja superior ao registrado no NFT, é importante destacar que esse maior limite salino não resultou em maior produção de MFPA, como observado para a alface. Isso pode indicar que a produção da rúcula foi mais limitada pelo próprio sistema de cultivo do que pela salinidade dos tratamentos, já que, em termos relativos, a produtividade expressou um maior limiar de salinidade com menor perda por incremento unitário da CE<sub>SOL</sub>.

Adicionalmente, na aeroponia, não houve ajuste do modelo de produtividade, pois a salinidade não teve efeito significativo sobre a produção de MFPA. Isso evidencia que, neste sistema hidropônico, tanto a alface quanto a rúcula podem ser produzidas sob altos níveis de salinidade da solução nutritiva sem redução significativa de produtividade. Conforme Leal et al. (2020), resultados como esses em sistemas hidropônicos são possíveis graças às excelentes condições de disponibilidade de água e nutrientes fornecidas às plantas, mesmo em condições salino-sódicas.

Sob cultivo hidropônico NFT, Dias et al. (2011) observaram limiares de salinidade de 0,95 e 1,3 dS m<sup>-1</sup> e reduções de 6,68 e 4,28% por incremento unitário além do limiar de duas cultivares de alface, valores estes abaixo daqueles registrados para a alface no cultivo em floating e NFT, embora no presente trabalho os decréscimos da produtividade relativa por incremento unitário da CE<sub>SOL</sub> acima do limiar sejam maiores. As diferenças entre este estudo e o presente podem estar relacionadas as variedades de alface, condições climáticas e aos diferentes sistemas hidropônicos. Já para a rúcula, Silva et al. (2013) verificaram queda de produtividade na ordem de 5,6% por aumento unitário da condutividade elétrica da SN além do limiar de 2,57 dS m<sup>-1</sup>. Do mesmo modo, Silva et al. (2011) também verificaram redução da

produtividade da rúcula de 9,58% por aumento unitário da  $CE_{SOL}$  além da salinidade limiar de 2,1 dS m<sup>-1</sup>.

Segundo Schrader (2017) e Ayers e Westcot (1985), a alface é considerada uma cultura sensível ao sal, com limites de salinidade amplamente aceitos para uma produtividade de 50% de 3,4 dS m<sup>-1</sup> para a água de irrigação e de 5,1 dS m<sup>-1</sup> para o extrato de saturação do solo. Contudo, os resultados obtidos nos três sistemas hidropônicos tanto para a alface quanto para a rúcula indicam que é possível alcançar produtividades satisfatórias com níveis de salinidade superiores aos mencionados na literatura, apresentando menores perdas de rendimento. Isso evidencia a capacidade das folhosas de tolerar condições salinas mais elevadas em sistemas hidropônicos do que em cultivos convencionais, ampliando as possibilidades de manejos de cultivos para essas hortaliças.

A produtividade relativa de massa de matéria seca da parte aérea (PRMS) é um indicador fundamental para avaliar a tolerância das plantas a estresses abióticos, particularmente o salino. Quando submetidas a altos níveis de salinidade, as plantas frequentemente encontram dificuldades na absorção de água e nutrientes, o que resulta em uma redução da biomassa e, conseqüentemente, da massa seca, como destacado por Sousa et al. (2023) e comprovado no presente estudo.

No geral, tanto a alface quanto a rúcula apresentaram menor PRMS quando cultivadas nos sistemas floating e NFT sob tratamentos salinos. Em contrapartida, na aeroponia, observou-se uma melhora substancial no desempenho desta variável, com aumentos e menores perdas de produtividade mesmo sob condições salinas, em comparação aos outros dois sistemas hidropônicos. Esse comportamento indica que a aeroponia pode fornecer condições mais favoráveis para o cultivo dessas culturas, mesmo em situações de estresse salino.

Complementando essa análise, Soares Filho et al. (2016) sugerem que é possível classificar cultivares de plantas quanto à tolerância a determinados níveis de salinidade com base na PRMS. De acordo com esses autores, as culturas que apresentam produtividades relativas de massa seca entre 100% e 80% são consideradas tolerantes; entre 79% e 60%, moderadamente tolerantes; entre 59% e 40%, moderadamente suscetíveis; e abaixo de 40%, suscetíveis à salinidade estudada. Aplicando essa classificação ao presente estudo, observa-se que, sob o tratamento mais salino, a alface seria classificada como moderadamente tolerante no

floating e NFT e tolerante na aeroponia. Já a rúcula seria considerada moderadamente suscetível no floating, moderadamente tolerante no NFT e tolerante na aeroponia.

## **2.5 CONCLUSÕES**

A produção por unidade área da alface e da rúcula no sistema em aeroponia destacou-se, apresentando maiores produções por área em comparação aos sistemas floating e NFT. Os resultados mostraram que, na aeroponia, as variáveis analisadas, especialmente a produtividade da água e a produtividade relativa de massa fresca e seca da parte aérea, apresentaram comportamento de aumento ou estabilização. Isso evidencia o grande potencial da aeroponia não apenas para otimizar a produtividade geral, mas também para melhorar a tolerância à salinidade em alface e rúcula, especialmente quando se utiliza água com altos níveis de salinidade.

Além disso, a aeroponia demonstrou ser o sistema de cultivo no qual a rúcula apresentou maior adaptabilidade, resultando em melhorias substanciais nas variáveis de produção. Por outro lado, o sistema floating mostrou-se de baixa aptidão para todos os aspectos produtivos da cultura, sugerindo limitações para o cultivo de rúcula, especialmente sob estresse salino nesse sistema.

Com base nesses resultados, fica clara a necessidade de estudos futuros que avaliem o comportamento de diferentes hortaliças sob estresse salino em variados sistemas hidropônicos, com ênfase especial na aeroponia. Tais pesquisas são essenciais para que os agricultores possam selecionar os sistemas de cultivo mais adequados às suas condições regionais, maximizando a produtividade e a resiliência das culturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 188 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 29).

BEZERRA, R. R.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; PESSOA, U. C.; SILVA, Ê. F. F.; OLIVEIRA, T. F.; NOGUEIRA, K. F.; SOUZA, E. R. Water efficiency of coriander under flows of application of nutritive solutions prepared in brackish waters. **Water**, v. 14, n. 24, p. 4005, 2022

BIONE, M. A. A.; SOARES, T. M.; COVA, A. M. W.; SILVA PAZ, V. P.; GHEYI, H. R.; RAFAEL, M. R. S.; MODESTO, F. J. N.; SANTANA, J. A.; NEVES, B. S. L. Hydroponic production of 'Biquinho'pepper with brackish water. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106607, 2021.

CAMPOS JÚNIOR, J. E.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; MARTINS, J. B.; SILVA, E. F. F.; ALMEIDA, C. D. G. C. Rocket production in a low cost hydroponic system using brackish water. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 1008-1016, 2018.

CAMPOS JÚNIOR, J. E.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SILVA, E. F. F.; MARTINS, J. B.; ROLIM, M. M. Consumption, efficiency and water content of arugula under different management of brackish nutritional solutions. **Engenharia Agrícola**, v. 38, p. 885-892, 2018.

CONVERSA, G.; BONASIA, A.; LAZZIZERA, C.; ELIA, A. Soilless cultivation system, electrical conductivity of nutrient solution, and growing season on yield and quality of baby-leaf oak-leaf lettuce. **Agronomy**, v. 11, n. 6, e1220, 2021.

CORREIA, K. G.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; RODRIGUES, L. N.; NERY, A. R. Relações hídricas e produção em plantas de amendoim irrigadas com águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 86-89, 2021.

COSTA, L. F.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G.; MODESTO, F. J. N.; QUEIROZ, L. A.; PEREIRA, J. S. Cauliflower growth and yield in a hydroponic system with brackish water. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 1060-1070, 2020.

COVA, A. M. W.; FREITAS, F. T. O.; VIANA, P. C.; RAFAEL, M. R. S.; AZEVEDO NETO, A. D.; SOARES, T. M. Content of inorganic solutes in lettuce grown with

brackish water in different hydroponic systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 150-155, 2017.

DI GIOIA, F.; ROSSKOPF, E. N.; LEONARD, C.; GIUFFRIDA, F. Effects of application timing of saline irrigation water on broccoli production and quality. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 97-104, 2018.

DIAS, N. S.; SOUSA NETO, O. N.; COSME, C. R.; JALES, A. G. O.; REBOUÇAS, J. R. L.; OLIVEIRA, A. M. Resposta de cultivares de alface à salinidade da solução nutritiva com rejeito salino em hidroponia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 991-995, 2011.

FAYEZIZADEH, M. R.; ANSARI, N. A. Z.; ALBAJI, M.; KHALEGHI, E. Effects of hydroponic systems on yield, water productivity and stomatal gas exchange of greenhouse tomato cultivars. **Agricultural Water Management**, v. 258, p. 107171, 2021.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FLORES, M. P.; MERCADO, E.; ESCALONA, V. H. Effect of salt stress on two types of lettuce crop in floating root hydroponic system. In: International Conference Postharvest Unlimited, VI. **ANAIS ...**, 1256. p. 525-532. 2019.

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 1999. 52p. Boletim Técnico, 180.

FUSSY, A.; PAPENBROCK, J. An overview of soil and soilless cultivation techniques—chances, challenges and the neglected question of sustainability. **Plants**, v. 11, n. 9, e1153, 2022.

GAMA, E. M., REIS, A. C. P.; MATOS, R. P.; GOMES, F. J. S. QUALIDADE DA ÁGUA EM ÁREAS DE CULTIVO DE ALFACE. RECIMA21-**Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 5, p. e453099-e453099, 2023.

GIUFFRIDA, F.; GANGI, D.; GIURATO, R.; LEONARD, C. Effects of NaCl salinity on yield, quality and mineral composition of broccoli and cauliflower. In: International Symposium on Brassicas and XVIII Crucifer Genetics Workshop, VI. **ANAIS ...** 1005. p. 531-538. 2013.

JASECHKO, S.; SEYBOLD, H.; PERRONE, D.; FAN, Y.; SHAMSUDDUHA, M.; TAYLOR, R. G.; FALLATAH, O.; KIRCHNER, J. W. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. **Nature** 625, 715–721, 2024.

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>.

JOSHI, A.; SAXENA, A.; DAS, S. K. Effect of greenhouse microclimate on crop performance. In: **Protected Cultivation** Apple Academic Press, 2024. p. 135-159.

KUMARI, S.; PRADHAN, P.; YADAV, R.; KUMAR, S. Hydroponic techniques: A soilless cultivation in agriculture. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 1S, p. 1886-1891, 2018.

LEAL, L. Y. C.; SOUZA, E. R.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SANTOS, M. A. Comparison of soil and hydroponic cultivation systems for spinach irrigated with brackish water. **Scientia Horticulturae**, v. 274, p. 109616, 2020.

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

LIRA, R. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, G. F. D.; SANTOS, A. N. D.; ROLIM, M. M. Production, water consumption and nutrient content of Chinese cabbage grown hydroponically in brackish water. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, p. 497-505, 2015.

MEHTA, D; VYAS, S. Comparative bio-accumulation of osmoprotectants in saline stress tolerating plants: A review. **Plant Stress**, p. 100177, 2023.

MINHAS, P. S.; RAMOS, T. B.; BEN-GAL, A.; PEREIRA, L. S. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. **Agricultural Water Management**, v. 227, p. 105832, 2020.

MUKHERJEE, A.; SCANLON, B. R.; AURELI, A.; LANGAN, S.; GUO, H.; MCKENZIE, A. Global groundwater: from scarcity to security through sustainability and solutions. In: **Global groundwater.....** : Elsevier, 2021. p. 3-20.

Ó, L. M. G.; COVA, A. M. W.; AZEVEDO NETO, A. D.; SILVA, N. D.; SILVA, P. C. C.; SANTOS, A. L.; GHEYI, H. R.; SILVA, L. L. Osmotic adjustment, production, and post-harvest quality of mini watermelon genotypes differing in salt tolerance. **Scientia Horticulturae**, v. 306, p. 111463, 2022.

OLIVEIRA, F. A.; SOUSA NETA, M. L.; SILVA, R. T.; SOUZA, A. A. T.; OLIVEIRA, M. K. T.; MEDEIROS, J. F. Desempenho de cultivares de rúcula sob soluções nutritivas com diferentes salinidades. **Revista Agro@ mbiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 170-178, 2013.

PAULUS, D.; PAULUS, E.; NAVA, G. A.; MOURA, C. A. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Revista Ceres**, v. 59, p. 110-117, 2012.

PEREIRA, F. H. F.; SILVA, L. J. S.; SILVA, F. A.; DIAS, M. S. Trocas gasosas, eficiência fotoquímica e potencial osmótico de plantas de tomate submetidas a condições salinas. **PesquisAgro**, v. 3, n. 1, p. 36-51, 2020.

PESSOA, V. G.; GÓIS, H. M. D.; OLIVEIRA, F. D. A. D.; OLIVEIRA, M. K.; CORDEIRO, C. J.; OLIVEIRA, C. E.; MARQUES, I. C. D. S. Semi-hydroponic cultivation of fertigated curly lettuce with calcium nitrate-enriched saline solutions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 712-718, 2023.

PETRETTO, G. L.; URGEGHE, P. P.; MASSA, D.; MELITO, S. Effect of salinity (NaCl) on plant growth, nutrient content, and glucosinolate hydrolysis products trends in rocket genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry** v. 141, p. 30-39, 2019.

PETROPOULOS, S. A.; CHATZIEUSTRATIOU, E.; CONSTANTOPOULOU, E.; KAPOTIS, G. Yield and quality of lettuce and rocket grown in floating culture system. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 44, n. 2, p. 603-612, 2016.

RICHARDS, L. A. (ed.). **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, DC : US Government Printing Office, 1954. 160p.

ROSA-RODRÍGUEZ, R.; LARA-HERRERA, A.; TREJO-TÉLLEZ, L. I.; PADILLA-BERNAL, L. E.; SOLIS-SÁNCHEZ, L. O.; ORTIZ-RODRÍGUEZ, J. M. Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato production. **Horticultura Brasileira**, v. 38, p. 47-52, 2020.

ROSCA, M.; MIHALACHE, G.; STOLERU, V. Tomato responses to salinity stress: From morphological traits to genetic changes. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1118383, 2023.

