ISSN 2316-6886
WRIM

Water Resources and Irrigation Management
v.14, n.1-3, p.88-108, 2025
DOI: 10.19149/wrim.v14i1-3.5255

Cruz das Almas, BA, Brazil – https://www3.ufrb.edu.br/seer/index.php/wrim/index

ORIGINAL PAPER

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

Leandro Ferreira da Costa[1]*, André Dias de Azevedo Neto[2], Tales Miler Soares[3], Igor Leonardo Nascimento Santos[4], Mairton Gomes da Silva[1,3], Paulo Vitor Santa Rosa Silva[5], Wellk Jovenal Oliveira Ferreira[3] & Alex Santana do Rosario[3]

[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil
[2]Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil
[3]Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil
[4]Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil
[5]Universidade Salvador, Feira de Santana, Bahia, Brasil

Resumo: Em sistemas hidropônicos, as plantas apresentam maior tolerância ao estresse salino em comparação a outros métodos de cultivo. No entanto, essa resposta pode ser otimizada mediante estratégias de manejo das águas salobras e da escolha do sistema hidropônico mais adequado às culturas a serem produzidas. Nesse sentido, este estudo avaliou a produtividade da água e a tolerância ao estresse salino da alface e da rúcula em sistemas hidropônicos (floating, NFT – nutrient film technique e aeroponia vertical) utilizando soluções nutritivas com diferentes níveis de salinidade (2,0 – controle; 3,7; 5,4 e 7,1 dS m^{-1}). No experimento com a alface, as plantas foram submetidas ao estresse salino por um período de 25 dias, enquanto no cultivo de rúcula, a exposição ao estresse foi mantida por 20 dias. Avaliou-se o número de folhas, massas de matéria fresca (MFPA) e seca da parte aérea (MSPA), produtividades por área da MFPA e relativa da MSPA, consumo hídrico e produtividade da água. Em geral, não houve efeito significativo do estresse salino sob cultivo na aeroponia para ambas as culturas. No entanto, variáveis como MFPA, MSPA e produtividade diminuíram significativamente com o incremento da salinidade sob cultivos nos sistemas NFT e floating para ambas as culturas. Os limites salinos para a produção sem perdas significativas foram ligeiramente melhores no floating (3,06 e 3,70 dS m^{-1} para a alface e a rúcula, respectivamente) do que no NFT (2,52 e 1,44 dS m^{-1} para a alface e a rúcula, respectivamente), enquanto na aeroponia não foi possível estabelecer um limiar, uma vez que a produtividade não diminuiu sob os níveis salinos testados. Esses resultados ressaltam a potencialidade da aeroponia para otimizar as respostas da alface e da rúcula em cultivos usando águas com altos níveis de salinidade para o preparo das soluções nutritivas.

Palavras-chave: Aeroponia vertical, cultivo sem solo, estresse salino, produtividade da água.

* Autor correspondente: E-mail: leandroifbaianobonfim@gmail.com
Editores: Petterson Costa Conceição Silva & Selma Cristina da Silva
Recebido em: 14 de dezembro de 2024
Aceito em: 04 de maio de 2025

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

Abstract: In hydroponic systems, plants exhibit greater salt stress tolerance compared to other cultivation methods. However, this response can be further optimized through brackish waters management strategies and the selection of the most suitable hydroponic system. In this sense, the aim of this study was to evaluate the water productivity and salt stress tolerance of lettuce and rocket in hydroponic systems (floating, NFT – nutrient film technique, and vertical aeroponics) using nutrient solutions with different levels of salinity (2.0 – control, 3.7, 5.4, and 7.1 dS m^{-1}). In the lettuce experiment, plants were subjected to salt stress for a period of 25 days, whereas in the rocket cultivation, stress exposure was maintained for 20 days. Number of leaves, shoot fresh matter (SFM), shoot dry matter (SDM), productivity per area of SFM, relative productivity of SDM, water consumption, and water productivity were evaluated. Overall, salt stress showed no significant effect on crop performance in aeroponic cultivation for either species. Under increasing salinity conditions, both crops exhibited significant reductions in SFM, SDM, and productivity in NFT and floating systems. The salinity thresholds for production without significant losses were slightly better in floating system (3.06 and 3.70 dS m^{-1} for lettuce and rocket, respectively) than in NFT hydroponics (2.52 and 1.44 dS m^{-1} for lettuce and rocket, respectively). In aeroponics it was not possible to establish a threshold, since productivity did not decrease at the salinity levels tested. These results highlight the potential of aeroponics to optimize lettuce and rocket growth when cultivated using nutrient solutions prepared with high-salinity water.
Keywords: Vertical aeroponics, soilless cultivation, saline stress, water productivity.

Introdução

Diante das mudanças climáticas e/ou de fenômenos climáticos periódicos, a disponibilidade de água de 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 predominam fontes de águas subterrâneas ricas em sais (Cova et al., 2017; Minhas et al., 2020; Mendes Filho et al., 2025). 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; 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; Guedes et al., 2024).

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). 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 estão em declínio. Diante dessas circunstâncias, torna-se crucial adotar tecnologias e técnicas de cultivos que permitam não apenas a viabilidade do uso de águas ricas em sais na produção de alimentos, mas que também garantam 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 empregadas técnicas de cultivo sem solo como a hidroponia (Costa et al.,

2020; Silva et al., 2020ab; Bione et al., 2021; Oliveira et al., 2023; Silva et al., 2023a; Couto et al., 2024; Silva et al., 2024a). O cultivo em sistemas hidropônicos tem crescido globalmente nos últimos anos devido ao uso mais eficiente da água e fertilizantes, além do controle mais preciso sobre pragas e fatores climáticos (Kumari et al., 2018). Adicionalmente, a hidroponia mitiga os riscos do uso de águas salobras 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 sistema NFT (nutrient film technique) é o mais comum para a produção de hortaliças folhosas em todo o mundo, especialmente no Brasil. Enquanto isso, o sistema floating e a aeroponia são mais utilizados em países líderes em tecnologia hidropônica, como Holanda, Austrália, Inglaterra, Canadá, EUA e Israel. Atualmente, a aeroponia vertical vem ganhando destaque com rápida expansão de uso, principalmente no cenário dos cultivos urbanos, por sua maior produtividade (Sharma et al., 2018).

Nesse contexto, é oportuno o desenvolvimento 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. Nesta perspectiva, estudos têm evidenciado ampla diferença de produção e produtividade da água para hortaliças sob cultivo em diferentes sistemas hidropônicos (Rosa-Rodríguez et al., 2020; Fayezizadeh 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. O estudo de Cova et al. (2017) aponta claramente para essa possibilidade, evidenciando diferenças na tolerância da alface ao estresse salino quando cultivada nos sistemas NFT e DFT.

O objetivo desse estudo foi avaliar a produção e a tolerância à salinidade da alface e da rúcula cultivadas em diferentes sistemas hidropônicos com águas salobras.

