



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

ALEXANDRE EMANUEL ANDRADE DE LUCENA

**TROCAS GASOSAS EM COENTRO HIDROPÔNICO CULTIVADO COM
ÁGUA SALOBRA: PERSPECTIVAS NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

RECIFE-PE

2025

ALEXANDRE EMANUEL ANDRADE DE LUCENA

**TROCAS GASOSAS EM COENTRO HIDROPÔNICO CULTIVADO COM
ÁGUA SALOBRA: PERSPECTIVAS NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador (a): Ênio Farias de França e Silva

RECIFE-PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

L935t Lucena, Alexandre Emanuel Andrade de.
Trocas gasosas em coentro hidropônico cultivado
com água salobra: perspectivas no semiárido
pernambucano / Alexandre Emanuel Andrade de
Lucena. - Recife, 2025.
50 f.; il.

Orientador(a): Ênio Farias de França e Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental,
Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e anexo(s).

1. *Coriandrum sativum* . 2. Estomato. 3.
Hidroponia . 4. Cation 5. Vazão. I. Silva, Ênio Farias
de França e, orient. II. Título

CDD 628

ALEXANDRE EMANUEL ANDRADE DE LUCENA

**TROCAS GASOSAS EM COENTRO HIDROPÔNICO CULTIVADO COM
ÁGUA SALOBRA: PERSPECTIVAS NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovado em: 16/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Breno Leonan de Carvalho Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

RESUMO

A hidroponia destaca-se como alternativa para o uso racional de águas salobras no Semiárido, mitigando riscos de degradação do solo. Todavia, o estresse salino impõe limitações fisiológicas severas às culturas, como a redução da absorção de nutrientes e do metabolismo oxidativo. Nesse contexto, há uma carência de informações sobre como o manejo dinâmico da solução nutritiva pode atenuar tais efeitos. Assim, o estudo de diferentes vazões justifica-se por sua capacidade de otimizar a oxigenação e a disponibilidade iônica no sistema radicular, fatores críticos para a resiliência das plantas sob condições de salinidade. O presente estudo avaliou o efeito da salinidade e das vazões da solução nutritiva sobre o desempenho fisiológico do coentro (*Coriandrum sativum* L.) em sistema NFT (Técnica do Filme Nutriente). O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) em delineamento fatorial 4 x 4, com quatro níveis de condutividade elétrica: $1,7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; $3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; $4,5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; $6,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) e quatro vazões ($1,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; $2,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; $3,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; $4,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), estados em três composições iônicas distintas: sódica (predominância de Na^+), cálcica (predominância de Ca^{2+}) e mista (equilíbrio entre múltiplos íons como Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), visando simular o perfil real das águas subterrâneas da região semiárida do Estado de Pernambuco. As variáveis analisadas foram as trocas gasosas – Taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), Condutância estomática (g_s), Transpiração (E) e Concentração interna de CO_2 (C_i) – medidas com IRGA aos 30 dias após a semeadura revelaram que o coentro tolera salinidade de até $3,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Acima desse limite, a salinidade reduziu a g_s e a A . Notavelmente, vazões intermediárias ($1,0 - 2,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) otimizaram a assimilação de CO_2 , e a solução mista causou os maiores prejuízos fisiológicos, evidenciados pela maior redução na condutância estomática (g_s). Tais resultados reforçam a importância de se considerar a natureza catiônica da água, e não apenas a condutividade elétrica, no manejo da cultura. Portanto o manejo eficiente da composição iônica e da dinâmica de circulação da solução é fundamental para a viabilidade do cultivo hidropônico do coentro com águas salobras no semiárido.

Palavras-chave: *Coriandrum sativum* L, condutância estomática, sistema NFT, natureza catiônica, manejo da vazão.

ABSTRACT

Hydroponics stands out as an alternative for the rational use of brackish water in the Semi-arid region, mitigating the risks of soil degradation. However, saline stress imposes severe physiological limitations on crops, such as reduced nutrient absorption and oxidative metabolism. In this context, there is a lack of information on how the dynamic management of the nutrient solution can attenuate these effects. Thus, the study of different flow rates is justified by its ability to optimize oxygenation and ionic availability in the root system, critical factors for plant resilience under saline conditions. This study evaluated the effect of salinity and nutrient solution flow rates on the physiological performance of coriander (*Coriandrum sativum* L.) in an NFT (Nutrient Film Technique) system. The study of flow rates is justified by their influence on root oxygenation and nutrient supply, which are critical factors under salt stress. The experiment was conducted at UFRPE using a 4 x 4 factorial design, with four levels of electrical conductivity: ($1.7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; $3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; $4.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; $6.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) and four flow rates: ($1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; $3.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; $4.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), tested across three distinct ionic compositions: sodic, calcic, and mixed. The variables analyzed were gas exchange parameters, including Net Photosynthesis (A), Stomatal Conductance (g_s), Transpiration (E), and internal CO₂ Concentration (Ci), measured using an IRGA 30 days after sowing. Coriander tolerated salinity levels up to $3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ in the NFT system. Above this limit, salinity reduced g_s and A. Intermediate flow rates ($1.0 - 2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) optimized CO₂ assimilation, while the mixed ionic solution caused the greatest physiological damage, evidenced by the sharpest reduction in stomatal conductance (g_s). This reinforces the importance of considering the water's chemical composition rather than just its electrical conductivity. Therefore, the efficient management of ionic composition and solution circulation dynamics is fundamental for the viability of hydroponic coriander cultivation using brackish water in the semi-arid region.

Keywords: *Coriandrum sativum* L, Stomatal conductance, NFT system, Cationic nature, Flow rate management.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
2.1 OBJETIVO GERAL.....	10
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	10
3. REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1 ÁGUA SALOBRA NO SEMIÁRIDO.....	11
3.1.1 A NATUREZA CATIÔNICA.....	11
3.2 EFEITOS DA SALINIDADE NAS PLANTAS	12
3.2.1 ESTRESSE OSMÓTICO	13
3.2.2 ESTRESSE IÔNICO (TOXICIDADE ESPECÍFICA)	13
3.2.3 ESTRESSE OXIDATIVO SECUNDÁRIO.....	14
3.3 HIDROPONIA COMO ALTERNATIVA PARA O SEMIÁRIDO....	15
3.3.1 O SISTEMA NFT (NUTRIENT FILM TECHNIQUE)	15
3.4 CULTIVO DE COENTRO (<i>CORIANDRUM SATIVUM</i> L) EM HIDROPONIA.....	16
3.4.1 RESPOSTA DO COENTRO À SALINIDADE.....	16
3.4.2 NECESSIDADES DE PESQUISA E LACUNAS NO MANEJO.....	16
3.5 LACUNAS E LIMITAÇÕES NOS ESTUDOS EXISTENTES.....	17
3.5.1 CARÊNCIA DE SIMULAÇÃO DA COMPOSIÇÃO IÔNICA REAL.....	17
3.5.2 NECESSIDADE DE OTIMIZAÇÃO DO FATOR HIDRODINÂMICO (VAZÃO)...	18
3.5.3 FOCO NAS VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS.....	18

3.6 EFEITO DA VAZÃO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA NO SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÔNICO NFT.....	19
3.6.1 FUNÇÕES DA VAZÃO NO SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÔNICO NFT.....	19
3.6.2 VAZÃO E ESTRESSE SALINO.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1 LOCAL E CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO.....	21
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	21
4.3 CULTIVO E SISTEMA HIDROPÔNICO.....	22
4.4 AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS (TROCAS GASOSAS)	22
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PH DA SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	24
5.1.1 EXPERIMENTO I: TRATAMENTO COM ÁGUA SALOBRA (NaCl).....	24
5.1.2 EXPERIMENTO II: TRATAMENTO COM ÁGUA CÁLCICA ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$).....	26
5.1.3 EXPERIMENTO III: TRATAMENTO COM ÁGUA MISTA ($NaCl + CaCl_2 \cdot 2H_2O + MgCl_2$ na proporção 2 : 1 : 1).....	28
5.2 TROCAS GASOSAS DO COENTRO SOB CONDIÇÕES SALINAS.....	30
5.2.1 CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA (GS).....	32
5.2.1.1 EFEITO DA ÁGUA SÓDICA (EXPERIMENTO I)	32
5.2.1.2 EFEITO DAS ÁGUA CÁLCICA (EXPERIMENTOS II)	33
5.2.1.3 EFEITO DAS ÁGUA MISTA (EXPERIMENTOS III)	34
5.2.2 CONCENTRAÇÃO INTERNA DE CO_2 (CI).....	35

5.2.2.1 EFEITO DAS ÁGUAS SÓDICA (EXPERIMENTOS I)	35
5.2.2.2 EFEITO DAS ÁGUA CÁLCICA (EXPERIMENTOS II)	36
5.2.2.3 EFEITO DA ÁGUAS MISTA (EXPERIMENTOS III)	37
5.2.3 TAXA DE ASSIMILAÇÃO LÍQUIDA DE CO_2 (A).....	38
5.2.3.1 EFEITO DA ÁGUA SÓDICA (EXPERIMENTOS I)	38
5.2.3.2 EFEITO DA ÁGUA CÁLCICA (EXPERIMENTOS II)	39
5.2.3.3 EFEITO DA ÁGUA MISTA (EXPERIMENTOS III)	
.....	40
5.3 EFEITO DA TRANSPIRAÇÃO: A RELAÇÃO ENTRE FLUXO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA (VAZÃO).....	41
5.3.1 EFEITO DA ÁGUA SÓDICA (EXPERIMENTOS I)	42
5.3.2 EFEITO DA ÁGUA CÁLCICA (EXPERIMENTOS II)	43
5.3.3 EFEITO DA ÁGUA MISTA (EXPERIMENTOS III)	44
6. CONCLUSÃO.....	45
7. REFERÊNCIAS.....	46
8. ANEXO.....	48
8.1 ANEXO A – ESTRUTURA FÍSICA DO EXPERIMENTO	49

1. INTRODUÇÃO

O vasto semiárido do Nordeste brasileiro, uma terra de desafios e resiliência, enfrenta um paradoxo hídrico. Muitas das perfurações feitas na busca por água subterrânea encontram águas salobras, os poços, são abandonados ou subutilizados. A razão é dupla: a água subterrânea, extraída do aquífero cristalino que ocupa quase metade do território (aproximadamente 45%) (SANTOS et al., 2021), apresenta baixas vazões e uma salinidade elevada. Essa salinidade resulta de uma complexa composição química entre a água em movimento e as rochas. Os principais agentes nessa composição são os ânions carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), acompanhados pelos cátions cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+) e sódio (Na^+) (AMARAL et al., 2021). A composição química dessa água e quantidade de sais - é moldada por seu percurso subterrâneo, dependendo da origem do fluxo, do tipo de rocha que ela entra em contato e da facilidade com que essa rocha se dissolve ao longo do caminho (SILVA et al., 2022).

Diante dessa limitação hídrica, a busca por soluções que devolvam a dignidade produtiva a esses poços é urgente. Uma das mais promissoras é o cultivo de hortaliças por meio da hidroponia. Esta técnica, que dispensa o cultivo no solo, revela-se uma aliada poderosa, pois as plantas em sistemas hidropônicos demonstram uma capacidade de adaptação e tolerância a níveis de salinidade mais elevados do que aquelas cultivadas no campo. Isso não só possibilita o uso da água que antes seria descartada, mas também eleva significativamente a eficiência no uso de cada gota de água e de fertilizante (ALVES, M.S. et al., 2022).

Há um benefício humano e prático adicional: no clima severo do semiárido, onde a escassez de água é a regra, a hidroponia protege as plantas. O fato de a solução nutritiva não tocar as folhas reduz o risco de queimaduras ou injúrias foliares causadas pelos íons tóxicos presentes na água, um avanço importantíssimo para a saúde da colheita (ALVES, M.S. et al., 2022). Em suma, mesmo que as águas do domínio cristalino sejam frequentemente salobras, a hidroponia é uma porta aberta para a produção de alimentos com valor econômico, utilizando menos água, com maior aproveitamento dos insumos, menor agressão ao meio ambiente e mais segurança na produtividade final (SILVA, M.G. et al., 2020). O segredo para o sucesso é a escolha inteligente: focar em espécies mais resistentes ao sal e que tenham um ciclo de vida, ou melhor, ciclo fenológico mais curto, minimizando o tempo de exposição aos seus efeitos (ALVES, M.S. et al., 2022).

O caminho já está sendo trilhado. Culturas como coentro, alface e pimentão já foram estudadas com sucesso em sistemas hidropônicos usando água salobra, principalmente aquela com alta concentração de sódio (SILVA et al., 2020; AMARAL et al., 2021; DIAS, A. S. et al., 2021). No entanto, o conhecimento precisa ser aprofundado. É essencial ir além do sódio realizar estudos mais amplos, investigando como as plantas reagem a soluções nutritivas onde predominam outros íons, como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), ou combinações variadas. Estas informações mais completas são vitais para que a ciência e os produtores rurais possam tomar decisões mais assertivas no manejo da produção.

Outro ponto que merece atenção e que afeta diretamente o manejo diário no campo é a circulação da solução nutritiva no sistema NFT (Técnica do Filme Nutriente). A vazão, ou seja, a velocidade com que a solução de nutrientes passa pelas raízes, é um fator determinante para o desenvolvimento da cultura, para a temperatura ideal da solução e, conseqüentemente, para a saúde e fisiologia da planta. Já se sabe, por exemplo, que a alface-americana tem sua melhor performance com um fluxo de $1 L \cdot min^{-1}$ (DALASTRA et al., 2020). Pesquisas mais recente avançaram, mostrando que para a couve-flor, em cenários de salinidade variada (simulando, inclusive, as águas brutas do semiárido pernambucano), a vazão de $1,5 L \cdot min^{-1}$ se mostrou mais eficiente em relação a $2,5 L \cdot min^{-1}$ (SOARES et al., 2020).