SANTOS, A. N.; SILVA, E. F. F.; SOARES, T. M.; DANTAS, R. M. L.; SILVA, M. M. D. Produção de alface em NFT e floating aproveitando água salobra e o rejeito da dessalinização. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 319-326, 2011.

SANTOS, J. F. D.; COELHO, M. A.; CRUZ, J. L.; SOARES, T. M.; CRUZ, A. M. L. Growth, water consumption and basil production in the hydroponic system under salinity. **Revista Ceres**, v. 66, p. 45-53, 2019.

SANTOS, R. S. S.; DIAS, N. S.; DUARTE, S. N.; LIMA, C. J. G. S.; FERNANDES, C. S.; MIRANDA, J. H. Cultivo da rúcula em substrato de fibra de coco sob solução



nutritiva salina. **Revista Cultura Agrônômica**, v. 27, n. 1, p. 12-21, 2018.

SCHIATTONE, M. I.; CANDIDO, V.; CANTORE, V.; MONTESANO, F. F.; BOARI, F. Water use and crop performance of two wild rocket genotypes under salinity conditions. **Agricultural Water Management**, v. 194, p. 214-221, 2017.

SCHRADER, S. E. Salinity tolerance of lettuce cultivars in controlled environment. **The University of Arizona**, 2017.

SEYFIPOUR, E.; GHOLAMI, H.; AZIZIAN, A.; YARAMI, N. Eruca sativa L. response to planting method and irrigation frequency under saline water application. **Iranian Journal of Irrigation & Drainage**, v. 15, n. 5, p. 1141-1152, 2021.

SHARMA, N.; ACHARYA, S.; KUMAR, K.; SINGH, N.; CHAURASIA, O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 17, n. 4, p. 364-371, 2018.

SILVA, A. O.; SILVA, D. J. R.; SOARES, T. M.; SILVA, E. F. F.; SANTOS, A. N.; ROLIM, M. M. Produção de rúcula em sistema hidropônico NFT utilizando água salina do Semiárido-PE e rejeito de dessalinizador. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 147-155, 2011.

SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SANTOS, C. G.; SANTOS, V. R.; SÁ, M. B. Produtividade da alface cultivada em campo e ambiente protegido em resposta às lâminas de irrigação e níveis salinos. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e8549109143-e8549109143, 2020.

SILVA, F. V.; DUARTE, S. N.; LIMA, C. J. G. S.; DIAS, N. S.; SANTOS, R. S. S.; MEDEIROS, P. R. F. Cultivo hidropônico de rúcula utilizando solução nutritiva salina. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 476-482, 2013.

SILVA, M. G.; ALVES, L. S.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; BIONE, M. A. A. Growth, production and water use efficiency of chicory (*Cichorium endivia* L.) in hydroponic systems using brackish waters. **Advances in Horticultural Science**, v. 34, n. 3, p. 243-253, 2020.

SILVA, P. C.; GHEYI, H. R.; JESUS, M. J. S.; CORREIA, M. R. S.; AZEVEDO NETO, A. D. Seed priming with hydrogen peroxide enhances tolerance to salt stress of hydroponic lettuce. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 704-711, 2023.

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

SOARES FILHO, W.S.; GHEYI, H.R.; BRITO, M.E.B.; NOBRE, R.G.; FERNANDES, P.D.; MIRANDA, R.D.S. Melhoramento Genético e Seleção de Cultivares Tolerantes à Salinidade. In Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados; Expressão Gráfica e Editora: Fortaleza, Brazil, 2016.

SOARES, H. R.; SILVA, Ê. F. F.; SILVA, G. F.; PEDROSA, E. M. R.; ROLIM, M. M.; SANTOS, A. N. Lettuce growth and water consumption in NFT hydroponic system using brackish water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 636-642, 2015.

SOUSA, J. N.; BRITO, P. O. B.; SOUSA, G. F.; ARRUDA, J. F.; GONDIM, F. A. Produção de matéria seca e atividade enzimática antioxidativa de plântulas de girassol sob condições de estresse salino suplementadas com *Salvinia auriculata*. *Nativa*, v. 11, n. 1, p. 44-52, 2023.

SOUZA NETA, M. L.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, R. T.; SOUZA, A. A. T.; OLIVEIRA, M. K. T.; MEDEIROS, J. F. Efeitos da salinidade sobre o desenvolvimento de rúcula cultivada em diferentes substratos hidropônicos. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 154-161, 2013.

YANG, T.; SAMARAKOON, U.; ALTLAND, J.; LING, P. Photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) 'standard' under different electrical conductivities of nutrient solution. **Agronomy**, v. 11, n. 7, e1340, 2021

## CAPÍTULO 3

### Acúmulo de solutos em alface e rúcula em diferentes sistemas hidropônicos sob estresse salino

**RESUMO:** Este trabalho objetivou avaliar o acúmulo de solutos inorgânicos e orgânicos em plantas de alface e rúcula cultivadas nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia com o uso de águas salobras em ambiente protegido. Os experimentos foram conduzidos de forma independente por sistema hidropônico, e aplicados quatro níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva, 2,0, 3,7, 5,4 e 7,1 dS m<sup>-1</sup>, com cinco repetições para cada. Foram avaliados os teores de solutos inorgânicos Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> e K<sup>+</sup> e orgânicos, carboidratos solúveis, proteínas solúveis, aminoácidos livres e prolina livres nas folhas e raízes. Os resultados mostraram aumentos substanciais de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> em folhas e raízes de alface e rúcula com o incremento da condutividade elétrica. Na alface, o K<sup>+</sup> aumentou em folhas e reduziu em raízes; na rúcula, houve uma redução em K<sup>+</sup>, exceto nas folhas em aeroponia, que mantiveram uma média de 1332 µmol g<sup>-1</sup>. A razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> aumentou em ambas as culturas com a salinidade. Em resposta ao estresse salino, os carboidratos solúveis aumentaram em folhas de alface e diminuíram nas raízes, exceto para folhas na aeroponia, onde houve uma redução. Em folhas de rúcula, os resultados variaram entre os sistemas, e as raízes mostraram pouca significância, exceto na aeroponia, que registrou uma redução. Na alface, os teores de proteínas solúveis aumentaram linearmente em folhas e reduziram em raízes com o aumento da salinidade, enquanto na rúcula, houve variações nas folhas e redução nas raízes para o NFT e aeroponia. A prolina livre aumentou com a salinidade em folhas e raízes, exceto nas raízes de alface no floating e aeroponia. O acúmulo de aminoácidos livres estabilizou no NFT e aeroponia e aumentou no floating com a salinidade. Na rúcula, os teores de aminoácidos livres variaram significativamente nas folhas e não significativamente nas raízes. O NFT mostrou adaptação intermediária das plantas ao aumento da salinidade, com acúmulo significativo de íons e solutos orgânicos. O floating revelou maior vulnerabilidade das plantas, com altos níveis de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> e redução de K<sup>+</sup>. A aeroponia destacou-se por mostrar melhor retenção de íons tóxicos e regulação eficaz de K<sup>+</sup>, sugerindo melhor tolerância nas plantas em comparação aos outros sistemas.

**Palavras-chave:** hidroponia, sódio, cloreto, potássio, solutos orgânicos.

## Accumulation of solutes in lettuce and rocket in different hydroponic systems under saline stress

**ABSTRACT:** The aim of this study was to evaluate the accumulation of inorganic and organic solutes in lettuce and rocket plants cultivated in floating, NFT and aeroponic hydroponic systems using brackish water in a protected environment. The experiments were conducted independently for each hydroponic system, and four levels of electrical conductivity were applied to the nutrient solution: 2.0, 3.7, 5.4 and 7.1 dS m<sup>-1</sup>, with five replicates for each. The levels of inorganic solutes Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> and K<sup>+</sup> and organic solutes, soluble carbohydrates, soluble proteins, free amino acids and free proline in the leaves and roots were assessed. The results indicated substantial increases in Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> in lettuce and rocket leaves and roots as electrical conductivity increased. In lettuce, K<sup>+</sup> increased in leaves and decreased in roots; in rocket, there was a decrease in K<sup>+</sup>, except in leaves under aeroponics systems, which maintained an average of 1332 μmol g<sup>-1</sup>. The Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> ratio increased in both crops with salinity. In response to salt stress, soluble carbohydrates increased in lettuce leaves and decreased in roots, except for leaves in aeroponics systems, where there was a reduction. In rocket leaves, the results varied between the systems, and the roots showed little significance, except in aeroponics, which recorded a reduction. In lettuce, soluble protein levels increased linearly in leaves and decreased in roots with increasing salinity, while in rocket, there were variations in leaves and reductions in roots for NFT and aeroponics. Free proline increased with salinity in leaves and roots, except in lettuce roots in floating and aeroponics systems. The accumulation of free amino acids stabilized in NFT and aeroponics and increased in floating with salinity. In rocket, free amino acid levels varied significantly in the leaves and not significantly in the roots. NFT showed intermediate plant adaptation to increased salinity, with significant accumulation of ions and organic solutes. Floating showed greater vulnerability of the plants, with high levels of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> and a reduction in K<sup>+</sup>. Aeroponics stood out for showing better retention of toxic ions and effective regulation of K<sup>+</sup>, suggesting better plant tolerance compared to the other systems.

**Keywords:** hydroponics, sodium, chloride, potassium, organic solutes.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.) e a rúcula (*Eruca sativa*) são duas das principais folhosas cultivadas no Nordeste brasileiro e estão entre as hortaliças mais estudadas em condições de estresse salino. Pertencente à família Asteraceae, a alface é uma hortaliça folhosa amplamente aceita no mercado interno (Jasse et al., 2006). Por sua vez, a rúcula, uma herbácea da família Brassicaceae, tem conquistado cada vez mais destaque em nossa agricultura, caracterizando-se por plantas robustas, de porte baixo, folhas relativamente espessas e coloração verde-escura, destacando-se pela elevada qualidade nutricional, contendo minerais como potássio, enxofre e ferro, além das vitaminas A e C (Porto et al., 2013).

A salinidade é uma das maiores ameaças para a agricultura sustentável e a segurança alimentar, especialmente em zonas áridas e semiáridas, podendo comprometer significativamente a produção agrícola ao causar uma redução direta no rendimento das culturas e, ainda, devido ao acúmulo de sais, o abandono de terras agricultáveis com consequentes problemas sociais (Munns; Tester, 2008; Yildiz et al., 2020).

Apesar dos desafios associados à salinidade, o uso de águas salobras tem se mostrado viável para o cultivo hidropônico de diversas folhosas, como coentro (Silva et al., 2017), couve-flor (Costa et al., 2020), alface (Bres et al., 2022), rúcula (Silva et al., 2011) e chicória (Alves et al., 2019). No entanto, o cultivo hidropônico em si ainda é uma tecnologia pouco explorada em muitas regiões do Brasil, especialmente no semiárido. Assim, é importante ressaltar que, apesar das vantagens oferecidas pela hidroponia, em especial o cultivo em nutriente film technique (NFT), algumas variações como floating e aeroponia ainda não estão sendo adequadamente exploradas, representando um potencial pouco conhecido para o uso de águas salobras na produção de hortaliças.

Um dos sais predominantes nas regiões afetadas pela salinidade é o cloreto de sódio. O excesso de íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , quando absorvidos em grande quantidade, pode ser prejudicial para a maioria das plantas sensíveis à salinidade (glicófitas). No entanto, as plantas podem apresentar mecanismos para sobreviver em condições de concentrações elevadas de sais no meio de cultivo (Munns; Tester, 2008). Adicionalmente, as plantas podem apresentar diferenças na tolerância ao estresse salino em função de espécies e do modo de cultivo.

A compartimentalização de íons  $K^+$ ,  $Cl^-$  e  $Na^+$  no vacúolo, juntamente com o acúmulo de solutos orgânicos compatíveis no citoplasma para manter a homeostase osmótica celular das plantas, constituem uns dos principais mecanismos de tolerância à salinidade amplamente relatados na literatura científica (Almeida et al., 2017; Zhao et al., 2020; Fu; Yang, 2023). Entre os solutos compatíveis mais estudados em plantas sob estresse salino, destacam-se os carboidratos solúveis, aminoácidos livres, proteínas solúveis e prolina livre, pois são os que mais contribuem para o potencial osmótico (Azevedo Neto et al., 2004).

O conhecimento sobre o acúmulo e a distribuição dos solutos inorgânicos e orgânicos nos diferentes órgãos de plantas de alface e rúcula submetidas ao estresse salino em diferentes sistemas de cultivo hidropônico pode contribuir para a compreensão dos mecanismos fisiológicos e bioquímicos relacionados à tolerância à salinidade dessas hortaliças. Assim sendo, o objetivo deste estudo foi investigar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos de adaptação ao estresse salino da alface e da rúcula em ambiente semiárido quando cultivadas nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia vertical mediante análise dos acúmulos de solutos inorgânicos e orgânicos.

## **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1 Condições experimentais e tratamentos**

O estudo com alface ocorreu de 02 a 27 de julho de 2022, enquanto o estudo com a rúcula foi conduzido de 22 de agosto a 11 de setembro do mesmo ano. Todos os estudos foram realizados em uma casa de vegetação na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, localizada em Cruz das Almas, Bahia, Brasil, a  $12^{\circ} 40' 1''$  Latitude Sul,  $39^{\circ} 06' 2''$  Longitude Oeste, com altitude média de 220 m. O clima local é tropical quente e úmido (Af) de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013).

Durante o período experimental da alface, os valores mínimos, máximos e médios de temperatura e umidade relativa do ar foram, respectivamente, 19,16; 26,96 e  $22^{\circ}C$  e 54,45, 93,21 e 80,16%. Para a rúcula os valores mínimos, máximos e médios de temperatura e umidade relativa do ar foram, respectivamente, 18,55; 26,6 e 21,64  $^{\circ}C$  e 53,4, 92,32 e 77,68%. A evapotranspiração de referência média foi de 2,4 mm  $dia^{-1}$  para a alface e 2,6 mm  $dia^{-1}$  para a rúcula.