Material e Métodos

Condições experimentais e tratamentos

Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, o primeiro com a alface (no período de 02 a 27 de julho de 2022) e o segundo com a rúcula (22 de agosto a 11 de setembro de 2022), na área experimental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas (12° 40’ 1” Latitude Sul, 39° 06’ 2” Longitude Oeste, com altitude média de 220 m), Bahia, Brasil. Segundo a classificação de Köppen, o clima local é tropical quente e úmido (Af) (Alvares et al., 2013).

Os dados de umidade relativa e temperatura do ar foram monitorados continuamente no interior da casa de vegetação utilizando um sensor DHT22, instalado a 1,5 m de altura em relação ao solo. Para a aquisição dos dados, o sensor foi acoplado a um sistema de baixo custo baseado em uma placa Arduino Mega, com registro de médias a intervalos de 10 min. Durante o período experimental para a cultura da alface, as temperaturas mínima, máxima e média foram de 19,16; 26,96 e 22,00°C e para umidade relativa do ar de 54,45; 93,21 e 80,16%, respectivamente. Para a rúcula, os valores registrados foram de 18,55; 26,60 e 21,64°C para temperatura e 53,40; 92,32 e 77,68% para umidade relativa, respectivamente. Os valores médios de evapotranspiração de referência (ETo) foram de 2,4 e 2,6 mm dia^{-1} para a alface e a rúcula, respectivamente. A ETo foi estimada pela equação de Penman-Montheith FAO 56.

As culturas estudadas foram a alface (*Lactuca sativa* L.) do grupo varietal crespa

cv. 'Jade' (Sakata Seed Sudamerica Ltda., Bragança Paulista, SP, Brasil) e a rúcula (*Eruca sativa*) do grupo varietal folha larga cv. 'Folha Larga' (Feltrin® Sementes, Farroupilha, RS, Brasil). O semeio foi realizado em espuma fenólica (0,02 × 0,02 × 0,03 m). No semeio da alface, foi colocada uma semente por célula de espuma fenólica; enquanto para rúcula, foram dispostas quatro sementes por célula. Após a germinação, as mudas de alface e de rúcula foram levadas para berçário e receberam a formulação de Furlani et al. (1999) para hortaliças folhosas na concentração de 50%, onde permaneceram até o desenvolvimento de quatro folhas definitivas (20 dias após a semeadura).

As plantas de alface e de rúcula foram submetidas a quatro níveis de condutividade elétrica da água (CEa de 0,3; 1,7; 3,4 e 5,1 dS m^{-1}) empregados no preparo das soluções nutritivas. A reposição da água consumida pelas plantas em todos os tratamentos foi feita com água de abastecimento local (CEa de 0,3 dS m^{-1}). Os três níveis salinos foram obtidos mediante a adição de NaCl na água de abastecimento, com as quantidades calculadas com base na metodologia proposta por Richards (1954). Após o preparo das águas salobras, foram adicionados os sais fertilizantes, utilizando-se a formulação completa recomendada por Furlani et al. (1999). Após o preparo das soluções nutritivas, os valores de condutividade elétrica foram de 2,01; 3,73; 5,44 e 7,11 dS m^{-1} para a alface e de 2,01; 3,71; 5,41 e 7,06 dS m^{-1} para a rúcula. Durante o período experimental, os níveis de condutividade elétrica das soluções nutritivas (CEsol) foram monitorados regularmente. Todos os tratamentos receberam reposição nutricional a cada três dias mediante a adição de solução nutritiva padrão concentrada, visando manter os valores pré-estabelecidos de CEsol para cada tratamento. O controle foi realizado com base em um critério de tolerância máxima de 25% de variação em relação à CEsol inicial de cada tratamento.

Para cada cultura, foram conduzidos simultaneamente três experimentos em diferentes sistemas hidropônicos: floating, NFT (técnica do filme laminar de nutrientes "nutrient film technique") e aeroponia vertical. Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições para os sistemas NFT e aeroponia, totalizando 20 parcelas experimentais dispostas longitudinalmente na casa de vegetação. Para o sistema floating, foram utilizadas seis repetições, totalizando 24 parcelas experimentais.

Com base no monitoramento periódico dos níveis de CEsol, foram determinadas as médias ponderadas no tempo de 1,8; 3,7; 5,4 e 6,9 dS m^{-1}. Estes valores de CEsol foram estabelecidos como tratamentos para as análises estatísticas subsequentes.

Estrutura experimental do sistema floating

O sistema foi instalado em bancadas metálicas do tipo tela, onde foram dispostas 24 bacias plásticas (capacidade de 10 L cada), espaçadas uniformemente a 0,25 m entre si. Cada unidade experimental (bacia) continha três plantas, sustentadas por placas de isopor com 0,02 m de espessura e 0,42 m de diâmetro. As placas de isopor apresentavam orifícios de 0,05 m de diâmetro, distribuídos em arranjo triangular com espaçamento de 0,40 m entre centros, garantindo posicionamento equidistante para o cultivo das plantas (Figura 1A).

O regime de oxigenação consistiu em ciclos de 15 min, realizados a cada hora no período diurno (06:00-18:00 h) e a cada duas horas no noturno. O sistema de aeração, acionado por temporizador analógico, utilizou um compressor de ar conectado a uma tubulação de PVC (0,02 m de diâmetro) com microtubos direcionados individualmente a cada unidade experimental.

Estrutura experimental do sistema NFT

O sistema NFT foi implementado com canais hidropônicos construídos em tubos de PVC para irrigação (0,075 m de diâmetro) (Figura 1B), mantendo uma

densidade de cultivo de 20 plantas por cada canal. As bancadas de cultivo foram instaladas com declividade de 6% (0,87 m na extremidade superior e 0,51 m na inferior) para melhorar o escoamento e oxigenação da solução. Cada bancada continha dois canais hidropônicos, com espaçamentos de 0,25 m (entre plantas) e 0,50 m (entre canais).

Cada parcela foi representada por um canal hidropônico independente, sendo composta também por um reservatório plástico (capacidade de 50 L) e uma eletrobomba (32 W) para bombear a solução nutritiva até o canal de cultivo. A solução nutritiva foi aplicada em ciclos intermitentes de 5 min (ligado/desligado) no período diurno (06:00-18:00 h) e a cada duas horas no noturno. O mesmo protocolo de aplicação foi adotado para o cultivo no sistema aeropônico vertical.

Estrutura experimental do sistema em aeroponia vertical

Cada unidade aeropônica consistiu em uma torre vertical de 1,5 m de altura, confeccionada com tubo de PVC branco (0,15 m de diâmetro) (Figura 1C), projetada para otimizar a distribuição da solução nutritiva e o aproveitamento luminoso no sistema de cultivo vertical. Cada unidade experimental foi composta ainda por um reservatório plástico (capacidade 18 L) para armazenamento da solução nutritiva e uma eletrobomba (32 W) responsável pelo bombeamento da solução até o topo da torre aeropônica. O sistema de irrigação partia da eletrobomba, que conduzia a solução nutritiva por meio de uma mangueira até um prato plástico do tipo jardinagem (posicionado no topo da torre). Este componente, dotado de orifícios estratégicos, promovia a distribuição uniforme da solução tipo chuveiro no interior da torre aeropônica, assegurando a adequada irrigação do sistema radicular das plantas.