Nesse cenário, evidencia-se a necessidade de expandir as pesquisas sobre o manejo de vazões em sistemas NFT, associando-as a diferentes perfis iônicos de águas salobras. Tais estudos são fundamentais para assegurar a viabilidade técnica e produtiva do coentro, cultura de relevância socioeconômica regional que ainda apresenta lacunas de informações sobre seu desempenho fisiológico sob estresse salino. Diante disso, este trabalho objetivou avaliar como diferentes vazões da solução nutritiva e composições de águas salobras otimizam as trocas gasosas da cultura, visando mitigar os efeitos deletérios da salinidade no cultivo hidropônico.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da salinidade da solução nutritiva e vazões de aplicação nas trocas gasosas do coentro (*Coriandrum sativum L.*) cultivado hidroponicamente pela técnica NFT, utilizando águas salobras representativas do semiárido nordestino.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar o limite de tolerância à salinidade do coentro (cultivar ‘verdão’) cultivado hidroponicamente pela técnica NFT mediante variáveis de trocas gasosas.
2. Avaliar a influência de diferentes vazões da solução nutritiva ($1,0 L \cdot \text{min}^{-1}$; $2 L \cdot \text{min}^{-1}$; $3 L \cdot \text{min}^{-1}$; $4 L \cdot \text{min}^{-1}$).
3. Investigar como diferentes composições iônicas da água salobra (sódica, cálcica e mista) modulam a resposta do coentro ao estresse salino, analisando as trocas gasosas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ÁGUA SALOBRA NO SEMIÁRIDO

A segurança hídrica é um dos maiores desafios para o desenvolvimento sustentável da região Nordeste, em particular o semiárido. A escassez de chuvas e a má distribuição temporal e espacial dos recursos hídricos superficiais impulsionam a busca por fontes alternativas, como a água subterrânea. Contudo, a qualidade dessa água impõe severas limitações à agricultura, sendo a salinidade o principal obstáculo (SANTOS et al., 2021). A geologia local é o fator determinante dessa alta salinidade. Cerca de 45% do território nordestino é composto por rochas do domínio cristalino, que possuem baixa porosidade e baixa capacidade de armazenamento. O fluxo de água nesse tipo de aquífero é predominantemente fissural, o que facilita o contato prolongado da água com as rochas e a dissolução de sais. Esse processo, somado à alta evapotranspiração característica da região, que concentra ainda mais os solutos, resulta em águas subterrâneas classificadas como salobras ou, em muitos casos, salinas (SILVA et al., 2022).

3.1.1 A natureza catiônica

A composição química da água salobra não é homogênea, variando em função da litologia, do tempo de residência da água no subsolo e da profundidade dos poços. Os principais sais solúveis identificados nessas águas são os ânions cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), além dos cátions sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Em muitos casos, observa-se a predominância do íon sódio (Na^+), cuja alta concentração é prejudicial à agricultura por exercer efeito osmótico, que dificulta a absorção hídrica, e por sua toxicidade específica, que desequilibra a absorção de nutrientes essenciais (LIMA G. S. et al., 2023). Por outro lado, a presença de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), embora contribua para a salinidade total — expressa pela condutividade elétrica (CE) —, pode modular a resposta da planta ao estresse salino. Esse comportamento justifica a necessidade de estudos que abordem a natureza catiônica da solução como um fator de manejo, em vez de considerar apenas a salinidade total (LIMA G. S. de., 2023). Como resultado desse cenário, inúmeros poços vitais para o abastecimento e irrigação acabam abandonados ou subutilizados devido à inviabilidade técnica de suas águas, exacerbando a crise

hídrica e social na região (LIMA G. S. de., 2023). Portanto, a busca por técnicas de manejo que viabilizem o uso dessas águas de qualidade inferior é crucial para a sustentabilidade da produção agrícola no Semiárido.

3.2 EFEITOS DA SALINIDADE NAS PLANTAS

A salinidade afeta o desenvolvimento vegetal por meio de dois componentes principais: o estresse osmótico e a toxicidade iônica, fatores que atuam diretamente na fisiologia das trocas gasosas e comprometem a eficiência metabólica da cultura. Inicialmente, o decréscimo do potencial osmótico da solução dificulta a absorção hídrica pelas raízes, levando a planta a promover o fechamento estomático como mecanismo de defesa contra a desidratação. Esse processo resulta na redução imediata da condutância estomática (g_s) e, conseqüentemente, na diminuição da taxa de transpiração (E), o que limita o fluxo de água e nutrientes para a parte aérea. Paralelamente, a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) sob estresse salino é prejudicada por fatores estomáticos e não-estomáticos, uma vez que o fechamento dos estômatos impõe uma barreira física à entrada de CO_2 no mesofilo foliar. Em estágios mais severos, o acúmulo de íons tóxicos, principalmente Na^+ e Cl^- , causa danos bioquímicos nos cloroplastos, como a degradação de pigmentos e a redução da atividade da enzima RuBisCO, inibindo a fixação de carbono. Nesse contexto, o comportamento da concentração interna de (C_i) torna-se um indicador crucial: quando a redução de A é acompanhada por um decréscimo em C_i , a limitação é predominantemente estomática; todavia, se a C_i elevar-se mesmo sob baixa g_s , evidencia-se que a maquinaria bioquímica está danificada por limitações não-estomáticas, indicando a incapacidade da planta em processar o CO_2 disponível nos espaços intercelulares.

3.2.1 Estresse osmótico

O efeito inicial e mais imediato da alta concentração de sais na solução do solo ou na solução nutritiva é o estresse osmótico, visto que o excesso de solutos reduz o potencial osmótico externo, tornando-o mais negativo do que o potencial hídrico interno da raiz. Esse fenômeno dificulta a absorção hídrica e, em casos extremos, pode reverter o fluxo, fazendo com que a planta perca água para o meio, sintoma este que é fisiologicamente idêntico ao estresse hídrico (DIAS, A. S. et al., 2021). Em resposta, a planta ativa mecanismos de defesa que incluem a redução da condutância estomática (g_s), na qual os estômatos fecham-se parcial ou totalmente para minimizar a perda de água por transpiração. Conseqüentemente, ocorre a redução da taxa de assimilação de CO_2 (A), uma vez que o fechamento estomático limita a entrada de dióxido de carbono (CO_2), substrato essencial para o processo de assimilação líquida de CO_2 , resultando na queda da taxa de assimilação de carbono e da produção de biomassa (TAIZ, L.; ZEIGER, E, 2024).

3.2.2 Estresse iônico (toxicidade específica)

Após a fase osmótica, ou paralelamente a ela, manifesta-se o estresse iônico, provocado pela absorção e acúmulo excessivo de íons específicos, principalmente sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), que são predominantes nas águas salobras. Esses íons desencadeiam toxicidade direta por meio de danos celulares, uma vez que, em altas concentrações no citoplasma, podem inibir enzimas essenciais e desestruturar membranas celulares. Além disso, ocorre um desbalanço nutricional devido à competição do sódio com íons essenciais, como o potássio (K^+) e o cálcio (Ca^{2+}), nos sítios de absorção radicular, o que compromete o metabolismo da planta; nesse sentido, a baixa relação K^+/Ca^{2+} configura-se como um indicativo clássico de toxicidade por sódio (GHEYI, H. R et al., 2021). Tais processos refletem-se em sintomas visuais, frequentemente manifestados por necrose e clorose nas margens e pontas das folhas mais velhas, visto que a planta tende a alocar esses íons em tecidos senescentes como estratégia de proteção aos tecidos jovens.

3.2.3 Estresse Oxidativo secundário

A resposta da planta aos estresses osmótico e iônico gera um estresse secundário: o estresse oxidativo. A redução da taxa de assimilação líquida de CO_2 e a atividade metabólica desregulada levam à superprodução de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radicais livres. As EROs são altamente destrutivas, causando danos a lipídios, proteínas e ácidos nucleico. Para combater esse dano, as plantas desenvolvem sistemas de defesa antioxidante (enzimáticos e não enzimáticos), cujo nível de atividade reflete a severidade do estresse salino ao qual a planta está sendo submetida. Portanto, a tolerância de uma cultura à salinidade depende de sua capacidade de gerenciar esses três níveis de estresse – ajustando osmoticamente suas células, controlando a exclusão ou compartimentalização de íons tóxicos e reforçando sua defesa antioxidante. A literatura recente demonstra que a exposição a sais aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas células vegetais, sendo necessária a ativação de enzimas antioxidantes como mecanismo de defesa (LIMA G. S. de., 2023).

3.3 HIDROPONIA COMO ALTERNATIVA PARA O SEMIÁRIDO

Diante das limitações impostas pela utilização de águas salobras, a hidroponia, caracterizada pelo cultivo sem solo onde os nutrientes são fornecidos via solução aquosa, surge como uma tecnologia crucial para a sustentabilidade agrícola no Semiárido. Esta técnica oferece vantagens significativas que mitigam os efeitos adversos da salinidade, a começar pela maior tolerância osmótica apresentada pelas plantas; em sistemas hidropônicos, os vegetais frequentemente toleram níveis salinos superiores aos suportados em cultivos convencionais, visto que, no solo, o estresse é exacerbado pela evaporação e pelo acúmulo descontrolado de sais, enquanto na hidroponia a solução nutritiva permite um controle rigoroso do potencial osmótico (ALVES, M.S. et al., 2022). Além disso, o sistema promove elevada eficiência hídrica e nutricional, especialmente na técnica NFT, cujo sistema de recirculação permite o reuso da água não absorvida, minimizando o desperdício em regiões de escassez hídrica (SILVA, M. G. et al., 2020). Outro benefício relevante é a redução da toxicidade foliar, uma vez que a ausência de contato direto entre a solução salina e a parte aérea da planta mitiga o risco de injúrias causadas pelo acúmulo de íons

tóxicos, como o cloreto (Cl^-) ou sódio (Na^+), especialmente sob as condições de alta demanda evaporativa comuns ao Semiárido (SANTOS et al., 2021).

3.3.1 O sistema NFT (Nutrient Film Technique)

O sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) configura-se como um dos métodos hidropônicos mais utilizados para o cultivo de hortaliças folhosas, a exemplo do coentro, destacando-se pelo fluxo contínuo e raso da solução nutritiva que forma uma fina película na base das raízes. Este método é particularmente relevante por estabelecer uma relação crítica entre a vazão e a nutrição vegetal, uma vez que o fluxo da solução não apenas garante o aporte constante de água e nutrientes via fluxo de massa, mas também influencia diretamente a aeração radicular e a estabilidade térmica do sistema. Nesse sentido, taxas de fluxo inadequadas podem induzir a anoxia radicular ou a elevação térmica da solução, fator que se constitui como um limitante severo em climas como o Semiárido. Diante disso, evidencia-se a necessidade de otimização desse parâmetro, pois, embora vazões em torno de $2,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ sejam frequentemente citadas para culturas como a alface, cenários de estresse salino exigem maior disponibilidade de oxigênio e fluxos constantes para mitigar os efeitos osmóticos. Assim, a calibração da vazão é fundamental para assegurar o equilíbrio entre o fornecimento de insumos e a minimização do estresse hídrico, justificando a investigação de diferentes taxas de fluxo (RHOADES et al., 1992). Portanto, o sistema NFT, quando manejado corretamente em termos de vazão e natureza química da água, representa um modelo tecnologicamente avançado para converter recursos marginais, como a água salobra, em produção agrícola eficiente no Nordeste brasileiro.

3.4 CULTIVO DE COENTRO (*CORIANDRUM SATIM L*) EM HIDROPONIA

O coentro (*Coriandrum Satim L*) é uma hortaliça folhosa aromática de ciclo curto, pertencente à família Apiaceae, de elevada importância cultural e econômica para a culinária brasileira, especialmente na região nordeste. Sua rápida rotação de cultivo e a alta demanda no mercado local e regional conferem-lhe um significativo valor comercial, tornando-o um alvo estratégico para a introdução de novas tecnologias de produção.

3.4.1 Resposta do coentro à salinidade

O coentro é geralmente classificado como uma cultura sensível a moderadamente sensível a moderadamente sensível ao estresse salino. Em condições convencionais de cultivo, o excesso de sais compromete drasticamente seu crescimento, reduzindo a área foliar, a altura da planta e, conseqüentemente, a massa fresca comercial. No entanto, em sistemas hidropônicos, estudos têm demonstrado que a cultura apresenta uma tolerância superior quando comparada ao cultivo em solo, desde o manejo da solução nutritiva seja otimizado (SILVA, M. G. et al., 2018). Além disso pesquisas anteriores já indicaram que o coentro consegue manter níveis aceitáveis de produtividade em salinidades moderadas, mas que o efeito negativo da salinidade se torna acentuado a partir de um determinado limiar, afetando variáveis fisiológicas essenciais, como a condutância estomática e a taxa de assimilação líquida de CO_2 (TAIZ, L.; ZEIGER, E, 2024).

3.4.2 Necessidades de pesquisa e lacunas no manejo

Apesar dos avanços, a literatura específica sobre o coentro em hidroponia no contexto do Semiárido ainda apresenta lacunas críticas que delimitam a relevância deste trabalho. Primeiramente, observa-se uma carência de estudos sobre a natureza catiônica das águas, visto que a maioria das pesquisas utiliza o cloreto de sódio ($NaCl$) para simular o estresse salino, representando águas predominantemente sódicas. No entanto, as águas subterrâneas do Nordeste possuem misturas complexas de sais, incluindo elevadas proporções de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Torna-se fundamental, portanto, compreender como a predominância de diferentes cátions na solução nutritiva modula a resposta fisiológica da cultura, uma vez que o cálcio é reconhecido por mitigar a toxicidade do sódio em diversas espécies (TAIZ, L.; ZEIGER, E, 2024). Além da

composição química, a otimização da vazão no sistema NFT configura-se como um fator hidrodinâmico vital, porém ainda pouco explorado para o coentro sob condições adversas. Estudos demonstram que a vazão ideal varia significativamente entre culturas e condições de cultivo; enquanto para a alface-americana vazões de $2,0 \text{ L min}^{-1}$ são otimizadas, para a couve-flor sob salinidade, o fluxo de $1,5 \text{ L min}^{-1}$ mostrou-se mais eficiente (DALASTRA et al., 2020; SOARES et al., 2020; SANTOS et al., 2021). Diante dessa carência de dados técnicos para o coentro, a investigação da vazão torna-se uma variável chave para otimizar a difusão iônica e a assimilação de CO_2 (taxa de assimilação líquida de CO_2). Dessa forma, a compreensão da interação entre a salinidade, a natureza iônica e a vazão da solução é essencial para desenvolver protocolos de manejo que garantam a viabilidade técnica e a rentabilidade desta olerácea.