As culturas investigadas foram a alface (*Lactuca sativa*), do grupo varietal crespa cv. 'Jade' da empresa Sakata Sementes®, e a rúcula (*Eruca sativa*), do grupo varietal folha larga cv. 'Folha Larga' da empresa Feltrin Sementes®. O semeio foi realizado em espuma fenólica (0,02 x 0,02 x 0,03 m). No semeio da alface foi colocada uma semente por célula e, no semeio da rúcula quatro sementes por célula de espuma fenólica. Após a germinação, as mudas de alface e de rúcula foram levadas ao berçário até terem desenvolvimento de 4 folhas definitivas e, aos 20 dias pós-semeadura, plantas de alface e de rúcula foram submetidas a quatro níveis de condutividade elétrica da água ( $CE_a$ ) utilizada para o preparo da solução nutritiva (SN). Os diferentes níveis de  $CE_a$  foram obtidos mediante a adição de NaCl na água de abastecimento local ( $CE_a = 0,30 \text{ dS m}^{-1}$ ), com as quantidades calculadas com base em adaptação da metodologia proposta por Richards (1954). Foram obtidas as seguintes condutividades elétricas de águas salobras: 1,7; 3,4 e 5,1  $\text{dS m}^{-1}$ . Posteriormente à salinização das águas, foram adicionados sais fertilizantes a essas, utilizando-se a formulação recomendada por Furlani et al. (1999a) para hortaliças folhosas. Após a adição dos sais fertilizantes, as condutividades elétricas dos tratamentos salinos foram 2,01; 3,73; 5,44 e 7,11  $\text{dS m}^{-1}$  para a alface e 2,01; 3,71; 5,41 e 7,06  $\text{dS m}^{-1}$  para a rúcula.

Para cada hortaliça foram realizados três experimentos simultâneos e independentes, em três tipos de sistemas de cultivos hidropônicos: floating, NFT (nutrient film technique) e aeropônico vertical. Ao longo dos experimentos a condutividade elétrica dos tratamentos foram monitoradas mantendo-os numa faixa de  $\pm 0,2 \text{ dS m}^{-1}$ . Os quatro tratamentos salinos foram distribuídos em cinco repetições inteiramente casualizadas, dispostos longitudinalmente na casa de vegetação e ocupando 20 parcelas experimentais para o NFT e aeroponia, enquanto para o floating para os quatro tratamentos foram utilizadas seis repetições, totalizando 24 parcelas experimentais.

Por meio do monitoramento periódico da condutividade elétrica dos tratamentos, foi possível obter as seguintes médias ponderadas ao longo do tempo para os ensaios com alface e rúcula: 1,8; 3,7; 5,4 e 6,9  $\text{dS m}^{-1}$ . Esses valores ponderados foram empregados para a análise estatística dos tratamentos.

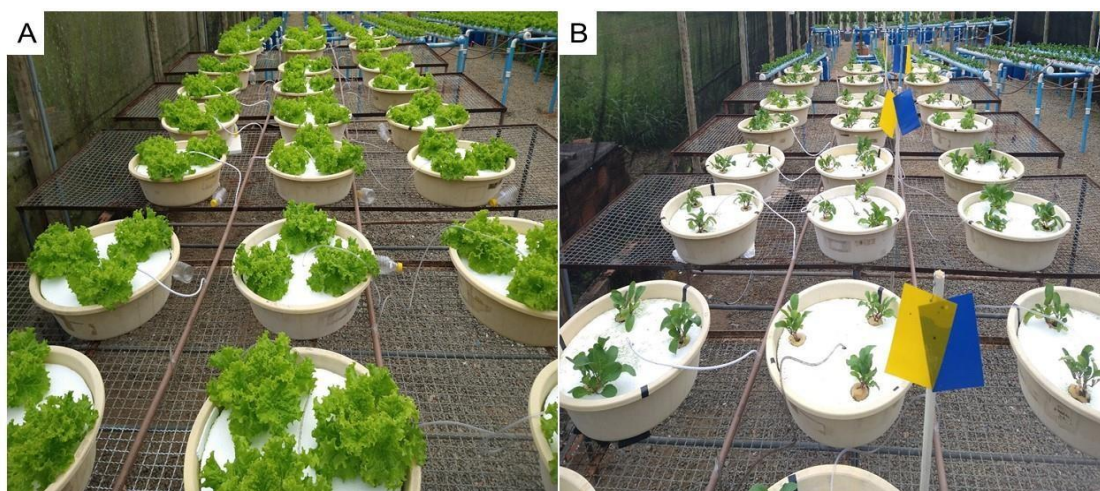
A reposição da água consumida em todos os tratamentos foi feita com água de abastecimento local ( $CE_a = 0,30 \text{ dS m}^{-1}$ ) com auxílio de uma proveta graduada com

capacidade de 1000 mL. Todos os tratamentos tiveram reposição de nutrientes a cada 3 dias, a fim de manter a  $CE_{SOL}$  estabelecida. Esta manutenção foi realizada utilizando o critério de variação máxima de 25% da  $CE_{SOL}$  inicial dos tratamentos.

### 3.2.2 Estruturas experimentais

#### 3.2.2.1 Estrutura do sistema floating

Em bancadas de mesas do tipo tela foram dispostos 24 recipientes plásticos com capacidade para 10 L de solução nutritiva (SN), espaçados 0,25 m entre si. Cada recipiente representou uma parcela experimental contendo três plantas. Os painéis flutuantes deste sistema foram feitos com isopor comercial de 0,02 m de espessura com diâmetro de 0,42 m. Cada painel possuía três orifícios com 0,05 m de diâmetro, espaçados em 0,40 m com disposição triangular em pontos equidistantes para a alocação das plantas (Figura 3.1).



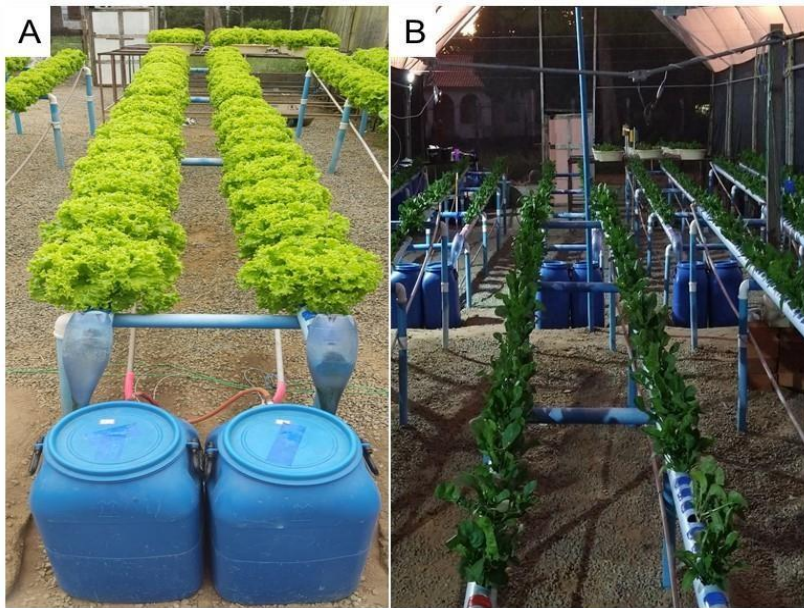
**Figura 3.1.** Vista geral do cultivo da alface (A) e da rúcula (B) no sistema floating em casa de vegetação.

A aeração do sistema foi feita com compressor de ar do tipo turbina, acoplado em um sistema de distribuição de ar confeccionado em tubo PVC de 0,02 m. Das 06:00 às 18:00 horas, a aeração foi realizada durante 15 minutos em intervalos de uma hora; e das 18:00 às 06:00 horas do dia seguinte, durante 15 minutos em intervalos de 2 horas.



### 3.2.2.2 Estrutura do sistema NFT

Foi utilizado o sistema hidropônico NFT (nutrient film technique) em tubos de PVC (0,075 m de diâmetro, tipo irrigação) com vinte plantas por tubo. Os canais de cultivo foram instalados com declividade de 6% (a fim de aumentar a velocidade de escoamento da lâmina e garantir uma melhor oxigenação da SN). O espaçamento foi de 0,25 m entre plantas de uma mesma parcela e de 0,50 m entre parcelas. As parcelas experimentais foram dispostas duas a duas sobre armações de PVC posicionadas a 0,87 e 0,51 m de altura do solo nas cotas superior e inferior, respectivamente (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Vista geral do cultivo da alface (A) e da rúcula (B) no sistema NFT em casa de vegetação 20 DAT.

Cada parcela foi representada por um canal hidropônico independente, sendo composta também por um reservatório de plástico (capacidade de 50 L) e uma eletrobomba (32 W) para recalcar a SN do reservatório para o canal hidropônico.

A circulação da SN foi realizada durante 5 minutos em intervalos de 5 minutos, das 06:00 às 18:00 horas; e das 18:00 às 06:00 horas do dia seguinte, durante 5 minutos em intervalos de 2 horas. Essa programação foi aplicada tanto para o sistema NFT quanto para a aeroponia vertical.

### 3.2.2.3 Estrutura do sistema em aeroponia vertical

A unidade de cultivo deste sistema foi constituída por uma torre 1,5 m de altura de tubo PVC (0,15 m de diâmetro), com 1,2 m útil, e 0,3 m inserido na base de sustentação (para melhor estabilidade), um reservatório de solução nutritiva (capacidade 18 L) e eletrobomba (32 W) para elevar a solução do reservatório até a parte superior da torre (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Vista geral do cultivo da alface (A) e da rúcula (B) no sistema aeroponia vertical em casa de vegetação aos 15 e 20 DAT, respectivamente.

Cada torre consistiu em uma parcela experimental, tendo quatro faces úteis dispostas de forma equidistante, perfazendo o total de 18 orifícios, espaçados em 0,25 m de uma mesma face. As torres foram dispostas em três fileiras espaçadas a 1,0 m, com espaçamento de 0,60 m entre parcelas da mesma fileira. Esse espaçamento resultou em uma área de 0,60 m<sup>2</sup> por torre de cultivo.

A distribuição da SN para as plantas foi realizada por meio de uma eletrobomba (34W) conectada a uma mangueira fixada em uma estrutura com furos, permitindo a distribuição da solução em um fluxo tipo chuveiro no interior do tubo. Dessa forma, o sistema radicular das plantas foi irrigado. Os reservatórios das estruturas foram construídos com baldes plásticos de 18 L.

### 3.2.3 Coleta e preparo das amostras

Foram coletadas amostras de folhas e raízes para análise de solutos inorgânicos (sódio - Na<sup>+</sup>, cloreto - Cl<sup>-</sup> e potássio - K<sup>+</sup>) e orgânicos (carboidratos solúveis - SC, aminoácidos livres - AA, prolina livre - FP e proteínas solúveis - SP) aos 24 dias após o transplântio (DAT) para o estudo com alface e aos 19 DAT para o

estudo com rúcula. Foi selecionada uma planta central de cada parcela e coletado o terço médio de duas folhas jovens e completamente expandidas, bem como o terço médio das raízes. Posteriormente à acomodação em papel alumínio, as raízes foram lavadas com água deionizada e secas com papel toalha. As amostras destinadas à análise de solutos inorgânicos foram secas em estufa a 65 °C. Para a análise de solutos orgânicos, as amostras foram primeiramente lavadas com água deionizada, secas com papel toalha, envolvidas em papel alumínio e, em seguida, processadas em liofilizador modelo LS 3000 (Terroni Equipamentos, Piracicaba–SP, Brasil).

### **3.2.3.1 Solutos inorgânicos**

Os extratos foram preparados seguindo o método descrito por Jones Júnior (2001). Em tubos de ensaio, foram adicionados 100 mg de material vegetal juntamente com 10 mL de água deionizada. Os tubos foram colocados em banho-maria a 80 °C, por 1 hora, com agitação a cada 15 minutos. Após esse período, os tubos foram centrifugados a 10.000 × g por 10 minutos à temperatura ambiente. Os teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> foram determinados utilizando um fotômetro de chama modelo B46 (Micronal SA, Santo André–SP, Brasil), enquanto os teores de Cl<sup>-</sup> foram determinados utilizando espectrofotômetro UV-VIS modelo LGS-53 (Bel Engenharia, Piracicaba–SP, Brasil), seguindo o protocolo de Gaines et al. (1984).

### **3.2.3.2 Solutos orgânicos**

Para o preparo dos extratos brutos, 100 mg de tecido vegetal liofilizado foi pulverizado em almofariz. Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas em tampão fosfato de potássio 0,1 M gelado, distribuídas em tubos Eppendorf® e centrifugadas a 12000 × g por 0,25 h a 4 °C (Silva et al., 2021).

Os carboidratos solúveis foram quantificados a 490 nm utilizando o método do ácido fenol-sulfúrico (Dubois et al., 1956). Para os aminoácidos livres, a quantificação foi realizada a 570 nm utilizando o método da ninhidrina (Yemm; Cocking, 1955). O teor de prolina livre foi determinado a 520 nm pelo método da ninhidrina ácida (Bates et al., 1973). As proteínas solúveis foram quantificadas a 595 nm pelo método de ligação proteína-corante (Bradford, 1976).