Cada torre aeropônica foi instalada de forma suspensa, com sua porção inferior imersa 0,3 m na solução nutritiva do reservatório. A estabilização das unidades aeropônicas foi garantida por uma estrutura metálica de sustentação (arame galvanizado), posicionada na altura do pé direito da casa de vegetação, proporcionando estabilidade estrutural e prevenção contra tombamentos.

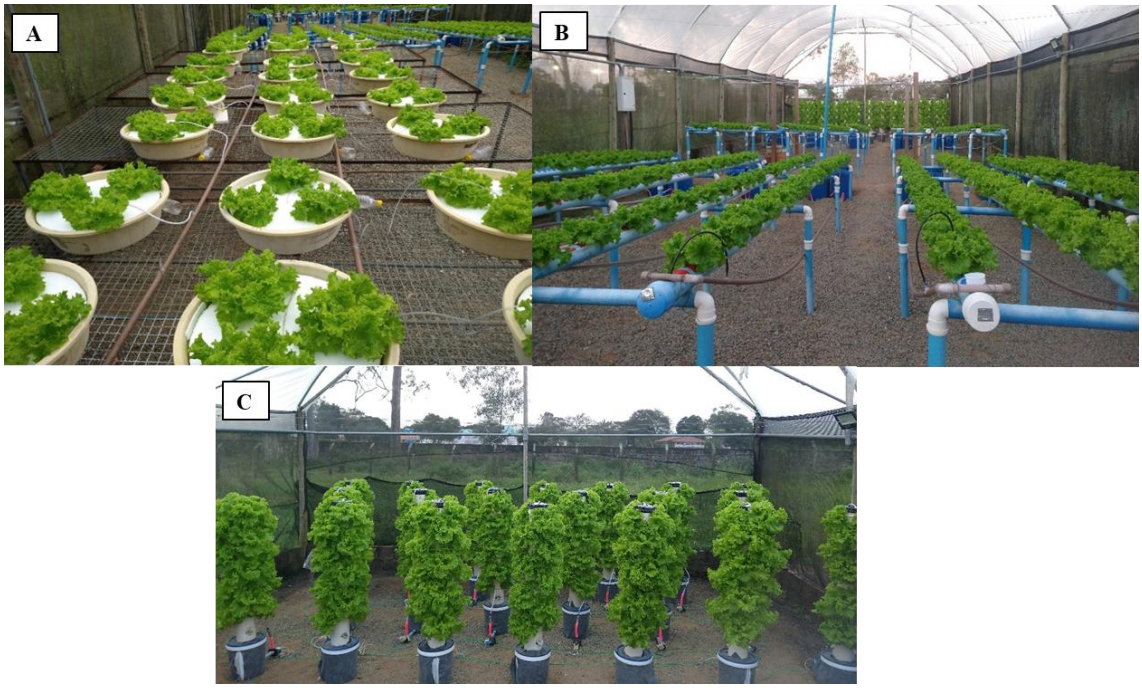

Figura 1: Aspectos gerais da alface nos sistemas do tipo floating (A), NFT (B) e aeroponia vertical (C).

Variáveis avaliadas

Crescimento e produção

Os ciclos produtivos foram finalizados mediante colheita realizada aos 25 dias após o transplantio (DAT) para a cultura da alface e aos 20 DAT para a rúcula, mantendo-se o mesmo período de cultivo em todos os sistemas avaliados (floating, NFT e aeroponia vertical). O número de plantas coletadas variou de acordo com o sistema: no floating, coletaram-se três plantas por parcela; no NFT, quatro plantas centrais por parcela; e na aeroponia vertical, uma planta por face no terço médio da torre, totalizando quatro plantas por unidade experimental. Na colheita, determinaram-se o número de folhas (NF), considerando apenas folhas com comprimento superior a 3 cm; e a massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA, g planta^{-1}), mensurada com auxílio de uma balança precisão (0,01 g de resolução).

Imediatamente após a colheita, o material fresco foi colocado em sacos de papel e seco em estufa de ventilação forçada de ar modelo Q314M (Quimis®, Diadema, SP, Brasil) a 65ºC até atingir peso constante, para determinação da massa de matéria seca da parte aérea (MSPA, g planta^{-1}). O teor de massa de matéria seca da parte aérea (TMS, %) foi determinado conforme a Equação 1.

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

Consumo hídrico e produtividade da água

Em cada sistema de cultivo, o volume diário evapotranspirado foi quantificado por parcela utilizando proveta graduada de 1000 mL, permitindo o cálculo do consumo hídrico acumulado (CH, L planta^{-1} para a alface e L maço^{-1} para a rúcula) por meio da divisão do volume total durante o ciclo pelo número de plantas contidas na respectiva parcela. A produtividade da água (PRA, g L^{-1}) foi determinada pela razão entre a MFPA e o CH acumulado (PRA = MFPA/CH).

Produtividade e produção relativa

A produtividade das culturas por unidade de área foi calculada com base na área média ocupada por planta, utilizando os espaçamentos previamente definidos. Definida como produtividade total (PRT) baseada na MFPA, em kg m^{-2}.

A produção relativa baseada na MSPA (PR_{MSPA}, %) em cada nível de CEsol foi calculada com base nas médias de produção dos tratamentos, utilizando-se a Equação 2. A salinidade limiar para a alface e a rúcula foi determinada a partir das produtividades relativas da MFPA (RY, kg kg^{-1}), utilizando-se o modelo de Maas e Hoffman (1977) conforme Equação 3. Os limiares de salinidade foram determinados por meio de otimização numérica, minimizando os erros por meio da ferramenta Solver do Excel 2016.

$$\text{PR}_{\text{MSPA}}\ (\%) = 1 - \left[\left(\frac{\text{MSPA}_{\text{controle}} - \text{MSPA}_{\text{salino}}}{\text{MSPA}_{\text{controle}}}\right) \times 100\right] \qquad (2)$$

$$\text{RY} = \begin{cases} 1;\ 0 \le \text{CEsol} \le \text{CEsol}_{\text{limiar}} \\ 1 - \text{b} \times (\text{CEsol} - \text{CEsol}_{\text{limiar}});\ \text{CEsol}_{\text{limiar}} < \text{CEsol} < \text{CEsol}_0 \\ 0;\ \text{CEsol} \ge \text{CEsol}_0 \end{cases} \qquad (3)$$

Em que: $MSPA_{salino}$ – massa de matéria seca da parte aérea de um dado tratamento salino, g planta^{-1}; $MSPA_{controle}$ – massa de matéria seca da parte aérea do tratamento sem estresse salino, g planta^{-1}; CEsol – condutividade elétrica da solução nutritiva, dS m^{-1}; b – coeficiente de perda de produtividade por acréscimo unitário da condutividade elétrica além do limiar, %; $CEsol_{limiar}$ – valor da condutividade elétrica limiar da solução nutritiva, a partir do qual se inicia a redução da produtividade relativa potencial, dS m^{-1}; $CEsol_0$ – menor valor da condutividade elétrica da solução nutritiva para o qual a produção é nula, dS m^{-1}.