3.5 LACUNAS E LIMITAÇÕES NOS ESTUDOS EXISTENTES

Apesar dos progressos no entendimento da tolerância das culturas à salinidade em sistemas hidropônicos, a literatura ainda apresenta duas grandes lacunas metodológicas e conceituais que limitam a aplicação dos resultados à realidade do semiárido nordestino e que justificam a necessidade de estudos mais aprofundados.

3.5.1 Carência de simulação da composição iônica real

Uma das limitações mais críticas em grande parte das pesquisas sobre estresse salino é a metodologia de salinização. Tradicionalmente, os estudos utilizam soluções salinizadas apenas com cloreto de sódio (NaCl). Embora este método simplifique o controle experimental, ele falha em refletir a realidade dos aquíferos do semiárido, cujas águas são caracterizadas por uma mistura complexa de sais. As águas subterrâneas são ricas em outros cátions, como o cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}), além dos ânions cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-) (AMARAL et al., 2021; DIAS et al., 2021). Esta simplificação é problemática, pois a natureza catiônica da solução modula a resposta fisiológica das plantas. Por exemplo, o cálcio é conhecido por mitigar a toxicidade do sódio ao estabilizar as membranas celulares e regular a seletividade de absorção de Na^{2+} (TAIZ, L.; ZEIGER, E, 2024; DIAS et al., 2021). Portanto torna-se necessário investigar os efeitos de diferentes composições iônicas (sódica, cálcica e mista) sobre o

desempenho das plantas, simulando as condições reais da região para fornecer dados de manejo mais aplicáveis.

3.5.2 Necessidade de otimização do fator hidrodinâmico (vazão)

Outra limitação conceitual reside no manejo do sistema NFT. Enquanto a salinidade é um fator químico, a vazão de circulação da solução nutritiva é um fator hidrodinâmico que afeta diretamente o ambiente radicular da planta, influenciando o fornecimento de oxigênio e a temperatura da solução. Embora alguns estudos já tenham relacionado vazões ($1 L \cdot \text{min}^{-1}$ a $2,5 L \cdot \text{min}^{-1}$) (DALASTRA et al., 2020; SOARES et al., 2020) com salinidade em culturas como alface e couve-flor, há uma clara escassez de informações sobre a otimização desse parâmetro para o coentro sob estresse salino. A vazão ideal não apenas deve garantir um filme nutritivo constante, mas também deve ser suficiente para compensar o estresse osmótico imposto pelo excesso de sais, sem causar anoxia radicular. A ausência de dados robustos sobre a interação entre vazão e estresse iônico impede a otimização técnica e a adoção comercial da cultura.

3.5.3 Foco nas variáveis fisiológicas

Estudos (SANTOS, J. P. et al., 2022; LIMA, G.S. et al., 2023) avançaram ao utilizar variáveis fisiológicas, como a condutância estomática (g_s) e a concentração interna de CO_2 (C_i), para avaliar a tolerância das plantas. Essas variáveis são métricas diretas e sensíveis da resposta da planta ao estresse (TAIZ, L.; ZEIGER, E, 2024) e oferecem uma compreensão mais profunda dos mecanismos de adaptação do que apenas os parâmetros de crescimento (altura e massa). O aprofundamento na avaliação das trocas gasosas sob a combinação de diferentes naturezas iônicas e vazões é fundamental para determinar os limites de tolerância do coentro e definir as melhores estratégias de manejo no sistema hidropônico NFT.

3.6 EFEITO DA VAZÃO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA NO SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÔNICO NFT

No sistema de cultivo hidropônico NFT (Nutrient Film Technique), a vazão de circulação da solução nutritiva é um parâmetro de manejo tão crítico quanto a sua composição química, pois atua como o principal fator hidrodinâmico que interage com o ambiente radicular. A otimização da vazão é essencial para garantir o equilíbrio hídrico, nutricional e gasoso da planta.

3.6.1 Funções da vazão no sistema de cultivo hidropônico NFT

A vazão ideal da solução nutritiva cumpre funções vitais que sustentam o desenvolvimento vegetal, a começar pelo fornecimento e renovação constante de nutrientes. Uma vazão adequada assegura que os elementos esgotados pela absorção radicular sejam rapidamente repostos, mantendo a estabilidade e a uniformidade da concentração iônica ao longo dos canais de cultivo; por outro lado, vazões excessivamente baixas podem criar gradientes de concentração prejudiciais na interface raiz-solução, enquanto fluxos muito elevados aumentam o custo energético e reduzem o tempo de contato necessário para a absorção eficiente (DALASTRA et al., 2020). Além da nutrição, a circulação contínua é determinante para a oxigenação radicular, visto que a velocidade do fluxo e a espessura da lâmina de solução influenciam diretamente a disponibilidade de oxigênio dissolvido (O_2). Vazões insuficientes ou lâminas excessivamente espessas podem induzir a anoxia radicular, inibindo a respiração celular e o metabolismo de crescimento da planta. Finalmente, em regiões de clima quente como o Semiárido, a vazão atua como um mecanismo de termorregulação, no qual o fluxo constante auxilia na dissipação do calor acumulado nos perfis de cultivo para evitar a elevação térmica da solução. Esse controle é crítico, pois o aumento da temperatura, além de acelerar a respiração das raízes, reduz drasticamente a solubilidade do O_2 , desencadeando estresse térmico e oxidativo (FURLANI et al., 1998)."

3.6.2 Vazão e estresse salino

A interação entre a vazão e o estresse salino constitui um campo de pesquisa de elevada relevância, pois, em condições de alta salinidade, a planta já se encontra sob severos estresses osmótico e hídrico. Nesse contexto, a demanda por oxigênio dissolvido (O_2) torna-se ainda mais acentuada, visto que as plantas sob estresse salino requerem maior aporte energético (ATP) para manter mecanismos ativos de defesa, como a compartimentalização de íons tóxicos, processo que depende de um fornecimento abundante de O_2 para a respiração radicular (SOARES et al., 2020). Além disso, diante dessa demanda, o ajuste da vazão torna-se uma estratégia de manejo essencial, uma vez que estudos com culturas tolerantes indicam que os fluxos ideais podem se alterar conforme o nível de salinidade; em ensaios com couve-flor, por exemplo, a vazão de $1,5 \text{ L min}^{-1}$ mostrou-se superior à de $2,5 \text{ L min}^{-1}$, sugerindo que o manejo do fluxo deve ser calibrado para mitigar os efeitos salinos (SOARES et al., 2020). Entretanto, ainda persiste uma lacuna no conhecimento técnico acerca do coentro, pois, embora existam diretrizes gerais para hortaliças como a alface, a vazão ótima para esta cultura — especialmente quando exposta a diferentes naturezas iônicas — ainda não está claramente definida. Portanto, a identificação dessa faixa de vazão é crucial para assegurar a viabilidade técnica e comercial da produção de coentro no Semiárido."

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL E CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em ambiente protegido (casa de vegetação) localizado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Recife-PE, situado a 8°01'05'' de latitude sul, 34°56'48'' de longitude oeste e altitude média de 6,5 metros. A pesquisa foi conduzida no período compreendido entre novembro de 2019 e março de 2020. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo As' (tropical quente e úmido), caracterizado por uma estação seca prolongada de setembro a fevereiro e uma estação chuvosa de março a agosto (APARECIDO, L. E. de O. et al., 2020).

A casa de vegetação possui estrutura metálica com cobertura em arco, filme de polietileno de baixa densidade (150 μm), com proteção contra raios ultravioleta e difusor de luz, além de sombreamento lateral com tela de náilon preta de 50%. O piso foi revestido com manta geotêxtil (Bidim).

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4×4 , com quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais. Os fatores estudados foram quatro níveis de salinidade da solução nutritiva (1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 dS m^{-1}) e quatro vazões de aplicação da solução (1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 L min^{-1}).

Foram conduzidos três experimentos, com diferentes naturezas iônicas da solução nutritiva:

- **Experimento I – Água sódica:** solução preparada com adição de NaCl à água de abastecimento (condutividade inicial de 0,2 dS m^{-1}), suplementada com a solução nutritiva proposta por Furlani (1998).
- **Experimento II – Água cálcica:** solução preparada com adição de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- **Experimento III – Água mista:** solução composta por NaCl, CaCl_2 e MgCl_2 em proporção molar 2:1:1.

A cada novo ciclo experimental, foi realizada a higienização dos perfis, reservatórios e equipamentos de bombeamento.

4.3 CULTIVO E SISTEMA HIDROPÔNICO

A cultura utilizada foi o coentro (*Coriandrum sativum* L.), cultivar Verdão, cultivado em sistema hidropônico do tipo NFT (Técnica de Fluxo Laminar de Nutrientes). As unidades experimentais consistiram em perfis hidropônicos independentes com 3 m de comprimento, dispostos com espaçamento de 0,20 m entre plantas e 0,30 m entre perfis, instalados a uma altura média de 1,10 m do solo, com inclinação de 3,33%.

Cada unidade experimental foi composta por quatro perfis hidropônicos alimentados por uma eletrobomba de 220 V (potência de 32 W), um reservatório de 50 L para a solução nutritiva e um reservatório auxiliar de 15 L para reposição da água evapotranspirada. A solução nutritiva foi aplicada por meio de temporizador elétrico, com ciclos de irrigação a cada 30 minutos entre 6h e 18h, com duração de 15 minutos por ciclo; nos demais horários, a aplicação ocorria a cada 2 horas, também por 15 minutos.

4.4 AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS (TROCAS GASOSAS)

As avaliações fisiológicas foram realizadas aos 30 dias após a semeadura (DAS), com análise das seguintes variáveis de trocas gasosas:

- Taxa de assimilação líquida de CO_2 ($A - \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Condutância estomática ($g_s - \text{mol } H_2O \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Transpiração ($E - \text{mmol } H_2O \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Concentração interna de CO_2 ($C_i - \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)

As medições foram realizadas com um analisador de gás infravermelho portátil (IRGA, modelo LCpro-SD – ADC, Inglaterra), equipado com fonte de luz artificial ajustada para $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa. As amostragens ocorreram no período da manhã, entre 08h30 e 10h30, na terceira folha mais jovem (folha +3) da parte mediana da planta.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade. Para os fatores quantitativos (níveis de salinidade e taxas de vazão), os dados foram ajustados por meio de modelos de regressão polinomial de primeiro e segundo graus. Os critérios para a escolha do modelo ideal basearam-se na significância dos coeficientes da equação (pelo teste t de Student a 5% de probabilidade), no maior coeficiente de determinação (R^2) e na coerência com o fenômeno biológico estudado. No caso das trocas gasosas, priorizou-se modelos que representassem fielmente a curva de resposta metabólica da planta ao estresse e à dinâmica hídrica no sistema NFT. As análises foram realizadas utilizando o software SISVAR 5.2.

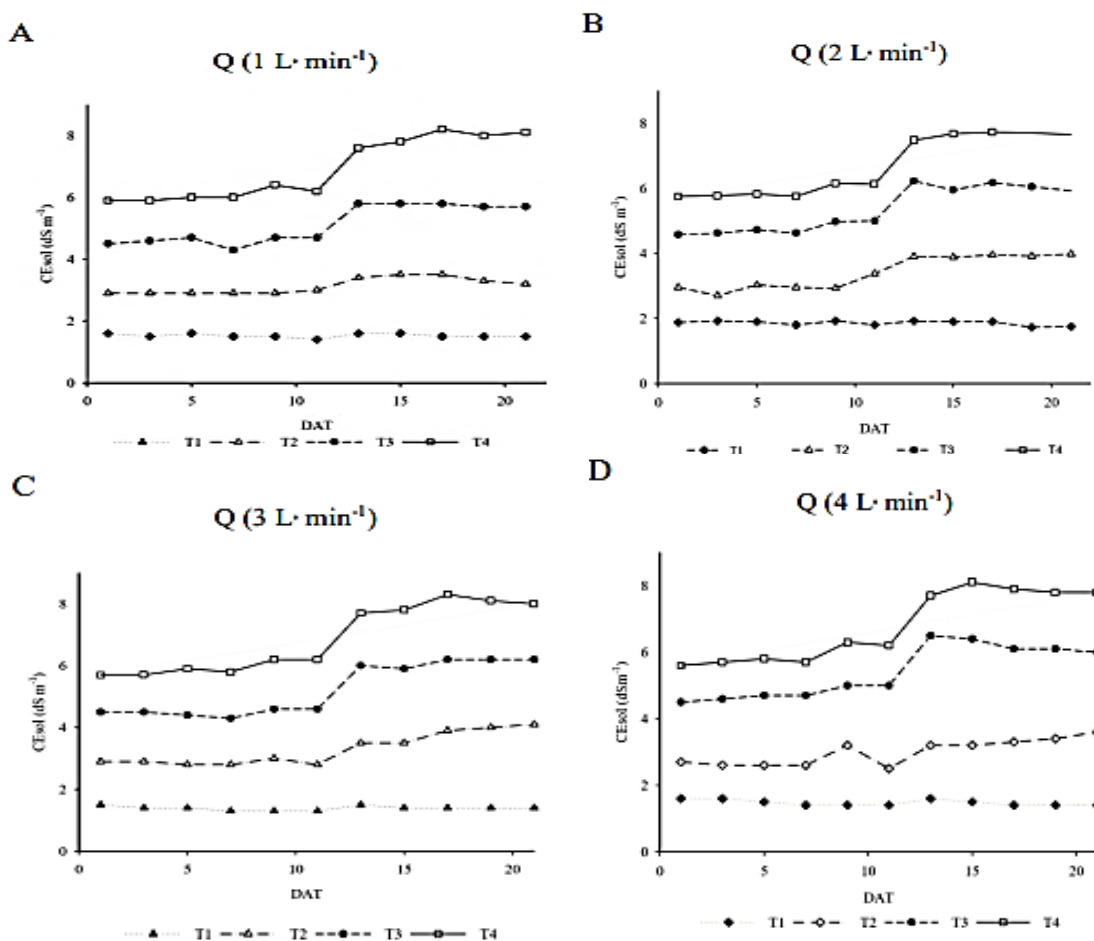
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PH DA SOLUÇÃO NUTRITIVA

