



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

JOSÉ LUCAS MARTINS MELO

**POLÍMERO HIDRORETENTOR ALTERNATIVO PARA HORTICULTURA EM
CONDIÇÕES SALINAS**

FORTALEZA

2021

JOSÉ LUCAS MARTINS MELO

POLÍMERO HIDRORETENTOR ALTERNATIVO PARA HORTICULTURA EM
CONDIÇÕES SALINAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientadora: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.

Coorientador: Dr. Alcione Guimarães Freire.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M485p Melo, José Lucas Martins.
Polímero hidretentor alternativo para horticultura em condições salinas / José Lucas Martins Melo. –
2021.
81 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.
Coorientação: Prof. Dr. Alcione Guimarães Freire.

1. Polímero superabsorvente. 2. Casca de ovo. 3. Lactuca sativa. I. Título.

CDD 631.4

JOSÉ LUCAS MARTINS MELO

POLÍMERO HIDRORETENTOR ALTERNATIVO PARA HORTICULTURA EM
CONDIÇÕES SALINAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 06/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Alcione Guimarães Freire (Coorientador)
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

Profa. Dra. Judith Pessoa de Andrade Feitosa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade de conhecimento concebida, no âmbito profissional e pessoal.

Aos meus pais, Lizete e William, pelo amor, carinho, valiosos ensinamentos, e todo o apoio fornecido durante essa jornada.

A minha companheira, Luana Mateus, por sempre dar apoio e compartilhar as empreitadas da vida.

Aos amigos de mestrado, Isadora, Iana, Leny, Hosana, Max, Gabriel, Francisco, Carlos, Josué, Márcio e Alexandre, pela amizade firmada, pela alegria e a tristeza que vivenciamos juntos. Ênfase meu orgulho por todas as boas histórias que compartilhamos.

Aos meus orientadores, professora Dra. Mirian Cristina Gomes Costa e Dr. Alcione Guimarães Freire, pela orientação, conselhos, inspiração e por serem quem mais acreditaram no sucesso desse trabalho.

À Deyse Maia, técnica do Laboratório de Manejo do Solo, por ter compartilhado às técnicas de laboratório, também por ter sido uma ótima companhia e alguém que visivelmente quer o sucesso pessoal e profissional de todos que estão ao seu lado.

Aos membros da equipe do Laboratório de Manejo e Conservação do Solo: Rafaela, Luan, Brenda, Mariana e Lais pelas histórias compartilhadas e amizade.

Ao professor Carlos Tadeu, por sempre dividir conhecimentos estatísticos e estar à disposição de qualquer aluno.

Aos professores participantes da banca examinadora pelas valiosas contribuições, sugestões e disponibilidade em contribuir no intuito de aperfeiçoar o trabalho.

Às equipes de técnicos, professores e de manutenção do Departamento de Ciências do Solo, que facilitam o estudo em ciência do solo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código do financiamento 001.

“Vitória, afinal das contas, acho eu.”

Bilbo – O Hobbit

J.R.R Tolkien

RESUMO

A retenção de água por hidrogéis superabsorventes é afetada pela salinidade, havendo interesse no desenvolvimento de materiais tolerantes aos sais para uso na agricultura. Este estudo foi realizado para comprovar que um hidrogel alternativo à base de carbonato de cálcio retém mais água no solo e favorece a cultura da alface quando comparado a um hidrogel comercial à base de acrilamida e acrilato de potássio sem carbonato de cálcio em condições de déficit hídrico, levando a resultados mais favoráveis em relação a ausência de polímeros em resposta à salinidade crescente. Foram instalados dois experimentos: um em laboratório e outro em casa de vegetação, ambos com delineamento inteiramente aleatorizado, em fatorial 3x5 com quatro repetições. O primeiro fator de tratamento em ambos os experimentos foi: solo sem hidrogel (SH), solo + 2 g kg⁻¹ de hidrogel alternativo (HA) e solo + 2 g kg⁻¹ de hidrogel comercial (HC). O segundo fator de tratamento foi composto por cinco condutividades elétricas (CE) da água de irrigação (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m). No primeiro experimento foi avaliada a curva de retenção de água no solo com os tratamentos nos pontos de baixa (0 -2 -6 e -10 kPa) e alta tensão (-33 -700 -e -1500 kPa), calculada a disponibilidade de água e a distribuição de poros. No segundo experimento, no qual a alface foi cultivada no solo com os tratamentos previamente mencionados, foram feitas medidas de desenvolvimento das plantas, atributos fisiológicos, biomassa, qualidade e acúmulo de nutrientes. Realizou-se análise da normalidade e transformação dos dados que não apresentaram distribuição normal. Procedeu-se à análise de variância, seguida pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para os fatores qualitativos e análise de regressão para os fatores quantitativos. No tratamento HA, a retenção e a disponibilidade da água no solo foram superiores às observadas nos tratamentos HC e SH. A distribuição de poros em HA foi semelhante à observada em SH, com frequência e número de poros mais elevadas até a CE de 2 dS/m. O HA foi superior ao HC em termos de massa fresca (22,89 e 1,07 g planta⁻¹, respectivamente) e seca (16,39 e 1,02 g planta⁻¹, respectivamente) das plantas de alface. Teores de prolina e nitrato foram maiores em HC (0,114 e 2,15 $\mu\text{mol g}^{-1}$) do que em HA (0,0915 e 1,345 $\mu\text{mol g}^{-1}$). Enquanto o cloreto em HC (108,14 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) foi maior que em HA (103,01 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). O tratamento HA favoreceu maior absorção dos macronutrientes e atenuação dos efeitos do excesso de sódio no solo nas condutividades elétricas crescentes de água de irrigação.

Palavras-chave: polímero superabsorvente; casca de ovo; *Lactuca sativa*.

ABSTRACT

Water retention by superabsorbent hydrogels is affected by salinity, and there is interest in developing salt-tolerant materials for use in agriculture. This study was conducted to prove that an alternative calcium carbonate based hydrogel retains more water in the soil and favors the lettuce crop when compared to a commercial acrylamide and potassium acrylate based hydrogel without calcium carbonate under water deficit conditions, leading to more favorable results compared to no polymer in response to increasing salinity. Two experiments were set up: one in the laboratory and the other in the greenhouse, both with a fully randomized design, in a 3x5 factorial design with four repetitions. The first treatment factor in both experiments was: soil without hydrogel (SH), soil + 2 g kg⁻¹ of alternative hydrogel (HA) and soil + 2 g kg⁻¹ of commercial hydrogel (HC). The second treatment factor was composed of five electrical conductivities (EC) of the irrigation water (0; 0.5; 1.0; 2.0 and 4.0 dS/m). In the first experiment the soil water retention curve was evaluated with the treatments at low (0 -2 -6 and -10 kPa) and high (-33 -700 -and -1500 kPa) stress points, water availability and pore distribution were calculated. In the second experiment, in which lettuce was grown in soil with the previously mentioned treatments, measurements of plant development, physiological attributes, biomass, quality, and nutrient accumulation were made. Analysis of normality was performed and data that did not present a normal distribution were transformed. Analysis of variance was performed, followed by Tukey's test ($p < 0.05$) for qualitative factors and regression analysis for quantitative factors. In the HA treatment, soil water retention and availability were superior to those observed in the HC and SH treatments. The pore distribution in HA was similar to that observed in SH, with higher pore frequency and number up to an EC of 2 dS/m. HA was superior to HC in terms of fresh (22.89 and 1.07 g plant⁻¹, respectively) and dry (16.39 and 1.02 g plant⁻¹, respectively) mass of lettuce plants. Proline and nitrate contents were higher in HC (0.114 and 2.15 $\mu\text{mol g}^{-1}$) than in HA (0.0915 and 1.345 $\mu\text{mol g}^{-1}$). While chloride in HC (108.14 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) was quantitatively higher than in HA (103.01 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). The HA treatment favored greater uptake of macronutrients and attenuation of the effects of excess soil sodium at increasing electrical conductivities of irrigation water.

Keywords: superabsorbent polymer; eggshell; *Lactuca sativa*.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Curvas características da água no solo para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC) mediante irrigação com água nas condutividades elétricas (dS/m^{-1}) de 0 (A); 0,5 (B); 1,0 (C); 2,0 (D) e 4,0 (E)..... 36
- Figura 2 – Curvas características de água no solo em resposta aos tratamentos com condutividades elétricas (CE) distintas (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m^{-1}) mediante ausência de hidrogel – SH (A), hidrogel alternativo – HA (B) e hidrogel comercial – HC (C)..... 39
- Figura 3 – Água disponível no solo em resposta aos tratamentos com condutividades elétricas (CE) distintas (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m^{-1}) mediante ausência de hidrogel – SH, hidrogel alternativo – HA e hidrogel comercial – HC..... 41
- Figura 4 – Curvas de distribuição de poros em resposta aos tratamentos com condutividades elétricas (CE) distintas (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m) mediante ausência de hidrogel – SH (A), hidrogel alternativo – HA (B) e hidrogel comercial – HC (C)..... 42
- Figura 5 – Massa fresca – MFPA (A) e massa seca de parte aérea – MSPA (B) de plantas de alface submetidas aos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC)..... 45
- Figura 6 – Massas fresca – MFPA (A) e seca da parte aérea – MSPA (B) de plantas de alface em função da condutividade elétrica da água de irrigação mediante tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC)..... 47
- Figura 7 – Acúmulo de N em plantas de alface em resposta à aplicação de hidrogel (A) e à salinidade da água de irrigação (B)..... 49
- Figura 8 – Acúmulo de potássio (A) e sódio (B) em plantas de alface em função dos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC) 50

Figura 9 – Acúmulo de potássio (A) e sódio (B) em plantas de alface em resposta ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC)...	52
Figura 10 – Índice SPAD representativo do teor de clorofila total em plantas de alface submetidas aos tratamentos com aplicação de hidrogel (A) e níveis crescentes de salinidade (B).....	54
Figura 11 – Respostas dos indicadores de estresse prolina (A e B), nitrato (C e D) e cloreto (E e F) em tecido vegetal de alface em resposta aos tratamentos com sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC) e em resposta aos tratamentos com condutividade elétrica (CE) crescente.....	56
Figura 12 – Disponibilidade de fósforo no solo nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC).....	60
Figura 13 – Disponibilidade de cálcio (A), magnésio (B), potássio (C) e sódio (D) no solo nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC).....	62
Figura 14 – Disponibilidade de cálcio (A), magnésio (B), potássio (C) e sódio (D) no solo nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC) em função de diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação.....	63
Figura 15 – Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (V%) e soma de bases (SB) no solo cultivado com alface em função de condutividade elétrica (CE) crescente da água de irrigação.....	65
Figura 16 – Condutividade elétrica do solo em resposta ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC).....	67
Figura 17 – Porcentagem de sódio trocável do solo em resposta ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC).....	68

Figura 18 – Teor de carbono do solo cultivado com alface com os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC).....	69
Figura 19 – Volume de água necessário para irrigar plantas de alface nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC) submetidas à condutividade elétrica (CE) crescente da água de irrigação.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Primeira análise do solo realizada para a granulometria, classe textural e caracterização dos atributos químicos na camada de 0-20 cm do solo utilizado no presente estudo.....	28
Tabela 2 – Composição química elementar (em massa %) do hidrogel comercial Forth Gel® e do hidrogel alternativo à base de casca de ovo (Pam-Ac/ES) utilizado no presente estudo.....	30
Tabela 3 – Resumo da análise da variância (ANOVA) para atributos avaliados nas plantas em resposta aos tratamentos referentes à aplicação de hidrogel (H) e condutividade elétrica (CE) da água de irrigação.....	44
Tabela 4 – Resumo da análise da variância (ANOVA) para atributos do solo e volume de água gasto na irrigação em resposta aos tratamentos referentes à aplicação de hidrogel e condutividade elétrica da água de irrigação.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CE	Condutividade elétrica
Ceasa	Centrais de Abastecimento do Ceará S/A
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
C/N	Relação carbono: nitrogênio
CTC	Capacidade de troca de cátions
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
H	Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
m%	Saturação por alumínio
N	Nitrogênio
SB	Soma de Bases
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
V%	Saturação por bases

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	A cultura da alface	17
2.2	Cultivo de alface sob salinidade	18
2.3	Demanda de água para produção de hortaliças	20
2.4	Condições de clima e solo do semiárido brasileiro como desafios à produção de hortaliças	21
2.4.1	<i>Limitações hídricas</i>	21
2.4.2	<i>Solos do semiárido brasileiro</i>	22
2.5	Polímeros superabsorventes como condicionadores de solo para a produção de hortaliças	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Experimento em laboratório	27
3.1.1	<i>Solo</i>	27
3.1.2	<i>Polímeros</i>	29
3.1.3	<i>Água Salina</i>	30
3.1.4	<i>Delineamento experimental e tratamentos</i>	30
3.1.5	<i>Instalação e condução do experimento</i>	30
3.1.6	<i>Avaliações</i>	31
3.2	Experimento em laboratório	32
3.2.1	<i>Área experimental e tipo de solo</i>	32
3.2.2	<i>Delineamento experimental e tratamentos</i>	32
3.2.3	<i>Instalação e condução do experimento</i>	32
3.2.4	<i>Avaliações</i>	33
3.2.4.1	<i>Produção de biomassa</i>	33
3.2.4.2	<i>Acúmulo de macronutrientes e de sódio no material vegetal</i>	33
3.2.4.3	<i>Indicadores bioquímicos de estresse hídrico e salino nas plantas</i>	34
3.2.4.4	<i>Atributos de solo</i>	34
3.2.4.5	<i>Análises estatísticas</i>	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Experimento em laboratório	35

4.1.1	<i>Curva de retenção de água no solo</i>	35
4.1.2	<i>Água disponível</i>	40
4.1.3	<i>Distribuição de poros por tamanho</i>	41
4.2	Experimento em casa de vegetação	43
4.2.1	Desenvolvimento das plantas	44
4.2.2	<i>Acúmulo de macronutrientes e sódio no material vegetal</i>	48
4.2.3	<i>Indicadores bioquímicos de estresse hídrico e salino nas plantas</i>	54
4.2.4	<i>Atributos químicos do solo e volume de água requerido na irrigação</i>	58
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste é responsável por 55.841 toneladas do total de alface produzido no Brasil, correspondente a 9,7% da produção nacional, com destaque para os estados do Ceará e Pernambuco (IBGE, 2016). O Ceará possui microrregiões que estão elencadas como principais fornecedoras de alface para a Central de Abastecimento do Estado (Ceasa - CE). Essas microrregiões são o Maciço de Baturité e a Chapada da Ibiapaba que apresentaram em 2019 produções de 183.860 kg e 611.170 kg, respectivamente (CONAB, 2020).

Nas regiões de clima semiárido, onde está inserido grande parte do Estado do Ceará e da região nordeste brasileira, o regime hídrico limitante faz com que muitos produtores de alface e de outras hortaliças não disponham dos recursos necessários para o cultivo hidropônico, tornando necessário o uso do solo como substrato para o desenvolvimento das culturas. Contudo, o cultivo da alface e de outras hortaliças no solo também depende de boa disponibilidade hídrica, sendo necessárias alternativas de manejo que proporcionem maior retenção de água no solo por mais tempo, disponibilizando essa água às plantas. Adicionalmente, nas regiões semiáridas há favorecimento do acúmulo de sais no solo e na própria água a ser utilizada para irrigação, o que constitui outro fator a ser superado para garantir a produção agrícola.

Géis superabsorventes, constituídos ou não por poliacrilamida ou acrilato, também denominados hidrogéis ou polímeros hidroretentores, têm potencial de reter grandes quantidades de água de modo que têm sido considerados para uso na agricultura como condicionadores de solo, principalmente na silvicultura, no paisagismo, na fruticultura e na horticultura. Contudo, o custo de obtenção dos hidrogéis e a redução em seu potencial de retenção de água mediante condições salinas são aspectos que podem desfavorecer seu uso agrícola.

O desenvolvimento de géis superabsorventes alternativos é um desafio de inovação pois um produto que seja economicamente viável e tecnicamente eficiente na retenção de água no solo e disponibilização dessa água às plantas, favorece o desenvolvimento vegetal mesmo em condições salinas. Nesse contexto, géis produzidos à base de resíduos agroindustriais podem ser promissores para uso na agricultura, mais especificamente na horticultura, principalmente se apresentarem menor custo de produção e maior tolerância às condições salinas do solo e/ou da água utilizada na irrigação.

O presente estudo foi realizado para responder às seguintes hipóteses: a) Há limite na salinidade da água de irrigação que proporciona maior retenção de água por polímero

alternativo à base de carbonato de cálcio e esse limite é superior àquele observado para polímero à base de acrilamida e acrilato de potássio; b) Polímero superabsorvente à base de carbonato de cálcio, quando comparado a um polímero à base de acrilamida e acrilato de potássio, promove maior retenção de água no solo e maior disponibilidade de água às plantas, favorecendo o desenvolvimento, a produção e a qualidade da alface cultivada em condições de déficit hídrico e de salinidade; c) A aplicação do polímero alternativo em condições salinas apresenta resultados favoráveis, distinguindo-se mais do que o polímero comercial em relação à ausência do polímero.

O objetivo geral do estudo foi determinar atributos físicos e químicos do solo, bem como a produção e a qualidade da alface em resposta a um polímero hidroretentor alternativo, elaborado à base de carbonato de cálcio e produzido com casca de ovo, comparando-o com um polímero comercial à base de acrilamida e acrilato de potássio que não contém carbonato de cálcio e com a ausência de polímero mediante níveis de salinidade crescentes da água de irrigação.

Os objetivos específicos foram: a) Avaliar a curva de retenção, a água disponível e a distribuição de poros no solo com polímero alternativo e polímero comercial, bem como no solo sem polímero, mediante níveis de salinidade crescentes da água de irrigação; b) Avaliar o desenvolvimento e o acúmulo de macronutrientes na alface desenvolvida em solo que recebeu polímero alternativo, polímero comercial e que não recebeu polímeros, submetidos a níveis de salinidade crescentes da água de irrigação; c) Avaliar atributos fisiológicos das plantas de alface que indiquem a ocorrência de déficit hídrico mediante uso do polímero alternativo, do polímero comercial e da ausência de polímeros, mediante níveis de salinidade crescentes da água de irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da alface

Originária das regiões mediterrâneas, a alface (*Lactuca sativa* L.) faz parte da família Asteraceae e suas folhas são consumidas principalmente *in natura* (RODRIGUES *et al.*, 2018), permitindo caracterizá-la como a folhosa mais importante na alimentação humana. No que diz respeito ao potencial nutricional, a hortaliça fornece carotenoides precursores de vitamina A, sendo o β -caroteno o mais importante e abundante, além de fornecer vitamina C e potássio (SILVA; MURA, 2011).

A diversidade de cultivares de alface no mercado explora os diferentes formatos,

tamanhos e cores. As cultivares mais produzidas comercialmente no Brasil são adaptadas às mais diversas condições climáticas com genótipos tolerantes à seca, doenças e ao pendoamento, destacando-se Repolhuda Lisa, Repolhuda Crespa ou Americana, Solta Lisa, Solta Crespa, Solta Crespa Roxa e Tipo Romana (HENZ; SUINAGA, 2009). A ordem de importância econômica dos tipos de alface é: crespa, americana, lisa e romana (SALA; COSTA, 2012).