### **3.2.4 Análise estatística**

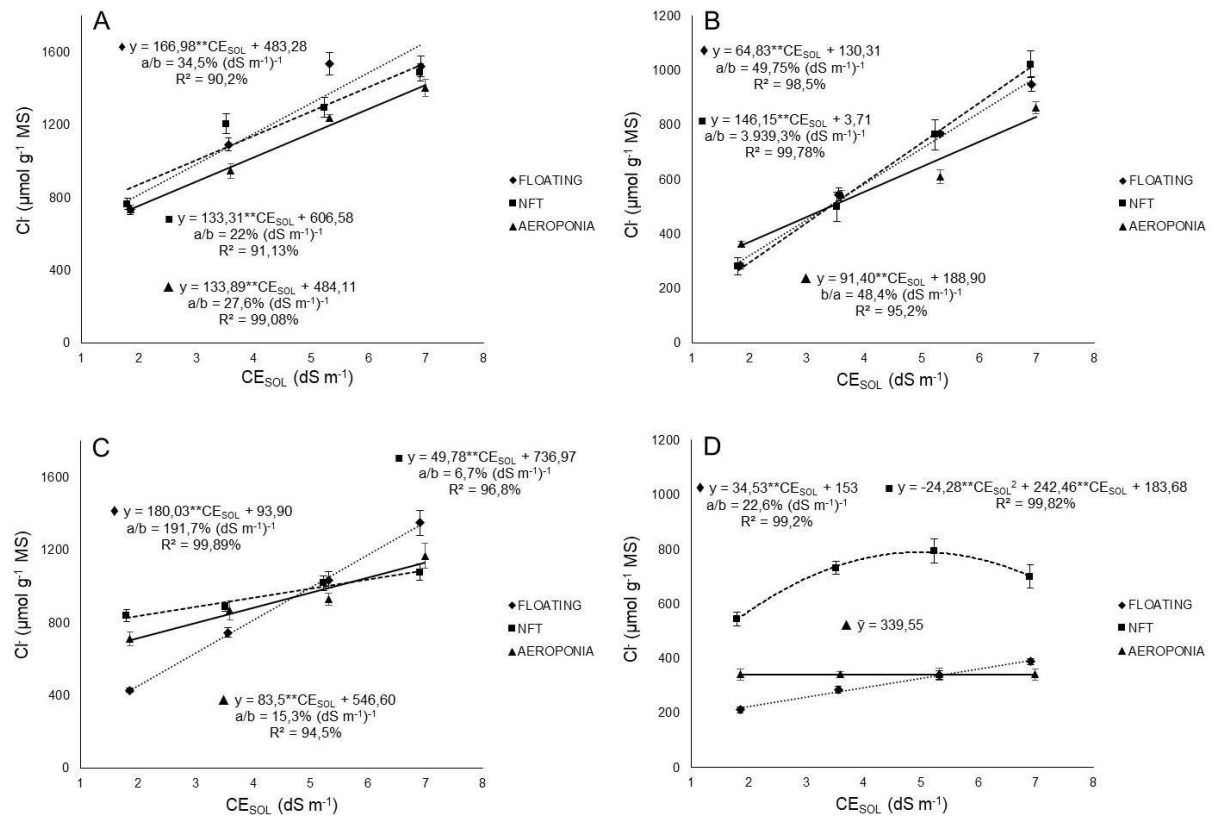
Os experimentos com cada cultura e cada estrutura de cultivo foram avaliados de forma independente. A significância dos tratamentos foi verificada através da análise de variância utilizando o teste F. Quando observada significância na análise de variância, a  $CE_{SOL}$  foi analisada por meio de regressão, escolhendo-se os modelos com base na significância de seus termos, no coeficiente de determinação e na relevância agrônômica dos resultados obtidos. A análise estatística foi realizada com o software estatístico SISVAR 5.6 (Ferreira, 2019).

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1 Teores de solutos inorgânicos em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino

Os teores de  $Cl^-$  na alface apresentaram aumento linear tanto nas folhas quanto nas raízes com o aumento da salinidade, conforme as Figuras 3.4A e 3.4B. Quando comparado o tratamento com maior condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ) de  $6,9 \text{ dS m}^{-1}$  com o tratamento controle ( $CE_{SOL} = 1,8 \text{ dS m}^{-1}$ ), foram observados aumentos significativos nos teores de  $Cl^-$ , sendo de 108,6, 80,3, e 94,2% nas folhas, e de 133,8, 279,4, e 131,9% nas raízes, nos sistemas floating, NFT, e aeroponia, respectivamente.

Para a rúcula, as concentrações de  $Cl^-$  nas folhas também aumentaram linearmente à medida que a  $CE_{SOL}$  cresceu em todos os sistemas de cultivo (Figura 3.4C). O maior aumento foi observado no floating, especialmente nas salinidades mais altas, enquanto os sistemas NFT e aeroponia tiveram aumentos mais moderados. Ao comparar o tratamento controle ( $1,8 \text{ dS m}^{-1}$ ) com o de maior salinidade ( $6,9 \text{ dS m}^{-1}$ ), observou-se aumentos de 219,7% no floating, 30,7% no NFT e 61% na aeroponia. Nas raízes, os teores de  $Cl^-$  variaram diferentemente nos sistemas de cultivo: linear no floating, quadrático no NFT e sem diferença significativa na aeroponia, que teve uma média geral de  $339,5 \mu\text{mol g}^{-1}$  (Figura 3.4D). Em relação à maior salinidade em comparação com o controle, os aumentos nos teores de  $Cl^-$  foram de 81,8 e 45,7% para o floating e NFT, respectivamente, sendo considerado o ponto de máximo ( $5 \text{ dS m}^{-1}$ ) para o NFT no modelo quadrático.

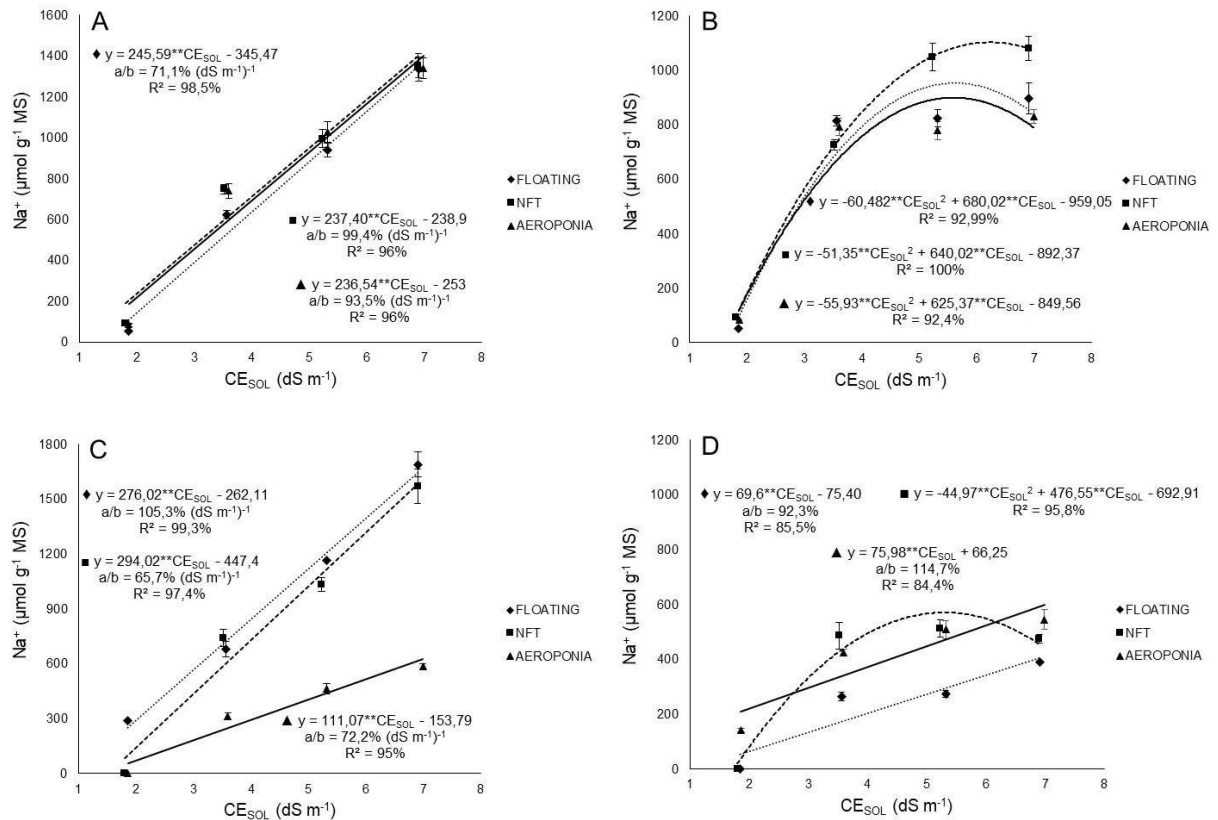


**Figura 3.4.** Teores médios de Cl<sup>-</sup> nas folhas e raízes da alface crespa cv. ‘Jade’ (A, B) e da rúcula cv. ‘Folha larga’ (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

A salinidade aumentou linearmente os teores de Na<sup>+</sup> tanto nas folhas de alface como nas folhas de rúcula nos três sistemas de cultivo hidropônico, conforme Figura 3.5A e 3.5C. Na alface, ao comparar os valores estimados na CE<sub>SOL</sub> de 6,9 dS m<sup>-1</sup> com os da CE<sub>SOL</sub> controle, observaram-se aumentos nos teores desta íons na ordem de 1296,7% no floating, de 642,6% no NFT e de 698,2% na aeroponia. Fazendo esta mesma comparação na rúcula, observaram-se acréscimos de 1407,7 μmol g<sup>-1</sup> no floating (599,7%), de 1499,5 μmol g<sup>-1</sup> no NFT (1832,3%) e de 566,4 μmol g<sup>-1</sup> de matéria seca na aeroponia (1227,8%).

Nas raízes de alface, os teores de Na<sup>+</sup> apresentaram um comportamento quadrático, com aumento inicial seguido de estabilização em todos os sistemas hidropônicos com o aumento da salinidade. Esse padrão foi mais pronunciado nos sistemas NFT e floating, onde os teores de sódio atingiram níveis mais elevados em comparação à aeroponia (Figura 3.5B). Ao comparar os valores do tratamento controle com os valores obtidos nos pontos de máximo de salinidade de cada sistema,

foram observados aumentos de 1279,7, 1081,1 e 846,9% para os sistemas floating ( $CE_{SOL}$  max 5,6  $dS\ m^{-1}$ ), NFT ( $CE_{SOL}$  max 6,2  $dS\ m^{-1}$ ) e aeroponia ( $CE_{SOL}$  max 5,6  $dS\ m^{-1}$ ), respectivamente.

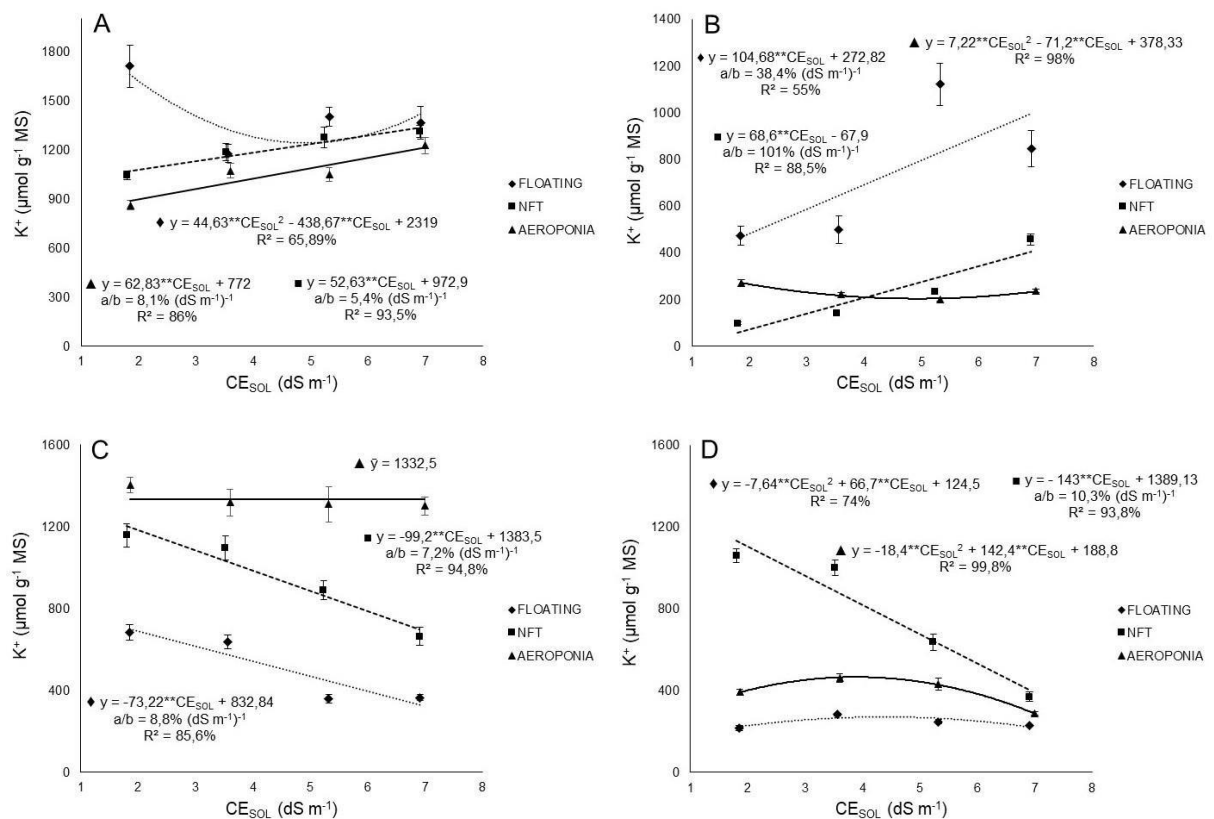


**Figura 3.5.** Teores médios de  $Na^+$  nas folhas e raízes da alface crespa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).

Nas raízes de rúcula, as concentrações de  $Na^+$  aumentaram linearmente nos sistemas floating e aeroponia, enquanto no NFT esse aumento foi de forma quadrática (Figura 3.5D). Os aumentos observados entre a maior salinidade e o controle foram de 713,2% no floating, 2870,2% no NFT (considerando o ponto de máximo da equação em 5,3  $dS\ m^{-1}$ ) e 190,9% na aeroponia.

Os teores de  $K^+$  nas folhas de alface aumentaram linearmente com a salinidade da solução nutritiva nos sistemas NFT e aeroponia (Figura 3.6A). Nos sistemas NFT e aeroponia, os teores de  $K^+$  aumentaram em 25,1 e 36,2%, respectivamente, em relação ao controle e o maior nível salino. No sistema floating, houve comportamento

quadrático com redução de 25,8% entre o controle e a salinidade do ponto de mínimo (4,9 dS m<sup>-1</sup>). Nas raízes, os teores de K<sup>+</sup> aumentaram linearmente no floating e NFT, enquanto na aeroponia houve uma redução quadrática com o aumento da salinidade (Figura 3.6B). No NFT, houve um acréscimo de 629,5% entre o controle e a salinidade mais alta, enquanto na aeroponia houve comportamento quadrático com redução de 25,9% entre o controle e a salinidade do ponto de mínimo (4,9 dS m<sup>-1</sup>).