Análise estatística

Os três sistemas de cultivo foram analisados de forma independente, assim como as culturas. Os dados foram submetidos ao teste F ($p \leq 0,05$) da análise de variância. Os níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva foram analisados por regressão, selecionando-se os modelos com base na significância estatística dos parâmetros, coeficiente de determinação e comportamento agronômico. Todas as análises foram realizadas no programa SISVAR 5.6 (Ferreira, 2019).

Resultados

Crescimento e produção

Nas Figuras 2A e 2B encontram-se os resultados referentes ao número de folhas (NF) da alface e da rúcula, respectivamente. A análise estatística revelou ausência de efeito significativo ($p > 0,05$) dos níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva (CEsol) sobre o NF da alface, independentemente do sistema de cultivo utilizado. No entanto, verificam-se diferentes padrões de produção de folhas entre os sistemas. O sistema floating apresentou o maior NF (média de 30,42 folhas planta^{-1}), seguido pelo NFT (22,57 folhas planta^{-1}) e aeroponia vertical (16,80 folhas planta^{-1}). Para a rúcula, apenas o sistema floating mostrou resposta significativa do NF à salinidade, com decréscimo linear de 29,3% quando a CEsol aumentou de 1,95 para 7,02 dS m^{-1}. Para o sistema NFT e a aeroponia vertical, em média, o NF foi de 32 folhas maço^{-1}.

A massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA) reduziu significativamente com o incremento da salinidade da solução nutritiva sob cultivo nos sistemas floating e NFT, tanto para a alface (Figura 2C) quanto para a rúcula (Figura 2D). Registraram-se reduções lineares de 6,04 e 7,94% para a alface e de 7,09 e 6,44% para a rúcula por aumento unitário da CEsol sob cultivo nos sistemas floating e NFT, respectivamente. As médias estimadas de MFPA para o tratamento controle foram de 429,02 e 350,54 g planta^{-1} para a alface e 27,65 e 62,37 g maço^{-1} para a rúcula nos sistemas floating e NFT, respectivamente. No cultivo aeropônico vertical, os valores médios de MFPA foram de 129,74 g planta^{-1} para a alface e 69,63 g maço^{-1} para a rúcula, sem influência significativa dos diferentes níveis de CEsol testados.

Um comportamento semelhante ao observado para MFPA foi verificado na massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), tanto para a alface (Figura 2E) quanto para a rúcula (Figura 2F) em resposta ao aumento da salinidade nos sistemas floating e NFT. Indicando que o estresse salino afetou não apenas o conteúdo de água dos tecidos, mas também a produção de biomassa vegetal. Registraram-se reduções lineares de 4,82 e 5,80% para a alface e de 7,28 e 4,65% para a rúcula por aumento unitário da CEsol sob cultivo nos sistemas floating e NFT, respectivamente. Independentemente do nível de CEsol, as médias de MSPA foram de 3,22 g planta^{-1} para a alface e 4,83 g maço^{-1} a rúcula sob cultivo na aeroponia vertical.

Não se verificou efeito significativo dos níveis de CEsol sobre o teor de massa de matéria seca da parte aérea (TMS) da alface, independentemente do sistema de cultivo empregado (Figura 2G). As médias registradas foram de 3,11; 3,33 e 2,43% sob cultivo nos sistemas floating, NFT e aeroponia, respectivamente. Para a rúcula (Figura 2H), observou-se um aumento linear significativo no TMS de 4,56% por incremento unitário (dS m^{-1}) da CEsol no sistema NFT. Para os sistemas floating e aeropônico, as médias do TMS foram de 10,81 e 6,96%, respectivamente.

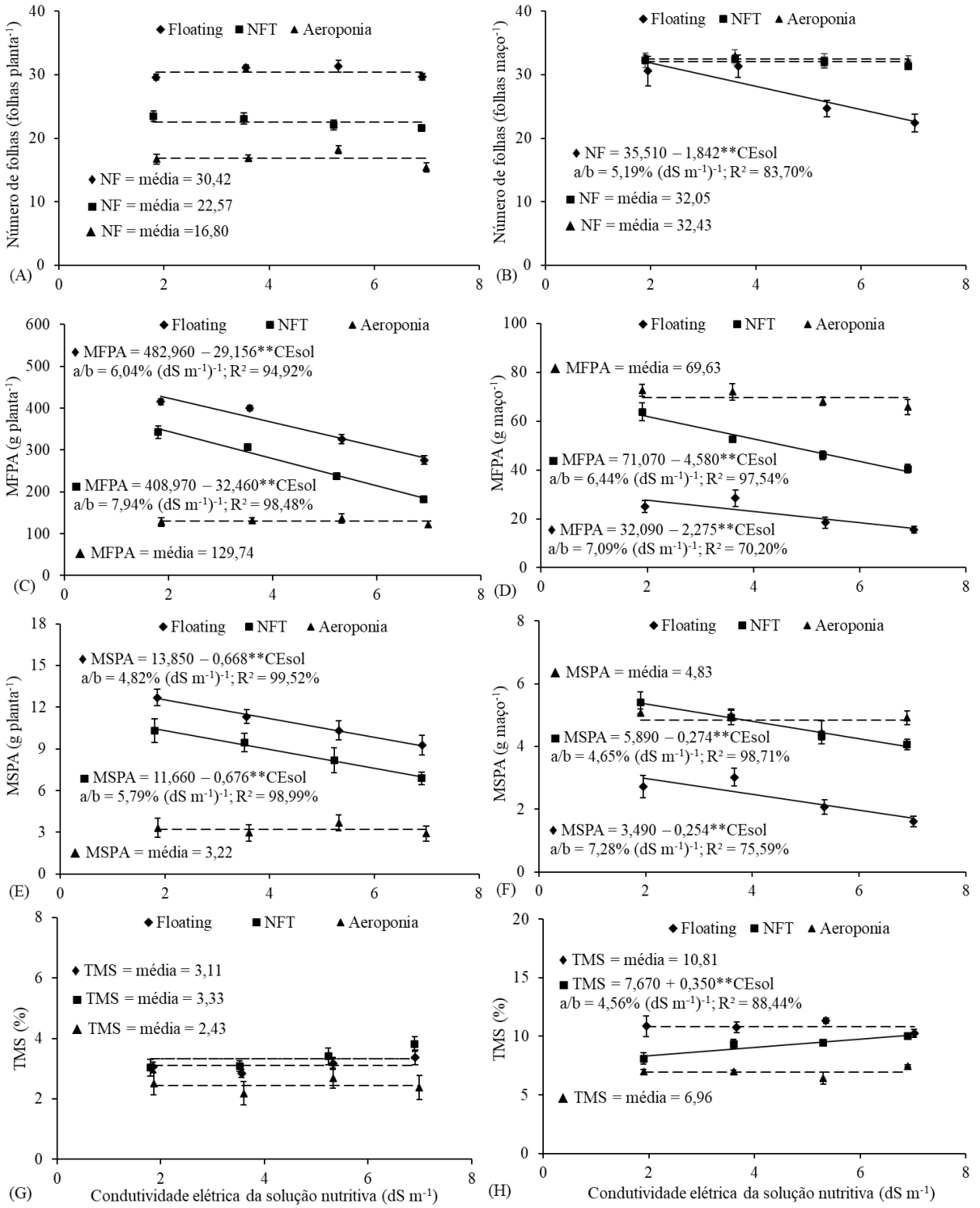

Figura 2: Número de folhas (NF) (A e B), massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA) (C e D), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) (E e F) e teor de massa de matéria seca da parte aérea (TMS) (G e H), respectivamente, da alface e da rúcula sob cultivo nos sistemas floating, NFT e aeroponia vertical em função dos níveis de condutividade elétrica das soluções nutritivas (CEsol).