A preferência do consumo de algumas variedades de alface decorre das características agronômicas. Nos anos 1980, a alface manteiga era a mais consumida no país, mas, em seguida, aumentou o consumo da alface crespa, principalmente a cv. Grand Rapids (SALA e COSTA, 2012). Essa cultivar é o padrão de referência da alface crespa com presença de folhas tenras flabeladas e flexíveis com coloração verde claro, bordos foliares ondulados, boa produção de massa foliar e crescimento rápido (ciclo de aproximadamente 30 dias, dependendo da região e época de plantio) (SALA e COSTA, 2012).

Devido ao melhoramento genético que promoveu menores injúrias na comercialização, a cv. Grand Rapids vem ganhando mais espaço (SALA e COSTA, 2012). Outra mudança no consumo varietal de alface no Brasil foi a aceitação crescente da alface americana, enquanto que as variedades mimosa, romana e vermelha tiveram baixa expressão nos cultivos quando comparadas às variedades crespa ou americana (SALA; COSTA, 2012).

2.2 Cultivo de alface sob salinidade

A área de produção de alface no Brasil é de, aproximadamente, 35 mil ha, predominando a cv. crespa (SOUSA *et al.*, 2014; SUINAGA *et al.*, 2013), sendo que parte dessa área cultivada está em propriedades que possuem sistema de produção familiar (COSTA *et al.*, 2012). Essa realidade não difere muito da produção agrícola do nordeste brasileiro, em que a maioria das unidades rurais produtoras da hortaliça são constituídas pelos próprios integrantes familiares.

A produção da alface é prejudicada em muitos locais devido às intempéries climáticas, ocasionando redução na oferta do produto. O cultivo protegido ajuda a garantir disponibilidade de alface ao longo do ano quando as variações climáticas desfavorecem o cultivo convencional. Por ser uma cultura exigente em água, o manejo adequado desse recurso é fundamental por, primariamente, suprir as necessidades hídricas, minimizar problemas com doenças e evitar a perda de nutrientes (KOETZ *et al.*, 2006).

De forma geral, o desenvolvimento das hortaliças é influenciado pela presença de água no solo, de modo que a limitação hídrica afeta diretamente a produtividade e a qualidade. Assim, a irrigação torna-se uma técnica relevante para elevar a produção (SANTANA;

MANCIN; RIBEIRO, 2016). No caso da cultura da alface, a irrigação está ligada a irregularidade de chuvas que restringe o desenvolvimento vegetativo, principalmente em regiões semiáridas em que, mesmo no período chuvoso, ocorre déficit hídrico devido a elevada evapotranspiração (MAGALHÃES *et al.*, 2015).

A alface exige até três irrigações diárias para viabilizar sua produção nas condições semiáridas (CRUZ *et al.*, 2011). Visando bom rendimento por hectare, alguns autores recomendam a irrigação para esta cultura em torno de 120 e 125% da evaporação média do tanque Classe A (ARAÚJO *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2019), embora a lâmina de água necessária varie de acordo com as exigências hídricas da cultivar e variedade adotada (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2010; VILAS BOAS *et al.*, 2007).

Estratégias no manejo da irrigação melhoram características comerciais da alface cultivada em regiões sujeitas ao déficit hídrico. Lâminas de irrigação afetam número de folhas, circunferência de cabeça, diâmetro do caule, peso total da planta e peso comercial. Doses de sais, principalmente aqueles considerados nutrientes para a cultura, podem aumentar a produtividade, conforme observado com doses crescentes de KCl aumentando a produtividade da cv. Raider (KOETZ *et al.*, 2006). Porém, o manejo da irrigação deve ser cuidadoso, pois lâmina de irrigação correspondente a 60% da evapotranspiração aumenta a eficiência do consumo de água da alface, mas afeta negativamente a produtividade (KOETZ *et al.*, 2006; SILVA e QUEIROZ, 2013; VALERIANO *et al.*, 2016).

Seja para produção hidropônica ou para cultivos no solo de canteiros, um dos grandes desafios para produção de alface e de outras hortaliças é a garantia da disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade, bem como o uso eficiente da água. Esses desafios se tornam ainda maiores quando se pensa na produção da hortaliça em regiões de clima semiárido.

Além da falta de água, a salinidade é outro problema que afeta as regiões semiáridas. O estresse causado pelo déficit hídrico e pela salinidade provoca efeitos fisiológicos nas hortaliças. Os efeitos são: acúmulo de ácido abscísico que promove fechamento dos estômatos, reduz a perda de água pela respiração e, conseqüentemente, diminui a taxa fotossintética; e desidratação celular que provoca perda de turgor celular e aumento das concentrações de íons no interior das células, redução da expansão celular e foliar, abscisão foliar, alteração na participação do carbono, citotoxicidade iônica e morte celular (TAIZ *et al.*, 2017).

Os efeitos da salinidade em hortaliças ocorrem já a partir da germinação, quando o potencial é maior no solo ou substrato, a capacidade de absorção de água pela semente é reduzida, afetando o potencial de germinação, vigor de sementes e desenvolvimento vegetativo

(LOPES; DE MACEDO, 2008). Na alface, moderadamente tolerante aos efeitos de sais, o aumento da salinidade na água utilizada para irrigação provoca formação de cabeças pequenas, mudança na coloração de folhas e textura diminuindo o peso fresco da hortaliça (DIAS *et al.*, 2005a; GERVÁSIO; CARVALHO; SANTANA, 2000; VIANA; FERNANDES; GHEYI, 2001).

As respostas bioquímicas ao estresse salino nas plantas envolvem o acúmulo de aminoácidos como a prolina que é responsável pelo ajustamento osmótico sem causar danos aos tecidos. Quando as concentrações de prolina estão acima de $5 \mu\text{mol g}^{-1}$ ocorrem danos ao tecido vegetal; redução do conteúdo de clorofila em plantas sensíveis e o aumento do conteúdo de clorofila em plantas tolerantes; e, por fim, acúmulo do íon nitrato nas folhas (MUNNS, 1993; PAULUS *et al.*, 2010).

2.3 Demanda de água para produção de hortaliças

O consumo de recursos hídricos em um país depende de dois fatores: consumo de água pela população e consumo para produzir mercadorias como as hortaliças (HOEKSTRA e MEKONNEN, 2012). Atualmente, a demanda por recursos hídricos para a produção de vegetais é de cerca de $300 \text{ m}^3/\text{ton}$ e 10 litros de água para produzir 1kg de massa fresca vegetal (MEKONNEN e HOEKSTRA, 2010). Por se tratar de um recurso imprescindível, as hortaliças, tanto em condições de campo ou ambiente protegido, têm seu desenvolvimento afetado pela quantidade de água disponível, de modo que a deficiência hídrica é o fator mais limitante à qualidade e produtividade (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 1996)

Para contornar a problemática em regiões com escassez hídrica são adotadas estratégias que permitam o armazenamento de água, a exemplo da região semiárida brasileira onde os agricultores são incentivados, por meio de iniciativas governamentais, a utilizarem sistemas de captação e armazenamento de águas pluviais (cisternas) para posterior utilização eficiente desse recurso na produção de hortaliças e demais atividades (FERREIRA *et al.*, 2016).

Outra alternativa é a utilização de efluente tratado que pode ser utilizado como uma fonte hídrica e de nutrientes para aplicação na agricultura, desde que seu uso seja bem planejado, até em períodos de estiagem (SCHAER-BARBOSA; SANTOS; MEDEIROS, 2014). Para esse uso deve-se obedecer as normas vigentes para aplicação de efluentes, o que envolve a adoção dos tratamentos necessários, determinação da qualidade microbiológica, o tipo de cultura e do método de irrigação (PERIN, 2006).

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 1992) recomenda que águas residuárias empregadas como fonte de água alternativa na agricultura

sejam utilizadas a partir de um sistema adequado de aplicação. Desse modo, seu manejo deve ser determinante na diminuição da contaminação da cultura e do ambiente, na redução da salinidade, na melhoria da produtividade da cultura, na garantia da segurança para consumo humano e na redução dos riscos de toxicidade.

Há também a viabilidade da produção de hortaliças por hidroponia já que é um método alternativo que está englobado no cultivo protegido, no qual o solo é substituído por uma solução nutritiva que fornece os nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas (GRAVES, 1983; JENSEN e COLLINS, 1985; RESH, 1996).

Quando o cultivo das hortaliças é feito no solo e não em sistemas hidropônicos, para contornar ou amenizar a baixa disponibilidade hídrica é importante adotar estratégias de manejo que permitam maior retenção e disponibilização de água às plantas. Destaque é dado às estratégias que permitem aumentar os teores de matéria orgânica e melhorar a estrutura do solo. Estratégias que envolvem o uso de condicionadores de solo também são consideradas, desde que sejam viáveis do ponto de vista técnico e econômico.

2.4 Condições de clima e solo do semiárido brasileiro como desafios à produção de hortaliças

2.4.1 Limitações hídricas

Considerando a demanda hídrica para produção de hortaliças mencionada no item anterior, compreende-se que as regiões secas do mundo – dentre as quais se insere o semiárido brasileiro - apresentam mais limitações para a produção desse tipo de cultura. As mudanças climáticas globais - e os eventos extremos a elas associados, tais como as secas mais intensas - podem aumentar as limitações para a produção de hortaliças no que diz respeito à disponibilidade de água.

No início dos anos 2000, Cunha *et al.* (2002) deduziram que a mudança na dinâmica climática afetaria a intensidade, qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos: sutis mudanças na precipitação provocariam variações na distribuição temporal dos recursos ou, em outras palavras, haveria diferentes disponibilidades de acordo com a localidade, levando à crise hídrica.

A crise hídrica no Brasil ganhou notoriedade com a seca que ocorreu em São Paulo nos anos de 2013 a 2015, evidenciada pela má gestão e manejo do recurso hídrico no sistema Cantareira, demonstrando a vulnerabilidade de como é a percepção do brasileiro em relação ao uso da água (MARENGO *et al.*, 2015). Contudo, na região Nordeste do Brasil o déficit hídrico sempre foi um problema que, na verdade, afeta todo semiárido brasileiro (MARENGO, 2006).

A zona semiárida brasileira tem 969.589 km² de extensão e engloba os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, boa parte da Paraíba e Pernambuco, oeste de Alagoas e Sergipe, sudeste do Piauí, porção central da Bahia e uma faixa que aborda do norte de Minas Gerais, seguindo o Rio São Francisco e o vale seco da região média do rio Jequitinhonha (BRASIL, 2005). Esta zona particulariza-se por secas periódicas, as quais podem ocorrer na forma de drástica variabilidade espacial e/ou temporal da precipitação pluvial anual, resultando na frequente ocorrência de longos períodos sem chuva, ou seja, veranicos, e conseqüentemente, em eventos de estiagem resultando em períodos secos em que a produção agrícola é afetada drasticamente, a pecuária é debilitada ou dizimada e as reservas de água de superfície se esgotam, caracterizando o Polígono das Secas (REBOUÇAS, 1997).

Pelo sistema de Köppen (1923), o clima local no semiárido brasileiro é do tipo Aw por apresentar estação chuvosa de verão e estação seca de inverno, caracterizado por pluviosidade baixa e irregular concentrada em apenas três meses do ano, na faixa entre 300 e 900 mm/ano, com temperaturas médias anuais variando entre 26 a 29°C. O quadro climático descrito gera umidade relativa do ar que apresenta médias anuais por volta de 50% e insolação que chega ao patamar de 2800/h/ano. Como consequência, tem-se um elevado déficit hídrico que chega a atingir 2200 mm/ano, inviabilizando algumas soluções hídricas, a exemplo dos açudes, sempre tidos como solução para a problemática do semiárido (REBOUÇAS, 2001). Em termos de vegetação, há predominância de cobertura vegetal constituída por espécies decíduas e caducifólias, com forte presença de cactáceas (PEREIRA, 2012).

As condições climáticas do semiárido brasileiro representam limitação na disponibilidade de água para o cultivo de hortaliças como a alface, exigindo alternativas que viabilizem sua produção. Além disso, fatores ambientais como luminosidade e temperatura elevadas alteram o ciclo vegetativo da cultura, resultando em taxas variáveis de crescimento e alterações na morfologia das plantas (SOUZA *et al.*, 2018).

2.4.2 Solos do semiárido brasileiro

No semiárido brasileiro predominam as classes dos Neossolos (Litólicos, Quartzarênicos e Regolíticos), Latossolos, Argissolos, Luvisolos, Planossolos, Cambissolos e também podem ser encontrados Neossolos Flúvicos, Vertissolos, Chernossolos em menor frequência (CUNHA *et al.*, 2010). Os solos, que constituem recurso essencial no setor produtivo primário, no semiárido brasileiro são predominantemente pouco desenvolvidos e apresentam baixa capacidade de armazenamento de água, trazendo ainda mais dificuldades para a produção agrícola no contexto de uma região com baixa disponibilidade hídrica (JACOMINE, 1996). Do

ponto de vista agrícola são solos com grande potencial, embora necessitem de manejo adequado devido sua tendência à salinização e à sodificação (JACOMINE, 1996; PEDROTTI *et al.*, 2015).

A baixa precipitação pluvial e a alta taxa de evaporação contribuem para a salinização e/ou sodificação dos solos nas regiões semiáridas, pois os sais não são lixiviados e acumulam-se no solo, dificultando o desenvolvimento de plantas cultivadas (BARROS *et al.*, 2004, 2006). Esse excesso de sais no solo compromete a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas, afetando diretamente o potencial osmótico do solo. Adicionalmente, as altas concentrações de sódio trocável ocasionam degradação estrutural do solo devido a dispersão da argila, além de causar toxidez nas plantas, podendo até impedir a germinação das sementes e o desenvolvimento das raízes (BATISTA *et al.*, 2002)

A convergência dos aspectos mencionados a respeito do clima e do solo faz com que a designação de seca se traduza num período prolongado de baixos índices pluviométricos, ou sua ausência, em que a perda de umidade do solo é superior ao seu reestabelecimento e, por ser assim, é considerado como um dos fenômenos naturais de maior impacto e ocorrência no mundo (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

A demanda por água de uma cultura agrícola depende de vários fatores do sistema solo-planta-clima que têm efeitos interativos e isolados. Isso afeta culturas de interesse econômico e social principalmente na região Nordeste brasileira que possui apenas 3,3% da água doce do país (MAY, 2004), dificultando o cultivo de hortaliças de modo intensivo. Hortaliças que são bastante exigentes como a alface, demandando mais área e água que outras hortaliças como beterraba, cenoura, espinafre, repolho e rúcula, têm sua produção comprometida nas condições edafoclimáticas de regiões semiáridas (ANDRADE FILHO *et al.*, 2010).

Apesar da limitação hídrica, existem estratégias que, desde que bem aplicadas, promovem o manejo adequado dos recursos, permitindo a produção agrícola, incluindo hortaliças. Um exemplo é a utilização de água de baixa qualidade para a irrigação das culturas. De acordo com Cruz *et al.*, (2010), na caracterização das águas dos poços no Nordeste brasileiro, verifica-se a predominância daquelas que apresentam níveis elevados de salinidade. Esse tipo de água tem potencial de uso, conforme mostrado no estudo de Santos *et al.* (2010) que utilizaram água subterrânea salobra na produção de alface em sistema hidropônico, mas que também poderia ser utilizada na irrigação da cultura produzida em canteiros.

A utilização de condicionadores de solo, tais como os polímeros superabsorventes (hidrogéis), é outra estratégia que pode favorecer a produção de hortaliças mediante o déficit

hídrico de regiões semiáridas. Os hidrogéis podem auxiliar na maior retenção de água no solo, mesmo que seja uma água com excesso de sais, disponibilizando essa água para a cultura.

2.5 Polímeros superabsorventes como condicionadores de solo para a produção de hortaliças

Uma alternativa para enfrentar as limitações na disponibilidade de água às plantas é a utilização de condicionadores que, ao serem incorporados ao solo, contribuam com a permanência e disponibilidade de água por tempo suficiente para as plantas poderem absorvê-la (BERNARDI *et al.*, 2012; CAMARA *et al.*, 2011). Dentre esses condicionadores estão os polímeros superabsorventes ou hidrogéis.

Hidrogéis são definidos como uma rede de polímeros capaz de absorver e reter grandes volumes de água em sua estrutura sem perder seu arranjo tridimensional, absorvendo água em pelo menos 100 vezes a própria massa (BRITO *et al.*, 2013; CHANG e ZHANG, 2011; KONO e FUJITA, 2012). Possuem estrutura tridimensional composta por cadeias de monômeros, denominados de homopolímeros, ou por vários monômeros, denominados copolímeros (AOUADA e MATTOSO, 2009).

Quanto à origem, os hidrogéis são classificados como naturais, sintéticos ou uma composição de ambos; quanto à expansão, são classificados como físicos ou químicos (CHANG e ZHANG, 2011). Os hidrogéis naturais podem ser à base de polipeptídeos ou à base de polissacarídeos obtidos a partir da celulose, da quitina e do alginato (AHMED, 2015; CHANG e ZHANG, 2011). Os monômeros sintéticos industrialmente mais empregados são os derivados de ácido acrílico, sais de sódio e potássio, e a acrilamida.

O potencial de retenção de água pelos polímeros está vinculado aos grupos hidrofílicos presentes em sua estrutura (AOUADA *et al.*, 2009; SABADINI, 2018). Já a capacidade de expansão do hidrogel está relacionada ao fenômeno osmótico responsável pelo transporte do solvente para o interior do polímero que é regulado por uma força elástica retrativa, formada por cadeias flexíveis e longas, mantendo a sua estrutura sem ser dissolvido (YONEZAWA; MOURA; AOUADA, 2017). O hidrogel contém arranjos de moléculas orgânicas de modo que, quando estão desidratados, ou seja, secos, têm forma granular, pequena, quebradiça e coloração branca. No momento em que entram em contato com a água, rapidamente se hidratam aumentando seu volume e transformando-se em um gel de coloração transparente, com característica física de forma macia e elástica com a função de absorver cerca de cem vezes o seu peso em água (BALENA, 1998).

As características dos géis são intimamente relacionadas com sua interação com a

água por meio da formação de ligações de hidrogênio (BRITO *et al.*, 2013). Depois de intumescidos, os hidrogéis estão sujeitos a alguns fatores para que sejam degradados tais como pH (ZHAO *et al.*, 2010), radiação ultra violeta e presença da forma iônica do cálcio, alumínio, ferro e ureia (FREITAS *et al.*, 2019).

Os hidrogéis retêm a água de precipitação ou da irrigação, permitindo que o solo fique úmido por maior tempo e liberando a água gradativamente para que as raízes das plantas possam absorvê-la (MELO *et al.*, 2005). De acordo com Sanches (2013) o uso de hidrogéis foi difundido mundialmente por reduzir significativamente a frequência de irrigação e o volume de água requerido pelas culturas, especialmente em solos arenosos, melhorando assim a eficiência do uso da água.