5.1.1 Experimento I: Tratamento com Água Salobra (NaCl)

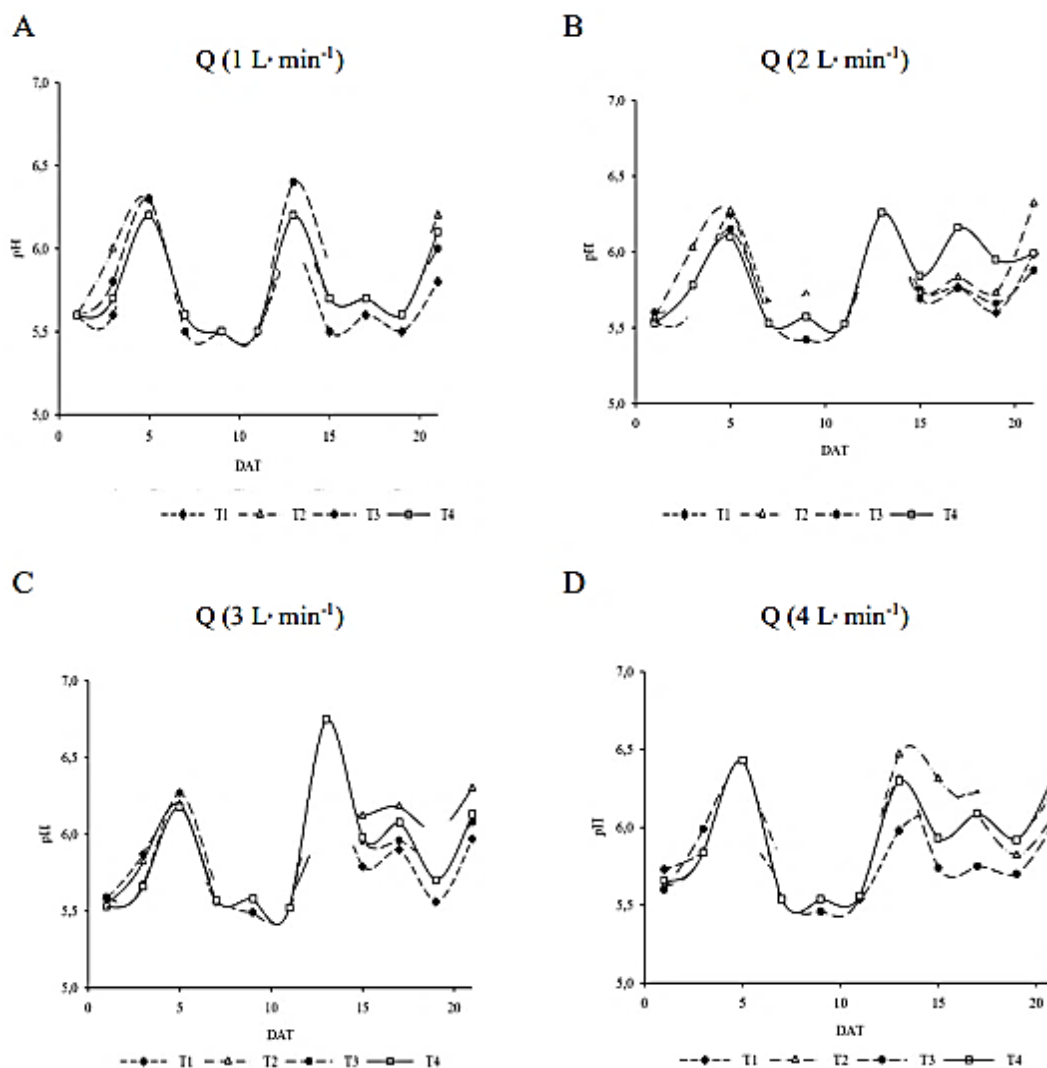
As variações da Condutividade Elétrica (CE) e do pH da solução nutritiva observadas no Experimento I (Tratamento com *NaCl*) ao longo dos dias após o transplante (DAT) estão apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 1 - As variações da Condutividade Elétrica (CE) observadas no Experimento I (Tratamento com NaCl) ao longo dos dias após o transplante (DAT) nas vazões de 1 L·min⁻¹ (A), 2 L·min⁻¹ (B), 3 L·min⁻¹ (C) e 4 L·min⁻¹ (D), no experimento I.



Fonte: Autor (2020)

Figura 2 - Valores médios de pH da solução nutritiva ao longo do ciclo de cultivo do Coentro cv. “Verdão” nas vazões de 1 L·min⁻¹ (A), 2 L·min⁻¹ (B), 3 L·min⁻¹ (C) e 4 L·min⁻¹ (D), no experimento I.



Fonte: Autor (2020)

A Condutividade Elétrica (CE) da solução nutritiva (**Figura 1**) foi crescente ao longo do ciclo de cultivo nas parcelas tratadas com águas salobras, especialmente nos tratamentos em que a reposição da lâmina evapotranspirada foi realizada com a própria água salina. Em contraste, o tratamento controle (água de abastecimento com CE inicial de 0,2 dS·m⁻¹) demonstrou leve redução da CE ao longo do ciclo (**Figura 1**). Esse comportamento pode ser atribuído à absorção

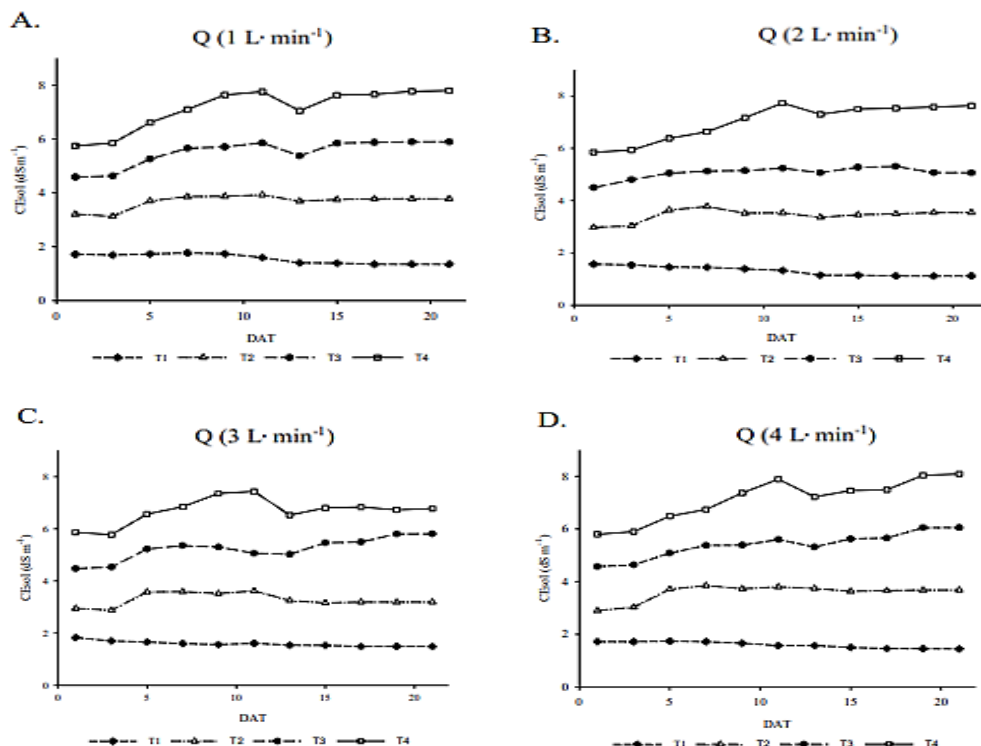
seletiva de nutrientes pelas plantas, promovendo diluição da solução (SOARES et al., 2020). Essa dinâmica de redução da CE nas águas não salinas está segundo o observado por (SILVA, J. S et al. 2021), que relataram declínio na concentração de íons em função da absorção ativa dos mesmos pelo sistema radicular.

Quanto ao pH da solução nutritiva (**Figura 2**), verificou-se leve oscilação durante o ciclo, com valores entre 6,3 e 6,7, permanecendo dentro da faixa ideal para disponibilização de nutrientes à maioria das hortaliças, conforme preconizado por FURLANI (1998).

5.1.2 Experimento II: Tratamento com Água Cálcica ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)

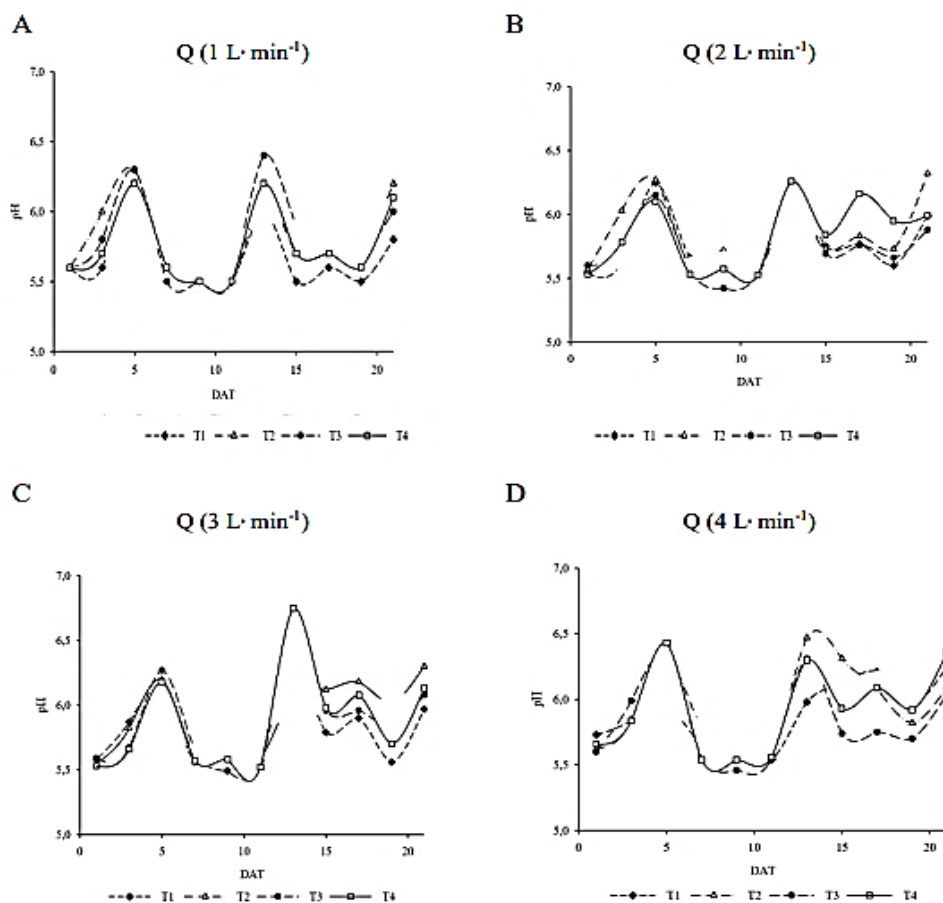
As variações da Condutividade Elétrica (CE) e do pH da solução nutritiva observadas no Experimento II (Tratamento com $CaCl_2 \cdot 2H_2O$) ao longo dos dias após o transplante (DAT) estão apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 - As variações da Condutividade Elétrica (CE) observadas no Experimento I (Tratamento com $CaCl_2 \cdot 2H_2O$) ao longo dos dias após o transplante (DAT) nas vazões de 1 L·min⁻¹ (A), 2 L·min⁻¹ (B), 3 L·min⁻¹ (C) e 4 L·min⁻¹ (D), no experimento II



Fonte: Autor (2020)

Figura 4 - Valores médios de pH da solução nutritiva ao longo do ciclo de cultivo do Coentro cv. “verdão” nas vazões de 1 L·min⁻¹ (A), 2 L·min⁻¹ (B), 3 L·min⁻¹ (C) e 4 L·min⁻¹ (D), no experimento II. 27



Fonte: Autor (2020)

A condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva (**figura 3**) apresentou comportamento similar ao experimento 1, com tendência geral de acréscimo nos tratamentos com salinidade, especialmente quando a reposição da lâmina evapotranspirada foi feita com a água enriquecida em $CaCl_2 \cdot 2H_2O$.

O incremento na salinidade da solução nutritiva, neste experimento, fora predominantemente causado pelo acúmulo do cátion Ca^{2+} . A taxa de aumento da CE é uma resposta direta à diferença entre a absorção de água pela planta (transpiração/evapotranspiração) e a taxa de absorção de íons. No entanto, o Ca^{2+} é um nutriente essencial, o que pode influenciar a dinâmica de sua absorção e acúmulo na solução em comparação com o Na^+ (íon não essencial) do experimento I.