Consumo hídrico e produtividade da água

Tanto para a alface (Figura 3A) quanto para a rúcula (Figura 3B), o consumo hídrico (CH) acumulado reduziu significativamente com a salinidade da solução nutritiva para os três sistemas de cultivo. Para a alface, verificou-se que cada

aumento unitário (dS m^{-1}) na CEsol resultou em reduções lineares de 6,68; 6,90 e 4,05% para os sistemas floating, NFT e aeroponia vertical, respectivamente; enquanto, para a rúcula, as reduções foram de 7,87; 4,47 e 5,30%, respectivamente.

A produtividade da água (PRA) da alface foi significativamente influenciada pela salinidade nos sistemas floating e NFT, apresentando um ajuste adequado a modelos matemáticos quadráticos (Figura 3C). Os máximos valores de PRA foram estimados em 108,64 e 108,80 g L^{-1} sob os níveis de CEsol de 4,58 e 3,67 dS m^{-1} para os sistemas floating e NFT, respectivamente. Para o cultivo na aeroponia vertical, a média da PRA foi de 84,82 g L^{-1}.

Para a rúcula (Figura 3D), observou-se um aumento linear significativo na PRA de 6,08% por incremento unitário (dS m^{-1}) da CEsol no sistema floating. Para os sistemas NFT e aeropônico, as médias da PRA foram de 42,09 e 21,26 g L^{-1}, respectivamente.

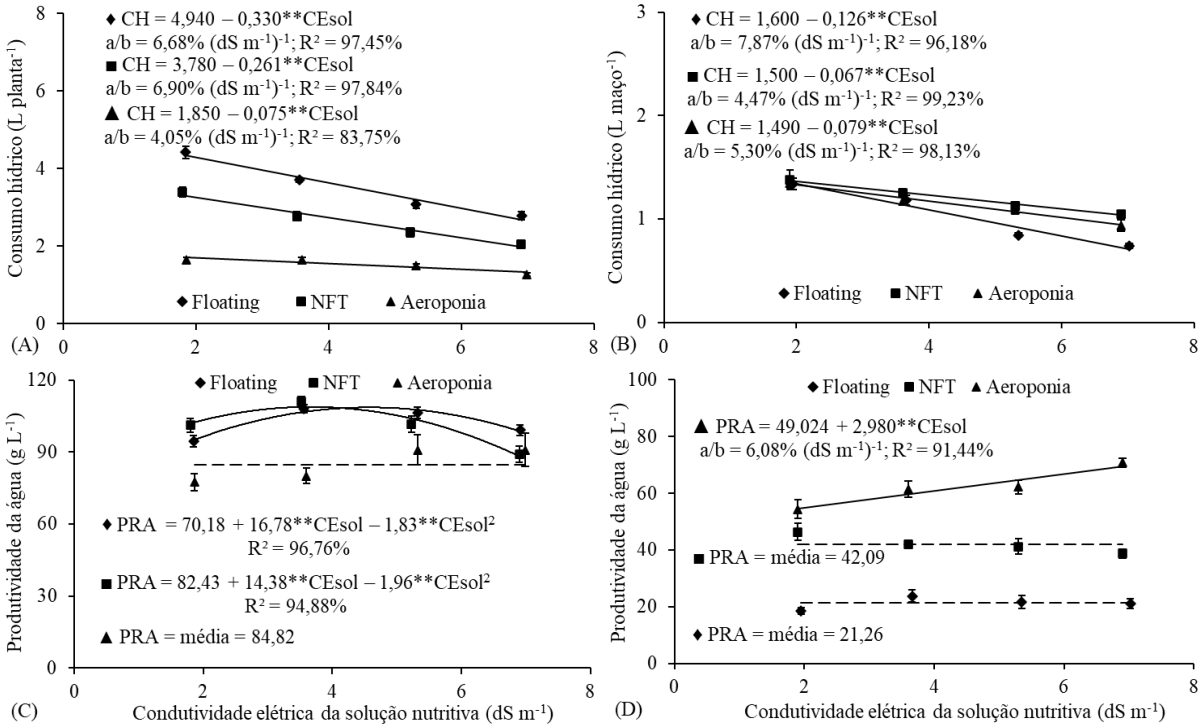

Figura 3: Consumo hídrico acumulado (CH) (A e B) e produtividade da água (PRA) (C e D), respectivamente, da alface e da rúcula sob cultivo nos sistemas floating, NFT e aeroponia vertical em função dos níveis de condutividade elétrica das soluções nutritivas (CEsol).

Produtividade, produção relativa e tolerância à salinidade

A produção por unidade de área (PRT) seguiu comportamento similar ao registrado para MFPA, tanto para a alface (Figura 4A) quanto para a rúcula (Figura 4B). Para a alface, verificou-se que cada aumento unitário (dS m^{-1}) na CEsol resultou em reduções lineares de 6,12 e 7,95% para os sistemas floating e NFT, respectivamente; enquanto, para a rúcula, as reduções foram de 6,92 e 6,31%, respectivamente. Na aeroponia vertical, as médias de PRT foram de 4,10 e 2,20 kg m^{-2} para a alface e a rúcula, respectivamente.

Os resultados da produção relativa baseada na massa de matéria seca da parte aérea (PR_{MSPA}) são apresentados nas Figuras 4C (alface) e 4D (rúcula). Na alface cultivada sob a maior salinidade testada (CEsol de 6,9 dS m^{-1}), registraram-se os valores de PR_{MSPA} de 73, 70 e 96% nos sistemas floating, NFT e aeroponia, respectivamente. Sob cultivo na salinidade de 5,3 dS m^{-1} na aeroponia vertical, resultou em uma PR_{MSPA} (média de 131%) superior

a observada no tratamento controle. Para a rúcula, os valores da PR_{MSPA} sob maior salinidade foram de 59, 77 e 97% nos sistemas floating, NFT e aeroponia, respectivamente.