A versatilidade dos hidrogéis como condicionadores de solo é exemplificada no trabalho de Nimah *et al.* (1983) em que houve acréscimos de 125% e 30% na disponibilidade de água ao adicionar hidrogel em solos arenoso e argiloso, respectivamente. Marques *et al.* (2013), utilizando hidrogel de forma a reduzir a frequência de irrigação em viveiro de mudas de cafeeiro, na dose de 2 g por saco de polietileno (volume igual a 1540 cm³), obtiveram mudas de mesma qualidade do que àquelas em cultivo irrigado.

Trabalhos como o de Navroski *et al.* (2014), com foco florestal, descrevem que a aplicação de hidrogel tem efeito positivo na redução do estresse hídrico de mudas de eucalipto. Devido a sua versatilidade como condicionador do solo tem-se a possibilidade de utilizar o polímero em culturas de elevado valor comercial, como exemplo, a cultura da soja em que ocorre aumento da massa de mil grãos com aplicação do polímero (FERRARI *et al.*, 2015). A aplicação de hidrogel em maracujazeiro mostra-se eficiente, porém doses elevadas (6 g L⁻¹ de solo) afetam o enraizamento e o desenvolvimento das mudas (HAFLE *et al.*, 2008). Marques *et al.* (2018) descreveram que o uso de hidrogel em cana de açúcar, especialmente em fases iniciais, afeta positivamente as mudas pré-brotadas. Sem deixar a horticultura de fora, pesquisas tem indicado que o uso de hidrogéis na alfacultura promove a eficiência no uso da água pela planta e o aumento na produtividade (SILVA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2015).

Mesmo com resultados exitosos do uso de polímeros hidroretentores na agricultura, a qualidade da água altera algumas propriedades dos hidrogéis. Soluções salinas são limitantes à absorção potencial dos polímeros, promovendo menor expansão em substrato quando comparado ao uso de água destilada em ensaios, associada à resistência oferecida pelo substrato à expansão do polímero e à falta de água livre circulante no substrato (GERVÁSIO e FRIZZONE, 2004). Isso se deve a presença de cátions na solução do solo, principalmente o sódio, que provocam uma diminuição de pressão osmótica entre o polímero e a solução externa

em maior força iônica, de modo que, ocorre um efeito de blindagem de carga dos cátions adicionais na superfície do acrilato provocando diminuição na repulsão eletrostática ânion-ânion, induzindo à diminuição na diferença de pressão osmótica entre a rede do polímero hidroretentor e a solução externa (LEE e HSU, 1998; MAHDAVINIA; ZOHURIAAN-MEHR; POURJAVADI, 2004). Desta forma, as cadeias poliméricas que compõem hidrogéis não expandirão e, conseqüentemente, não absorverão muita água (BRITO *et al.*, 2013; GARCIA; MOURA; AOUADA, 2019)

Hidrogéis deixam de ser eficientes mediante aplicação de baixas doses ao solo, quando passam por ciclos de umedecimento e secagem e, adicionalmente, quando submetidos à temperaturas elevadas com a presença de sais na água de irrigação (SMITH; PRUES; OEHME, 1997; RABAT; HASHIM; MAJID, 2016; ALBUQUERQUE, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2021).

A utilização na agricultura de hidrogéis constituídos por poli(acrilamida) tem custo relativamente alto a curto prazo, de modo que sua indicação pode ser mais favorável às culturas que favoreçam maior retorno econômico. Contudo, a durabilidade desses hidrogéis em campo não é elevada, funcionando efetivamente no solo apenas por alguns ciclos de umedecimento e secagem (AHMED, 2015; ALBUQUERQUE, 2019; AOUADA; MATTOSO, 2009; TAVAKOL *et al.*, 2016). Para amenizar os custos dos hidrogéis, o desenvolvimento de polímeros produzidos à base de resíduos surge como uma alternativa promissora. Nesse contexto, a utilização de polímero superabsorvente produzido a partir de resíduo da casca de ovo (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017) pode ser uma alternativa economicamente viável.

Polímero alternativo à base de carbonato de cálcio (CaCO_3), elaborado a partir da casca de ovo, foi desenvolvido por Queirós, Bezerra e Feitosa (2017). Esse material alternativo, além de representar maior viabilidade econômica e o reuso de resíduos agroindustriais, tem retenção de água semelhante quando comparado a copolímeros (LI e WANG, 2005; MAGALHÃES *et al.*, 2013). Além disso, quando comparado ao polímero comercial à base de acrilamida e acrilato de potássio, absorve mais água mesmo em condições salinas (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017).

Porém, estudo com o polímero à base de casca de ovo foi realizado apenas em laboratório, sem a mistura com o solo. Para avaliar a viabilidade do uso desse tipo de polímero alternativo na agricultura, nas condições de irrigação com água de qualidade inferior (salina), o próximo passo é testar o material aplicado ao solo, monitorando os efeitos do hidrogel na retenção de água no solo e no desenvolvimento vegetal.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado por meio da instalação de dois experimentos, sendo o primeiro em laboratório e o segundo em casa de vegetação.

3.1 Experimento em laboratório

3.1.1 Solo

Foi utilizada a camada de 0-20 cm de um Neossolo Flúvico coletado em área da Estação de Aquicultura da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizada no Campus do Pici (Fortaleza, CE). As coordenadas geográficas do local onde o solo foi coletado são: latitude 3°44'23.7"S e longitude 38°34'24.9"W. Os atributos físicos e químicos de caracterização do solo são apresentados na Tabela 1.

Camada	Areia ¹	Silte ¹	Argila ¹	Textura	P ²	Ca ³	Mg ³	K ²	Na ²	Al ⁵	H+Al ⁴	T ⁶	SB ⁶	V ⁶	m ⁶	PST ⁶	CEs ⁷	C _{org} ⁸
cm	----- TFSA (%) -----				mg kg ⁻¹	-----cmol _c kg ⁻¹ -----								-----% -----			dS/m ⁻¹	g kg ⁻¹
0 – 20	83,4	7,3	9,3	arenosa ¹	32,08	0,9	0,23	0,06	0,1	0,38	5,56	6,83	1,27	18,6	23	1,46	0,5	0,74

Tabela 1- Resultado das análises de caracterização da camada de 0-20 cm do Neossolo Flúvico utilizado no presente estudo.

¹ Método da pipeta (CLAESSEN *et al.*, 1996). ²Extração por Melich-1; determinação de P via espectrofotômetro, Na e K por fotômetro de chama. ³Extração por KCl; determinação por absorção atômica. ⁴Extração por acetato de cálcio; determinação via titulação com NaOH. ⁵Extração via KCl; determinação por titulação com NaOH (0,025 mol/L). ⁶Determinação do complexo sortivo, porcentagem de sódio trocável e porcentagem (PST) de saturação por alumínio (m), Teixeira (2017). ⁷Determinação via pasta saturada. ⁸Determinação por oxidação via úmida com dicromato de potássio, em presença de H₂SO₄ e aquecimento externo, titulado com dicromato com sulfato ferroso amoniacal.

Fonte: Autor, 2021

As análises químicas, bem como cálculos que foram realizados para fins de caracterização da fertilidade do solo, seguiram métodos descritos em Teixeira *et al.* (2017): o pH do solo foi analisado por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:líquido, na proporção 1:2,5, solo e água destilada, respectivamente; a determinação da condutividade elétrica (CE) foi por meio do extrato da pasta saturada; o carbono orgânico foi determinado por oxidação via úmida com dicromato de potássio na presença de H₂SO₄, aquecimento externo e o excesso de dicromato foi titulado com sulfato ferroso amoniacal; o fósforo (P), sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) foram extraídos com a solução de Mehlich-1, enquanto P foi determinado por meio do espectrofotômetro, K e Na foram determinados pelo fotômetro de chama; cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram extraídos por solução utilizando o KCl (1 mol/L) e determinados por espectrometria de absorção atômica; para a acidez potencial (H+Al), utilizou-se extrator acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e determinado por titulação com hidróxido de sódio; o alumínio trocável foi extraído com solução de KCl (1 mol/L) e determinado por titulação alcalina com NaOH (0,025 mol/L).

De posse das análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB) pelo somatório de Ca, Mg, K e Na; a capacidade de troca de cátions (T) pelo somatório entre SB e a acidez potencial (Al+H); a saturação por bases (V%) calculada pela relação entre SB e T a pH 7,0 e a saturação por alumínio pela proporção de alumínio (m%) solúvel em relação aos teores de bases trocáveis e alumínio no valor de T do solo (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

3.1.2 Polímeros

Foram avaliados dois materiais cujas composições estão apresentadas na Tabela 2. O primeiro material se refere a um polímero hidroretentor comercializado como ForthGel®, caracterizado como copolímero de acrilamida e acrilato de potássio (92% de K no acrilato), que apresenta diferentes frações granulométricas e absorção de 429 mL de água no intervalo de 10 minutos para cada grama do produto (BEZERRA, 2015; NASCIMENTO, 2020).

O segundo material estudado por Queirós, Bezerra e Feitosa (2017) é um polímero alternativo (Pam-Ac/ES) contendo carbonato de cálcio (CaCO₃), proveniente do pó de casca de ovo e cuja decomposição ocorre na faixa de temperatura de 574-731 °C, resultando na perda de massa com a liberação de CO₂ devido à decomposição. A 800 °C os resíduos do material são constituídos por compostos inorgânicos, neste caso CaO. O polímero possui maior hidrofiliabilidade devido ao aumento de minerais em sua composição, provocando diferença nas pressões osmóticas do gel com a solução externa. Adicionalmente, o material apresenta maior grau de intumescimento em solução salina do que em água destilada, com a absorção ocorrendo

nos minutos iniciais (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017).

Tabela 2 - Composição química elementar do hidrogel comercial Forth Gel® e do hidrogel alternativo à base de casca de ovo (Pam-Ac/ES) utilizado no presente estudo em massa %.

Polímero	C	H	N
Forth Gel®	39,7	6,7	15,0
Pam-Ac/ES	31,9	5,5	6,6

Fonte: ALBUQUERQUE, 2019; QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017.

3.1.3 Água salina

Para obter os valores das condutividades elétricas (CE) desejadas, foi utilizada água destilada acrescida de sais por meio da adição de solução composta por cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl₂) e cloreto de magnésio (MgCl₂) na proporção 7:2:1 (MEDEIROS, 1992). A solução salina foi adicionada à água destilada até resultar nas condutividades elétricas referentes aos tratamentos que foram avaliados.

3.1.4 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o inteiramente aleatorizado, em fatorial 3 x 5 com quatro repetições, totalizando 60 unidades experimentais. No primeiro fator foram avaliados três tratamentos: solo sem hidrogel (SH); solo + 2 g kg⁻¹ de hidrogel alternativo (HA) e solo + 2 g kg⁻¹ hidrogel comercial (HC). No segundo fator de tratamento foram avaliadas cinco condutividades elétricas da água de irrigação (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m).

3.1.5 Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em 11/08/2020 e conduzido por 90 dias. Nos tratamentos que receberam os polímeros, os materiais foram aplicados ao solo na dose de 2 g kg⁻¹ que se aproxima da dose recomendada pelo fabricante do polímero ForthGel® (2,4 g kg⁻¹). No tratamento sem hidrogel foi utilizado solo na ausência do polímero. Em seguida, as amostras de solo correspondentes a cada tratamento foram alocadas em anéis de borracha que apresentaram na parte inferior um tecido para evitar perdas de material.

Foi adicionada água destilada (para o controle) ou salina, de acordo com o tratamento, em cada amostra contida nos anéis até atingir a saturação do solo. Posteriormente, as amostras foram levadas ao funil de Haines e submetidas às tensões de 0, 2, 6 e 10 KPa. Na

sequência, as amostras foram colocadas no extrator de Richards e submetidas às tensões de -33, -700 e -1500 KPa.

3.1.6 Avaliações

Após atingir o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas em balança de precisão a fim de mensurar a massa do conjunto (solo+água+anel de borracha) e calcular a umidade correspondente à tensão aplicada. Com os valores de umidade correspondentes à cada tensão, os dados foram ajustados conforme o modelo matemático de Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), a partir da equação 1.

$$u = u_r + \frac{u_s - u_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m} \quad (1)$$

Onde u_r e u_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação (g g^{-1}); ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa); α (escalador do ϕ_m); m e n são parâmetros sem significação física utilizados no ajuste do modelo matemático.

Utilizou-se o software SWRC para construção da curva de retenção de água no solo, onde as variáveis u_r e u_s foram fixadas com valores de umidade medidos em laboratório correspondentes à saturação e à tensão de 1500 kPa. Os parâmetros α , m , n foram ajustados com base no método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO-NETO *et al.*, 2000).

A água disponível foi determinada a partir da diferença da capacidade de campo e ponto de murcha permanente, em que esse intervalo corresponde a água do solo disponível para as plantas. As curvas de retenção de água referentes a cada tratamento, a água disponível e a distribuição de poros foram analisadas de maneira qualitativa.

A partir dos parâmetros da equação de van Genuchten foi calculada a distribuição de poros por tamanho a partir da equação proposta por Van Genuchten – Mualem em função da carga hidráulica (VAN LIER, 2020).

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} = (\theta_s - \theta_r)(n-1)\alpha^n |h|^{n-1} \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{n}-2} \quad (2)$$

Fixou-se os parâmetros α , m , n , u_r e u_s variando os potenciais mátricos citados no item 3.1.5. Aplicando esses valores na equação 2 foi calculada a distribuição de poros solo

utilizado a partir da derivação da equação em relação aos potenciais mátricos abordados.

3.2 Experimento em casa de vegetação

3.2.1 Área experimental e tipo de solo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciências Solo da Universidade Federal do Ceará, localizada no campus do Pici (Fortaleza, CE). A localização geográfica do local de realização do segundo experimento é latitude 3°44'25.4"S e longitude 38°34'31.1"W. De acordo com a classificação de Koppen (1923), o clima local é do tipo Aw por apresentar estação chuvosa de verão e estação seca de inverno.

Utilizou-se o mesmo solo do primeiro experimento e que foi descrito no item 3.1.1.

3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente aleatorizado (DIA) em fatorial 3x5 com 4 repetições, totalizando 60 unidades experimentais. Os fatores de tratamento foram os mesmos descritos no experimento 1 (item 3.1.4).

3.2.3 Instalação e condução do experimento

O solo utilizado no experimento foi corrigido por meio de calagem elevando a saturação de bases para 70%. Foi realizada adubação de base com aplicação do equivalente a 80kg/ha de fósforo, aplicados como superfosfato triplo, 80 kg/ha de potássio aplicados como cloreto de potássio e 40 kg/ha de nitrogênio aplicados como uréia. Esses procedimentos foram feitos de acordo com os resultados da análise de caracterização do solo e as recomendações de calagem e adubação para a cultura da alface do Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Ceará (FERNANDES *et al.*, 1993).

O solo usado para preenchimento dos vasos com capacidade para cinco litros foi seco e passado em peneira com tâmis de 2 mm. O mesmo volume de solo (2 litros, correspondentes a 3 kg) foi usado no preenchimento de cada vaso. No tratamento sem hidrogel o solo foi colocado diretamente no vaso, enquanto nos tratamentos com hidrogel comercial e alternativo, os polímeros foram homogeneizados ao solo após a realização da calagem e adubação de base.

Sementes de alface cv. Grand Rapis foram semeadas em bandejas plásticas contendo substrato feito com palha de arroz e húmus. Em 28/09/2020, quando as mudas apresentaram 4 folhas definitivas (ou 21 dias após semeadura), foram transplantadas para os

vasos preenchidos com solo contendo os tratamentos informados no item 3.2.2.

Foi transplantada uma só planta por vaso a fim de diminuir a competição e facilitar o desenvolvimento vegetativo até a colheita. Com a umidade representativa da capacidade de campo (-10 KPa) obtida a partir do experimento 1 (item 3.1.5), foi definida a irrigação equivalente a 60% da capacidade de campo, visando estimular respostas ao hidrogel em função do déficit hídrico.

A irrigação passou a ser realizada logo após o transplântio das mudas, utilizando água com diferentes níveis de condutividade elétrica. O experimento foi conduzido por 38 dias após o transplântio das mudas e as irrigações foram realizadas diariamente com base na massa de água evapotranspirada que foi determinada por meio da pesagem dos vasos.

A adubação de cobertura foi realizada em duas momentos: aos 15 dias após o transplântio e aos 15 dias após a primeira adubação de cobertura, aplicando o equivalente a 90 kg/ha de N, na forma de ureia, e o equivalente a 80 kg/ha de K na forma de cloreto de potássio.

3.2.4 Avaliações

3.2.4.1 Produção de biomassa

Ao final do experimento (38 dias após o transplântio das mudas), em 05/11/2020, as plantas tiveram suas folhas contadas, cortadas rente ao solo, sua massa pesada para obtenção da massa fresca de parte aérea (MFPA) e armazenada em freezer para evitar a deterioração do tecido vegetal. A biomassa de parte aérea foi armazenada em embalagens confeccionadas com papel alumínio, identificadas e levadas para secagem em liofilizador por uma semana para a preparação do extrato (CATALDO *et al.*, 1975a). Como aminoácidos sofrem processo de desnaturação em temperaturas a partir de 50 °C, optou-se em desidratar o material vegetal a frio evitando a perda do aminoácido livre prolina.

3.2.4.2 Acúmulo de macronutrientes e de sódio no material vegetal

A biomassa da parte aérea foi seca por liofilização, triturada com almofariz, pistilo e nitrogênio líquido para se obter o pó do tecido vegetal liofilizado. O material foi analisado quimicamente para determinação dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na) e cloreto (Cl).

Para a determinação dos elementos químicos no tecido vegetal, as amostras de parte aérea foram liofilizadas e os elementos foram extraídos. A extração de N total foi por digestão sulfúrica e a quantificação foi pelo método semimicro Kjeldahl (MIYAZAWA *et al.*, 2009). Os

elementos P, K e Na foram extraídos por Melich-1. A quantificação de P foi por espectrofotometria com azul-de-molibdênio, enquanto as quantificações de Na e K foram por fotometria de chama (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; SILVA *et al.*, 2009).

Com os teores de cada elemento em mg kg^{-1} , foi efetuada a conversão em mg g^{-1} para determinação do acúmulo total (mg planta^{-1}) com base na biomassa seca de parte aérea, de acordo com a equação 3:

$$\text{Acúmulo total} = \frac{\text{massa seca (mg)} * \text{teor do nutriente (mg/g)}}{1000} \quad (3)$$

3.2.4.3 Indicadores bioquímicos de estresse hídrico e salino nas plantas

Foram analisados os seguintes indicadores fisiológicos para avaliar o estresse hídrico e salino das plantas: a) teor de prolina conforme metodologia descrita por Bates (1973), utilizando 0,5g de material vegetal fresco; b) teor de clorofila total por meio do índice SPAD (*Soil plant analysis development*); e c) teor de nitrato acumulado nas folhas pelo procedimento do ácido salicílico (CATALDO *et al.*, 1975b).

3.2.4.4 Atributos de solo

Após o corte das plantas foram coletadas amostras de solo em duplicatas, sendo a primeira utilizada para determinação da umidade por gravimetria utilizando estufa de circulação forçada de ar a 105 °C até obtenção de massa constante. As demais amostras foram secas ao ar e passadas em peneira com tâmis de 2 mm para posterior determinação dos mesmos atributos químicos informados no item 3.1.1.