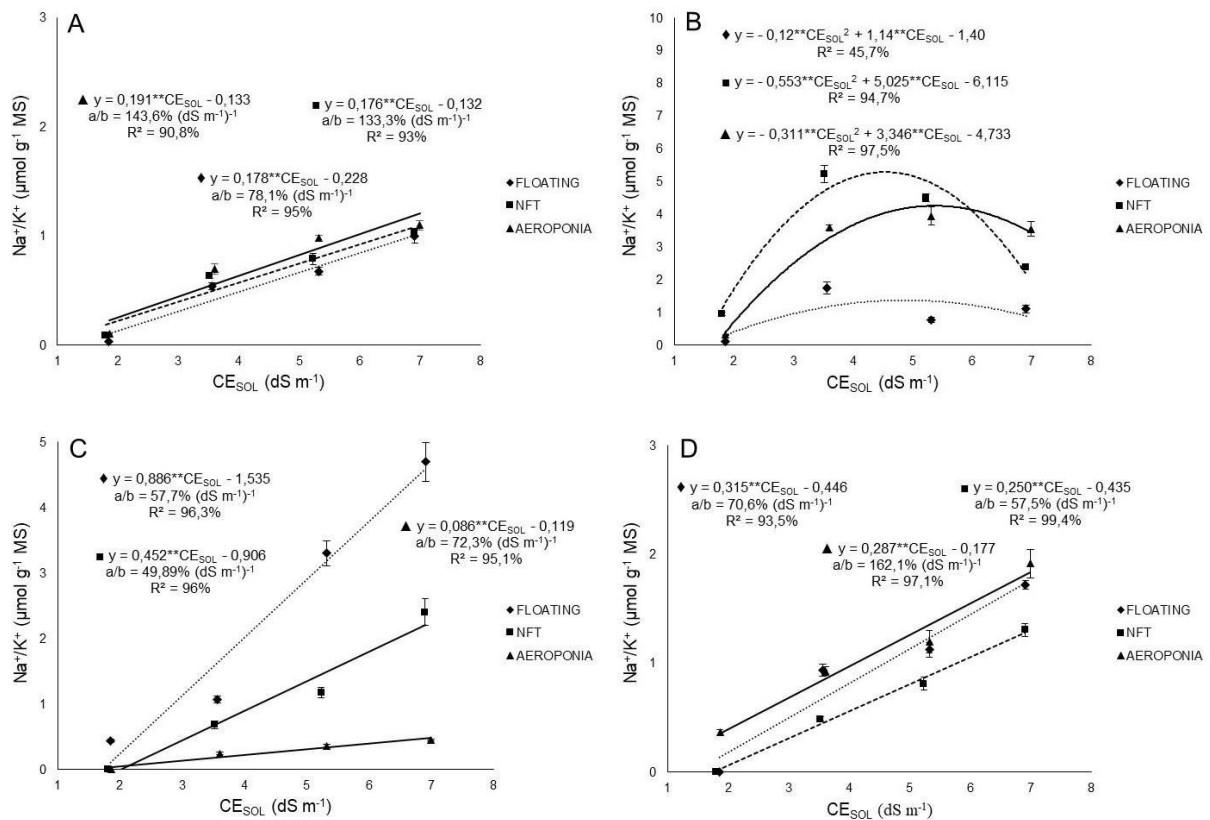


**Figura 3.6.** Teores médios de K<sup>+</sup> nas folhas e raízes da alface crespa cv. ‘Jade’ (A, B) e da rúcula cv. ‘Folha larga’ (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

Ao contrário dos teores de Cl<sup>-</sup> e Na<sup>+</sup> em folhas de rúcula, que aumentaram com a salinidade da solução nutritiva, os níveis de K<sup>+</sup> diminuíram à medida que a concentração de sal aumentou nos sistemas floating e NFT. Na aeroponia, por outro lado, não houve efeito significativo dos tratamentos salinos, mantendo uma média geral de 1332,5 µmol g<sup>-1</sup> (Figura 3.6C). Ao comparar os valores dos modelos matemáticos entre o controle e o maior nível salino, observou-se uma redução nos teores de K<sup>+</sup> de 53,1% no floating e 42% no NFT. Nas raízes os teores de K<sup>+</sup> nos

sistemas floating e aeroponia tiveram comportamento quadrático com aumentos de 22,9 e 20,4%, respectivamente, até as salinidades de 4,4 e 3,9 dS m<sup>-1</sup> (Figura 3.6D).

A razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> em folhas de alface aumentou linearmente com a elevação da CE<sub>SOL</sub> em todos os sistemas de cultivo (Figura 3.7A). Comparando os tratamentos de 1,8 e 6,9 dS m<sup>-1</sup>, a razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> elevou-se de 0,21 para 1,18 (462%) no floating, de 0,18 para 1,08 (485,7%) no NFT e de 0,09 para 1 (982,5%) na aeroponia, segundo os modelos lineares para cada sistema. Por outro lado, nas raízes, a razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> aumentou de forma quadrática (Figura 3.7B). Ao comparar os valores obtidos pelo modelo entre o controle e os pontos de máximo, houve aumentos de 396,5% para o floating (CE<sub>SOL</sub> max 4,7 dS m<sup>-1</sup>), 365,5% para o NFT (CE<sub>SOL</sub> max 4,5 dS m<sup>-1</sup>) e de 1412,1% para a aeroponia (CE<sub>SOL</sub> max 5,4 dS m<sup>-1</sup>).



**Figura 3.7.** Razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> nas folhas (A) e raízes (B) da alface crespa cv. 'Jade' e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D para folha e raízes, respectivamente) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

Com o aumento da salinidade, houve um crescimento linear na razão Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> tanto nas folhas quanto nas raízes de rúcula (Figura 3.7C e 3.7D). Ao comparar os



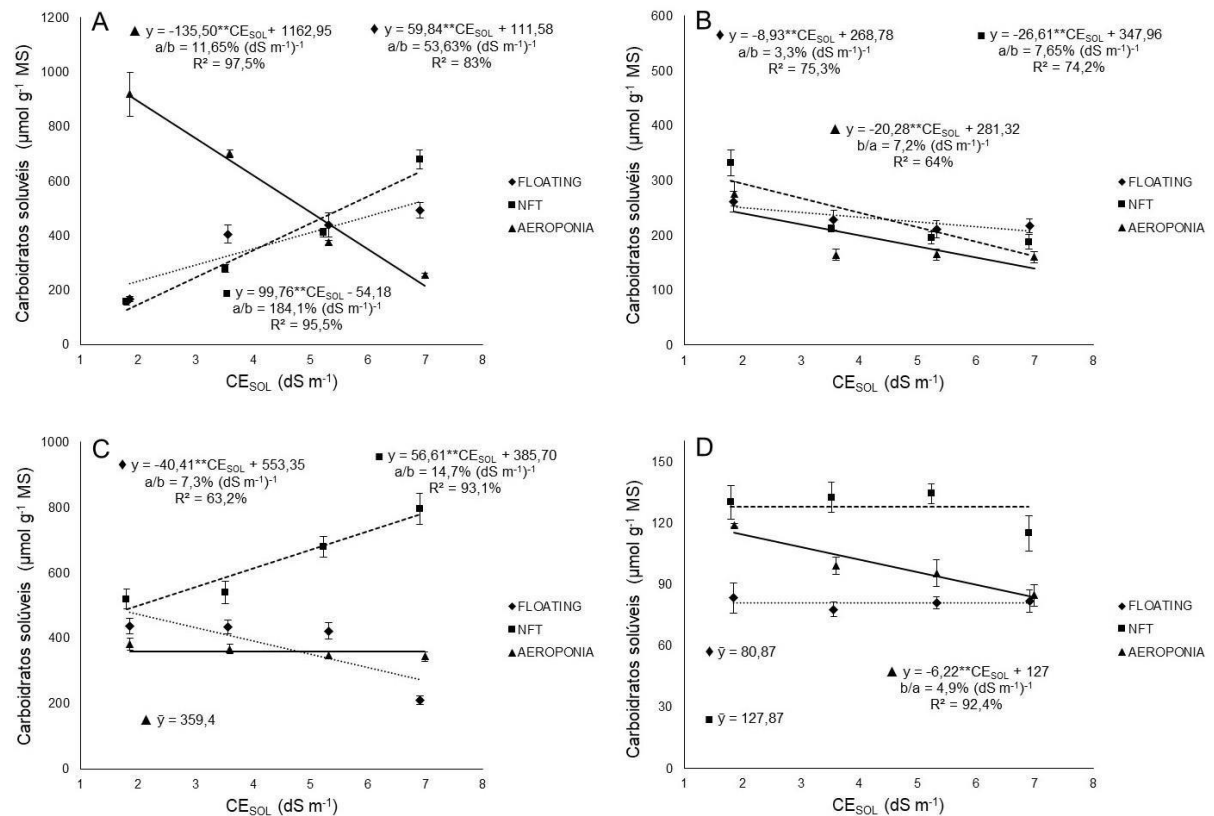
valores estimados entre o controle e a salinidade de 6,9 dS m<sup>-1</sup>, constatou-se nas folhas aumento de 4,5 μmol g<sup>-1</sup> (7556,2%) no floating, de 2,3 μmol g<sup>-1</sup> (2494,8%) no NFT, e de 0,4 μmol g<sup>-1</sup> (1225,1%) na aeroponia. Já nas raízes, os incrementos observados foram de 1,6 μmol g<sup>-1</sup> (1327,7%) no floating, de 1,3 μmol g<sup>-1</sup> (8500%) no NFT, e de 1,5 μmol g<sup>-1</sup> (431%) na aeroponia.

### **3.3.2 Teores de solutos orgânicos em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino**

Os teores de carboidratos solúveis (CS) em folhas de alface apresentaram variações distintas nos diferentes sistemas em resposta à salinidade. Nos sistemas floating e NFT, houve aumento linear de 139,2% e 217,7%, respectivamente, ao comparar o tratamento controle (1,8 dS m<sup>-1</sup>) com a maior CE<sub>SOL</sub> (6,9 dS m<sup>-1</sup>). Em contrapartida, na aeroponia, observou-se decréscimo linear de 75,2% quando comparados os mesmos tratamentos (Figura 3.8A). Quanto às raízes, as concentrações de CS diminuíram de forma linear em todos os sistemas (Figura 3.8B), apresentando reduções de 17,9% no floating, 45,2% no NFT e 42,7% na aeroponia, ao contrastar os tratamentos controle e maior nível salino.

No sistema floating, os teores de CS em folhas de rúcula reduziram linearmente com o aumento da CE<sub>SOL</sub>, resultando em um decréscimo estimado de 42,7% ao comparar o controle com a maior salinidade. Por outro lado, no NFT, houve um comportamento oposto, com incremento estimado de 59,2% para a mesma comparação. Na aeroponia, não foram observados efeitos dos tratamentos salinos, mantendo uma média geral de 359,4 μmol g<sup>-1</sup> (Figura 3.8C).

Nas raízes de rúcula, o estresse salino não alterou os teores de CS nos sistemas floating e NFT, apresentando médias gerais de 80,9 e 127,9 μmol g<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, na aeroponia, os teores de carboidratos mostraram decréscimo linear de 4,9% por aumento unitário da CE<sub>SOL</sub>, representando uma queda de 27,4% entre o controle e o maior nível salino (Figura 3.8D).



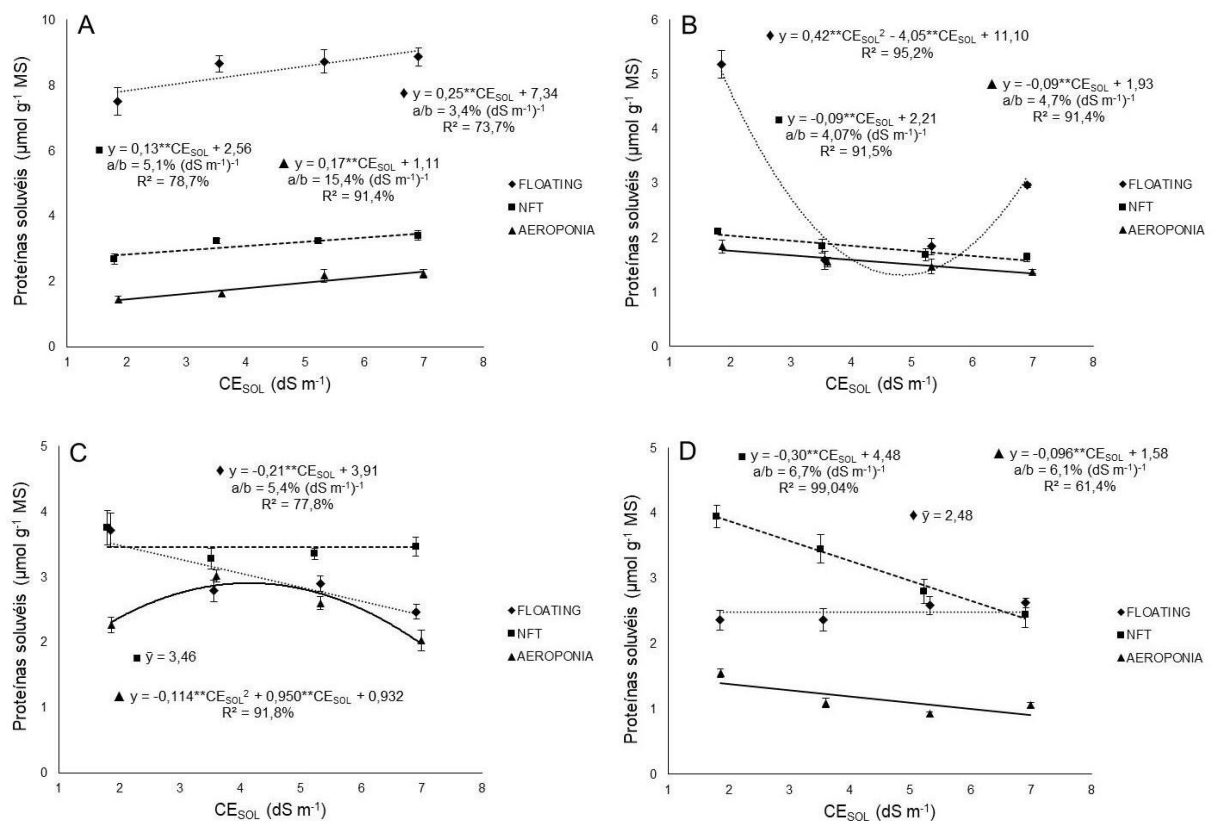
**Figura 3.8.** Teores médios de carboidratos solúveis (CS) em folhas e raízes da alface crespa cv. ‘Jade’ (A, B) e da rúcula cv. ‘Folha larga’ (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $CE_{SOL}$ ).