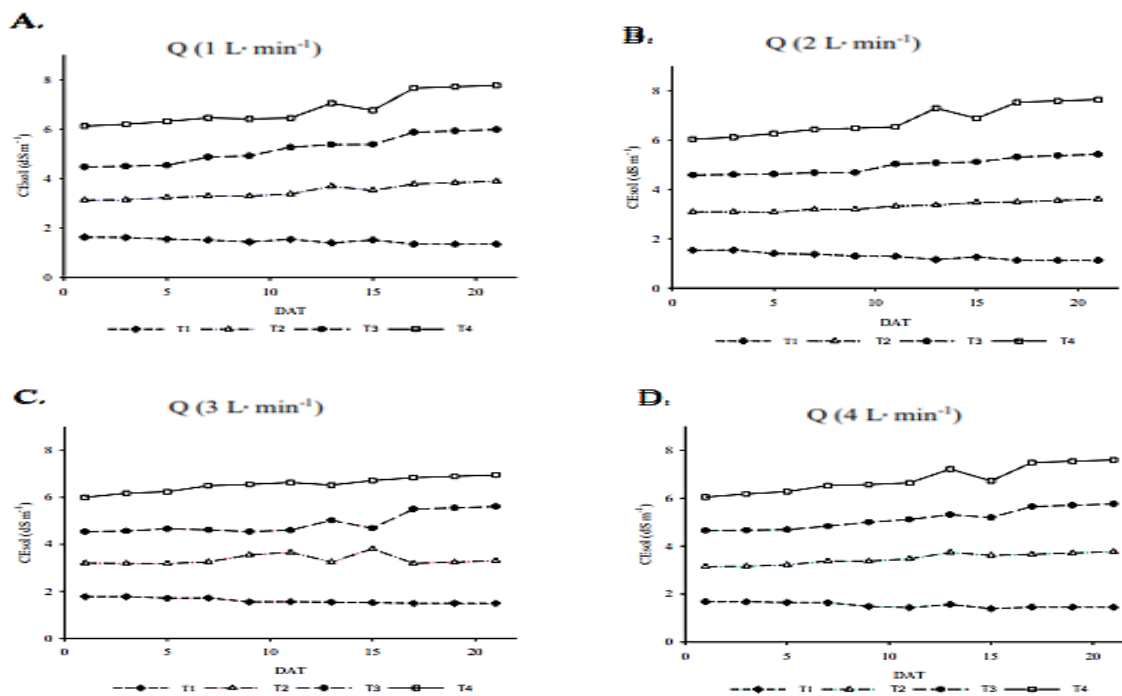
A leve redução da CE observada no tratamento controle (água de abastecimento) seguiu o padrão de diluição do experimento I, confirmando que a absorção líquida de nutrientes pelas raízes excedeu a absorção de água.

A análise do pH (**figura 4**) para o tratamento II ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) revelou uma faixa de variação entre 6,1 e 6,5 ao longo do ciclo. Essa estabilidade ou leve oscilação pode ser atribuída à capacidade tamponante da solução e à absorção equilibrada de ânions (NO_3^-) e cátions (K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}). A manutenção do pH nesta faixa demonstrou ser satisfatória para evitar a precipitação de nutrientes e garantir a absorção de micronutrientes, como preconizado por FURLANI et al., 1998).

5.1.3 Experimento III: Tratamento com Água Mista ($NaCl + CaCl_2 \cdot 2H_2O + MgCl_2$ na proporção 2 : 1 : 1)

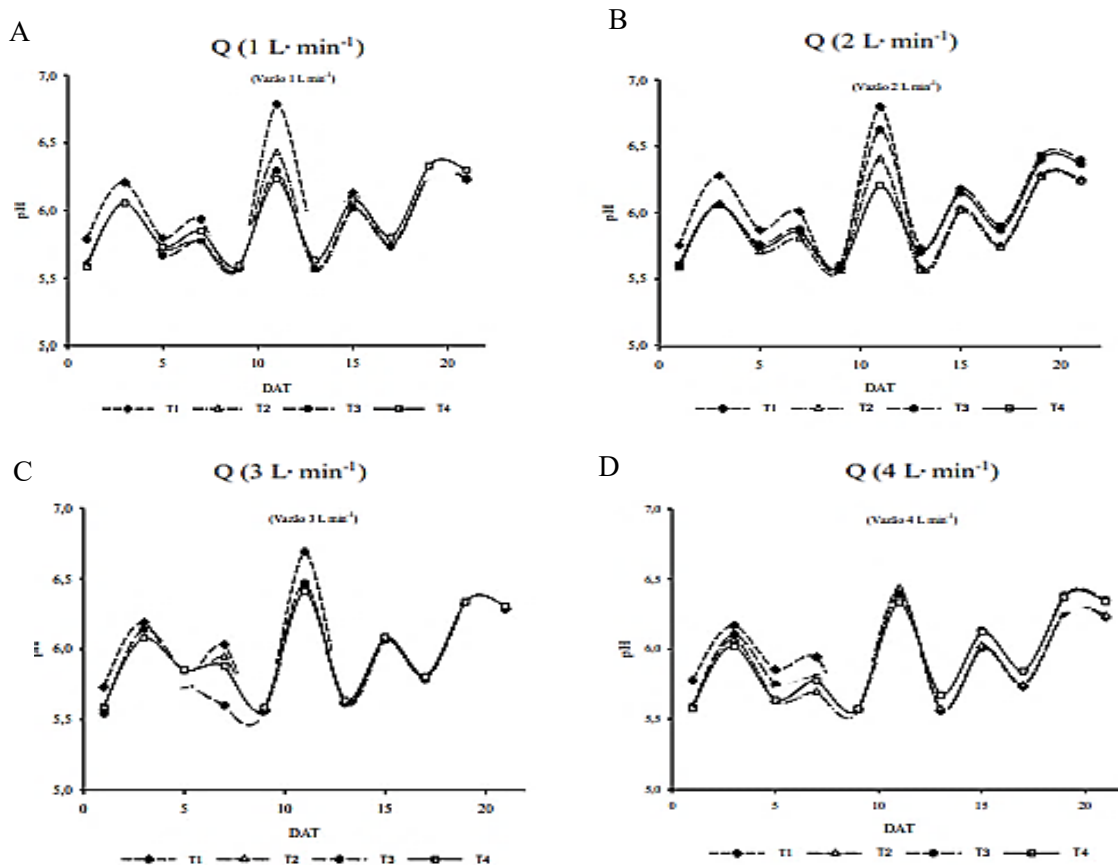
As variações da Condutividade Elétrica (CE) e do pH da solução nutritiva observadas no Experimento III ($NaCl + CaCl_2 \cdot 2H_2O + MgCl_2$ na proporção 2 : 1 : 1) ao longo dos dias após o transplante (DAT) estão apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Figura 5 - Valores médios de CE_{sol} da solução nutritiva ao longo do ciclo de cultivo do Coentro cv. “verdão” nas vazões de 1 L·min⁻¹ (A), 2 L·min⁻¹ (B), 3 L·min⁻¹ (C) e 4 L·min⁻¹ (D), no experimento III.



Fonte: Autor (2020)

Figura 6 - Valores médios de pH da solução nutritiva ao longo do ciclo de cultivo do Coentro cv. “Verdão” nas vazões de 1 L · min⁻¹ (A), 2 L · min⁻¹ (B), 3 L · min⁻¹ (C) e 4 L · min⁻¹ (D), no experimento III.



Fonte: Autor (2020)

Na solução nutritiva do experimento III (**figura 5**), a Condutividade Elétrica (CE) seguiu o padrão de acréscimo nos tratamentos salinos ao longo do ciclo de cultivo. Este aumento na CE é resultado direto da reposição da água evapotranspirada com a água mista ($NaCl + CaCl_2 \cdot 2H_2O + MgCl_2$ na proporção 2 : 1 : 1), promovendo o acúmulo de íons Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . A taxa de aumento da salinidade, neste caso, reflete a combinação da absorção de um íon não essencial (sódio) e dois essenciais (cálcio e magnésio). A presença combinada de Ca^{2+} e Mg^{2+} em relação ao Na^+ é crucial. O Ca^{2+} é conhecido por mitigar a toxicidade do Na^+ e manter a integridade da membrana radicular. Por outro lado, o Mg^{2+} também é nutriente essencial, embora em concentrações elevadas e na presença de Na^+ , pode haver competição iônica pelos sítios de

absorção com o Ca^{2+} , potencializando o desequilíbrio nutricional e o estresse na planta, em comparação com os Experimentos I (Na^+) e II (Ca^{2+}).

A análise do pH da solução nutritiva (**figura 6**) no tratamento com água mista revelou uma variação entre 6,2 e 6,6) ao longo do ciclo. Essa faixa indica que a solução manteve um pH adequado, apesar da complexidade da composição iônica. A manutenção da estabilidade do pH é especialmente importante em soluções com alta concentração de sais, pois garante a disponibilidade de nutrientes e minimiza o risco de estresse salino-osmótico para o coentro.

5.2 TROCAS GASOSAS DO COENTRO SOB CONDIÇÕES SALINAS

As variáveis fisiológicas avaliadas (taxa de assimilação líquida de CO_2 , condutância estomática, concentração interna de CO_2 e transpiração) permitiram inferir os impactos do estresse salino sobre o metabolismo das plantas de coentro cultivadas em sistema hidropônico NFT. Observou-se que o aumento da salinidade da solução nutritiva provocou alterações significativas, variando conforme a natureza iônica da água utilizada e a vazão da solução nutritiva.

Tabela 1. Resumo da análise de variância das variáveis: taxa de assimilação líquida de CO_2 ($A \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa transpiração ($E \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($G_s \text{ mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 ($C_i \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e de plantas de coentro (cultivar verdão), expostas a diferentes níveis de salinidade e vazões de aplicação da solução nutritiva aos 30 DAS, em Recife – PE.

FV	GL	Quadrado médio				
		<i>A</i>	<i>E</i>	<i>C_i</i>	<i>g_s</i>	<i>A/C_i</i>
Experimento I - NaCl						
CEsol (CE)	3	210,4950**	0,1456 ^{ns}	11691,7239**	0,0130**	0,0029**
Vazão (V)	3	14,0617**	0,3754 ^{ns}	3089,1822**	0,0011 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
CE X V	9	5,0688*	0,2628 ^{ns}	480,3628*	0,0013 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Resíduo	48	2,3236	0,3321	223,5781	0,0007	0,0003
CV (%)	-	8,42	12,05	8,7	12,2	17,18
Experimento II - $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$						
CEsol (CE)	3	231,4384**	0,0731 ^{ns}	26437,2200**	0,0057**	0,0024**
Vazão (V)	3	15,0571**	0,9221**	323,0100 ^{ns}	0,0009 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
CE X V	9	6,3025 ^{ns}	0,0817 ^{ns}	1153,2600 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
Resíduo	48	3,5329	0,1871	778,2100	0,0005	0,0003
CV (%)	-	12,92	9,17	21,26	11,18	16,42
Experimento III - 2:1:1 ($\text{NaCl} : \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} : \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)						
CEsol (CE)	3	189,6271**	57,2441**	15981,0522**	0,0279**	0,0013**
Vazão (V)	3	2,5258**	28,5238**	7006,2502**	0,0010 ^{ns}	0,0006 ^{ns}
CE X V	9	0,8536 ^{ns}	3,1264 ^{ns}	1976,1985**	0,0035 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Resíduo	48	0,5960	2,1132	527,7120	0,0026	0,0002
CV (%)	-	6,87	15,52	14,73	16,39	23,01

*, **Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo pelo teste F; GL – grau de liberdade; CV – Coeficiente de determinação.

Fonte: Autor (2020)

No Experimento I (natureza sódica), não foi verificado efeito significativo da interação entre a salinidade e as vazões da solução nutritiva para as variáveis de trocas gasosas ($p > 0,05$). Observou-se efeito isolado do fator salinidade para a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E) e concentração interna de CO_2 (C_i) ($p < 0,01$). Quanto ao efeito isolado das vazões, houve influência significativa apenas sobre a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) e a transpiração (E) ($p < 0,05$), indicando que a dinâmica do fluxo interfere diretamente na eficiência hídrica e na assimilação de carbono sob condições de água sódica (Tabela 1).

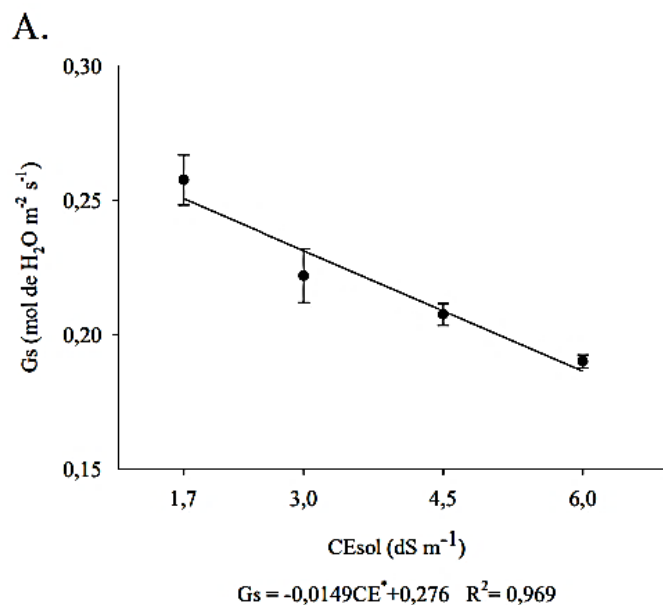
No experimento II, verifica-se que não houve efeito significativo da interação salinidade e vazões da solução nutritiva, para nenhuma das variáveis analisadas. Sendo observado efeito isolado da salinidade, para as variáveis taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), concentração interna de CO_2 (C_i), condutância estomática (G_s) ($p < 0,01$). O efeito isolado das vazões da solução nutritiva, foi observado na taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) e transpiração (E) ($p < 0,01$) (Tabela 1).

No experimento III, verifica-se efeito significativo da interação salinidade e vazões da solução nutritiva, para a concentração interna de CO_2 (C_i) ($p < 0,01$). O efeito isolado salinidade, foi observado na taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (G_s), transpiração e eficiência de carboxilação (A/C_i) ($p < 0,01$), sendo o efeito isolado das vazões da solução nutritiva, observado, apenas para a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) e transpiração (E) ($p < 0,01$) (Tabela 1).