Adicionalmente foi avaliado o volume de água necessário para a irrigação diária dos tratamentos, utilizando o volume total de água que foi requerido na execução do experimento.

3.2.4.5 Análises estatísticas

Foi realizado teste de normalidade dos dados a 5% de confiabilidade. Quando não houve normalidade, foram realizadas transformações dos dados. Após constatação e/ou obtenção de distribuição normal, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Mediante diferença significativa, foi feito teste de comparação de médias por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$) para o fator de tratamento qualitativo (sem hidrogel, com hidrogel comercial e

com hidrogel alternativo) e análise de regressão para os valores de condutividade elétrica (CE).

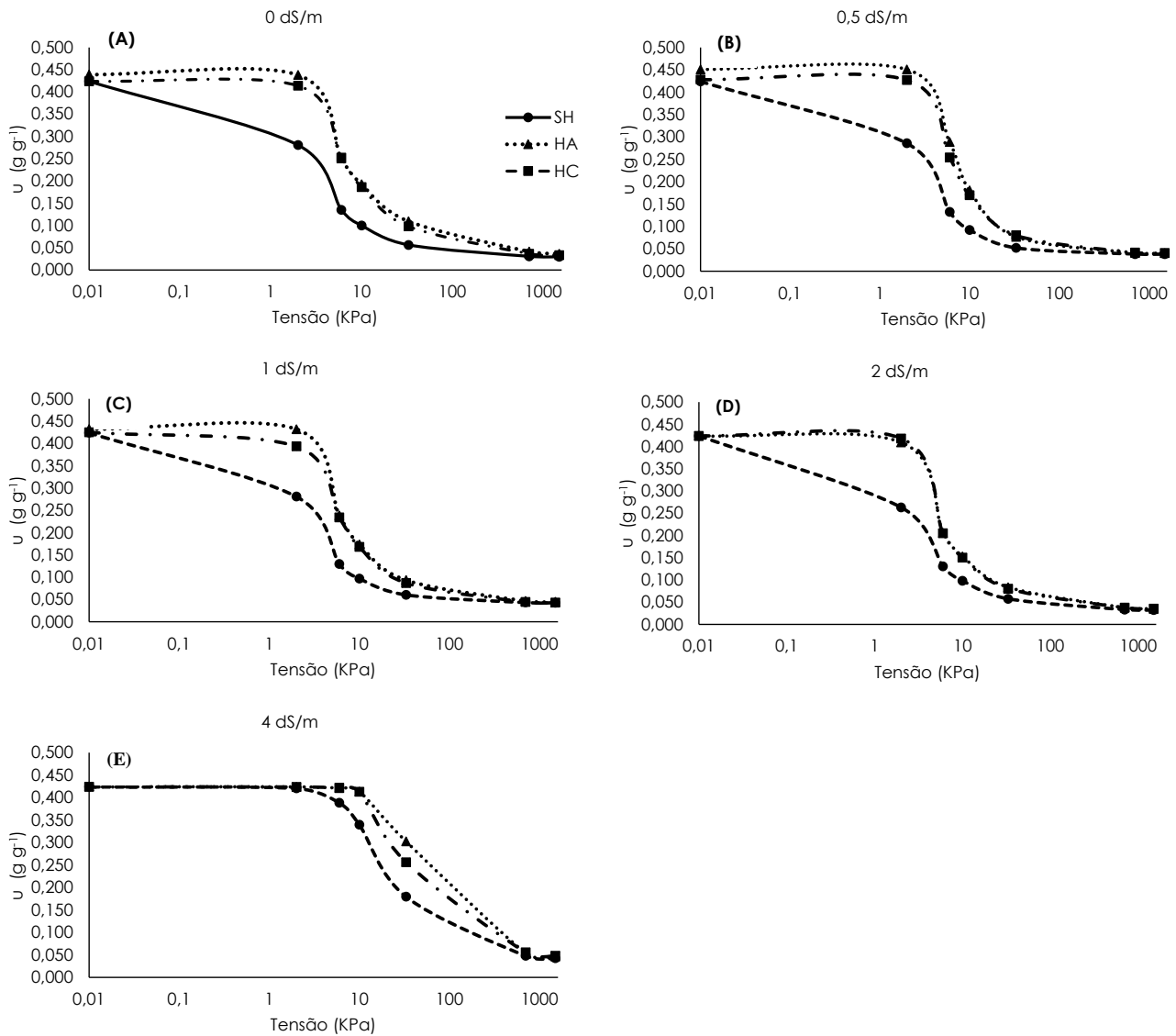
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento em laboratório

4.1.1 Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água (CRA) é uma representação gráfica da relação entre o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo. As CRAs nos tratamentos Solo + Hidrogel Alternativo (HA) e Solo + Hidrogel Comercial (HC) foram semelhantes e indicaram maior conteúdo de água do que o tratamento Solo sem hidrogel (SH) em toda a faixa de potencial mátrico estudada (Figura 1).

Figura 1 - Curvas características da água no solo para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC) mediante irrigação com água nas condutividades elétricas (dS/m) de 0 (A); 0,5 (B); 1,0 (C); 2,0 (D) e 4,0 (E).



Fonte: Autor, 2021.

Até a salinidade correspondente à CE 1 dS/m, o HA resultou em teor de água superior ($0,253$ a $0,289\ g\ g^{-1}$) em relação aos tratamentos SH ($0,128$ a $0,133\ g\ g^{-1}$) e HC ($0,252$ a $0,234\ g\ g^{-1}$) até o primeiro ponto de inflexão da CRA (Figuras 1A, 1B e 1C). Esse ponto é caracterizado pelo esvaziamento dos macroporos do solo e situa-se em torno de -6 a -10 KPa para solos arenosos (ANDRADE e STONE, 2011; BRITO *et al.*, 2011). A retenção de água proporcionada pelo HA na referida faixa de tensão até a salinidade de 1 dS/m é superior à

observada nos tratamentos HC e SH em 4,6 % e 49,72 % , respectivamente.

Hidrogéis que possuem cargas de minerais de argila em sua composição, como o HA avaliado neste estudo, possuem maior poder de intumescimento em condições em que a solução do solo seja salina (LIMA, 2007; PEDROTTI *et al.*, 2015; QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017). Desta forma, o HA absorveu mais água do que o HC devido a interação cálcio-carboxilato, cujas cargas adicionais aumentaram a hidrofiliabilidade e a pressão osmótica no hidrogel que foi superior à da solução externa (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017).

Nas CEs de 2 e 4 dS/m, o teor de água nos tratamentos HA e HC até o primeiro ponto de inflexão da CRA foi praticamente o mesmo (0,206; 0,421 e 0,205; 0,422 g g⁻¹, respectivamente), indicando que a partir de 2 dS/m ambos os polímeros foram similarmente afetados pela salinidade (Figuras 1D e 1E). Em estudo prévio, o HA apresentou maior absorção de água salina em relação ao copolímero de poliacrilamida e poliacrilato de potássio (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017), mas no presente estudo esse diferencial de tolerância à salinidade correspondente à CE a partir de 2 dS/m não foi observado nas menores tensões da CRA.

O impacto da salinidade nos dois polímeros a partir da CE de 2 dS/m significa que o uso de água com maior condutividade elétrica para irrigar o solo e hidratar polímeros hidroretentores pode resultar em maior percentual de água liberada pelos hidrogéis em relação à água com baixa condutividade elétrica, o que ocorre devido à interação das cargas elétricas da água salina com as cargas eletrostáticas fixas na rede polimérica (CANNAZZA *et al.*, 2014).

Mesmo diante da maior salinidade, os dois polímeros avaliados nos tratamentos HA e HC resultaram em disponibilidade hídrica superior para o primeiro ponto de inflexão (0,206 e 0,205 g g⁻¹) quando comparados ao tratamento SH (0,131 g g⁻¹). Isso confirma que a adição de hidrogéis ao solo eleva a capacidade de retenção e de disponibilização de água em baixos potenciais (MONTESANO *et al.*, 2015). O menor teor de água observado em SH, além de ser resultado da ausência de polímeros superabsorventes, também se deve ao predomínio de macroporos em solos arenosos, os quais são esvaziados mais rapidamente em baixas tensões, sobrando água retida em potenciais menores (REICHARDT, 1990).

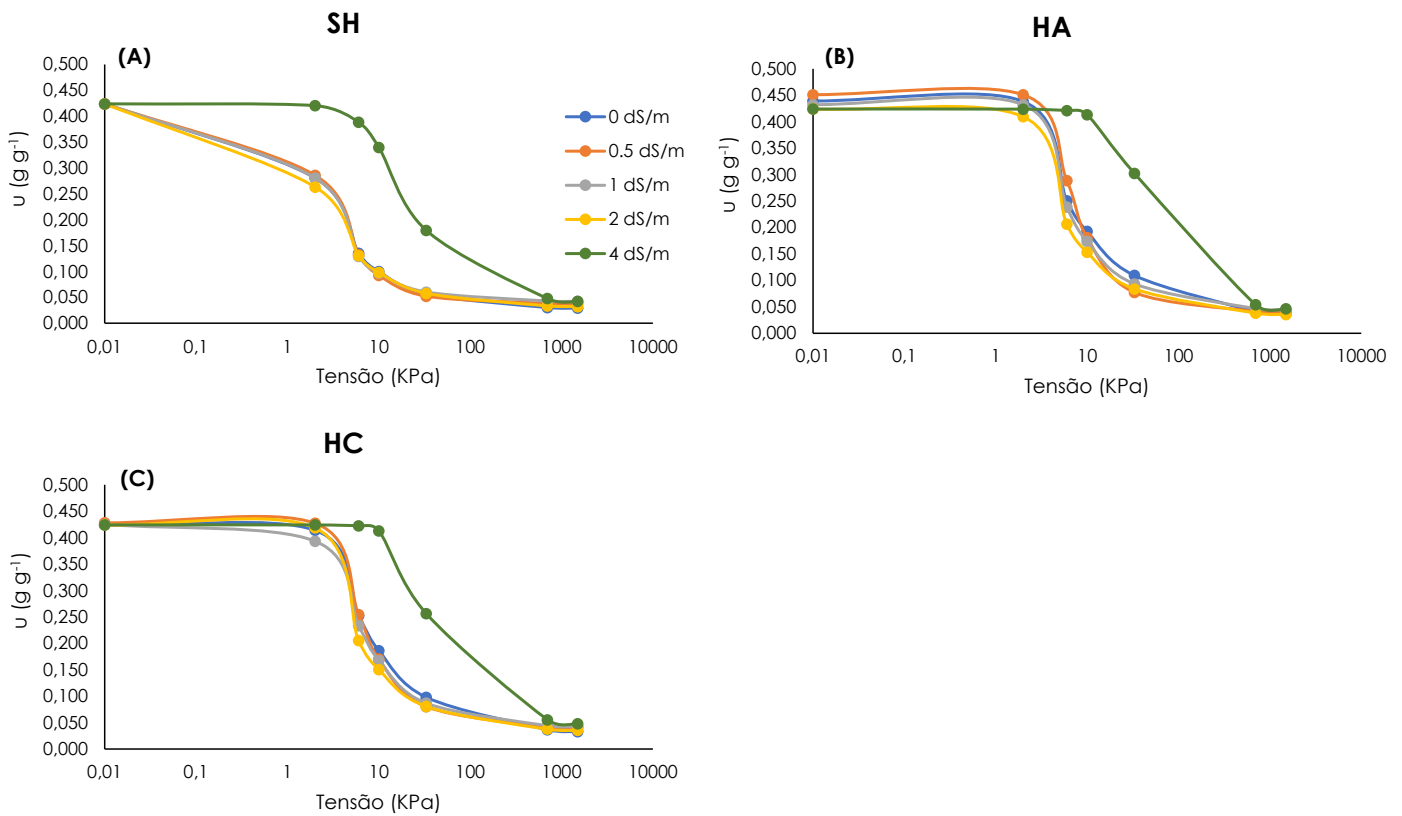
Diante da salinidade mais elevada (CE de 4 dS/m), a disponibilidade de água no solo foi semelhante entre tratamentos com os hidrogéis até o primeiro ponto de inflexão da CRA (Figura 1E). Na tensão de -33 KPa, o tratamento HA disponibilizou mais água (0,302 g g⁻¹) que o HC (0,256 g g⁻¹) e SH (0,180 g g⁻¹). Nas tensões de -700 e -1500 KPa, HA e HC apresentaram valores próximos de umidade (0,054; 0,055 e 0,046; 0,048 g g⁻¹, respectivamente). Isso indica que o polímero alternativo resultou em tempo efetivo de retenção de água no solo mais longo

que o tratamento SH e tão longo quanto HC. A maior retenção de água proporcionada pelo HA na tensão de -33 KPa e na maior salinidade indica que o polímero alternativo foi menos afetado pelos sais que o HC, possivelmente por apresentar poros menores que contribuíram com a forte retenção de água que não está, necessariamente, disponível às plantas.

O tamanho dos poros dos hidrogéis pode afetar a absorção de água e sua liberação conforme a tensão aplicada na determinação da CRA (ANDRY *et al.*, 2009; BHARDWAJ *et al.*, 2007). Estudo prévio revelou que o HA possui diâmetros de poros menores, superfície mais irregular do que o polímero de poliacrilato de potássio e maior potencial osmótico em relação a solução do solo (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017). A combinação dos fatores mencionados foi considerada suficiente para que HA retenha e disponibilize água por maior tempo em condições salinas com cátions de diferentes valências (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017).

Ao analisar as CRAs em resposta às CEs para cada tratamento com uso de polímeros (Figura 2), se constata que no tratamento SH o teor de água foi inferior na maior salinidade (CE de 4 dS/m), variando de 0,424 a 0,042 g g⁻¹ nas baixas e altas tensões; os tratamentos HA e HC variaram de 0,424 a 0,046 g g⁻¹ e de 0,424 a 0,048 g g⁻¹, respectivamente (Figura 2A). Isso indica que o maior teor de água no tratamento HA, que foi observado nas maiores tensões e na maior salinidade, não é resultado exclusivo da maior retenção de água nos poros de menor diâmetro do polímero.

Figura 2 - Curvas características de água no solo em resposta aos tratamentos com condutividades elétricas (CE) distintas (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m⁻¹) mediante ausência de hidrogel – SH (A), hidrogel alternativo – HA (B) e hidrogel comercial – HC (C).



Fonte: Autor, 2021.

Apesar do teor de água nos tratamentos HA e HC ter sido maior do que o observado para o tratamento SH, a maior CE (4 dS/m) também resultou em maior umidade em HA e HC quando comparada às demais salinidades. Contudo, diferentemente do observado para o tratamento SH, essa diferença foi verificada somente após o ponto de inflexão (Figuras 2B e 2C). Isso indica que nas menores tensões, a retenção de água com a maior salinidade foi influenciada pelo potencial de absorção dos polímeros HA e HC, mas nas maiores tensões parece ter ocorrido influência mais expressiva de outros fatores.

O maior teor de água no solo associado à maior salinidade não deve ser decorrente de algum efeito positivo dos sais na retenção de água. A elevação na quantidade de sais no solo pode afetar a dinâmica de poros por meio da contração da dupla camada difusa devido ao excesso de cátions, como exemplo o sódio, aumentando o diâmetro de poros em maiores

condutividades elétricas, de modo que a água retida naquele poro é retirada mais facilmente (BOUYOUCOS, 1962; TAGHIZADEHGHASAB; SAFADOUST; MOSADDEGHI, 2021).

Assim, a maior retenção de água no solo observada nas maiores tensões na maior salinidade está ligada aos efeitos da salinidade nos parâmetros utilizados para calcular a curvas de retenção pela equação de van Genuchten (Equação 1). A sodicidade tem efeito sobre a redução no valor no parâmetro alfa (α) e aumento dos valores de n e m da referida equação (LIMA; GRISMER; NIELSEN, 1990). O efeito é mais pronunciado no parâmetro α já que este é escalonador do ϕ_m do solo: diminuindo com o aumento do θ_r , aumentando a retenção hídrica; m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva (LIMA *et al.*, 2014; LIMA; GRISMER; NIELSEN, 1990). A elevação no valor do parâmetro n indica que as curvas apresentam menor inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão e maior distribuição uniforme de poros (ENGLER, 2007).

A inclinação das curvas foi menor nos tratamentos HA e HC já que a presença dos hidrogéis pode aumentar a porosidade total do solo, não necessariamente a macroporosidade. Contudo, a retenção de água em polímeros hidrorretentores é um processo físico e químico (BRITO *et al.*, 2013; FLORY, 1953). A maior declividade nas curvas de retenção onde não há adição dos polímeros se deve à baixa variação no tamanho dos poros, justificando a predominância da macroporosidade (SILVA *et al.*, 2020).

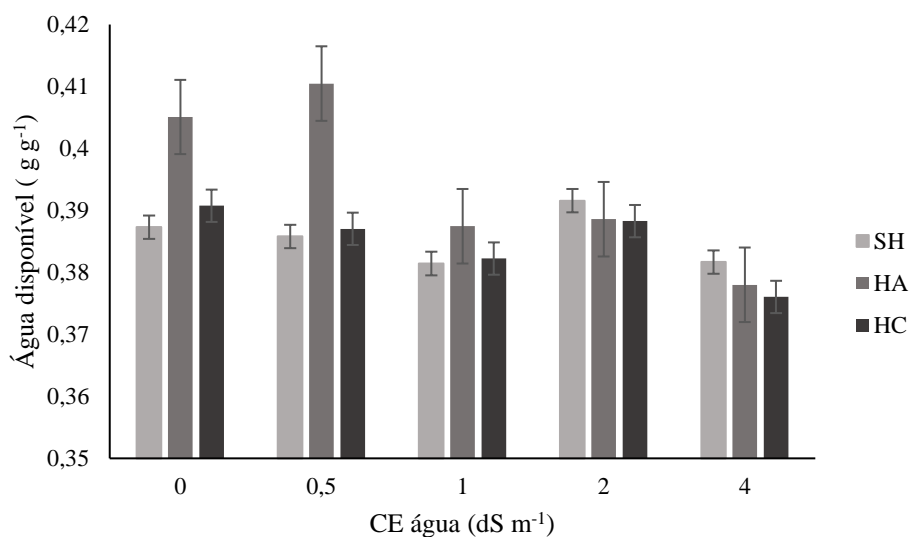
4.1.2 Água disponível

O tratamento HA resultou em mais água disponível no solo quando comparado aos tratamentos HC e SH, principalmente mediante água de irrigação apresentando CE de 0 e 0,5 dS/m (Figura 3). Quando a salinidade aumentou para 1 dS/m o HA ainda resultou em maior valor de água disponível no solo, mas a diferença não foi expressiva em relação aos demais tratamentos (Figura 3). O aumento na água disponível como resultado da aplicação de hidrogéis superabsorventes tem sido observado de modo mais expressivo em solos arenosos, mediante maiores doses de hidrogel e com variação conforme o tipo de polímero utilizado (SAHA *et al.*, 2020).