Nos sistemas de cultivo avaliados, o aumento da  $CE_{SOL}$  resultou em diferentes respostas nos teores de proteínas solúveis (PS) em folhas de alface. O sistema floating apresentou os maiores incrementos, seguido pelo NFT e pela aeroponia (Figura 3.9A). Ao comparar os teores de PS entre o controle e a maior  $CE_{SOL}$  nos três sistemas, observaram-se aumentos de 16,4, 23,7 e 61,2%, respectivamente. No entanto, nas raízes, houve um padrão inverso para o NFT e a aeroponia, com uma redução linear nos teores de PS, enquanto no floating foi observada redução com comportamento quadrático (Figura 3.9B). Essas reduções foram de 74% no floating, 22,4% no NFT e 26% na aeroponia, comparando-se os mesmos tratamentos anteriores, exceto para o floating, onde se utilizou a salinidade correspondente ao ponto de mínimo da função quadrática ( $4,8\ dS\ m^{-1}$ ).

Em folhas de rúcula, o teor de PS no floating apresentou redução linear com o aumento da salinidade, evidenciando uma queda de 30,3% entre as salinidades de

1,8 e 6,9 dS m<sup>-1</sup>. Em contraste, na aeroponia, o comportamento do teor de PS foi quadrático, com aumento de 28,1% até a salinidade de 4,2 dS m<sup>-1</sup>, correspondente ao ponto de máximo do modelo polinomial. No sistema NFT, não foram observados efeitos salinos significativos, mantendo-se uma média geral de 3,46 μmol g<sup>-1</sup> (Figura 3.9C).

Já nas raízes de rúcula, os teores de PS diminuíram à medida que a salinidade aumentou nos sistemas NFT e aeroponia, com decréscimos estimados na ordem de 38,8 e 34,8%, respectivamente, ao comparar o controle com a maior salinidade. Por outro lado, no floating, não houve diferença significativa dos tratamentos, apresentando uma média geral de 2,48 μmol g<sup>-1</sup> (Figura 3.9D).

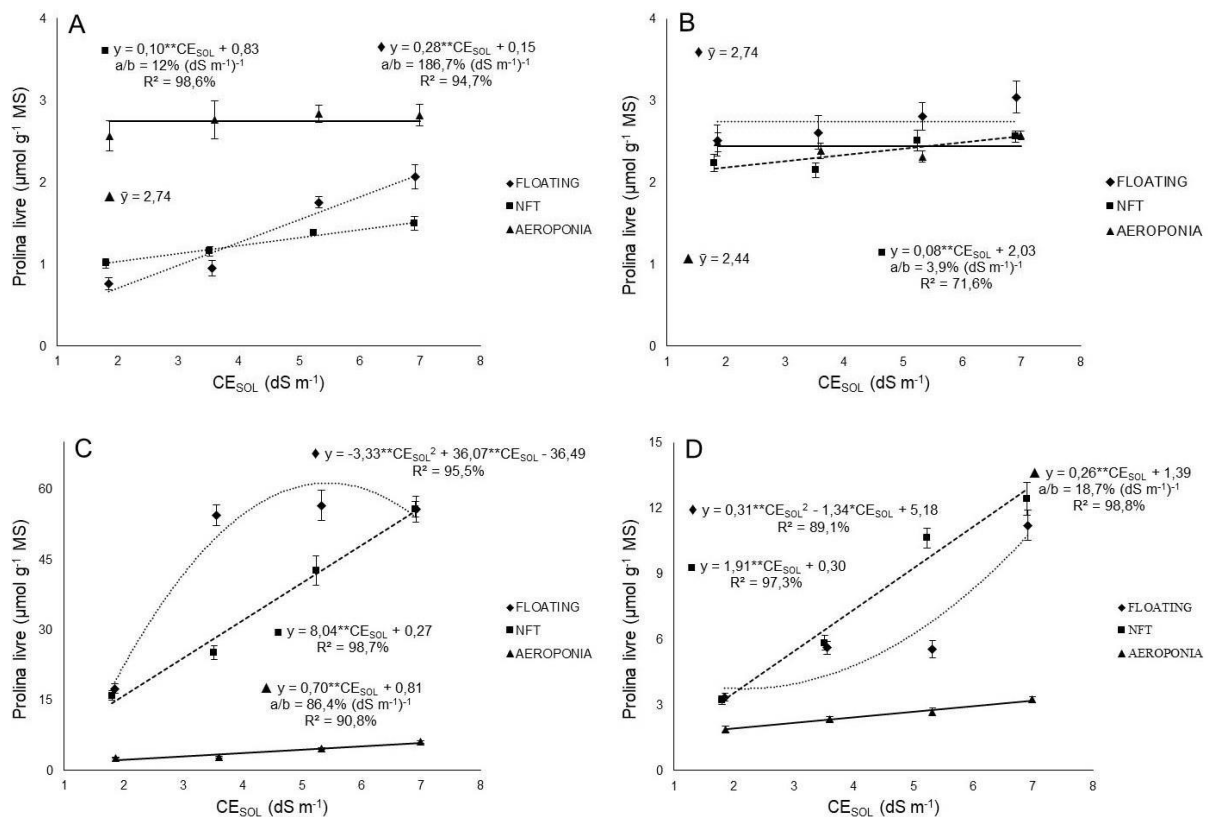


**Figura 3.9.** Teores médios de proteínas solúveis (PS) em folhas e raízes da alface crespa cv. ‘Jade’ (A, B) e da rúcula cv. ‘Folha larga’ (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

Para os teores de prolina livre (PL) nas folhas de alface, observou-se que no floating houve crescimento linear desse soluto, com aumento de 218,3% entre os tratamentos de 1,8 e 6,9 dS m<sup>-1</sup>. No entanto, nas raízes não houve efeito salino,

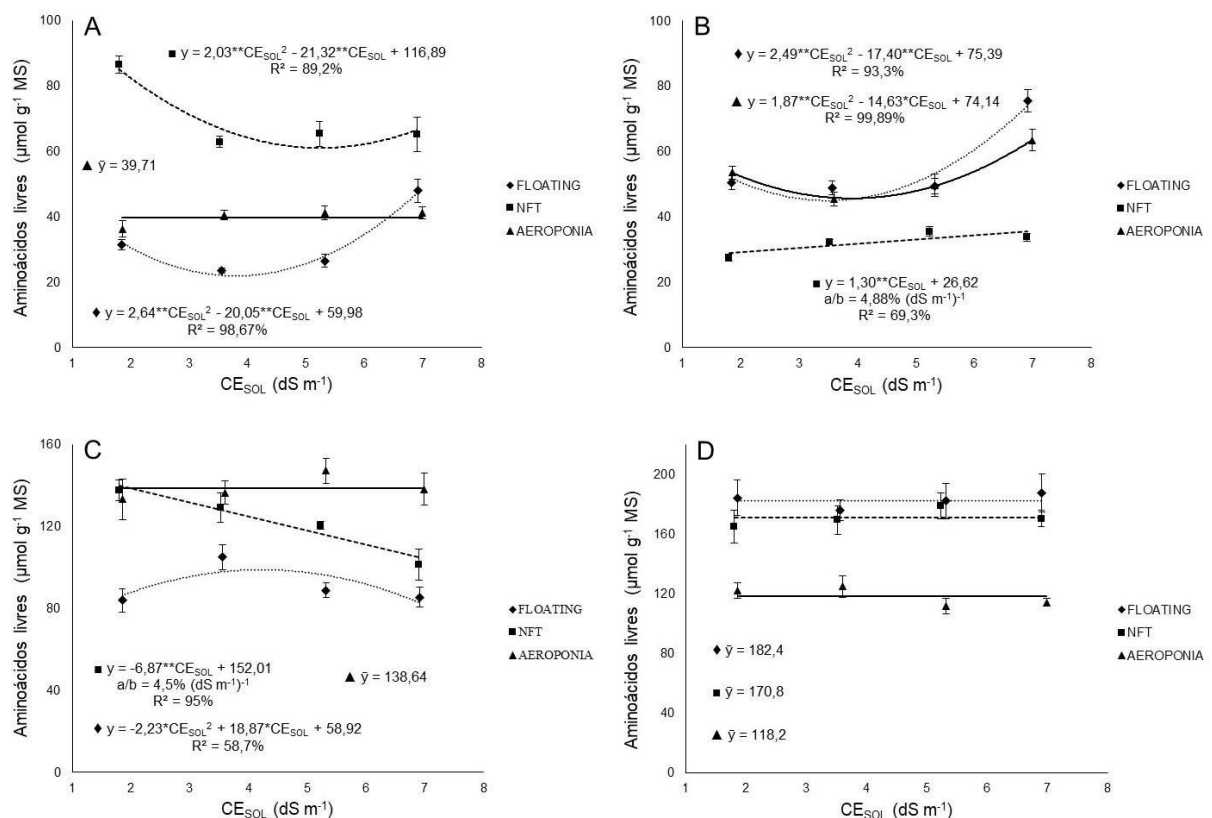
mantendo uma média geral de  $2,74 \mu\text{mol g}^{-1}$ . Já no NFT, os teores de PL aumentaram de forma linear tanto nas folhas quanto nas raízes com o aumento da  $\text{CE}_{\text{SOL}}$ , com incrementos estimados de 50,5 e 18,8% ao comparar o controle e a maior salinidade, respectivamente. Por outro lado, na aeroponia, não houve efeito significativo da salinidade em qualquer parte da planta, apresentando médias gerais de  $2,74 \mu\text{mol g}^{-1}$  para as folhas e de  $2,44 \mu\text{mol g}^{-1}$  para as raízes (Figura 3.10A, 3.10B).

O estresse salino resultou em aumentos significativos nos teores de PL tanto nas folhas quanto nas raízes de rúcula (Figura 3.10C, 3.10D). Nas folhas, o sistema floating apresentou um crescimento de 246,7% ao comparar o controle com a salinidade correspondente ao ponto de máximo do modelo quadrático ( $\text{CE}_{\text{SOL}}$  de  $5,4 \text{ dS m}^{-1}$ ). Nos sistemas NFT e aeroponia, os teores de PL aumentaram de forma linear, com elevações estimadas de 278,1% e 172,5%, respectivamente, ao se considerar o controle e a maior salinidade. Nas raízes, os acréscimos estimados foram de 184,9% no floating, 260,6% no NFT e 71,4% na aeroponia, ao comparar os tratamentos controle com o maior nível salino testado.



**Figura 3.10.** Teores médios de prolina livre (PL) em folhas e raízes da alface crespa cv. ‘Jade’ (A, B) e da rúcula cv. ‘Folha larga’ (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva ( $\text{CE}_{\text{SOL}}$ ).

Para a alface cultivada no floating, os teores de AL (aminoácidos livres) exibiram um comportamento quadrático tanto nas folhas quanto nas raízes com o aumento da salinidade, resultando em elevações de 45,9% e 41,7%, respectivamente, quando comparado o tratamento controle com o maior nível de salinidade (Figura 3.11A, 3.11B). No NFT, também foi observado um comportamento quadrático, mas com reduções nos teores de AL nas folhas na ordem de 22%, seguidas de estabilização ao comparar o controle com a maior salinidade testada (6,9 dS m<sup>-1</sup>), enquanto nas raízes, foi constatado um aumento de 23% ao comparar a testemunha e a salinidade de 6,9 dS m<sup>-1</sup> (Figura 3.11A, 3.11B). Para a aeroponia, os teores de AL nas folhas não apresentaram alterações significativas sob estresse salino ( $\bar{y} = 39,7$ ). No entanto, nas raízes, houve uma resposta quadrática com incremento de 15,5% ao comparar o controle com a maior salinidade (Figura 3.11A, 3.11B).



**Figura 3.11.** Teores médios de aminoácidos livres (AL) em folhas e raízes da alface crepsa cv. 'Jade' (A, B) e da rúcula cv. 'Folha larga' (C, D) nos sistemas hidropônicos floating, NFT e aeroponia em função da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE<sub>SOL</sub>).

Os teores de AL em folhas de rúcula variaram de forma distinta nos três sistemas em resposta ao aumento da salinidade. No sistema floating, foi observado um modelo quadrático, resultando em um incremento estimado de 15,4% entre o controle e o ponto de máximo ( $CE_{SOL} 4,2 \text{ dS m}^{-1}$ ). Por outro lado, no NFT, houve um decréscimo linear dessa variável, representando redução de 25% entre as salinidades controle e a mais elevada. Já na aeroponia, não foram identificados efeitos significativos entre as salinidades, indicando média geral de  $138,64 \mu\text{mol g}^{-1}$  (Figura 3.11C). Em relação às raízes de rúcula, não foram observados efeitos significativos da salinidade da solução nutritiva em qualquer sistema hidropônico, com médias gerais de  $182,4 \mu\text{mol g}^{-1}$  para o floating,  $170,8 \mu\text{mol g}^{-1}$  para o NFT e  $118,2 \mu\text{mol g}^{-1}$  para a aeroponia (Figura 3.11D).

### **3.4 DISCUSSÃO**

#### **3.4.1 Teor de $\text{Cl}^-$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ e razão $\text{Na}^+/\text{K}^+$ em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino**

O estresse salino modifica os padrões de disponibilidade e transporte de nutrientes, resultando em grandes alterações no crescimento das plantas. Os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  são os principais competidores que limitam a absorção de nutrientes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{NO}_3^-$ . Além disso, o equilíbrio iônico desempenha um papel crucial na capacidade de sobrevivência das plantas diante do estresse salino. As plantas mantêm esse equilíbrio por meio de diversos processos, incluindo a captação celular, o sequestro e a inclusão e exclusão de íons (Isayenkov; Maathuis, 2019; Shahid et al., 2020).

Assim como verificado no presente estudo para a alface e a rúcula e independentemente do sistema de cultivo, o aumento da concentração dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  em diferentes órgãos de plantas expostas à salinidade é amplamente descrito na literatura (Khare et al., 2020; Hasanuzzaman, Fujita, 2022). Além disso, o acúmulo desses íons nas células vegetais representa um desafio para as plantas, pois causam perturbações no metabolismo celular. No entanto, esses íons também fornecem osmótico energeticamente barato para diminuir o potencial osmótico da célula e, portanto, evitar a perda de água (Isayenkov; Maathuis, 2019). O acúmulo de íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  como mecanismo de tolerância ao sal foi relatado por Bres et al. (2022) e Bartha et al. (2015) para plantas de alface e, também por Petretto et al. (2019) e Shariatinia et al. (2021) em plantas de rúcula.