5.2.1 Condutância estomática (g_s)

5.2.1.1 Efeito da Água Sódica (Experimento I)

Figura 7 – Condutância estomática (g_s) do coentro cv. Verdão submetido a diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva da água sódica.



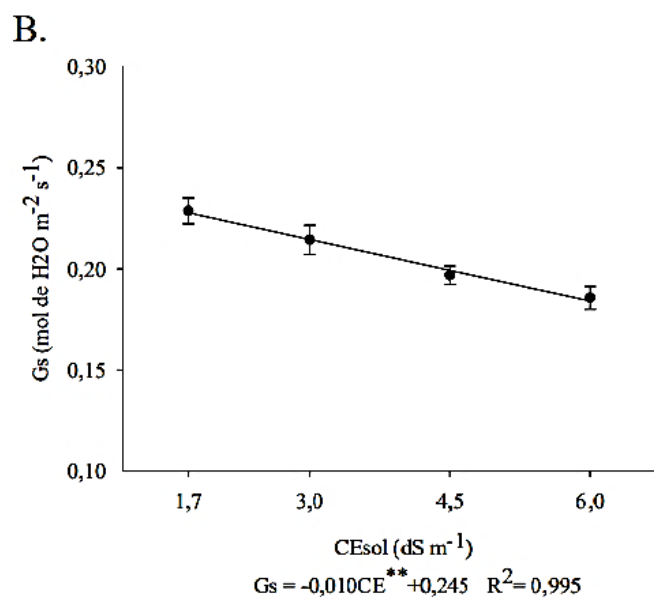
Fonte: Autor (2020)

No Experimento I, sob o domínio da água sódica, a condutância estomática (g_s) foi severamente afetada pelo incremento da salinidade, apresentando uma redução linear de $0,014 \text{ mol de } H_2O \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para cada unidade de aumento na CE_{sol} . Essa inibição resultou em uma perda acumulada de 26,21% quando comparado o nível de 6,0 ao controle (**Figura 7**).

Biologicamente, essa redução da g_s reflete uma estratégia adaptativa imediata da planta para mitigar a perda excessiva de água por transpiração, uma resposta típica ao estresse hídrico-salino. Ao reduzir a abertura dos estômatos, a planta tenta manter o potencial de turgor celular frente ao baixo potencial osmótico da solução externa (SANTOS, J. P. et al., 2022). No entanto, esse mecanismo de defesa impõe uma barreira física à entrada de CO_2 no mesofilo foliar, o que pode comprometer a taxa de assimilação líquida de CO_2 . Embora o fechamento estomático vise tornar o uso da água mais conservador, a eficiência biológica é um ajuste fino entre a economia hídrica e a manutenção da produção de biomassa, sendo um indicativo clássico de aclimatização ao ambiente salino do Semiárido.

5.2.1.2 Efeito das Água Cálca (Experimentos II)

Figura 8 – Condutância estomática (g_s) do coentro cv. Verdão submetido a diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva da água cálcica.

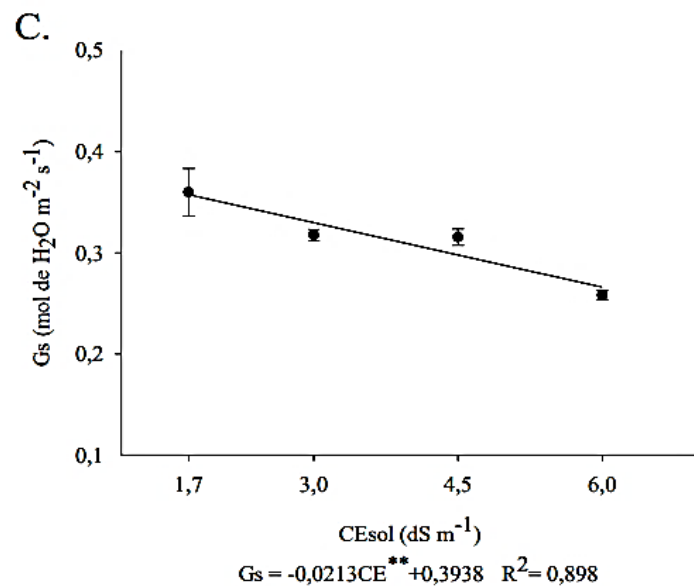


Fonte: Autor (2020)

No Experimento II (água cálcica), a condutância estomática (g_s) apresentou um comportamento linear decrescente ($p < 0,01$), com uma redução de $0,010 \text{ mol } H_2O \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para cada incremento unitário na CE_{sol} (**Figura 8**). Comparativamente, a perda relativa neste experimento (18,82%) foi inferior à observada no Experimento III (água mista), onde a redução atingiu 28,29%. Essa variação revela que a composição iônica da água é tão determinante quanto a concentração total de sais. Enquanto o cálcio (Ca^{2+}) possui um papel relevante na manutenção da integridade das membranas celulares e na sinalização celular, podendo atenuar parte dos danos salinos, a combinação de múltiplos cátions (Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) no Experimento III impôs uma restrição estomática mais severa. A presença desses íons em desequilíbrio reduz o potencial hídrico radicular e induz o fechamento estomático mediado por sinais hormonais, visando evitar o colapso hídrico da planta (SANTOS et al., 2022). Como resposta, a planta intensifica o controle da transpiração, o que explica a queda acentuada na g_s sob o domínio de águas mistas no semiárido.

5.2.1.3 Efeito das Água Mista (Experimentos III)

Figura 9 – Condutância estomática (g_s) do coentro cv. Verdão submetido a diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva da água cálcica.



Fonte: Autor (2020)

No Experimento III, os resultados apresentados na **Figura 9** demonstram que a redução da condutância estomática (g_s) em níveis de salinidade superiores a $1,7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ocorre devido ao efeito osmótico imediato. O acúmulo de sais na solução nutritiva reduz o potencial osmótico,

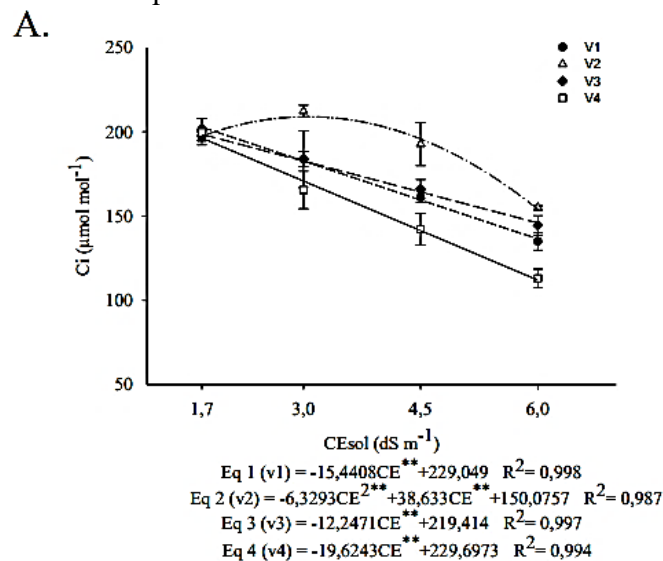
dificultando a absorção de água pelas raízes e, conseqüentemente, diminuindo o potencial hídrico foliar. Essa condição leva à perda de turgor das células-guarda, resultando no fechamento estomático como mecanismo de defesa para minimizar a transpiração. Esse comportamento, além de reduzir a perda de água, impõe uma restrição física à difusão de CO_2 para o interior do mesofilo, limitando a taxa de assimilação líquida de CO_2 . No caso específico deste experimento, a natureza mista da água (composta por Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) agrava esse cenário, pois o desequilíbrio iônico potencializa o estresse hídrico e metabólico na cultura do coentro (SILVA et al., 2021).

5.2.2 Concentração interna de CO_2 (C_i)

A concentração interna de CO_2 foi significativamente afetada pela interação entre salinidade e vazão da solução nutritiva, especialmente nas vazões de $1 L \cdot min^{-1}$, $3 L \cdot min^{-1}$ e $4 L \cdot min^{-1}$ nos experimentos I (água sódica), II (água cálcica) e III (água mista). Em geral, a C_i diminuiu com o aumento da salinidade, indicando menor eficiência na fixação de carbono, o que está associado tanto ao fechamento estomático quanto a limitações bioquímicas da enzima Rubisco (LIMA, G. S. et al., 2023).

5.2.2.1 Efeito das Águas sódica (Experimentos I)

Figura 10 – Concentração interna (C_i) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva e quatro diferentes vazões da sódica.



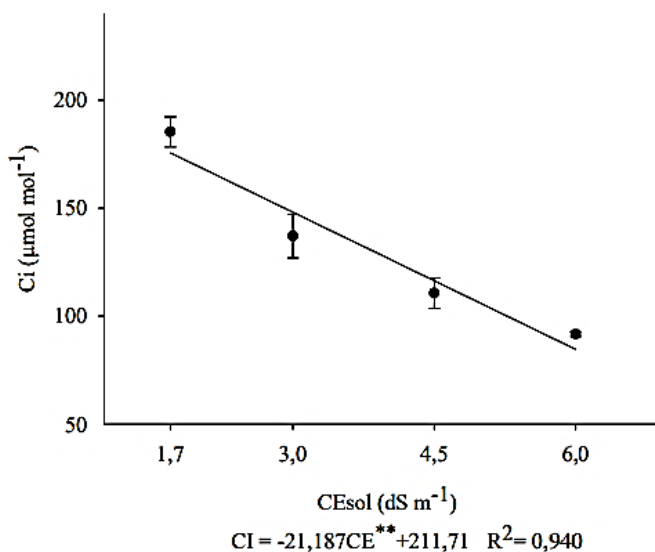
Fonte: Autor (2020)

Referente ao experimento I (água sódica), a **figura 10** sobre C_i , observou-se interação significativa entre salinidade e vazão da solução nutritiva. As vazões de $1 L \cdot min^{-1}$, $3 L \cdot min^{-1}$ e $4 L \cdot min^{-1}$ apresentaram comportamento linear com queda na concentração interna de CO_2 (C_i), enquanto a vazão de $2 L \cdot min^{-1}$ teve comportamento quadrático, com valor máximo de C_i ($209,68 \mu mol/mol$) a $3,0 dS \cdot m^{-1}$, indicando boa atividade taxa de assimilação líquida de CO_2 até esse ponto. Acima dessa salinidade, a (C_i) e a (A) diminuíram devido ao estresse osmótico e à possível redução da condutividade hidráulica das raízes pela lignificação.

5.2.2.2 Efeito das Água cálcica (Experimentos II)

Figura 11 – Concentração interna (C_i) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva sódica.

B.



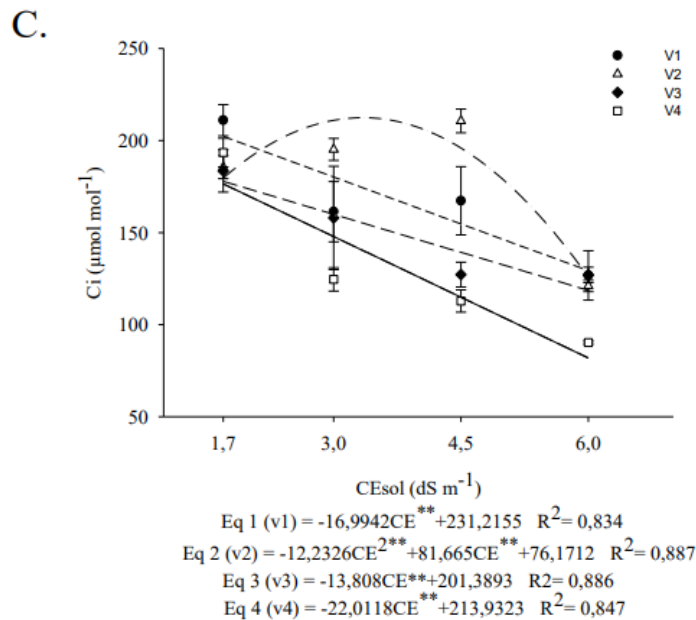
Fonte: Autor (2020)

No Experimento II (água cálcica), os resultados apresentados na **Figura 11** indicam que a concentração interna de CO_2 (C_i) sofreu uma redução linear acentuada com o aumento da salinidade. É importante destacar que a interação entre os fatores salinidade e vazão não foi significativa para esta variável ($p > 0,05$), o que evidencia que a condutividade elétrica da solução nutritiva foi o fator determinante e dominante na modulação da resposta da C_i . Esse decréscimo linear sugere que, embora o cálcio possa atuar na estabilização de membranas, o estresse osmótico e o desequilíbrio iônico prevaleceram, limitando a difusão de CO_2 e possivelmente afetando a eficiência da enzima Rubisco no processo de carboxilação. Esse comportamento corrobora com

estudos recentes que indicam que o potencial osmótico da solução nutritiva se sobrepõe à dinâmica do fluxo hídrico no sistema NFT quando os níveis salinos são elevados (SILVA et al., 2021).

5.2.2.3 Efeito da Águas Mista (Experimentos III)

Figura 12 – Concentração interna (C_i) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva e quatro diferentes vazões da solução nutritiva da água mista.



Fonte: Autor (2020)

No Experimento III (água mista), os resultados da **Figura 12** revelam uma interação significativa entre a salinidade e as vazões da solução nutritiva para a concentração interna de CO_2 (C_i). Enquanto as vazões de $1 L \cdot \text{min}^{-1}$, $3 L \cdot \text{min}^{-1}$ e $4 L \cdot \text{min}^{-1}$ promoveram reduções lineares na C_i com o aumento da salinidade, a vazão de $2 L \cdot \text{min}^{-1}$ apresentou comportamento quadrático, atingindo o pico de concentração em $3,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Diante disso, esse incremento da C_i em níveis intermediários de salinidade, quando acompanhado pela redução da taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), sinaliza que a limitação da cultura não ocorreu apenas pelo fechamento estomático (limitação difusional), mas sim por restrições bioquímicas no mesófilo foliar. Tal fenômeno sugere uma redução na eficiência de carboxilação e na atividade da enzima Rubisco, onde o CO_2 que entra na câmara subestomática não é devidamente processado devido aos danos causados pelo desequilíbrio iônico e estresse oxidativo. Esse padrão de resposta é característico da

exposição do coentro a águas de natureza mista, onde o excesso de cátions interfere na integridade do aparato da taxa de assimilação líquida de CO_2 e na regulação enzimática (SILVA et al., 2021).