Há a preocupação de que hidrogéis superabsorventes aumentem o conteúdo de água no ponto de murcha permanente em virtude de ligações fortes entre a água e os grupos hidrofílicos dos polímeros, de modo que a água não estaria disponível para as plantas (SAHA *et al.*, 2020). No presente estudo, a diferença na água disponível no solo promovida pelo HA foi decorrente da maior retenção de água na capacidade de campo, que foi superior no HA,

principalmente nas menores salinidades (Figura 1). Assim, o polímero alternativo foi superior aos tratamentos sem polímero e ao polímero comercial mediante CEs de 0 e 0,5 dS/m.

Figura 3 - Água disponível no solo em resposta aos tratamentos com condutividades elétricas (CE) distintas (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m) mediante ausência de hidrogel – SH, hidrogel alternativo – HA e hidrogel comercial – HC.

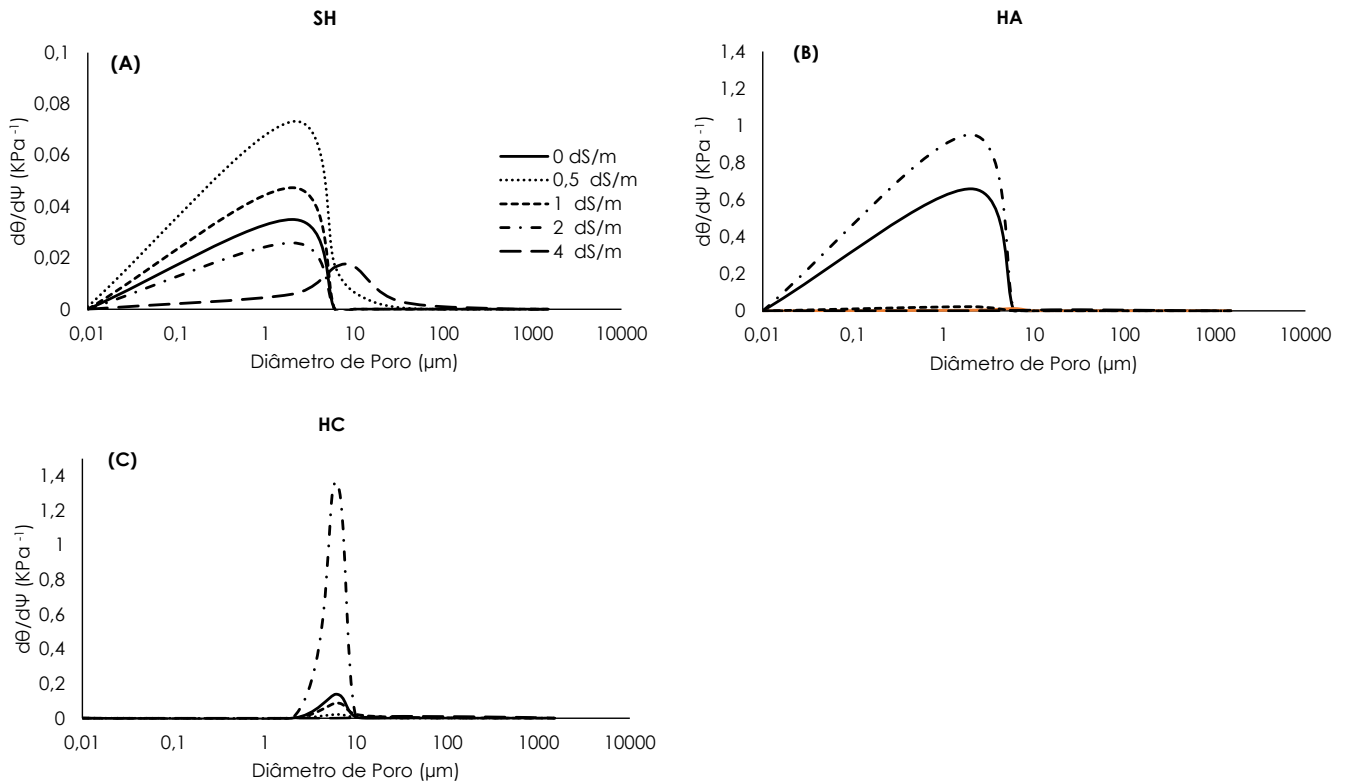


Fonte: Autor, 2021.

4.1.3 Distribuição de poros por tamanho

A partir do uso dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten foram obtidos os gráficos de distribuição de poros por tamanho nas diferentes salinidades para os tratamentos sem hidrogel (SH), hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC). Nos referidos gráficos, os pontos de máxima correspondem ao ponto de inflexão da curva de retenção de água (Figura 1).

Figura 4 - Curvas de distribuição de frequência do tamanho dos poros em resposta aos tratamentos com condutividades elétricas (CE) distintas (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 dS/m) mediante ausência de hidrogel – SH (A), hidrogel alternativo – HA (B) e hidrogel comercial – HC (C).



Fonte: Autor, 2021.

No tratamento SH houve mudança na distribuição dos diâmetros de poros com a salinidade da água de irrigação (Figura 3A). Com o uso de água não salina houve menor ocupação do volume poroso do solo por água em relação ao observado até a salinidade correspondente a 1 dS/m. Com o aumento nos níveis de salinidade da água utilizada para a irrigação, o volume de poros ocupados passou a ser menor. Houve tendência de distribuição semelhante de poros no solo até a CE de 2 dS/m, com ocupação de diferentes diâmetros e volumes de poros (Figura 3A). Com salinidade de 4 dS/m, devido ao elevado conteúdo de sais na água de irrigação, ocorreu o achatamento da curva, indicando menor frequência de poros ocupados pela água e menor volume de poros preenchidos (Figura 3A).

No tratamento HA há a mesma distribuição de volume de poros que no tratamento SH, porém é notada maior frequência dos poros com as condutividades de 0 e 2 dS/m (Figura 3B). O HA possibilita que poros com determinado volume sejam mais ocupados na ausência de

salinidade e na salinidade correspondente a CE de 2 dS/m em detrimento das demais condutividades. Esse comportamento do hidrogel alternativo disponibiliza água para as plantas a uma tensão que não demande mais energia para ser absorvida pelas raízes das plantas, explicando a maior disponibilidade de água no solo associada a este tratamento.

O tratamento HC não apresentou o mesmo padrão que SH e HA, predominando estreita faixa de poros e uma frequência de poros próximos à tensão de -10 KPa (Figura 3C). Esse comportamento é observado principalmente na condutividade de 2 dS/m com maior frequência, enquanto os demais tratamentos apresentam a mesma faixa de poros, mas com menor frequência. Assim, no tratamento HC submetido à CE de 2 dS/m há ocupação de poros com maiores diâmetros e em curta faixa de potencial.

As diferenças na distribuição de poros ocupados nos tratamentos são atribuídas a dois processos. O primeiro processo diz respeito ao ciclo de umedecimento e secagem que ocorreu no preparo das amostras e condução do experimento. Esse ciclo provoca a abertura de microfissuras devido a contração do sistema solo+hidrogel à medida que a água vai sendo retirada, e durante o umedecimento ocorre a expansão do sistema (YIPING *et al.*, 2016). O segundo é o processo de entumescimento e secagem dos polímeros. Os polímeros quando secos ocupam volume menor no solo, mas quando entumescidos passam a ocupar volume maior, afetando significativamente a porosidade do solo (ALBUQUERQUE, 2019; MAMEDOV *et al.*, 2010).

Destaca-se ainda a variação na amplitude das curvas que demonstra alterações no raio dos poros predominantes e, conseqüentemente, na disponibilidade de água e no comprimento da curva do gráfico. Curvas mais largas representam maior gama de poros ocupados no espaço poroso (CÁSSARO *et al.*, 2008; KLEIN e LIBARDI, 2002). Nesse caso, o tratamento HA se destacou em relação ao HC, apresentando mais poros ocupados com água na salinidade correspondente à CE de 2 dS/m.

4.2 Experimento em casa de vegetação

No resumo da análise de variância (ANOVA) se constata que houve interação entre fatores de tratamento ($p < 0,01$) para massa fresca (MFPA) e massa seca de parte aérea (MSPA), acúmulo de nitrogênio (N) e sódio (Na) nas plantas e para os teores de prolina e nitrato no tecido vegetal. O acúmulo de potássio (K) respondeu isoladamente à aplicação de hidrogel ($p < 0,01$) e à condutividade elétrica ($p < 0,05$), similar ao observado para o índice SPAD no qual a significância foi de 5% para a aplicação de hidrogel e de 1% para a condutividade elétrica

(Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise da variância (ANOVA) para atributos avaliados nas plantas em resposta aos tratamentos referentes à aplicação de hidrogel (H) e condutividade elétrica (CE) da água de irrigação.

FV ¹	MFPA ⁵	MSPA ⁶	N	K	Na	Cl ⁻	SPAD	Prolina	Nitrato
-----Valor F-----									
H ²	19.08**	7.81**	37.59**	49.89**	81.81**	8.68**	3.35*	6.24**	25.72**
CEa ³	52.09**	21.96**	3.15*	47.13**	16.3**	62.04**	8.42**	51.84**	17.52**
H x CEa	4.71**	4.12**	6.13**	7.3**	5.61**	0.65 ^{ns}	0.83 ^{ns}	3.82**	13.01**
CV% ⁴	16.9	3.36	10.37	18.41	17.77	16.64	15.5	20.54	22.62

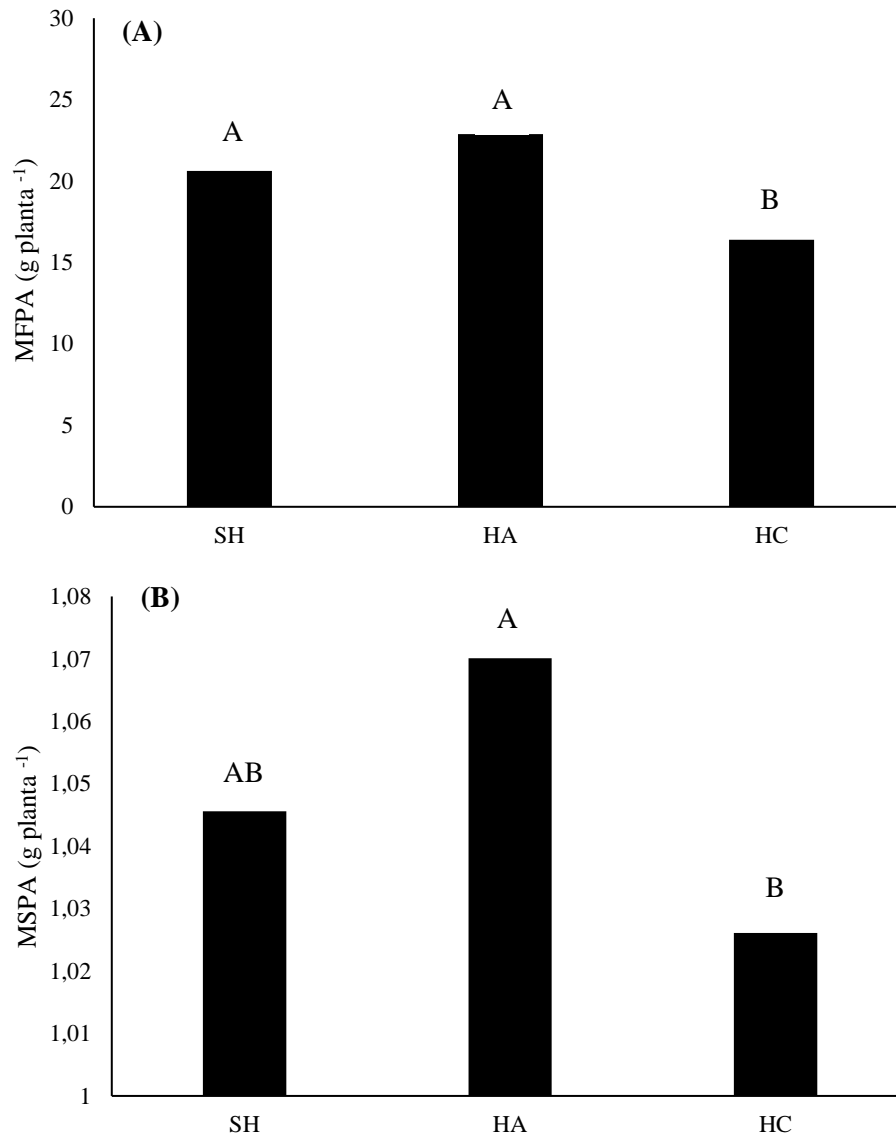
¹FV = Fonte de variação; ²H = tratamentos referentes ao hidrogel; ³CEa = Condutividade elétrica da água de irrigação; ⁴CV = coeficiente de variação; ⁵MFPA = massa fresca da parte aérea; ⁶MSPA = massa seca da parte aérea. ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

Os resultados dos atributos avaliados nas plantas estão apresentados nos subitens a seguir.

4.2.1 Desenvolvimento das plantas

A massa fresca de parte aérea (MFPA) variou de 16,39 a 22,88 g planta⁻¹, o que pode ser considerado baixo em relação aos valores de 210,0 e 64,3 g planta⁻¹ observados para a cultivar Grand Rapids em estudos realizados por Goulart *et al.* (2018) e Zuffo *et al.* (2016) nas condições climáticas de Seropédica (RJ) e do semiárido piauiense. Os valores de MFPA encontrados neste estudo foram similares aos encontrados por Fernandes *et al.* (2020). A maior massa fresca ocorreu nos tratamentos SH e HA. Apesar da ausência de diferença significativa, a MFPA em HA foi HA 10,71% maior do que em SH. O tratamento HC resultou em menor MFPA que foi 20,55% menor ao observado em SH (Figura 5A).

Figura 5 - Massa fresca – MFPA (A) e massa seca de parte aérea – MSPA (B) de plantas de alface submetidas aos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC).



Fonte: Autor, 2021.

A massa seca da parte aérea (MSPA) variou de 1,03 a 1,07 g planta⁻¹, sendo esses valores inferiores aos encontrados por Zuffo *et al.* (2016) para a cultivar Grand Rapids desenvolvida em condições de telado no semiárido piauiense. Por outro lado, os valores foram próximos aos encontrados por Fernandes *et al.* (2020) que avaliaram a cultivar no semiárido brasileiro. O tratamento HA não diferiu do SH para valores de MSPA, mas se destacou em relação ao valor obtido em HC (Figura 5B).

A alface é uma cultura exigente em água e o uso de hidrogeis durante o desenvolvimento vegetativo é uma ferramenta eficaz na elevação da matéria seca e fresca

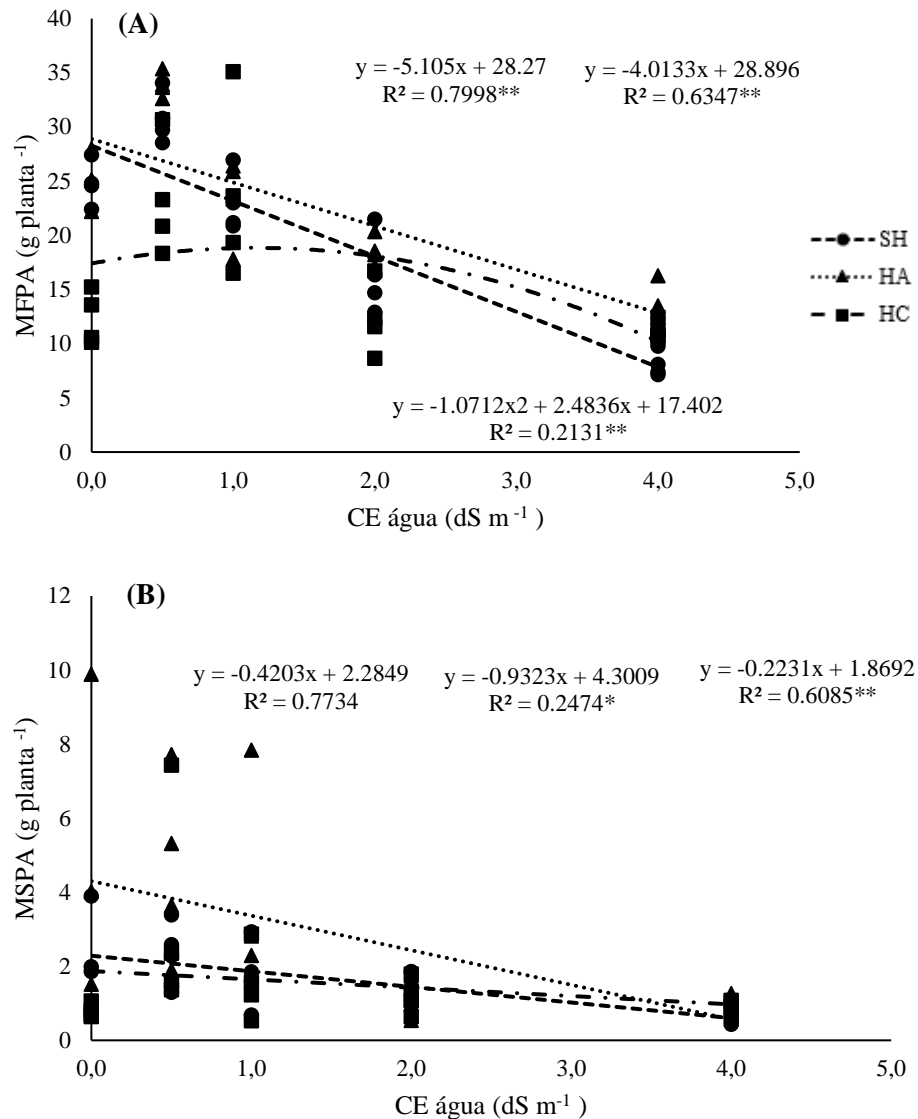
produzida, uma vez que o principal produto da alface são a folhas (parte aérea) (ARAÚJO *et al.*, 2010; COELHO; VITTI; VIEGAS, 2015). Com a baixa oferta de água disponível para suprir as necessidades hídricas da alface, ocorre redução na produção (DA SILVA *et al.*, 2019; KOETZ *et al.*, 2006), o que corresponde aos resultados encontrados nos tratamentos avaliados no presente estudo. A baixa MFPA também pode ser explicada pelo fato do cultivo ter sido realizado em vaso que limitou o crescimento das plantas de alface (FILGUEIRA, 2012).

O tratamento HC resultou nos menores valores de MFPA e MSPA quando comparado aos demais tratamentos. Esse resultado indica que o polímero comercial pode ter resultado em limitações ao desenvolvimento vegetal devido a menor retenção de água no solo ocasionada por uma maior salinidade (XIONG *et al.*, 2018).

O tratamento HA proporcionou maior produção de MFPA e MSPA, o que pode ter sido decorrente da melhor disponibilidade hídrica, da menor limitação física promovida pelo polímero para o desenvolvimento das raízes das plantas e de outros benefícios indiretos proporcionados pelo hidrogel avaliado. Contudo, vale destacar que em termos de produção de MFPA, o HA não diferiu do tratamento SH trazendo questionamentos quanto a viabilidade econômica em aplicar o polímero já que a produção não foi significativamente superior com sua aplicação.