Os dados obtidos neste estudo indicam que tanto a alface quanto a rúcula apresentam limitações na exclusão de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  ou que os mecanismos de retenção desses íons nas raízes podem ter sido saturados (Azevedo Neto; Tabosa, 2000). Como resultado, as raízes não foram capazes de continuar atuando de forma eficaz como um reservatório para esses íons, permitindo seu acúmulo nas folhas, onde foram observados os maiores teores. Isso sugere uma capacidade limitada das raízes para impedir a translocação desses íons para a parte aérea da alface e da rúcula, o que pode ter implicações significativas na tolerância das plantas ao estresse salino. Além disso, é importante destacar que o acúmulo desses íons foi menos acentuado na aeroponia, indicando que, nesse sistema, sob salinidade, as plantas podem acumular menos  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , especialmente em folhas de rúcula, onde o sódio apresentou teores menores em 62% e 61% em comparação ao floating e ao NFT na maior salinidade, respectivamente.

O potássio por sua vez desempenha papel essencial na osmorregulação, na manutenção do turgor celular e na síntese de proteínas, além de ativar mais de 50 enzimas e a redução da sua absorção pode causar diminuição no crescimento e produtividade das plantas, principalmente em condições salinas (Munns; Tester, 2008; Shahid et al., 2020). De modo geral, os teores de  $\text{K}^+$  nas folhas e raízes, aumentaram na alface e diminuíram na rúcula. Em oposição aos resultados obtidos no presente estudo, Cova et al. (2017) e Bres et al. (2022) apontaram redução no acúmulo de  $\text{K}^+$  em plantas de alface sob maior salinidade da solução nutritiva.

Como visto nos resultados, em geral, para a rúcula houve comportamento de queda nos teores de  $\text{K}^+$  em todos os órgãos com o aumento da  $\text{CE}_{\text{SOL}}$ , exceto para folhas na aeroponia que não mostrou variação. Esses resultados são corroborados pelos estudos de Petretto et al. (2019) e Alves et al. (2024), que também verificaram queda no teor de  $\text{K}^+$  na rúcula sob estresse salino.

Além dos benefícios mencionados anteriormente, o potássio tem o potencial de mitigar os danos causados pela salinidade nas plantas, atuando na redução das espécies reativas de oxigênio geradas pelo estresse osmótico. O  $\text{K}^+$  desempenha um papel crucial na atividade das enzimas antioxidantes, melhorando a eficiência do uso de nitrogênio nas plantas e, assim, contribuindo para a manutenção do rendimento das culturas, mesmo em condições adversas de estresse (Tital et al., 2021)

A razão  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  é um parâmetro chave na tolerância ao sal por refletir a homeostase iônica das plantas sob estresse salino (Fakhrfeshani et al., 2015; Ó et al., 2022). É sabido que a capacidade de resistência ao sal em plantas está relacionada a um mecanismo mais eficaz para a absorção preferencial de  $\text{K}^+$  em vez de  $\text{Na}^+$  (Ashraf; O'leary, 1996; Guo et al., 2015). No presente estudo, o aumento mais pronunciado nos teores de  $\text{Na}^+$  associado a um menor aumento nos teores de  $\text{K}^+$  resultou em um aumento na razão  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  nas folhas de alface, em conformidade com as descobertas de Abdelkader et al. (2023) em um estudo anterior. Essa tendência também foi observada por Cova et al. (2017) em plantas de alface submetidas a estresse salino em diferentes sistemas hidropônicos. No entanto, ao compararmos os dados deste estudo com os resultados apresentados por esses autores, notamos que a relação  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  que estes observaram teve uma magnitude maior.

De modo similar ao observado na alface, o aumento da razão  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  em plantas de rúcula foi resultado da elevação do acúmulo de  $\text{Na}^+$  e redução do acúmulo de  $\text{K}^+$ . O aumento desta razão também foi verificado na rúcula (Afsar et al., 2020) e, em outras espécies brássicas, como o repolho (Sanoubar et al., 2016) sob estresse salino.

De acordo com Greenway e Munns (1980), a relação  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  em plantas não halófitas deve apresentar limites inferiores ou iguais a 1,0 para a conservação da homeostase iônica e uma ótima eficiência metabólica. Assim, neste estudo, os valores estimados para a razão  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  na maior salinidade da solução nutritiva em folhas de alface para todos os sistemas de cultivo hidropônico sugerem que, no floating o metabolismo celular não foi afetado pelo desequilíbrio iônico ocasionado pelo  $\text{NaCl}$ , enquanto nos sistemas NFT e aeroponia essa relação mostrou valores superiores ao limite estabelecido pela literatura em 8 e 20%, respectivamente, o que pode sugerir um ligeiro distúrbio no equilíbrio iônico da alface nestes dois sistemas, indicando ainda que até as salinidades de 6,4 e 5,9  $\text{dS m}^{-1}$  a alface cultivada no NFT e na aeroponia não teria o metabolismo afetado pelo sal.

Na rúcula, a razão  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  mostrou valores estimados para a maior salinidade superiores ao limite estabelecido em 4,6 vezes no floating, 2,2 vezes no NFT e inferior a metade do limite na aeroponia. Entretanto, para não haver perturbação do metabolismo celular, os modelos matemáticos dos três sistemas sugerem níveis máximos de salinidade de 2,9  $\text{dS m}^{-1}$  para o floating, 4,2  $\text{dS m}^{-1}$  para o NFT e de até



13 dS m<sup>-1</sup> para a aeroponia, ou seja, apenas na aeroponia um limite de salinidade muito superior ao maior nível salino dos tratamentos testados nesse estudo não causaria desequilíbrio iônico em plantas de rúcula.

### **3.4.2 Teor de solutos orgânicos em plantas de alface e de rúcula sob estresse salino**

A resistência à salinidade é uma característica complexa que envolve diversos mecanismos de mitigação do estresse, incluindo a produção de osmorreguladores, que são compostos orgânicos hidrofílicos de baixo peso molecular e, que desempenham várias funções relacionadas aos sistemas de defesa das plantas (Singh et al., 2022). A retenção de íons tóxicos (Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>) no interior celular requer que a célula acumule solutos orgânicos para manter o ajustamento osmótico devido à concentração de íons no vacúolo (Choudhary et al., 2023). Em contraste com os compostos inorgânicos, esses compostos não são prejudiciais em concentrações celulares mais altas (Niazian et al., 2021). Neste estudo, os compostos orgânicos analisados foram os carboidratos solúveis, proteínas solúveis, prolina livre e aminoácidos livres.

A salinidade causou respostas variadas no acúmulo de carboidratos solúveis tanto na alface quanto na rúcula em todas as partes das plantas. Na alface, os teores de CS aumentaram nas folhas e reduziram nas raízes nos três sistemas, exceto em folhas na aeroponia onde houve redução. Em folhas de rúcula, os teores de carboidratos reduziram no floating, aumentaram no NFT e não foram afetados pela salinidade na aeroponia, enquanto nas raízes houve alterações significativas apenas na aeroponia. Se por um lado, o elevado conteúdo de carboidratos nas folhas estimula o desenvolvimento das plantas e o armazenamento de carboidratos nos órgãos destinados à reserva (Taiz et al., 2017) por outro lado, a diminuição dos níveis de carboidratos nas folhas está geralmente ligada a problemas na sua biossíntese ou na translocação para outras partes da planta (Azevedo Neto et al., 2004; 2009). Assim, os resultados atuais sugerem que nos sistemas floating e NFT o maior acúmulo foliar desses solutos induzido pela salinidade pode estar relacionado à necessidade de ajustamento osmótico, em contraste com a aeroponia, onde o menor acúmulo de carboidratos não sugere essa necessidade.

Diversos estudos têm documentado variações no acúmulo de carboidratos solúveis em plantas de diversas espécies, incluindo alface e brássicas (da família da rúcula), sob condições de estresse salino. Segundo Yavuz et al. (2023), os níveis de carboidratos na alface diminuíram com o aumento da salinidade, ao passo que Zhang & Du (2023) observaram um aumento nesse acúmulo. Em relação às plantas de couve-flor, Santos et al. (2021) não encontraram mudanças nos teores de carboidratos após 30 dias de tratamento salino, porém, aos 60 dias, houve uma redução no acúmulo desse soluto com o aumento da salinidade. Isso evidencia que as variações nos teores de carboidratos não dependem apenas da espécie e do sistema de cultivo (como foi observado neste estudo), mas também do tempo de exposição das plantas ao sal.

A salinidade pode estimular a produção de proteínas específicas em resposta ao estresse salino, levando a variações nos níveis totais ou solúveis de proteínas, dependendo do órgão analisado da planta (Pessarakli, 1999). No estudo atual, foi observada uma relação positiva entre o aumento da salinidade e os níveis de proteínas solúveis nas folhas de alface em todos os sistemas de cultivo, sugerindo um estímulo à biossíntese proteica, conforme destacado por Ahmed et al. (2019). Já em folhas de rúcula, verificaram-se comportamentos distintos em função do sistema de cultivo utilizado. Por outro lado, os níveis de proteínas solúveis nas raízes de ambas as culturas diminuíram em resposta ao aumento do estresse salino, exceto nas raízes de rúcula no sistema floating, que não apresentaram uma alteração significativa em resposta ao estresse salino.

De acordo com Zhang et al. (2021), o considerável acúmulo de prolina em situações de estresse salino ressalta a importância desse osmólito no ajuste osmótico diante das condições adversas causadas pela salinidade. Apesar da interpretação convencional na literatura de que a prolina se acumula principalmente para o ajuste osmótico e é uma característica crucial na tolerância à salinidade, essa visão nem sempre é corroborada em diversas espécies de plantas sob condições salinas. Essa constatação levanta questionamentos sobre o verdadeiro papel do acúmulo de prolina na adaptação das plantas ao estresse salino (Mansour; Ali, 2017).

No âmbito desta pesquisa, verificou-se que, comparativamente aos demais aminoácidos, os teores de prolina livre na alface foram geralmente baixos, independentemente da parte da planta ou do sistema de cultivo hidropônico utilizado.

No entanto, foi observada uma correlação positiva entre esses níveis e o aumento da salinidade, tanto em folhas no sistema floating quanto em folhas e raízes do sistema NFT, conforme também documentado por Ahmed et al. (2019), Babausmail et al. (2022) e Sardar et al. (2023) em estudos anteriores com alface. Esses resultados sugerem que a alface não acumula prolina em níveis elevados como resposta ao estresse salino e que este soluto pode não ter desempenhado um papel chave para o mecanismo de osmorregulação, diferentemente de outras espécies que podem apresentar um aumento substancial nos teores de prolina sob condições de estresse.

Na rúcula, os teores de prolina livre foram consideravelmente superiores aos observados na alface, mostrando uma forte correlação com o aumento do estresse salino em todas as partes da planta. Em resposta ao aumento da salinidade, os maiores acúmulos foram registrados nos sistemas floating e NFT, corroborando os resultados encontrados por Mahawar et al. (2018). No entanto, na aeroponia, as concentrações de prolina foram mais baixas tanto nas folhas quanto nas raízes sob condições de salinidade, sugerindo uma dinâmica distinta nesse sistema no que se refere ao acúmulo de prolina e, conseqüentemente, à resposta ao estresse salino.

Durante estresses abióticos, tais como a salinidade, os teores de aminoácidos livres nas plantas aumentam significativamente. A razão para esta acumulação pode ser diferente para aminoácidos individuais. A síntese dos aminoácidos pode ser estimulada, enquanto a degradação é inibida. Além disso, eles podem ser acumulados em decorrência de um aumento da proteólise ou de uma redução na síntese de proteínas e metabólitos secundários (Batista-Silva et al., 2019).

Os resultados do nosso trabalho mostram que, em folhas de alface, a principal variação na acumulação dos aminoácidos livres está mais relacionada às diferenças entre os sistemas de cultivo hidropônico. Independentemente dos efeitos dos sais, os maiores acúmulos foram observados no NFT, seguido pela aeroponia e, por último, no floating. Para a rúcula, foram registrados maiores teores desses solutos na aeroponia, NFT e floating.

Ao considerar os efeitos da salinidade, as reduções observadas no acúmulo de aminoácidos livres nas folhas de alface sugerem uma possível associação com o aumento da degradação ou com o incremento da síntese proteica. Isso se reflete na correlação positiva dos teores de proteínas solúveis com o aumento da salinidade, conforme destacado anteriormente. Por outro lado, o aumento dos teores de

aminoácidos livres nas folhas de rúcula no sistema floating sugere uma relação com o incremento da proteólise ou a diminuição da síntese de proteínas, refletida na relação negativa do acúmulo de proteínas solúveis com a salinidade. No sistema NFT, a redução desses solutos está associada à inibição da biossíntese, visto que os teores de proteínas solúveis não foram afetados pela salinidade. Na aeroponia, por sua vez, a biossíntese desses solutos parece não ter sido perturbada pelo estresse salino, pois os teores de proteínas solúveis neste sistema mostraram uma associação positiva com a salinidade.

### 3.5 CONCLUSÕES

1. Plantas de alface e de rúcula cultivadas no sistema NFT apresentaram respostas moderadas ao estresse salino, com acúmulo significativo de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  e solutos orgânicos, como carboidratos, proteínas e aminoácidos livres, sugerindo uma adaptação intermediária das plantas comparado aos outros sistemas hidropônicos.

2. No sistema floating, a alface e a rúcula registraram os maiores acúmulos de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  em folhas, indicando uma maior vulnerabilidade das plantas ao estresse salino. Além disso, os teores de  $\text{K}^+$  diminuíram, diferentemente dos outros sistemas, e os aumentos nos solutos orgânicos foram menos expressivos em relação aos íons tóxicos.

3. A aeroponia promoveu maior eficiência na retenção de íons tóxicos como  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  na alface e na rúcula, com uma regulação mais eficaz dos níveis de  $\text{K}^+$  e variações menos intensas nos solutos orgânicos, mantendo uma estabilidade relativa, o que sugere uma maior tolerância nas duas culturas comparada aos sistemas NFT e floating.