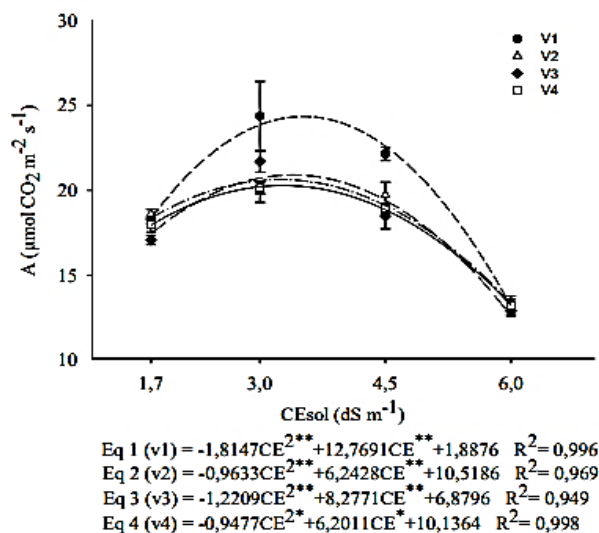
5.2.3 Taxa de assimilação líquida de CO_2 (A)

taxa de assimilação líquida de CO_2 também demonstrou comportamento quadrático em função da salinidade, com ponto ótimo estimado entre 3,0 e 3,5 $dS \cdot m^{-1}$ nos três experimentos. No experimento I (água sódica), a maior taxa de assimilação líquida de CO_2 ($24,35 \mu mol CO_2 m^{-2} \cdot s^{-1}$) foi registrada na vazão de $1 L \cdot min^{-1}$ e salinidade de $3,5 dS \cdot m^{-1}$. No experimento II (água cálcica), observou-se redução linear da taxa de assimilação líquida de CO_2 , com perda de até 45% entre o tratamento controle e o mais salino. No experimento III (água mista), as respostas variaram conforme a vazão adotada, sendo que valores intermediários ($2-3 L \cdot min^{-1}$) apresentaram melhor desempenho fisiológico em níveis salinos moderados ($3,0-4,5 dS \cdot m^{-1}$). A partir desse ponto, observou-se decréscimo acentuado na assimilação de CO_2 .

5.2.3.1 Efeito das Águas sódica (Experimentos I)

Figura 13 – Taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva e quatro diferentes vazões da solução nutritiva da água sódica.

A.

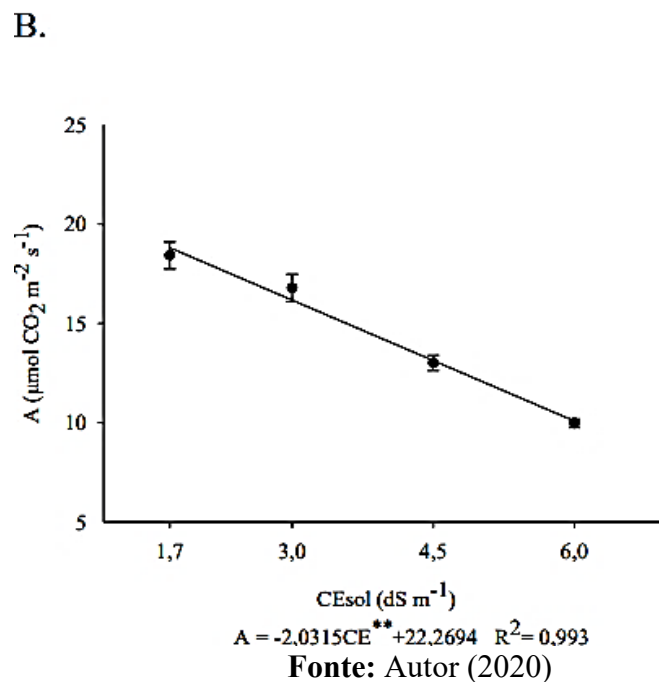


Fonte: Autor (2020)

No Experimento I (natureza sódica), os resultados da **Figura 13** revelam uma interação significativa entre a salinidade e as vazões da solução nutritiva ($p < 0,05$) para a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A). Observou-se um comportamento quadrático, no qual a vazão de $1 L \cdot min^{-1}$ se destacou, apresentando o melhor desempenho assimilatório líquida CO_2 ($24,35 \mu mol CO_2 m^{-2} \cdot s^{-1}$) sob salinidade de $3,5 dS \cdot m^{-1}$. Este valor superou as vazões de $2 L \cdot min^{-1}$, $3 L \cdot min^{-1}$ e $4 L \cdot min^{-1}$. Esse desempenho superior na menor vazão sob estresse moderado sugere que a dinâmica de fluxo mais lenta pode ter favorecido um ajuste osmótico mais eficiente e uma melhor oxigenação na zona radicular dentro dos canais NFT, permitindo a manutenção da turgidez foliar. Todavia, o declínio observado em salinidades mais elevadas indica que os mecanismos adaptativos são superados pela toxicidade iônica do Na^+ e pelo estresse oxidativo, que degradam pigmentos fotossintéticos e comprometem a integridade das membranas dos tilacoides. Esse padrão de resposta ao estresse por água sódica reforça a premissa de que a natureza do sal impõe restrições severas à bioenergética da planta, limitando a conversão de energia luminosa em biomassa (SILVA et al., 2021).

5.2.3.2 Efeito da Água cálcica (Experimentos II)

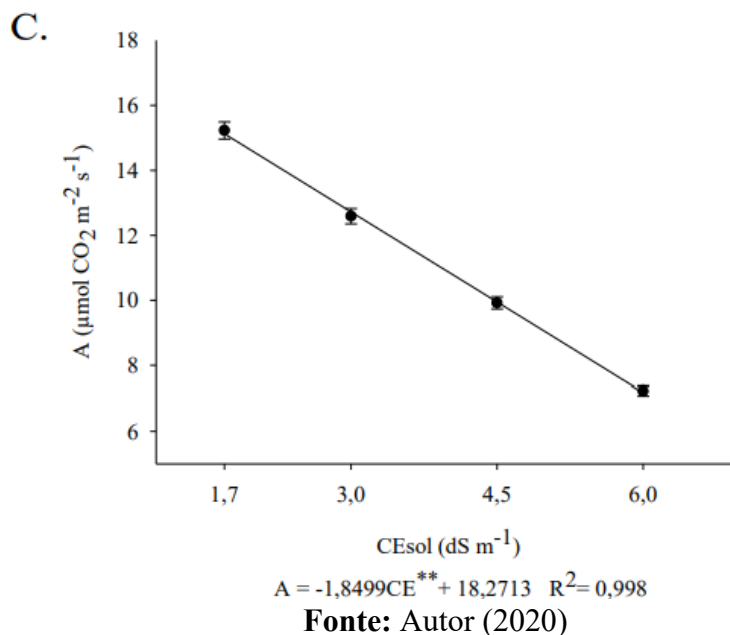
Figura 14 – Concentração interna (A) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva e quatro diferentes vazões da solução nutritiva da água cálcica.



Referente ao experimento II, a **figura 14** sobre taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), observa-se um efeito isolado para a salinidade, com resposta linear decrescente ($p < 0,01$), e um decréscimo de $2,031 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, para cada incremento unitário na salinidade, além de uma perda relativa de 45%, na comparação do tratamento controle $1,7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, com valor estimado da ordem de $18,43 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, com o maior nível de condutividade elétrica da solução nutritiva $6,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, com valor estimado da ordem de $9,97 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Esse padrão pode ser explicado por um possível ajustamento osmótico da planta até determinado nível de salinidade. No entanto, a exposição prolongada a elevados níveis salinos pode desencadear toxicidade iônica, desestruturação de membranas, redução da clorofila e foto-oxidação, afetando diretamente o desempenho assimilatório líquido do CO_2 (SANTOS, J. P. et al., 2022; TAIZ, L.; ZEIGER, E., 2024).

5.2.3.3 Efeito da Água mista (Experimentos III)

Figura 15 – Taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva da água mista.



No Experimento III (natureza mista), os resultados apresentados na **Figura 15** demonstram um declínio acentuado na taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) com o aumento da salinidade da solução nutritiva. É importante ressaltar que a interação entre os fatores salinidade e vazão não foi significativa ($p > 0,05$) para esta variável, o que indica que a condutividade elétrica da solução foi

o fator dominante e isolado na modulação da resposta da taxa de assimilação líquida de CO_2 , sobrepondo-se à dinâmica do fluxo hídrico no sistema NFT. Esse comportamento é atribuído ao efeito sinérgico da toxicidade iônica e do estresse osmótico, que promove a desidratação celular e restringe a condutância estomática, dificultando a difusão do CO_2 para o estroma do cloroplasto. Além das limitações estomáticas, a queda na taxa de assimilação líquida de CO_2 sob o domínio de águas mistas envolve fatores não estomáticos severos, como a degradação de pigmentos e danos fotoquímicos no Fotossistema II. A presença excessiva de íons como o magnésio e o sódio em desequilíbrio causa o desarranjo das membranas dos tilacoides, reduzindo a eficiência de conversão da energia luminosa e comprometendo a atividade enzimática da Rubisco. Essa vulnerabilidade da cultura do coentro à composição química das águas mistas ressalta que o prejuízo fisiológico atinge diretamente a integridade do aparato de assimilação líquida de CO_2 , independentemente da taxa de vazão aplicada (SILVA et al., 2021).

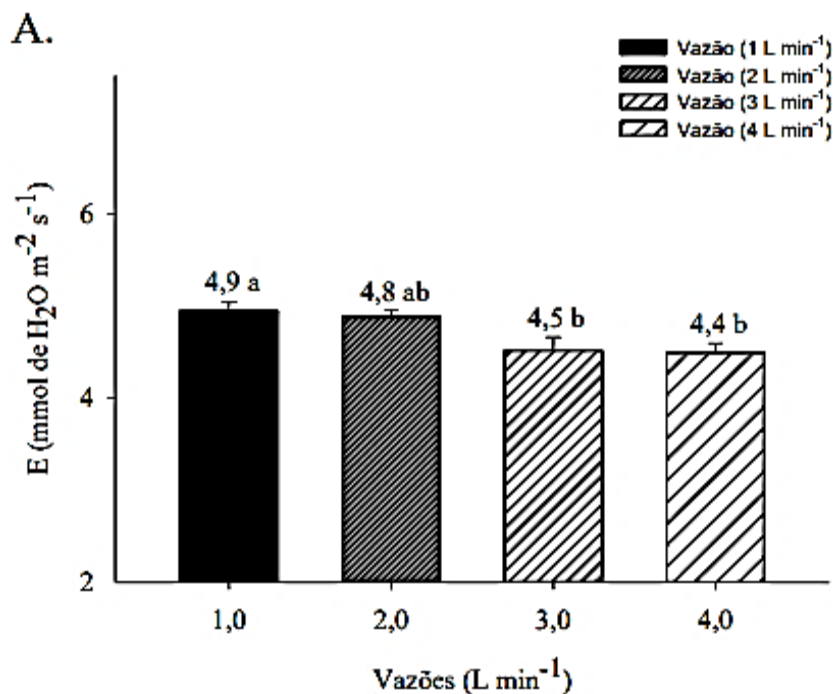
5.3 EFEITO DA TRANSPIRAÇÃO: A RELAÇÃO ENTRE FLUXO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA (VAZÃO)

As vazões de aplicação da solução nutritiva mostraram influência direta sobre a fisiologia da planta. Vazões mais baixas ($1-2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) promoveram maior tempo de contato da solução com o sistema radicular, otimizando a difusão iônica e a assimilação líquida de CO_2 (A). Por outro lado, vazões elevadas ($4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) podem ter reduzido a eficiência de uso da água, além de aumentar o consumo energético do sistema.

Esses achados corroboram os resultados de Soares et al. (2020), que ao trabalharem com couve-flor em sistema NFT e diferentes níveis de salinidade, observaram que a vazão de $1,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ promoveu melhor desenvolvimento fisiológico e morfológico das plantas. Tais evidências reforçam a necessidade de ajustar a vazão conforme o nível de salinidade da água, de modo a otimizar o uso dos nutrientes e preservar o funcionamento do sistema radicular.

5.3.1 Efeito da Água sódica (Experimentos I)

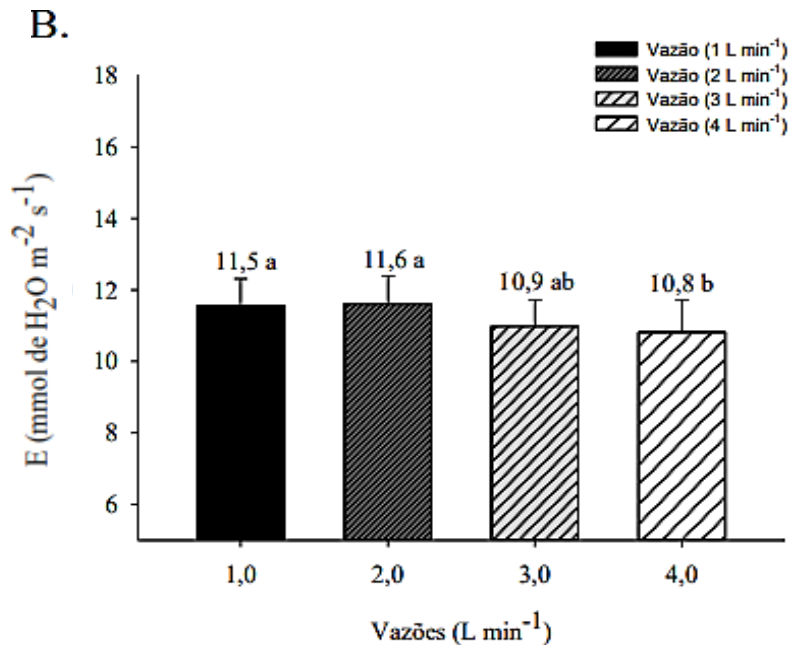
Figura 16 – Transpiração (E) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de vazão da solução nutritiva da água sódica.