A Figura 5 apresenta os limiares críticos de salinidade (CEsol) para cultivo de alface e da rúcula nos sistemas avaliados. Para a alface, os valores críticos foram de 3,06 dS m^{-1} no sistema floating (Figura 5A) e 2,52 dS m^{-1} no sistema NFT (Figura 5B), sendo observadas reduções lineares de 8,9 e 11,0%, respectivamente, para cada incremento unitário (dS m^{-1}) acima desses limiares. Conforme demonstrado anteriormente, na aeroponia vertical não apresentou ajuste significativo ao modelo de tolerância à salinidade, uma vez que a massa fresca da parte aérea da alface manteve-se estatisticamente estável em todos os níveis de CEsol testados. Para a rúcula, os limiares estimados foram de 3,70 dS m^{-1} no sistema floating (Figura 5C) e 1,44 dS m^{-1} no sistema NFT (Figura 5D), sendo observadas reduções lineares de 5,6 e 7,7%, respectivamente, para cada incremento unitário (dS m^{-1}) acima desses limiares. Assim como observado para a alface, não houve ajuste do modelo para a rúcula cultivada na aeroponia.

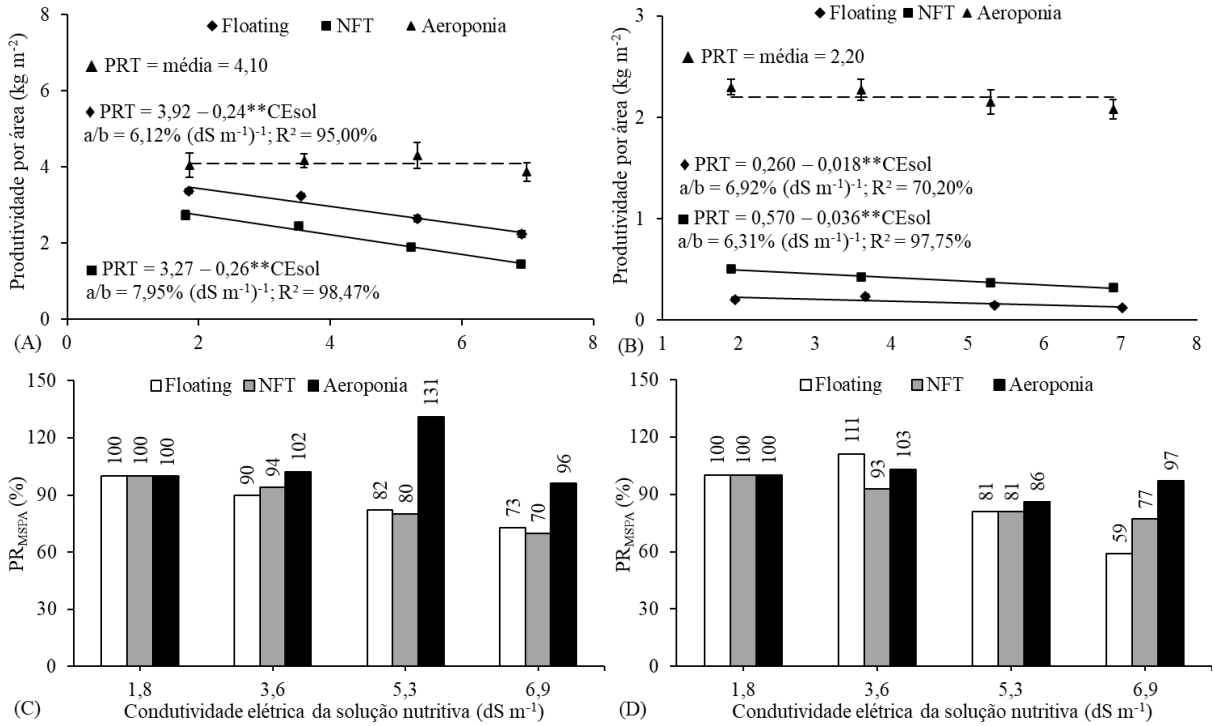

Figura 4: Produtividade por área (PRT) com base na massa de matéria fresca da parte aérea (A e B) e produção relativa com base na massa de matéria seca da parte aérea (PR_{MSPA}) (C e D), respectivamente, da alface e da rúcula sob cultivo nos sistemas floating, NFT e aeroponia vertical em função dos níveis de condutividade elétrica das soluções nutritivas (CEsol).