A variável MFPA reduziu de 27,42 para 7,15 g em SH; de 27,97 para 11,30g em HA e de 18,81 para 10,19 g em HC; enquanto a MSPA reduziu de 3,90 para 0,43 g em SH, de 9,88 para 0,57 em HA e de 1,06 para 0,66 em HC, respectivamente, com o aumento da CE da água de irrigação (Figura 6). A MFPA foi mais afetada pela salinidade no tratamento SH, atingindo 8,1g na salinidade de 4 dS/m (Figura 6A). Já os tratamentos HA e HC resultaram em MFPA de 13,51g e 11,26g, respectivamente, na salinidade de 4 dS/m (Figuras 6A). A MSPA de todos os tratamentos foi menor que 2g na maior condutividade de 4 dS/m (Figura 6B). Ressalta-se que nas condições salinas impostas, na menor e maior CE da água de irrigação aplicada, o tratamento HA (27,97 e 11,30 g) teve maior massa fresca que HC (18,81 e 10,19 g).

Figura 6 - Massas fresca – MFPA (A) e seca da parte aérea – MSPA (B) de plantas de alface em função da condutividade elétrica da água de irrigação mediante tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC).



Fonte: Autor, 2021.

A elevação da quantidade de sais na água utilizada para irrigação reduz a fitomassa das plantas não tolerantes à salinidade, dentre as quais está a alface (FERNANDES e GHEYI, 2001; GURGEL *et al.*, 2007; SÁ *et al.*, 2015; VIANA; FERNANDES; GHEYI, 2001). A existência de dois tipos de estresse (hídrico e salino) afeta a oferta de água às planta, de modo que a restrição hídrica prejudica o crescimento vegetal, influenciando diretamente a expansão, divisão, alongamento celular e a fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2017). Com maior potencial mátrico no solo as plantas demandam mais energia para absorver água desviando parte da energia que seria utilizada em outro processos fisiológicos (MUNNS, 1993; MUNNS; TESTER, 2008;

LIMA *et al.*, 2014; DE PAULA DA SILVA *et al.*, 2015; LIRA *et al.*, 2020).

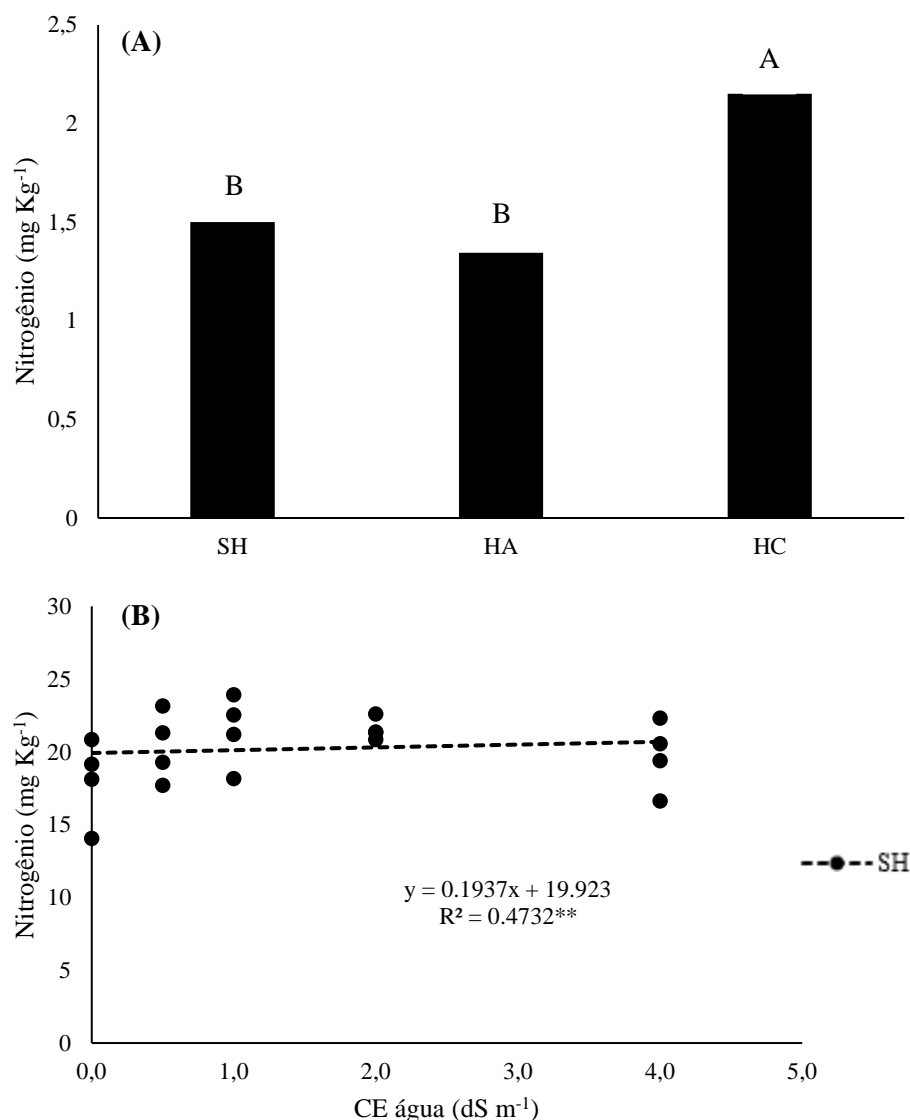
Os polímeros superabsorventes podem amenizar estresses e contribuir com o desenvolvimento vegetal em condições de déficit hídrico e salinidade. No presente, estudo os polímeros HA e HC resultaram em disponibilidade de água de 4,4 a 1% superior ao tratamento SH na menor salinidade, enquanto nas salinidades de 2 e 4 dS/m o tratamento SH foi superior na disponibilidade de água do que os tratamentos HA (0,76 a 1%) e HC (1,04 a 1,57%), respectivamente (Figura 3). A maior quantidade de água disponível em HA na menor salinidade possibilitou que o referido tratamento resultasse em maior fitomassa (Figuras 5 e 6).

Efeitos positivos do hidrogel superabsorvente nas condições de maior salinidade não foram expressivos. Provavelmente isso é explicado pelo fato de que a água de irrigação com CE acima de 0.003 dS/m reduz a absorção de água pelo hidrogel comercial favorecendo a degradação química do polímero (NASCIMENTO *et al.*, 2021). Os mesmos autores acrescentam que o polímero perde seus efeitos em longo prazo. Assim, apesar do curto período de desenvolvimento da alface (47 dias), a combinação entre salinidade e escassez hídrica afetou negativamente o potencial dos hidrogéis contribuírem com o desenvolvimento vegetal.

4.2.2 Acúmulo de macronutrientes e sódio no material vegetal

Os maiores acúmulos de nitrogênio foliar foram encontrados no tratamento HC (2,15 mg kg⁻¹), seguido por SH e HA (1,5 e 1,35 mg kg⁻¹, respectivamente) que não diferiram estatisticamente (Figura 7A). Como HC produziu menor biomassa, esperava-se menor acúmulo de nitrogênio, mas isso não ocorreu. Desse modo, o maior acúmulo de N no tratamento HC está vinculado ao alto teor do nutriente no tecido vegetal.

Figura 7 - Acúmulo de N em plantas de alface em resposta à aplicação de hidrogel (A) e à salinidade da água de irrigação (B).



Fonte: Autor, 2021.

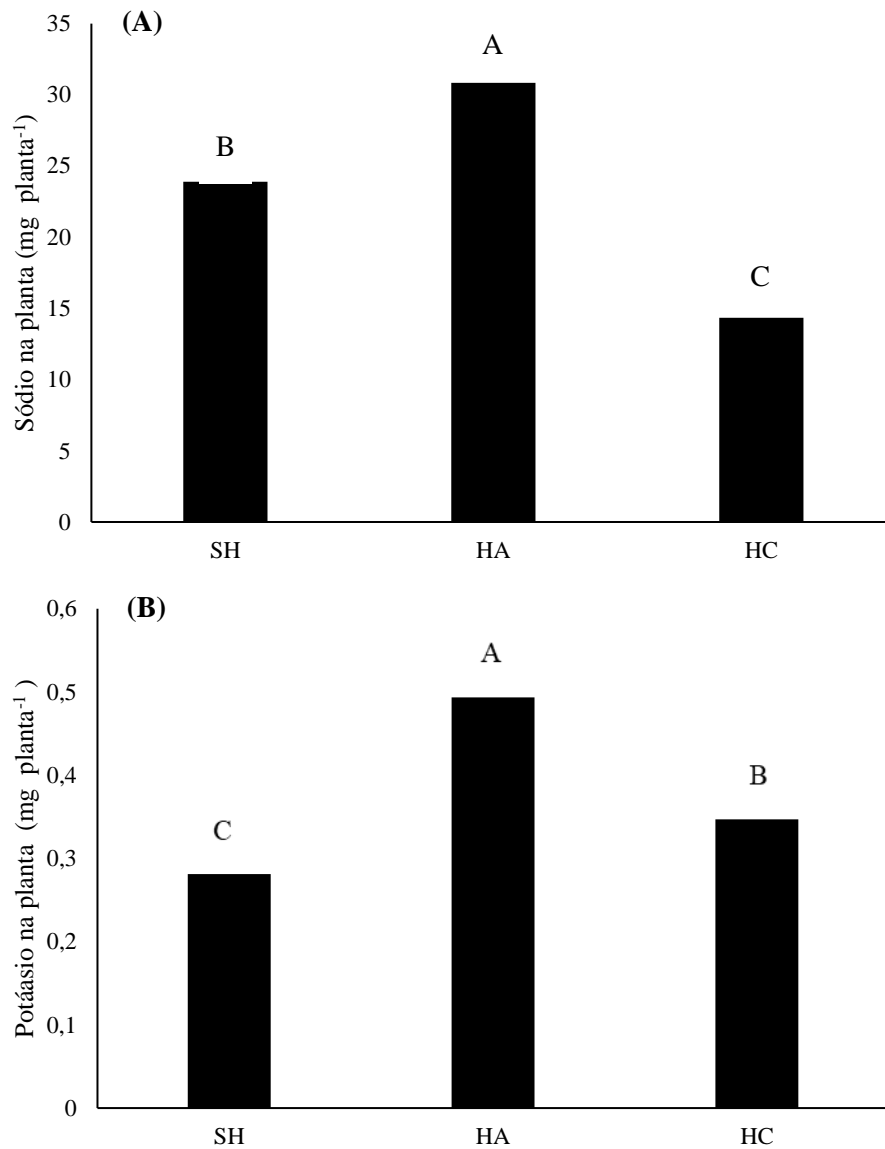
Na análise da regressão só houve significância para o acúmulo de N nas plantas de alface em resposta às condutividades elétricas no tratamento SH. Os tratamentos HA e HC não apresentaram resultados que demonstrassem alteração nos valores do acúmulo de nitrogênio com o aumento da CE (Figura 7).

A elevação da CE no tratamento SH ressalta o efeito da salinidade aumentando o acúmulo de nitrogênio para síntese de nitrato, de modo a reduzir os efeitos do íon cloreto nos tecidos foliares (FREIRE; NASCIMENTO; DE ASSIS MEDEIROS, 2020).

O sódio (Na) foi menor para o tratamento HC (14,35 mg planta⁻¹) e maior para HA (30,82 mg planta⁻¹), seguido por SH (23,90 mg planta⁻¹), conforme apresentado na Figura 8A.

Esse resultado está de acordo com o observado para a produção de massa seca (Figura 5B). O acúmulo de potássio (K) foi maior para o tratamento HA (0,49 mg planta⁻¹), seguido por HC e SH (0,35 e 0,28 mg planta⁻¹, respectivamente), conforme apresentado na Figura 8B.

Figura 8 - Acúmulo de sódio (A) e potássio (B) em plantas de alface em função dos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC).



Fonte: Autor, 2021.

O maior acúmulo de Na nas folhas de alface está associado ao menor acúmulo de K nas folhas. O menor acúmulo de potássio está relacionado as maiores concentrações de sódio na solução do solo devido a proporção de sais utilizados na elaboração da água de irrigação. Esse excesso de sódio inibe a absorção de potássio devido ao antagonismo entre o K⁺ e Na⁺, levando à incapacidade da alface promover o ajuste iônico com a solução do solo, possibilitando

maior absorção de sódio em detrimento ao potássio (KAWASAKI; SHIMIZU; MORITSUGU, 1983; BRAZ, 2018; FREIRE; NASCIMENTO; DE ASSIS MEDEIROS, 2020).

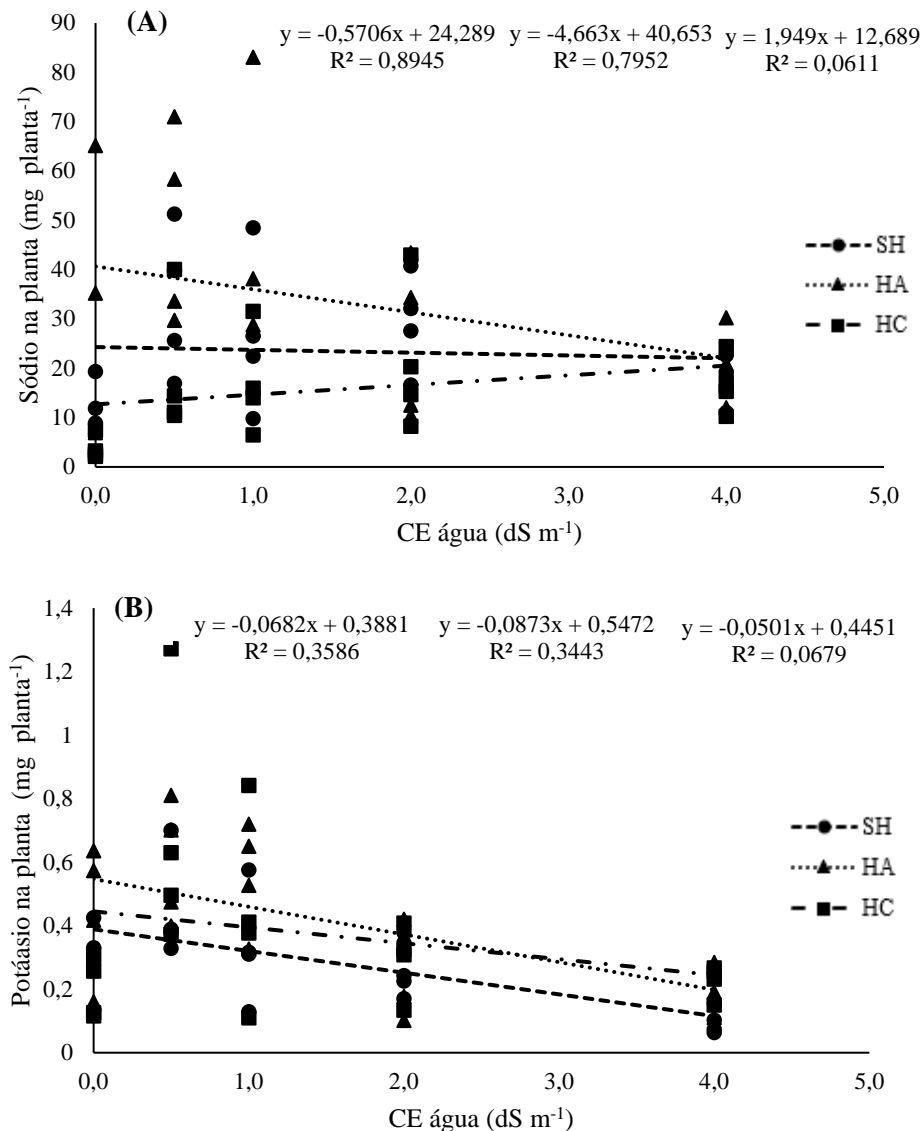
O acúmulo de K nos tratamentos ocorreu na ordem decrescente HA>HC>SH, pois, mesmo com a adubação realizada em todos os tratamentos, conforme informado no item 3.2.3, houve resposta em função do tipo de polímero superabsorvente avaliado. A diferença observada no acúmulo de K para o tratamento HC ocorreu porque houve aporte do nutriente ao solo proveniente do próprio polímero que é à base de acrilato de potássio (item 3.1.2).

Os hidrogéis hidroretentores são condicionadores que, ao serem adicionados ao solo, podem se degradar e disponibilizar elementos que fazem parte de sua constituição. A composição dos polímeros é importante, pois caso sejam adicionadas cargas à sua estrutura para aumentar seu potencial osmótico, a exemplo dos polímeros à base de acrilato de sódio e potássio, ocorre a liberação dos íons Na^+ e K^+ para o solo, que tornam-se disponíveis para serem absorvidos pelas plantas (CHEN *et al.*, 2016). Isso foi observado por outros autores para o mesmo tipo de polímero comercial avaliado no presente estudo (NAVROSKI *et al.*, 2014; NASCIMENTO, 2020).

A liberação de cargas com a degradação dos polímeros é passível de acontecer com hidrogéis distintos, visto que algumas das condições necessárias para que isso ocorra ao longo do tempo são a baixa disponibilidade hídrica e a utilização de águas com salinidade acima de 0.003 dS/m^{-1} (CHEN *et al.*, 2006; CHEN *et al.*, 2016; NASCIMENTO, 2020)

Na análise da regressão em resposta aos níveis de salinidade, se constata que o aumento da condutividade elétrica da água de irrigação diminuiu o acúmulo de sódio no tratamento HA de 40,65 para 22,00 mg planta^{-1} e aumentando no tratamento HC de 12,69 para 20,48 mg planta^{-1} (Figura 9A). Para o potássio, na medida em que a CE da água aumentou, ocorreu a diminuição no acúmulo de K foliar em todos os tratamentos, sendo mais elevado no tratamento HA seguido por HC e SH na menor CE da água de irrigação (0,55; 0,44 e 0,39 mg planta^{-1} , respectivamente) e na maior CE, o tratamento HC apresentou maior acúmulo de K nas folhas seguido por HA e SH (0,24; 0,19 e 0,11 mg planta^{-1} , respectivamente) (Figura 9B).

Figura 9 - Acúmulo de sódio (A) e potássio (B) em plantas de alface em resposta ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC).



Fonte: Autor, 2021.

Ao observar o acúmulo de Na no tecido vegetal mediante salinidade crescente se constata que em HA, o acúmulo é reduzido com o aumento da salinidade devido a troca de cátions da estrutura do polímero alternativo com o aumento de Na⁺ no solo. Na composição da rede polimérica do hidrogel hidrotentor em HA, durante o segundo estágio de intumescimento, os íons divalentes são absorvidos com a água fazendo que o polímero atinja maior intumescimento. No terceiro estágio há troca dos íons monovalentes da estrutura do polímero com cátions divalentes na solução do meio, por meio da coordenação do grupo hidrofílico carboxilato, de modo que o potencial osmótico do hidrogel fica maior que o potencial da solução do solo (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017).

Devido a essa característica do polímero hidroretentor alternativo, ocorre maior umidade próxima às raízes das plantas, formando um bulbo úmido que desloca boa parte dos sais para a periferia do bulbo (GHEYI *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2018). A adição de polímeros hidroretentores pode reduzir a concentração de sais no solo com o aumento da disponibilidade hídrica, diluindo os sais presentes nos microporos e limitando a quantidade de sais próximos às raízes, causando menos estresse as plantas (AL JABRI; ABDEL RAHMAN; IBRAHIM, 2015; SAHA; SEKHARAN; MANNA, 2020).