O experimento I (natureza sódica), a taxa de transpiração (E) apresentada na **Figura 16** exibiu um declínio linear conforme a salinidade da solução nutritiva foi elevada. Este comportamento foi mais acentuado nas vazões de $1 L \cdot min^{-1}$ e $2 L \cdot min^{-1}$, enquanto as vazões maiores conferiram uma relativa estabilidade ao fluxo hídrico. A redução na E é uma resposta imediata ao decréscimo do potencial osmótico na solução, o que induz o fechamento estomático para preservar o turgor celular e evitar o colapso hídrico. Esta estratégia de economia de água, embora essencial para a sobrevivência em ambientes salinos, limita o resfriamento foliar e a absorção passiva de nutrientes. Estudos recentes indicam que, em hortaliças sob estresse salino, a manutenção da transpiração em níveis mínimos aceitáveis é crucial para evitar a queima das bordas das folhas (tipburn) causada pelo desequilíbrio iônico, especialmente sob o domínio de sódio (LIMA et al., 2023).

5.3.2 Efeito da Água cálcica (Experimentos II)

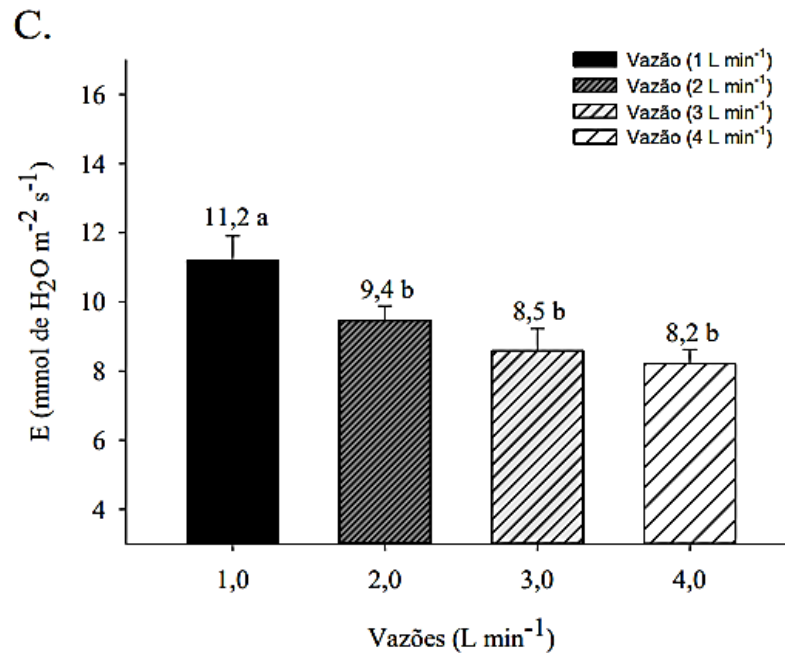
Figura 17 – Transpiração (E) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de vazão da solução nutritiva da água cálcica.



No Experimento II (natureza cálcica), os resultados da **Figura 17** revelam que a cultura do coentro obteve os maiores valores de transpiração (E) sob as menores vazões de circulação da solução nutritiva. Esse comportamento sugere que, sob o domínio de águas cálcicas, a menor velocidade de fluxo na fase inicial pode ter proporcionado uma dinâmica de absorção radicular mais equilibrada, permitindo que a planta mantivesse a turgidez celular e, conseqüentemente, o fluxo transpiratório. O cálcio atua como um importante mensageiro secundário, auxiliando na regulação da abertura estomática e na manutenção da estabilidade das membranas das células-guarda frente ao estresse osmótico. No entanto, o declínio observado com a elevação da salinidade confirma que o efeito do potencial osmótico eventualmente se sobrepõe ao benefício iônico do cálcio, forçando a planta a reduzir a E para evitar o déficit hídrico severo (LIMA et al., 2023).

5.3.3 Efeito da água mista (Experimentos III)

Figura 18 – Transpiração (E) do coentro cv. Verdão submetido a quatro diferentes níveis de vazão da solução nutritiva da água mista.



Referente ao experimento III (água mista), a **figura 18** sobre a transpiração é possível observar efeito isolado para o fator vazão da solução nutritiva, verificando-se maior transpiração na menor vazão $1 L \cdot min^{-1}$, com valor da ordem $11,21 \text{ mmol de } H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. com o aumento da vazão, ocorreu um fechamento estomático, como estratégia para aumentar a resistência estomática ao fluxo de vapor de água das folhas para a atmosfera, objetivando a manutenção do potencial de água nas folhas, evitando a desidratação das células guardas, resultando em restrição do fluxo de CO_2 (SILVA, M. G. et al., 2020).

6. CONCLUSÃO

O cultivo hidropônico de coentro em sistema NFT no semiárido pernambucano é tecnicamente viável com o uso de águas salobras, desde que respeitados os limites fisiológicos da cultura e o manejo adequado da solução nutritiva. Com base nos dados obtidos, conclui-se que:

1. **Tolerância à Salinidade:** O coentro apresenta tolerância fisiológica à salinidade da solução nutritiva até o limite de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$; acima deste nível, ocorre redução severa na condutância estomática e na taxa de assimilação líquida de CO_2 .
2. **Influência da Vazão:** O manejo da hidrodinâmica influencia as trocas gasosas, sendo que vazões intermediárias (entre $1,0$ e $2,0 \text{ L min}^{-1}$) otimizam a assimilação de CO_2 e auxiliam na mitigação do estresse salino.
3. **Composição Iônica:** A natureza química da água é determinante, sendo a composição iônica mista (presença de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) a mais prejudicial ao desempenho fisiológico da cultura em comparação às soluções puramente sódicas ou cálcicas.
4. **Viabilidade Sustentável:** O ajuste conjunto da vazão e da composição iônica configura-se como uma estratégia de manejo essencial para garantir a eficiência hídrica e a produção agrícola sustentável utilizando águas subterrâneas salobras na região.

7. REFERÊNCIAS

- AMARAL, K.; FERREIRA, D. M.; NAVON, J. A. **Avaliação das águas subterrâneas salobras do semiárido do Rio Grande do Norte: qualidade e impactos sob atividades agropecuárias.** *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 3, p. 1-12, 2021.
- ALVES, M. S. et al. **Estratégias de uso de água salobra na produção de coentro em hidroponia NFT.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 4, 2022.
- APARECIDO, L. E. de O. et al. **Köppen-Geiger climate classification and its changes in the State of Pernambuco, Brazil.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 142, p. 1197–1211, 2020.
- DALASTRA, C. et al. **Head lettuce production and nutrition in relation to nutrient solution flow.** *Horticultura Brasileira*, v. 38, p. 21–26, 2020.
- DIAS, A. S. et al. **Trocas gasosas e produção de coentro sob soluções nutritivas preparadas em águas salobras.** *Revista Ciência Agronômica*, 2021.
- FERREIRA, D. F. **SISVAR: um sistema computacional de análise estatística.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
- FURLANI, P. R. **Instruções para o cultivo de olerícolas de folhas pela técnica de hidroponia NFT.** Campinas: Instituto Agronômico, 1998. (Boletim Técnico, 168).
- GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados.** 2. ed. rev. e ampl. Fortaleza: INCTSal, 2021. p. 250–289.
- LIMA, G. S. de; SILVA, F. G. da; SOARES, L. A. dos A.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G. **Gas exchange and growth of leafy vegetables under salinity stress in hydroponic systems.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, n. 5, p. 340–348, 2023.

RHOADES, J. D. et al. **Managing saline water for irrigation: principles and practices.** FAO Irrigation and Drainage Paper 48. Rome: FAO, 1992.

SANTOS, J. P. et al. **Gas exchange and production of coriander under saline stress in a hydroponic system.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 2, p. 115–121, 2022.

SANTOS, M. A. S.; NAVON, J. A. **A utilização da água subterrânea em uma comunidade rural piauiense.** 2021. 97 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2021.

SILVA, C. C. N. et al. **O aquífero fissural no semiárido: análise de modelos com base em dados geológico-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestres.** *Águas Subterrâneas*, v. 37, n. 2, p. 1–15, 2023.

SILVA, J. S.; SILVA, E. F. F.; LIMA, N. S.; PESSOA, U. C. M.; ROLIM, M. M. **Ionic nature of brackish water and its effects on the physiology of hydroponic coriander.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 10, p. 670–677, 2021.

SILVA, M. G. et al. **Growth, production and water consumption of coriander in hydroponic system using brackish waters.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 8, p. 547–552, 2018.

SILVA, M. G. et al. **Yield and quality of coriander grown in a hydroponic system under different nutrient solution temperatures and salinities.** *Postharvest Biology and Technology*, v. 164, 2020.

SOARES, H. R. et al. **Salinity and flow rates of nutrient solution on cauliflower biometrics in NFT hydroponic system.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 4, p. 258–265, 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2024.

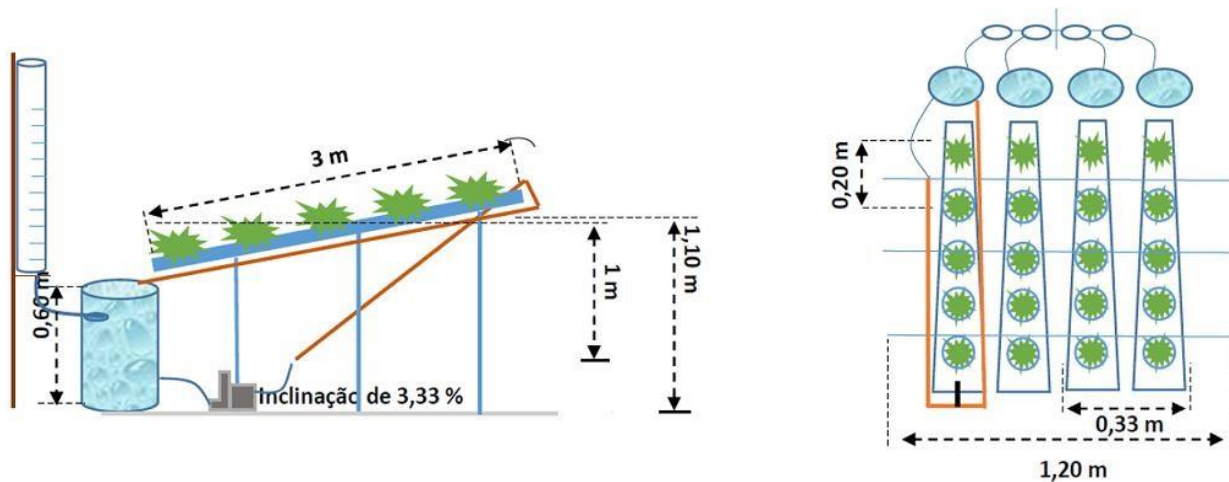
ANEXO A – ESTRUTURA FÍSICA DO EXPERIMENTO

Figura 1A. Vista frontal da casa de vegetação localizada no Departamento de Engenharia Agrícola-UFRPE.



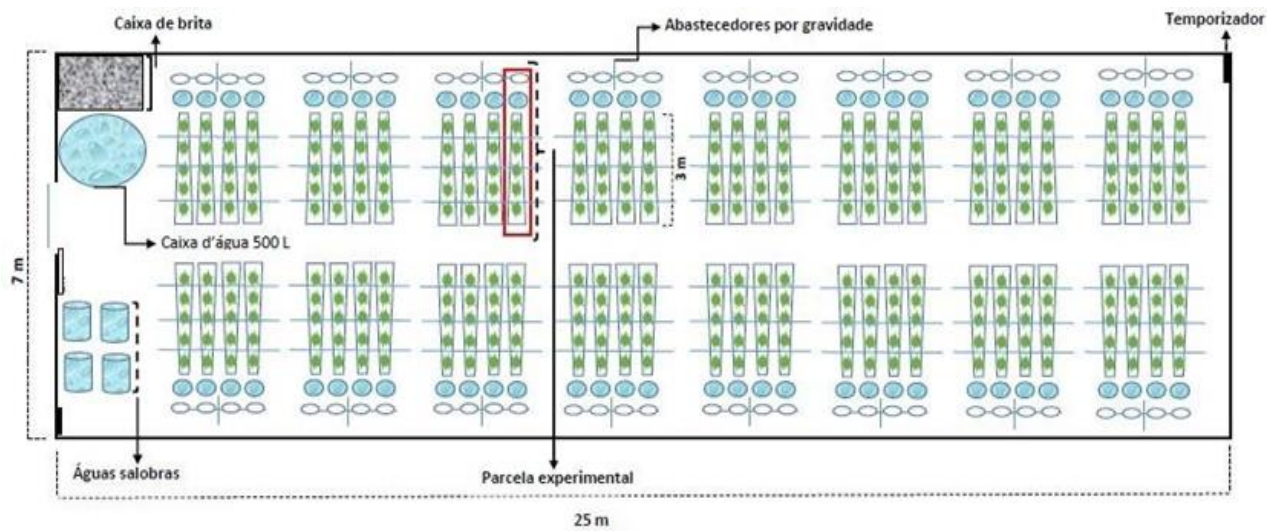
Fonte: Autor (2020)

Figura 2A. Vista lateral da parcela experimental (A) e medidas de espaçamento utilizadas para a produção hidropônica do coentro (B).



Fonte: Autor (2020)

Figura 3A. Croqui e vista superiores das parcelas experimentais usadas na pesquisa.



Fonte: Autor (2020)

Figura 4A. Registro da montagem, condução e higienização da estrutura experimental.



Fonte: Autor (2020)