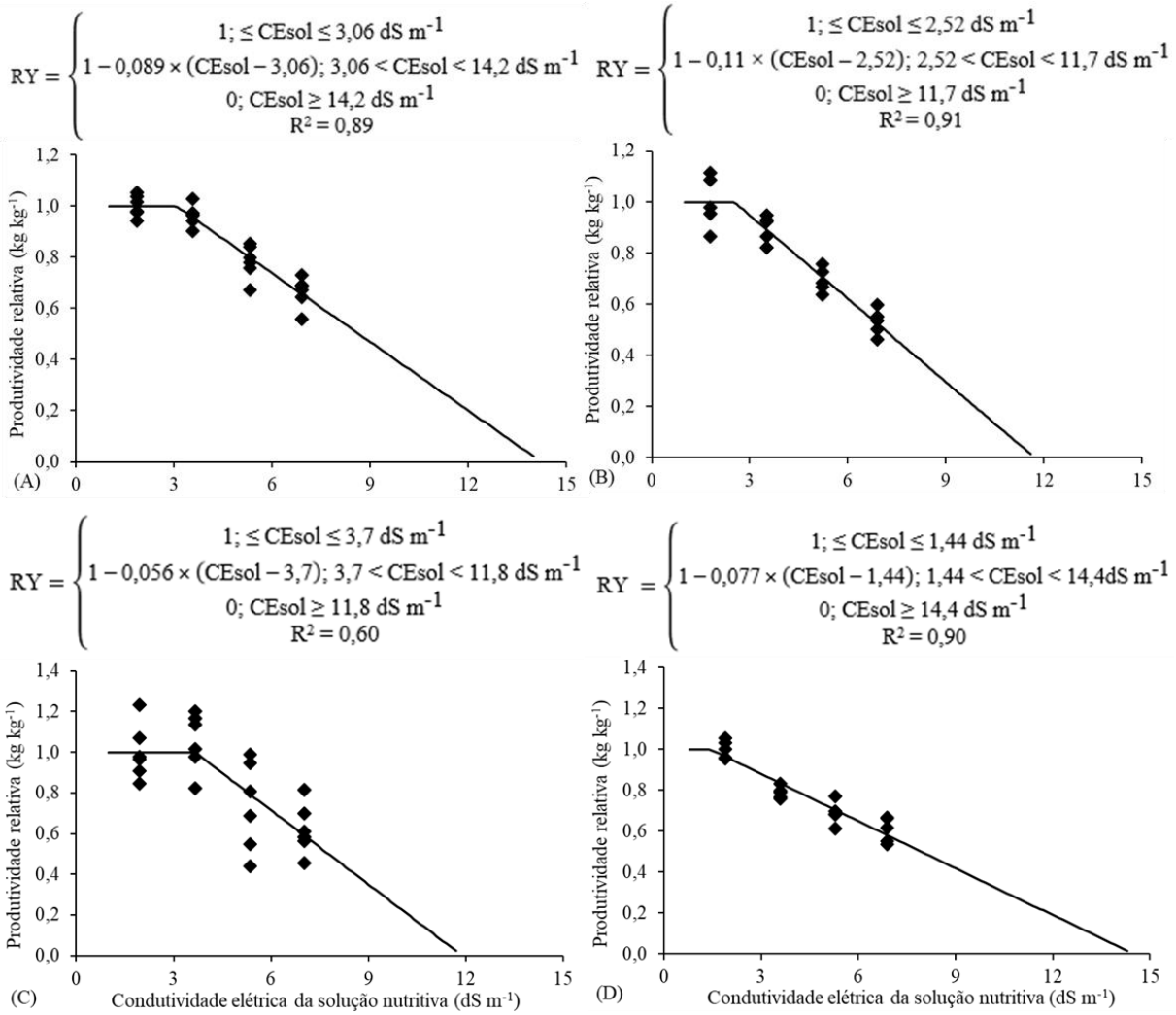

Figura 5: Produtividade relativa (RY) baseada na massa de matéria fresca da parte aérea da alface (A e B) e da rúcula (C e D), respectivamente, nos sistemas floating e NFT em função dos níveis de condutividade elétrica das soluções nutritivas (CEsol).

Discussão

Crescimento e produção

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 (Figura 2A) quanto para a rúcula (Figura 2B) nos sistemas hidropônicos testados no 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 e 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 (Campos Júnior et al., 2018a; 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.

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; Silva et al., 2020c; Silva et al., 2024b) e rúcula (Schiattone et al., 2017; Campos Júnior et al., 2018a; Silva et al., 2022). No presente estudo, a produção de MFPA tanto da alface (Figura 2C) quanto da rúcula (Figura 2D) 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 (Figura 2E) e da rúcula (Figura 2F) 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 os sistemas NFT e floating tiveram sua produção reduzida pelo aumento da salinidade. Além do mais, o sistema 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 (Schiattone et al., 2017; Campos Júnior et al., 2018a) e com outras brássicas, como brócolis (Giuffrida et al., 2013; Silva et al., 2023b), couve-chinesa (Lira et al., 2015) e couve-flor (Costa et al., 2020; Silva et al., 2023a). 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 proporcionou 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 (Figura 2G) e da rúcula (Figura 2H) 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 Breś 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., 2018a).

Consumo hídrico, produtividade e tolerância salina

O consumo hídrico (CH) das plantas de alface (Figura 3A) e da rúcula (Figura 3B) 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. (2018b) 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, manjericão, chicória, couve-flor e coentro (Lira et al., 2015; Lira et al., 2018; Santos et al., 2019; Costa et al., 2020; Silva et al., 2020a; Bezerra et al., 2022).

Para a produtividade da água (PRA) da alface (Figura 3C), 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 (Figura 3D), 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 no estudo de Soares et al. (2019) com alface.

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 PRA com o aumento da salinidade da solução nutritiva, registrando acréscimos de até 30%. Diferente do presente estudo, outros trabalhos sob condições hidropônicas relataram efeitos severos da salinidade sobre a PRA da rúcula. Campos Júnior et al. (2018b) relataram perdas de PRA de até 75% na faixa salina estudada; Silva et al. (2011) 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, consequentemente, uma maior PRT da alface (Figura 4A) e da rúcula (Figura 4B) 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. (2020c) 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, consequentemente, 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. (2020c), 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. (2020c), verifica-se que mesmo na maior salinidade os três sistemas hidropônicos tiveram produtividade superior, independentemente do ambiente de cultivo. É valido 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).

A produção relativa baseada na massa de matéria seca da parte aérea (PR_{MSPA}) é um indicador fundamental para avaliar a tolerância das plantas aos 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, consequentemente, da massa seca, como destacado por Sousa et al. (2023) e comprovado no presente estudo.

No geral, tanto a alface (Figura 4C) quanto a rúcula (Figura 4D) apresentaram menor PR_{MSPA} 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 PR_{MSPA}. 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. Aplicando

essa classificação ao presente estudo, observa-se que, sob o tratamento mais salino, a alface foi classificada como moderadamente tolerante nos sistemas floating e NFT e tolerante na aeroponia. Já a rúcula, foi considerada moderadamente suscetível no sistema floating, moderadamente tolerante no sistema NFT e tolerante na aeroponia.

Com base na produtividade relativa da MFPA, as plantas de alface (Figuras 5A e 5B) e rúcula (Figuras 5C e 5D) apresentaram diferentes limiares de salinidade nos três sistemas hidropônicos. Para a alface, no sistema floating, a salinidade limiar foi de 3,0 dS m^{-1}, com produção relativa acima de 65% para o maior nível de CEsol. No cultivo NFT, esse limiar foi de 2,5 dS m^{-1}, com produção relativa mínima acima de 51% no maior nível salino. Além disso, a perda de produtividade por incremento unitário da CEsol 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 salina foi de 3,7 dS m^{-1}, com perda de produtividade por incremento unitário da CEsol de 6% além deste limite. No NFT, o limiar foi de 1,4 dS m^{-1}, com queda de produtividade de 8% por aumento unitário da CEsol 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 CEsol.

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 salinas.

Sob cultivo em sistema hidropônico NFT, Dias et al. (2011) observaram limiares de salinidade de 0,95 e 1,3 dS m^{-1} 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 CEsol 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 CEsol além do limiar de 2,57 dS m^{-1}. Do mesmo modo, Silva et al. (2011) também verificaram redução da produtividade da rúcula de 9,58% por aumento unitário da CEsol além da salinidade limiar de 2,1 dS m^{-1}.

Segundo Ayers e Westcot (1985) e Schrader (2017), a alface é considerada uma cultura sensível à salinidade, com limites amplamente aceitos para uma produtividade de 50% de 3,4 dS m^{-1} para a água de irrigação e de 5,1 dS m^{-1} 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.

Conclusões

A produção por unidade área da alface e da rúcula no sistema em aeroponia vertical destacou-se, apresentando maiores produções por área em comparação aos sistemas floating e NFT. Os resultados mostraram que, na aeroponia vertical, 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 vertical não apenas para otimizar a produtividade geral, mas também para melhorar a tolerância à salinidade em alface e rúcula, especialmente quando se utiliza águas salobras.

Além disso, a aeroponia vertical 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

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. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

Ayers, R. S.; Westcot, D. W. Water quality for agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1985. 188p. (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, 4005, 2022. https://doi.org/10.3390/w14244005

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, 106607, 2021. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106607

Breś, 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, 244, 2022. https://doi.org/10.3390/agronomy12020244

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, n. 4, p. 1008-1016, 2018a. https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n424rc

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, n. 6, p. 885-892, 2018b. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n6p885-892/2018

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, n. 4, p. 1060-1070, 2020. https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n421rc

Couto, J. S. C.; Soares, T. M.; Vellame, L. M.; Santos, I. L. N.; Souza, E. A. Simulation of hydroponic production using rainwater and brackish water. Water Resources and Irrigation

Management, v. 13, n. 1-3, p. 97-109, 2024. https://doi.org/10.19149/wrim.v13i1-3.3467

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, n. 3, p. 150-155, 2017. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p150-155

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. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.004

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, n. 10, p. 991-995, 2011. https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001000001

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, 107171, 2021. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107171

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. https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450

Furlani, P. R.; Silveira, L. C. P.; Bolonhezi, D.; Faquin, V. Cultivo hidropônico de plantas. Campinas: IAC, 1999. 52p. (Boletim Técnico, 180).