4. Os sistemas hidropônicos estudados apresentam vantagens e desafios específicos, sendo que a aeroponia se destaca com maior potencial para conferir às plantas melhor tolerância ao estresse salino.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKADER, M.; VORONINA, L.; SHELEPOVA, O.; PUCHKOV, M.; LOKTIONOVA, E.; ZHANBYRSHINA, N.; YELNAZARKYZY, R.; TLEPPAYEVA, A.; KSENOFONTOV, A. Monitoring Role of Exogenous Amino Acids on the Proteinogenic and Ionic Responses of Lettuce Plants under Salinity Stress Conditions. **Horticulturae**, v. 9, n. 6, p. 626, 2023.

AFSAR, S.; BIBI, G.; AHMAD, R.; BILAL, M.; NAQVI, T. A.; BAIG, A.; SHAH, M. M.; HUANG, B.; HUSSAIN, J. Evaluation of salt tolerance in *Eruca sativa* accessions based on morpho-physiological traits. **PeerJ**, v. 8, p. e9749, 2020.

AHMED, S.; AHMED, S.; ROY, S. K.; WOO, S. H.; SONAWANE, K. D.; SHOHAEEL, A. M. Effect of salinity on the morphological, physiological and biochemical properties of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in Bangladesh. **Open Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 361-373, 2019.

ALMEIDA, D. M.; OLIVEIRA, M. M.; SAIBO, N. J. M. Regulation of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants. **Genetics and molecular biology**, v. 40, p. 326-345, 2017.

ALVES, D. M. R.; DE MELLO PRADO, R.; BARRETO, R. F. Silicon and sodium attenuate potassium deficiency in *Eruca sativa* Mill. **Food Chemistry**, v. 432, p. 137225, 2024.

ALVES, L. S.; SILVA, M. G.; GHEYI, H. R.; SILVA PAZ, V. P.; SOARES, T. M.; RAFAEL, M. R. S. Uso de águas salobras no cultivo da chicória em condições hidropônicas. **Irriga**, v. 24, n. 4, p. 758-769, 2019.

ASHRAF, M.; O'LEARY, J. W. Responses of some newly developed salt-tolerant genotypes of spring wheat to salt stress: 1. Yield components and ion distribution. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 176, n. 2, p. 91-101, 1996.

AZEVEDO NETO, A. D.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Changes in soluble amino-N, soluble proteins and free amino acids in leaves and roots of salt-stressed maize genotypes. **Journal of Plant Interactions**, London, v. 4, n. 2, p. 137-144, 2009.

AZEVEDO NETO, A. D.; PRISCO, J. T.; ENÉAS-FILHO, J.; LACERDA, C. F.; SILVA, J. V.; COSTA, P. H. A.; GOMES-FILHO, E. Effects of salt stress on plant growth, stomatal response and solute accumulation of different maize genotypes. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos de Goytacazes, v. 16, n. 1, p. 31-38, 2004.

AZEVEDO NETO, A. D.; TABOSA, J. N. Estresse salino em plântulas de milho: parte II distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 165-171, 2000.

BABAOUSMAIL, M.; NILI, M. S.; BRIK, R.; SAADOUNI, M.; YOUSIF, S. K.; OMER, R. M.; OSMAN, N. A.; ALSAHLI, A. A.; ASHOUR, H.; EL-TAHER, A. M. Improving the tolerance to salinity stress in lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) using exogenous application of salicylic acid, yeast, and zeolite. **Life**, v. 12, n. 10, p. 1538, 2022.

BARTHA, C.; FODORPATAKI, L.; MARTINEZ-BALLESTA, M. D. C.; POPESCU, O.; CARVAJAL, M. Sodium accumulation contributes to salt stress tolerance in lettuce cultivars. **JOURNAL OF APPLIED BOTANY AND FOOD QUALITY-ANGEWANDTE BOTANIK**, v. 88, p. 42-48, 2015.

BATISTA-SILVA, W.; HEINEMANN, B.; RUGEN, N.; NUNES-NESE, A.; ARAÚJO, W. L.; BRAUN, H. P.; HILDEBRANDT, T. M. (2019). The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. **Plant, Cell & Environment**, 42(5), 1630-1644. doi: 10.1111/pce.13518.

BRES, W.; KLEIBER, T.; MARKIEWICZ, B.; MIELOSZYK, E.; MIELOCH, M. The effect of NaCl stress on the response of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 244, 2022.

CHOUDHARY, S.; WANI, K. I.; NAEEM, M.; KHAN, M. M. A.; AFTAB, T. Cellular responses, osmotic adjustments, and role of osmolytes in providing salt stress resilience in higher plants: Polyamines and nitric oxide crosstalk. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 2, p. 539-553, 2023.

COVA, A. M. W.; FREITAS, F. T. O.; VIANA, P. C.; RAFAEL, M. R. S.; AZEVEDO NETO, A. D.; SOARES, T. M. Content of inorganic solutes in lettuce grown with brackish water in different hydroponic systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 150-155, 2017.

FAKHRFESHANI, M.; SHAHRIARI-AHMADI, F.; NIAZI, A.; MOSHTAGHI, N.; ZARE-MEHRJERDI, M. The effect of salinity stress on Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> concentration, Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> ratio, electrolyte leakage and HKT expression profile in roots of *Aeluropus litoralis*. **Journal of Plant Molecular Breeding**, v. 3, n. 2, p. 1-10, 2015.

FU, H.; YANG, Y. How plants tolerate salt stress. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 45, n. 7, p. 5914-5934, 2023.

GREENWAY, H.; MUNNS, R. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. **Annual review of plant physiology**, v. 31, n. 1, p. 149-190, 1980.

GUO, Q.; MENG, L.; MAO, P. C.; TIAN, X, X. Salt tolerance in two tall wheatgrass species is associated with selective capacity for K<sup>+</sup> over Na<sup>+</sup>. **Acta physiologiae plantarum**, v. 37, p. 1-9, 2015.

HASANUZZAMAN, M.; FUJITA, M. Plant responses and tolerance to salt stress: Physiological and molecular interventions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, p. 4810, 2022.

ISAYENKOV, S. V.; MAATHUIS, F. J. M. Plant salinity stress: many unanswered questions remain. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 435515, 2019.

JASSE, M. E. C.; OLIVEIRA, S. D.; RESENDE, F. V.; VIDAL, M. C. Produção de cultivares de alface dos tipos lisa, crespa e americana em sistema agroecológico. **Brasília: Embrapa Hortaliças**, 2006.

KHARE, T.; SRIVASTAVA, A. K.; SUPRASANNA, P.; KUMAR, V. Individual and additive stress impacts of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> on proline metabolism and nitrosative responses in rice. **Plant physiology and biochemistry**, v. 152, p. 44-52, 2020.

MAHAWAR, L.; KHATOR, K.; SHEKHAWAT, G. S. Role of Proline in mitigating NaCl induced oxidative stress in *Eruca sativa* Miller: an important oil yielding crop of Indian Thar Desert. **Vegetos**, v. 31, n. special, p. 55-63, 2018.

MANSOUR, M. M. F.; ALI, E. F. Evaluation of proline functions in saline conditions. **Phytochemistry**, v. 140, p. 52-68, 2017.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annu. Rev. Plant Biol.**, v. 59, p. 651-681, 2008.

NIAZIAN, M.; SADAT-NOORI, S. A.; TOHIDFAR, M.; MORTAZAVIAN, S. M. M.; SABBATINI, P. (2021). Betaine aldehyde dehydrogenase (BADH) vs. Flavodoxin (Fld): two important genes for enhancing plants stress tolerance and productivity. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 650215, 2021.

Ó, L. M. G.; COVA, A. M. W.; AZEVEDO NETO, A. D.; SILVA, N. D.; SILVA, P. C. C.; SANTOS, A. L.; GHEYI, H. R.; SILVA, L. L. Osmotic adjustment, production, and post-harvest quality of mini watermelon genotypes differing in salt tolerance. **Scientia Horticulturae**, v. 306, p. 111463, 2022.

PESSARAKLI, M. **Handbook of plant and crop stress**. New York : CRC Press, 1999.

PETRETTO, G. L.; URGEGHE, P. P.; MASSA, D.; MELITO, S. Effect of salinity (NaCl) on plant growth, nutrient content, and glucosinolate hydrolysis products trends in rocket genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 141, p. 30-39, 2019.

PORTO, R. A.; SILVA, E. M. B.; SOUZA, D. S. M.; CORDOVA, N. R. M.; POLYZEL, A. C.; SILVA, T. J. A. Adubação potássica em plantas de rúcula: produção e eficiência no uso da água. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v. 7, n. 1, p. 28-35, 2013.

SANOUBAR, R.; CELLINI, A.; VERONI, A. M.; SPINELLI, F.; MASSIA, A.; ANTISARI, L. V.; ORSINI, F.; GIANQUINTO, G. Salinity thresholds and genotypic variability of cabbage (*Brassica oleracea* L.) grown under saline stress. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 1, p. 319-330, 2016.

SANTOS, A. L.; COVA, A. M. W.; SILVA, M. G.; SANTOS, A. A. A.; PEREIRA, J. S.; GHEYI, H. R. Crescimento e conteúdo de solutos orgânicos em couve-flor cultivada com água salobra em sistema hidropônico. **Water Resources and Irrigation Management-WRIM**, v. 10, n. 1-3, p. 38-50, 2021.

SARDAR, H.; KHALID, Z.; AHSAN, M.; NAZ, S.; NAWAZ, A.; AHMAD, R.; RAZZAQ, K.; WABAIDUR, S. M.; JACQUARD, C.; ŠIRIC, I.; KUMAR, P.; FAYSSAL, S. A. Enhancement of salinity stress tolerance in lettuce (*Lactuca sativa* L.) via foliar application of nitric oxide. **Plants**, v. 12, n. 5, p. 1115, 2023.

SHAHID, M. A.; SARKHOSH, A.; KHAN, N.; BALAL, R. M.; ALI, S.; ROSSI, L.; GÓMEZ, C.; MATTSON, N.; NASIM, W.; GARCIA-SANCHEZ, F. Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 938, 2020.

SHARIATINIA, F.; AZARI, A.; RAHIMI, A.; PANAHI, B.; MADAHHOSSEINI, S. Germination, growth, and yield of rocket populations show strong ecotypic variation under NaCl stress. **Scientia Horticulturae**, v. 278, p. 109841, 2021.

SILVA, A. O.; SILVA, D. J.; SOARES, T. M.; SANTOS, A. N.; ROLIM, M. M. Produção de rúcula em sistema hidropônico NFT utilizando água salina do Semiárido-PE e rejeito de dessalinizador. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 147-155, 2011.

SILVA, M. G.; SOARES, T. M., GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, I. S.; FREITAS, F. T. O.; RAFAEL, M. R. S. Consumo hídrico do coentro em hidroponia NFT com o uso de águas salobras para reposição do consumo evapotranspirado. In: **Proceedings of the 4th Inovagri International Meeting**. Fortaleza, Brazil. 2017.

SINGH, P.; CHOUDHARY, K. K.; CHAUDHARY, N.; GUPTA, S.; SAHU, M.; TEJASWINI, B.; SARKAR, S. Salt stress resilience in plants mediated through osmolyte accumulation and its crosstalk mechanism with phytohormones. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1006617, 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. A.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TITTAL, M.; MIR, R. A.; JATAV, K. S.; AGARWAL, R. M. Supplementation of potassium alleviates water stress-induced changes in *Sorghum bicolor* L. **Physiologia plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1149-1161, 2021.

YAVUZ, D.; SEYMEN, M.; KAL, Ü.; ATAKUL, Z.; TANRIVERDI, Ö. B.; TÜRKMEN, Ö.; YAVUZ, N. Agronomic and physio-biochemical responses of lettuce to exogenous sodium nitroprusside (SNP) applied under different irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 277, p. 108127, 2023.

YILDIZ, M.; POYRAZ, İ.; ÇAVDAR, A.; ÖZGEN, Y.; BEYAZ, R. Plant responses to salt stress. In **Plant Breeding—Current and Future Views**; Abdurakhmonov, I.Y., Ed.; IntechOpen: London, UK, 2020. doi: 10.5772/intechopen.93920.

ZHANG, G.; WANG, Y.; WU, K.; ZHANG, Q.; FENG, Y.; MIAO, Y.; YAN, Z. Exogenous application of chitosan alleviate salinity stress in lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Horticulturae**, v. 7, n. 10, p. 342, 2021.

ZHANG, W.; DU, T. Fresh/brackish watering at growth period provided a trade-off between lettuce growth and resistance to NaCl-induced damage. **Scientia Horticulturae**, v. 304, p. 111283, 2022.

ZHAO, C.; ZHANG, H.; SONG, C.; ZHU, J. K.; SHABALA, S. Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. **The innovation**, v. 1, n. 1, 202



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo indicam que a salinidade impacta de maneira diferenciada as plantas quando cultivadas em diferentes sistemas de cultivo. Na alface e na rúcula, por exemplo, houve reduções significativas na massa fresca da parte aérea nos sistemas floating e NFT, enquanto na aeroponia as duas culturas não apresentaram alterações significativas de produção. Além disso, as plantas cultivadas na aeroponia se destacaram não apenas pela produção por unidade de área, mas também pela maior tolerância ao sal, mostrando-se superior as demais cultivadas nos sistemas floating e NFT.

Estudos adicionais são necessários para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos fisiológicos e moleculares relacionados às respostas da alface e da rúcula ao estresse salino, visando otimizar as práticas de cultivo e maximizar a produtividade e a qualidade das plantas cultivadas nesses sistemas. Além disso, será necessária uma atenção especial para o fator nutrição das plantas cultivadas na aeroponia, com o intuito de corrigir deficiências da estrutura de cultivo e otimizar ainda mais a produção das culturas produzidas nesse sistema com águas salobras.

Finalmente, este trabalho enfatiza a necessidade de continuar as pesquisas em aeroponia, especialmente para avaliar a tolerância de diferentes cultivos e cultivares ao estresse salino em comparação com os sistemas hidropônicos convencionais. Tal linha de investigação tem o potencial de abrir novas perspectivas para a agricultura em regiões semiáridas, promovendo sistemas de cultivo mais resilientes e produtivos, que estejam alinhados às necessidades e limitações locais.