Para o tratamento HC o aumento do acúmulo de sódio com a CE da água de irrigação reduziu o potencial de expansão e absorção de água pelo polímero. Neste material os cátions dos sais ligam-se aos grupos hidrofílicos e impedem a entrada de água ocasionando um efeito de proteção aniônica de carboxilatos por excesso de cátions resultando em uma repulsão eletrostática aniônica não perfeita. Consequentemente, há redução na pressão osmótica resultando em menor absorção de água (OMIDIAN *et al.*, 1999; MIRDARIKVANDE *et al.*, 2014; XIONG *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2019).

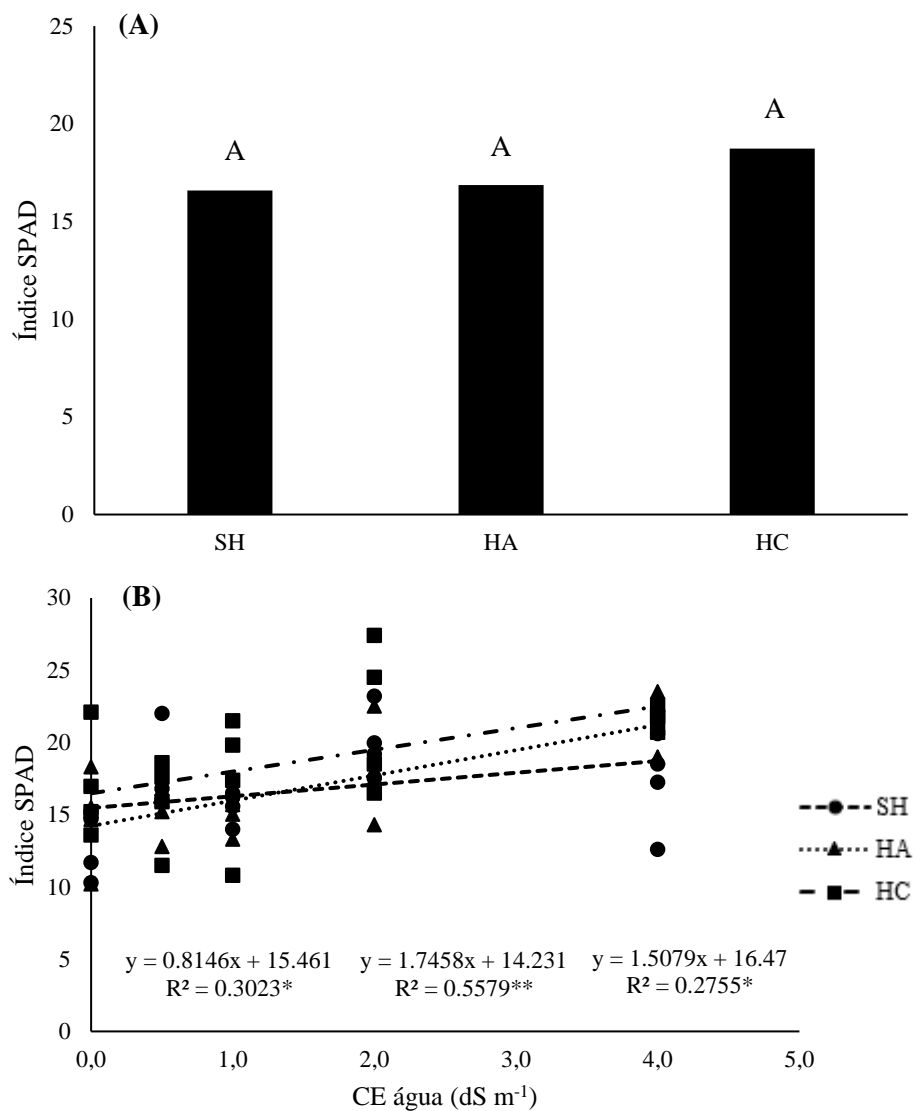
A elevação da CE juntamente ao sódio adicionado à água de irrigação explica a diminuição do acúmulo de potássio em tecido foliar em todos os tratamentos. A elevação na concentração do Na^+ próximo ao sistema radicular dificulta a absorção de K^+ pelas raízes em decorrência da competição entre cátions monovalentes (KAWASAKI; SHIMIZU; MORITSUGU, 1983; BRAZ, 2018; FREIRE; NASCIMENTO; DE ASSIS MEDEIROS, 2020).

O acúmulo de potássio no tratamento HA foi menos prejudicado pela salinidade, o que pode ser observado por meio da maior biomassa seca produzida que, mesmo com maior salinidade, foi superior aos demais tratamentos (Figura 6B). Os efeitos do sódio proveniente da água salina foram mais acentuados no tratamento SH em que não houve hidrogéis superabsorventes para atenuar os efeitos do sal. Contudo, essa atenuação foi evidenciada para o HA e não para o HC. Para o polímero alternativo HA, a adição de cargas à sua composição com Ca^{+2} favorece o movimento da água para o interior do polímero, contribuindo com a disponibilidade de água e com a absorção de potássio pelas plantas (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017). Como os efeitos positivos do potássio nas plantas envolvem o ajustamento osmótico, a atenuação dos efeitos do déficit hídrico e o uso mais eficiente da água, a maior absorção do elemento resulta em maior produção de matéria fresca e seca (PRADO, 2008; WARAICH *et al.*, 2011).

4.2.3 Indicadores bioquímicos de estresse hídrico e salino nas plantas

A avaliação do teor de clorofila foi realizada por meio do índice SPAD e não houve diferença entre os tratamentos SH, HA e HC, nos quais as leituras médias foram 16,6, 16,85 e 18,7, respectivamente (Figura 10A). Os valores observados foram semelhantes aos encontrados na literatura para a cultura da alface sem limitações ao desenvolvimento vegetativo devido a tolerância da alface a salinidade (MUNNS, 1993; OLIVEIRA *et al.*, 2010; PAULUS, 2008). Os resultados da Figura 10 condizem com a proposta inicial do experimento em submeter os tratamentos ao estresse hídrico e salino uma vez que a seca provoca redução nas taxas de clorofila (LI *et al.*, 2006).

Figura 10 - Índice SPAD representativo do teor de clorofila total em plantas de alface submetidas aos tratamentos com aplicação de hidrogel (A) e níveis crescentes de salinidade (B).

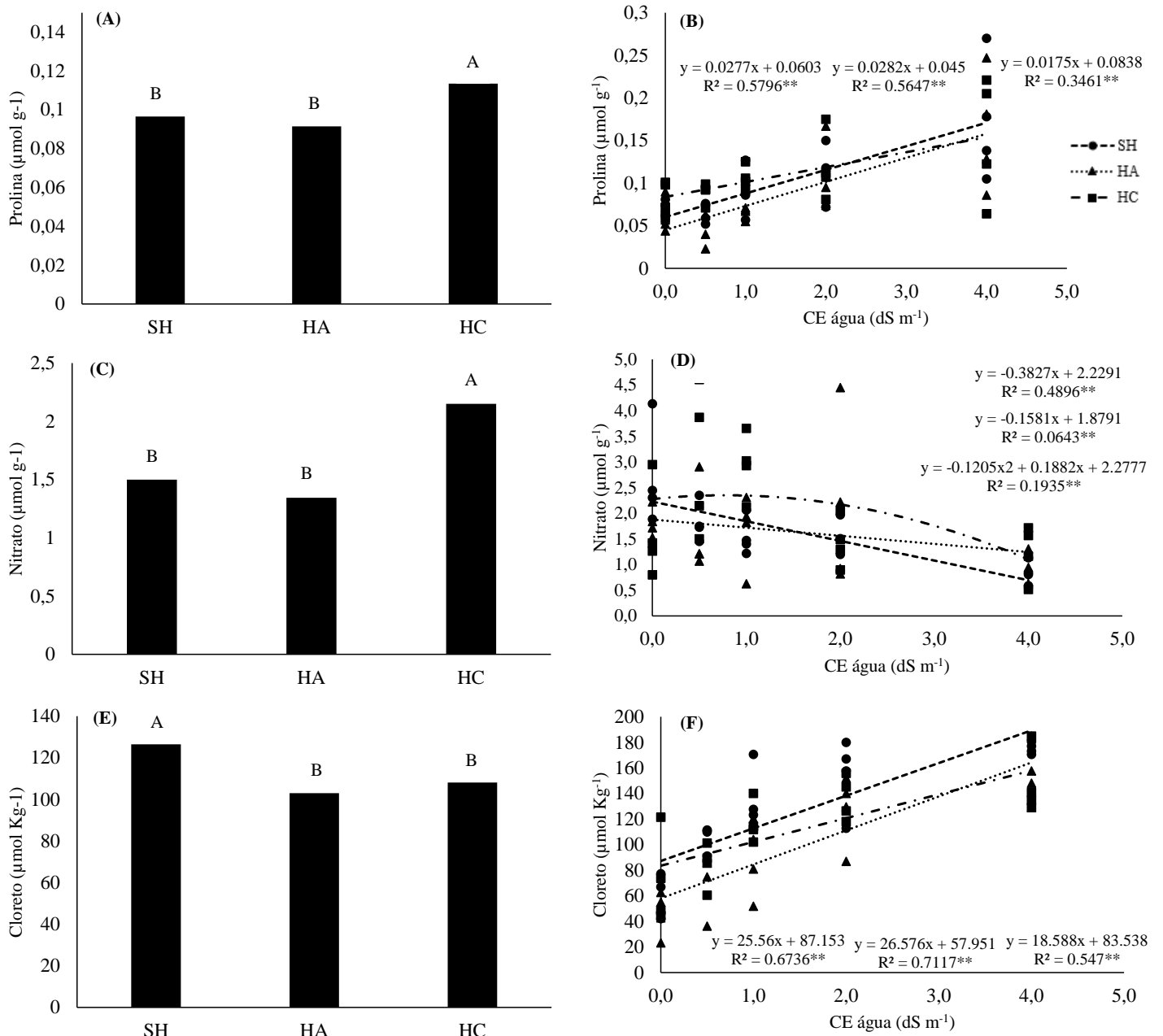


Valores baixos do índice SPAD são indicativos de sensibilidade à salinidade e deficiência hídrica (GRACIANO *et al.*, 2011; MAGALHÃES *et al.*, 2013). Contudo, ao analisar a curva de regressão em resposta à salinidade, se constata que houve aumento do índice SPAD com o aumento condutividade elétrica para os tratamentos SH, HA e HC, sendo que os tratamentos HC e HA resultaram em maiores valores do índice (22,5 e 21,21, respectivamente) em relação ao tratamento SH (18,72), conforme apresentado na Figura 10B.

A elevação da clorofila com a salinidade observada neste estudo é condizente com relatos da literatura de que o aumento da clorofila ocorre em resposta à tolerância mediana da alface ao excesso de sais (MUNNS, 1993; RODRIGUES, 2002; CARVALHO *et al.*, 2012). Os polímeros adicionados ao solo propiciaram maior inclinação nas retas, principalmente HC e menos acentuada em HA, indicando que a resposta da cultura é resultado da maior condutividade elétrica proveniente do excesso de sais no solo e a limitação hídrica.

Avaliando os indicadores de estresse hídrico prolina e nitrato, o tratamento HC resultou nos maiores teores (0,114 e 2,15 $\mu\text{mol g}^{-1}$, respectivamente); enquanto os teores de cloreto foram maiores para o tratamento SH (126,48 $\mu\text{mol g}^{-1}$) e menores para HC e HA (108,14 e 103,01 $\mu\text{mol g}^{-1}$, respectivamente), conforme apresentado nas Figuras 11 A, 11C e 11E. Os valores mencionados são considerados baixos para prolina e nitrato e elevados para o cloreto nas plantas de alface, indicando que em todos os tratamentos o material vegetal se desenvolveu em condição de estresse (KAVI KISHOR *et al.*, 2005; PAULUS *et al.*, 2010).

Figura 11 - Respostas dos indicadores de estresse prolina (A e B), nitrato (C e D) e cloreto (E e F) em tecido vegetal de alface em resposta aos tratamentos com sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e com hidrogel comercial (HC) e em resposta aos tratamentos com condutividade elétrica (CE) crescente.



Fonte: Autor, 2021.

A prolina tem como papel o ajustamento osmótico da planta sem proporcionar injúrias aos tecidos em relação aos íons; o nitrato e o cloreto desempenham a mesma função na regulação osmótica e redução do consumo de água por meio da redução da densidade estomática, contudo nitrato e cloreto causam danos aos tecidos (CHUNG; JIN; CHO, 2005;

PAULUS *et al.*, 2010; FRANCO-NAVARRO *et al.*, 2019).

Mesmo sendo considerado um condicionador de solo, o polímero comercial FortGel ao invés de atenuar os efeitos impostos pelo estresse hídrico e salino, resultou em maiores valores de prolina e nitrato ($0,114$ e $2,15 \mu\text{mol g}^{-1}$) em relação a SH e HA ($0,097$ e $0,092 \mu\text{mol g}^{-1}$; $1,5$ e $1,35 \mu\text{mol g}^{-1}$), respectivamente, já que perdeu seu potencial máximo de absorção de água e expansão, reiterando o efeito de blindagem devido ao excesso de cátions no solo (HEIDARI *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2021).

O maior teor de cloreto nas plantas observado no tratamento SH indica benefícios dos polímeros aplicados favorecendo a disponibilidade hídrica. No solo dos tratamentos HA e HC a água permanece por mais tempo e, mesmo com a homogeneização dos hidrogéis nos vasos durante a montagem do experimento, as raízes das plantas de alface se desenvolveram por entre o polímero intumescido dos seus respectivos tratamentos. Deste modo, o sistema radicular esteve em contato por um tempo superior com água formando um bulbo úmido que pode ter reduzido a absorção dos íons que causam estresse hídrico e salino.

Na análise dos indicadores de estresse em resposta ao aumento da salinidade, se constata que a prolina aumentou com a condutividade elétrica (CE) da água de irrigação, principalmente no tratamento SH em que os teores de prolina aumentaram de $0,06$ para $0,17 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Figura 11 B). O nível de prolina acompanha o crescimento da CE da água executando o papel protetor na planta e minimizando os efeitos do estresse hídrico e salino (RODRIGUEZ *et al.*, 1997; LIMA *et al.*, 2004; PAULUS *et al.*, 2010).

O nitrato decresceu com a elevação da CE da água de irrigação em todos os tratamentos (Figura 11D). A redução do nitrato pode ser explicada com a redução da produção de biomassa com o aumento da salinidade (Figura 6) (CHUNG; JIN; CHO, 2005; PAULUS *et al.*, 2010). O mesmo resultado foi encontrado por Miceli *et al.* (2003), com a elevação da CE ocorreu a redução no teor de nitrato devido a menor produção de biomassa.

Os teores de nitrato nas plantas de alface foram mais elevados no tratamento HC (Figura 11C), da mesma forma que o acúmulo de nitrogênio (Figura 7A). Comparando os dois polímeros nas duas maiores CEs, o tratamento HA teve menor concentração de cloreto em 2 dS/m ($111,1 \mu\text{mol kg}^{-1}$) e maior concentração quando em 4 dS/m ($164,3 \mu\text{mol kg}^{-1}$), já em HC a concentração cresce com o aumento da CE da água aplicada, maior em 2 dS/m ($120,7 \mu\text{mol kg}^{-1}$) porém é menor que HA em 4 dS/m ($157,9 \mu\text{mol kg}^{-1}$)

As constatações referentes ao nitrato se devem à competição na absorção entre nitrato, sintetizado como regulador osmótico devido a elevada CE do solo e excesso de íons potássio e cloreto (FLORES *et al.*, 2002; FREIRE; NASCIMENTO; DE ASSIS MEDEIROS,

2020).

A redução nos teores de nitrato no material vegetal com a elevação da salinidade também pode ser explicada pelo aumento dos teores de cloreto no tecido vegetal, de modo que o excesso de Cl^- nas folhas reduz a atividade da enzima redutase do nitrato, levando à redução dos níveis de nitrogênio total e da absorção do nitrato pelas plantas (PARIDA; DAS, 2004; BRAZ, 2018;). O nitrogênio é o elemento fundamental e mais requerido na nutrição das plantas sendo afetado pela condição salina imposta ao solo e a planta (ARAGÃO *et al.*, 2010; CHAVES; GHEYI; RIBEIRO, 2011).

Em relação a CE da água que foi crescente, o polímero alternativo promoveu menor assimilação de nitrogênio total que o polímero comercial (1,35 e 2,15 mg kg^{-1} , respectivamente), indicando menor síntese de NO_3^- e esse resultado pode ser interpretado como atenuação do estresse hídrico e salino devido as menores quantidades dos indicadores de estresse.

4.2.4 Atributos químicos do solo e volume de água requerido na irrigação

No resumo da análise de variância (ANOVA) se constata que houve interação entre os fatores de tratamentos a 1% de significância para teores de magnésio e volume de água requerido na irrigação (Tabela 4). Interação a 5% de significância foi observada para valores de saturação por bases (V%) e de alumínio (m%). Os demais atributos químicos do solo responderam isoladamente aos fatores de tratamento, com exceção da acidez potencial (H+Al) que não variou com a aplicação de hidrogel e o carbono orgânico (C_{org}) que não variou com a condutividade elétrica (Tabela 4).

Tabela 4 - Resumo da análise da variância (ANOVA) para atributos do solo e volume de água gasto na irrigação em resposta aos tratamentos referentes à aplicação de hidrogel e condutividade elétrica da água de irrigação.