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, e453099, 2023. https://doi.org/10.47820/recima21.v4i5.3099

Giuffrida, F.; Gangi, D.; Giurato, R.; Leonard, C. Effects of NaCl salinity on yield, quality and mineral composition of broccoli and cauliflower. Acta Horticulturae, v. 1005. p. 531-538. 2013. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1005.65

Guedes, M. A.; Gheyi, H. R.; Lima, G. S.; Soares, L. A. A.; Sá, V. K. N. O.; Silva, L. A.; Silva, F. J. L.; Torres, R. A. F. Aplicação foliar de H_2O_2 no cultivo hidropônico de tomate cereja sob soluções nutritivas salinas. Water Resources and Irrigation Management, v. 13, n. 1-3, p. 150-164, 2024. https://doi.org/10.19149/wrim.v13i1-3.4944

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, v. 625, p. 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: Singh, M. C.; Sharma, K. K. (ed.). Protected cultivation: Structural design, crop management modeling, and automation. 1st ed. Florida: Apple Academic Press, 2024. p. 135-159. https://doi.org//10.1201/9781003402596-6

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, 109616, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109616

Lira, R. M.; Silva, Ê. F. 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, n. 1, p. 13-19, 2018. https://doi.org/10.1590/S0102-053620180103

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. Ciência Agronômica, v. 46, n.

3, p. 497-505, 2015. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150031

Maas, E. V.; Hoffman, G. J. Crop salt tolerance—current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division, v. 103, n. 2, p. 115-134, 1977. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137

Mehta, D.; Vyas, S. Comparative bio-accumulation of osmoprotectants in saline stress tolerating plants: A review. Plant Stress, v. 9, 100177, 2023. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100177

Mendes Filho, H. T.; Matos, D. A.; Maia, I. C. S.; Souza, Í. B.; Carvalho, I. C.; Silva, I. P.; Silva, T. L.; Silva, M. G.; Silva, R. O. Uso de águas de baixa qualidade para irrigação no Nordeste brasileiro: Uma revisão. Water Resources and Irrigation Management, v. 14, n. 1-3, p. 48-87, 2025. https://doi.org/10.19149/wrim.v14i1-3.5258

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, 105832, 2020. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832

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, 111463, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111463

Oliveira, T. F.; Santos Júnior, J. A.; Silva, M. G.; Gheyi, H. R.; Almeida, J. C.; Guiselini, C. Cultivation of chicory under nutrient solutions prepared in brackish waters and applied at different temperatures. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 27, n. 9, p. 719-728, 2023. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n9p719-728

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, n. 1, p. 110-117, 2012. https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000100016

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. Revista PesquisAgro, v. 3, n. 1, p. 36-51, 2020. https://doi.org/10.33912/pagro.v3i1.656

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, n. 9, p. 712-718, 2023. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n9p712-718

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. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.012

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. https://doi.org/10.15835/nbha44210611

Richards, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Washington: United States Salinity Laboratory Staff, 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, n. 1, p. 47-52, 2020. https://doi.org/10.1590/S0102-053620200107

Rosca, M.; Mihalache, G.; Stoleru, V. Tomato responses to salinity stress: From morphological traits to genetic changes. Frontiers in Plant Science, v. 14, 1118383, 2023. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118383

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. Ciência Agronômica, v. 42, n. 2, p. 319-326, 2011. https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000200009

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, n. 1, p. 45-53, 2019. https://doi.org/10.1590/0034-737X201966010007

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 Agronômica, v. 27, n. 1, p. 12-21, 2018. https://doi.org/10.32929/2446-8355.2018v27n1p12-21

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. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.009

Schrader, S. E. Salinity tolerance of lettuce cultivars in controlled environment. Tucson: University of Arizona, 2017. Master's Dissertation.

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. https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.5.13.1

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. https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5

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. https://doi.org/10.5039/agraria.v6i1a929

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, e8549109143, 2020c. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9143

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. https://doi.org/10.5039/agraria.v8i3a1689

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, 2020a. https://doi.org/10.13128/ahsc-8855

Silva, M. G.; Costa, L. F.; Soares, T. M.; Gheyi, H. R. Growth and yield of cauliflower with brackish waters under hydroponic conditions. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 27, n. 9, p. 663-672, 2023a. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n9p663-672

Silva, M. G.; Gheyi, H. R.; Silva, L. L.; Silva, P. C. C.; Correia, M. R. S.; Queiroz, L. A.; Santos, T. S.; Jesus, M. J. S. Plant density to compensate for coriander production losses caused by the isolated and/or combined effects of salt and root-zone temperature stresses. Water Resources and Irrigation Management, v. 13, n. 1-3, p. 32-59, 2024a. https://doi.org/10.19149/wrim.v13i1-3.3582

Silva, M. G.; Gheyi, H. R.; Silva, L. L.; Souza, T. T.; Silva, P. C. C.; Queiroz, L. A.; Santos, T. S.; Soares, T. M. Evaluation of salt and root-zone temperature stresses in leafy vegetables using hydroponics as a clean production cultivation technique in northeastern Brazil. Horticulture, Environment, and Biotechnology, v. 65, n. 1, p. 95-118, 2024b. https://doi.org/10.1007/s13580-023-00547-6

Silva, M. G.; Soares, T. M.; Gheyi, H. R.; Oliveira, M. G. B.; Santos, C. C. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different temperatures of the nutrient solution. Engenharia Agrícola, v. 40, n. 6, p. 674-683, 2020b. http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n6p674-683/2020

Silva, M. G.; Soares, T. M.; Gheyi, H. R.; Santos, C. C.; Oliveira, M. G. B. Hydroponic cultivation of coriander intercropped with rocket subjected to saline and thermal stresses in the root-zone. Revista Ceres, v. 69, n. 2, p. 148-157, 2022. https://doi.org/10.1590/0034-737X202269020004

Silva, P. V. S. R.; Soares, T. M.; Bomfim, L. R.; Silva, M. G.; Costa, L. F. Crescimento, produção e tolerância do brócolis em hidroponia com o uso de águas salobras. Irriga, v. 28, n. 4, p. 700-719, 2023b. https://doi.org/10.15809/irriga.2023v28n4p700-719

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. Ciência Agronômica, v. 50, n. 2, p. 216-222, 2019. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190025

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: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F.; Gomes Filho, E. (ed.). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. p. 259-271.

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, n. 7, p. 636-642, 2015. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p636-642

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. https://doi.org/10.31413/nativa.v11i1.13597

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. https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i2.947

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, 1340, 2021. https://doi.org/10.3390/agronomy11071340