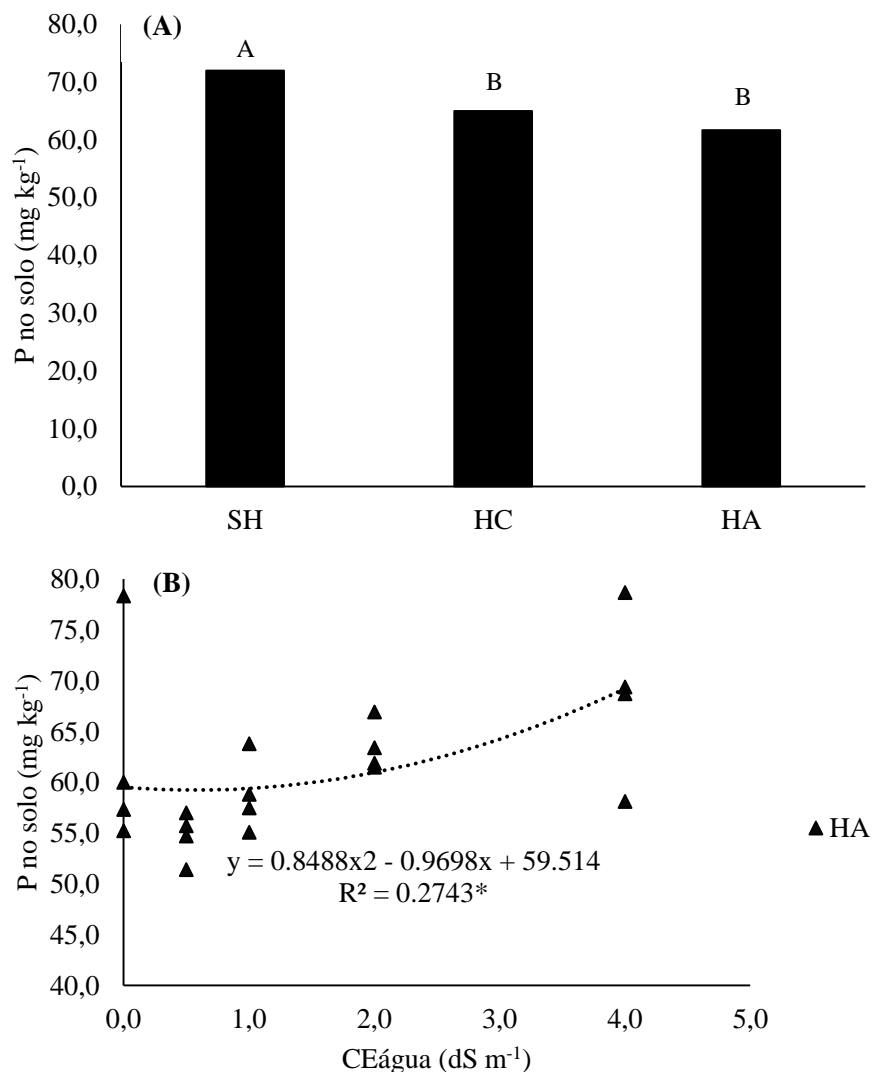
FV ¹	P	Ca	Mg	K	Na	Al	H+Al	T	SB	V%	m%	PST	CEs ⁵	Corg	Água ⁶
-----Valor F-----															
H ²	17,45**	7.98**	20.81**	149.6**	27.86**	---	0.62 ^{ns}	5.41**	19.81**	22.31**	27.01**	30.59**	3.64*	10.93**	39.47**
CEa ³	2,67*	121**	26.34**	3.24*	128.1**	---	3.59*	50.73**	169.3**	126.6**	116.7**	112**	273.4**	2.4 ^{ns}	11.93**
H x CEa	1,47 ^{ns}	1.68 ^{ns}	3.41**	0.97 ^{ns}	2.14 ^{ns}	---	1.23 ^{ns}	1.09 ^{ns}	2.06 ^{ns}	2.84*	2.26*	1.76 ^{ns}	1.52 ^{ns}	0.87 ^{ns}	4.67**
CV% ⁴	8,5	6.2	21.93	19.36	22.21	---	6.11	5.42	7.01	4.51	7.22	19.9	14.6	9.93	7.83

¹FV = Fonte de variação; ²H = tratamentos referentes ao hidrogel; ³CEa = Condutividade elétrica da água de irrigação; ⁴CV = coeficiente de variação; ⁵CEs = condutividade elétrica do solo; ⁶Água = volume de água usado na irrigação do experimento. ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

Os teores de fósforo (P) no solo nos tratamentos HC e HA não diferiram estatisticamente e foram menores (65 e 61 mg kg^{-1} , respectivamente) em relação ao observado para o tratamento SH (72 mg kg^{-1}), conforme apresentado na Figura 12A. Os valores encontrados para o fósforo estão dentro dos níveis deste elemento exigidos para a cultura da alface (FAQUIN e ANDADRE, 2004).

Em parte, as diferenças entre teores de P no solo em resposta aos tratamentos com hidrogel se devem à ação das plantas que cresceram no solo submetido aos distintos tratamentos e levaram à exportação de P. Contudo, como a biomassa vegetal produzida em SH não foi inferior à observada em HC, fica reforçada a influência de outros fatores na disponibilidade de P no solo. Ressalta-se que a mesma quantidade de P foi aplicada ao solo durante a adubação de fundação.

Figura 12 - Disponibilidade de fósforo no solo nos tratamentos SH, HA e HC.



Fonte: Autor, 2021.

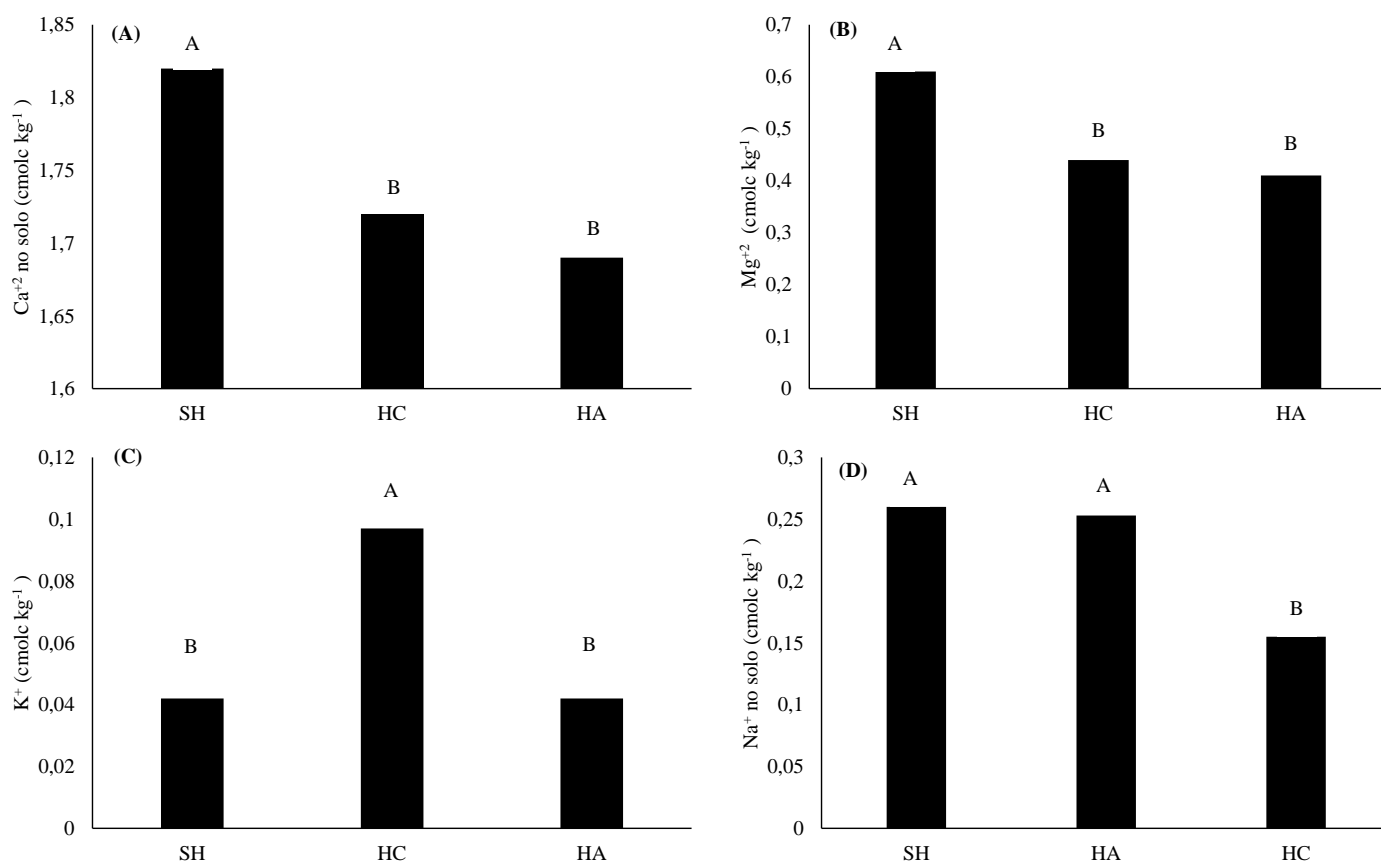
Na análise de regressão em resposta aos níveis crescentes de CE na água de

irrigação, se constata que houve significância somente para o tratamento HA, com aumento nos teores de P no solo com o aumento da salinidade (Figura 12B). Quando o sódio substitui o cálcio, magnésio e o alumínio no complexo de troca, há elevação do potencial negativo, provocando dessorção de fósforo no solo (SANTOS, 1995; SHARPLEY; CURTIN; SYERS, 1988), explicando o aumento nos teores de P no solo com a elevação da salinidade. Também é válido considerar que o aumento da salinidade levou à redução na produção de biomassa (Figura 6), levando à menor exportação de nutrientes que pode ter favorecido os maiores teores de P no solo com a salinidade.

Benefícios do tratamento HA podem ocorrer em termos de disponibilidade de P no solo e absorção do nutriente pelas plantas. Se o HA proporciona maior disponibilidade hídrica na rizosfera (Figura 3), onde o P é absorvido por difusão, a elevação no teor de água disponível próximo às raízes possibilita maior absorção do elemento (DOS SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo foram maiores para o tratamento SH (1,82 e 0,61 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente), e menores para os tratamentos HC e HA, que não diferiram estatisticamente apresentando 1,72 e 1,69 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de Ca e 0,44 e 0,41 de Mg, respectivamente (Figuras 13A e 13B). O teor de potássio (K) foi maior para o tratamento HC (0,097 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) e menor para os tratamentos SH e HA que não diferiram estatisticamente (0,042 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente). Os teores de sódio (Na) no solo foram maiores para SH e HA que não diferiram estatisticamente (0,26 e 0,25 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente) e menores para o tratamento HC (0,15 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), conforme apresentado nas Figuras 13C e 13D.

Figura 13 - Disponibilidade de cálcio (A), magnésio (B), potássio (C) e sódio (D) no solo nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC).



Fonte: Autor, 2021.

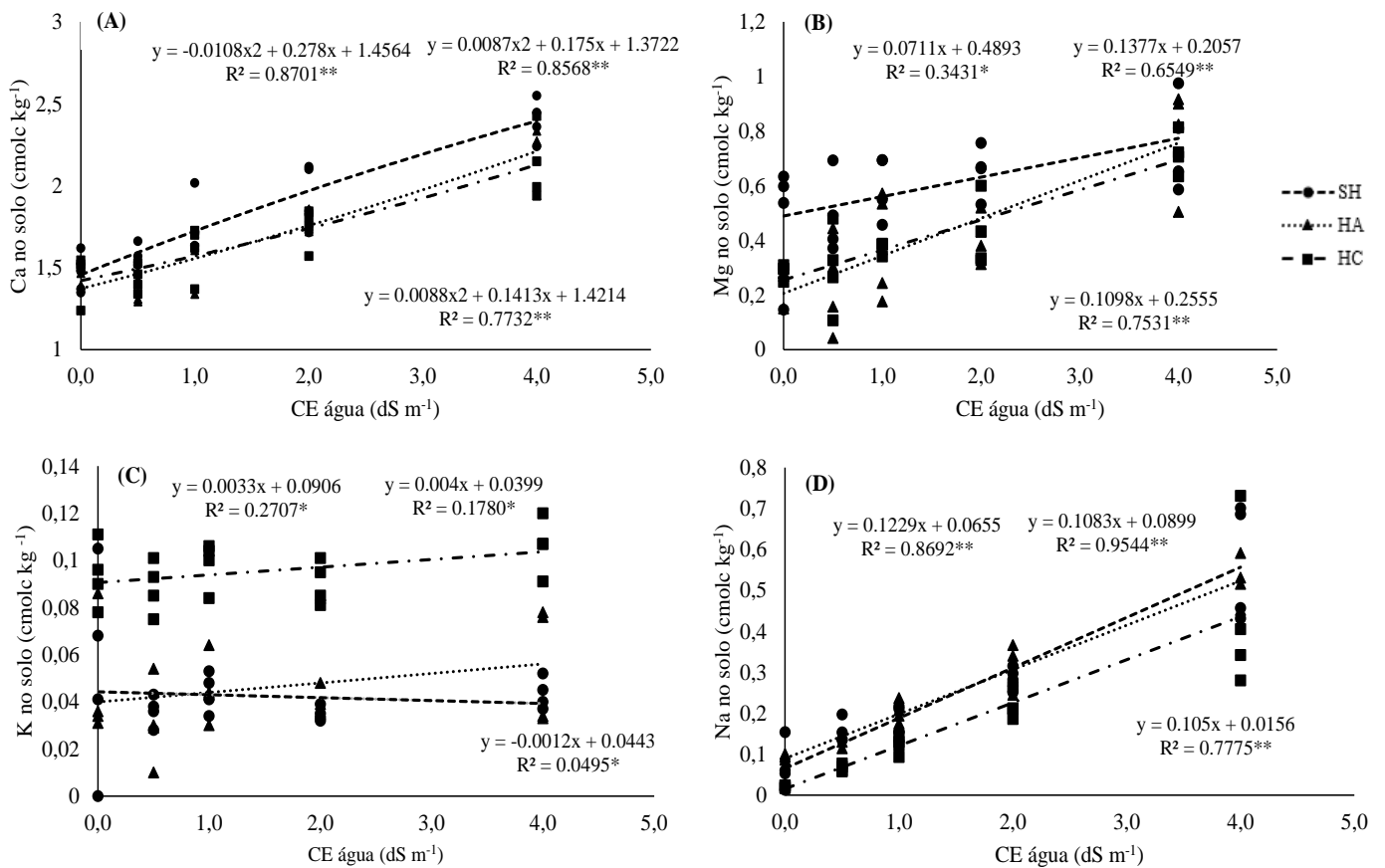
Como a água salina utilizada no estudo continha sais de NaCl , CaCl_2 e MgCl_2 , resultou em aumento nos teores de Ca e Mg no solo, conforme também observado por Gonçalves *et al.* (2011), o que ocorreu de forma mais expressiva no tratamento SH por não haver motivos aparentes para reduzir a disponibilidade dessas bases em relação aos outros dois tratamentos avaliados.

O tratamento HC resultou em maior teor de K no solo provavelmente devido a troca do K presente na estrutura do polímero comercial com cátions divalentes (ALBUQUERQUE, 2019; ZHANG *et al.*, 2014) ou até mesmo com o Na em excesso no solo. Isso influenciou o desenvolvimento vegetal resultando em maior acúmulo de K no tratamento HC (Figura 13C). A possível troca entre o Na do solo com o K presente na estrutura do polímero comercial permite explicar o menor teor de Na no solo associado ao tratamento HC. No tratamento HA, a coordenação do carboxilato com o cálcio na síntese do polímero reduz a interação dos elementos de sua estrutura com cátions presentes no solo (QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017).

Os teores de K observados no solo, variando de 0,097 a 0,042 cmol_c kg⁻¹ entre os tratamentos, são considerados baixos para a cultura da alface (CECÍLIO FILHO *et al.*, 2018). Além da influência do tratamento HC, os teores de K no solo também se devem à adubação realizada conforme o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Ceará (FERNANDES *et al.*, 1993) e ao efeito das plantas de alface que cresceram no solo durante o experimento.

Na análise das curvas de regressão são observados aumentos nos teores de Ca, Mg, K e Na no solo com o aumento da CE da água de irrigação (Figura 14 A, B, C e D).

Figura 14 - Disponibilidade de cálcio (A), magnésio (B), potássio (C) e sódio (D) no solo nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC) em função de diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação.



Fonte: Autor, 2021.

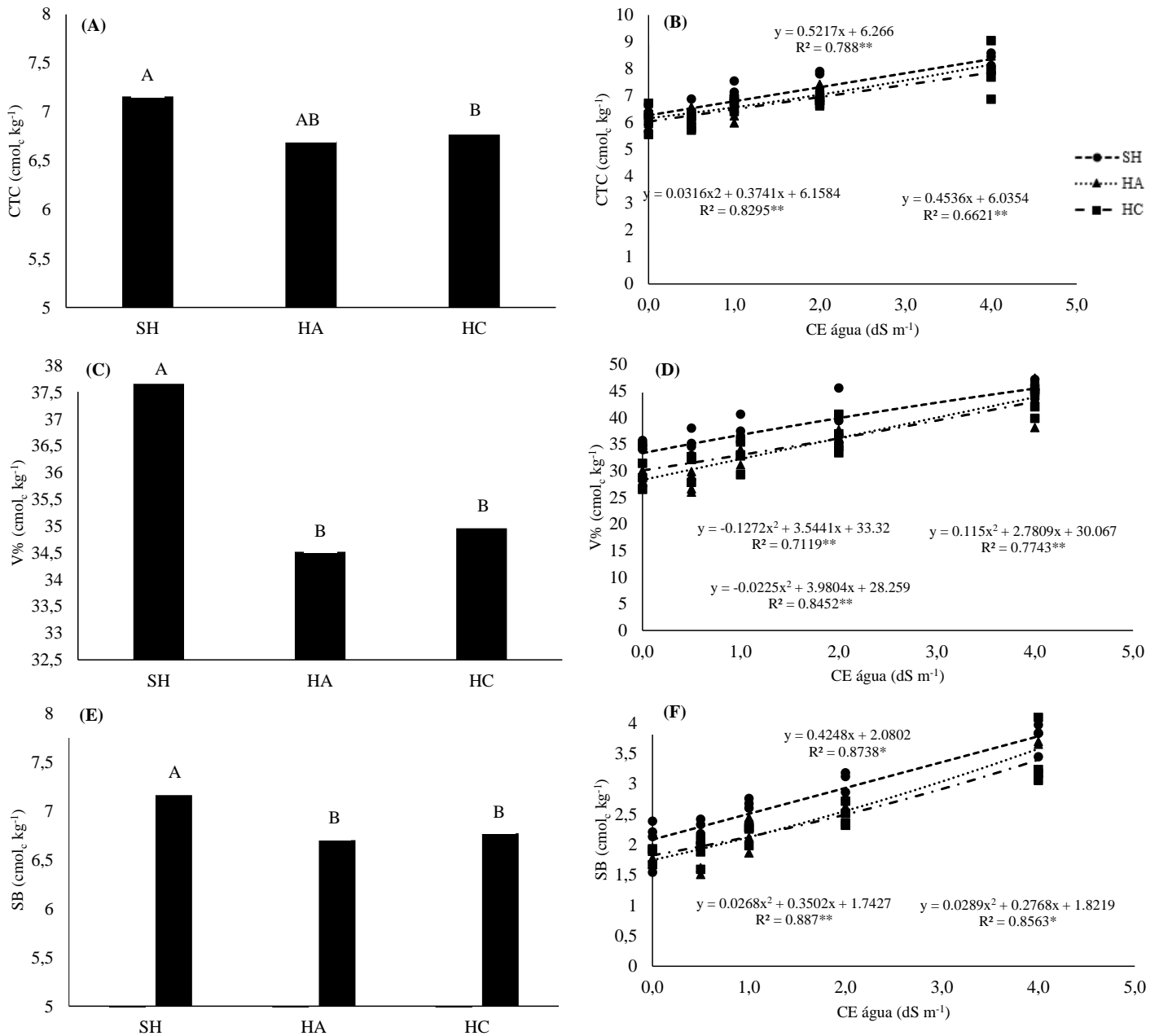
Nos tratamentos SH, HA e HC os teores de Ca, Mg e Na no solo foram influenciados pelas soluções utilizadas na elaboração das águas de irrigação que contém sais de NaCl, CaCl₂ e MgCl₂. No entanto, quando os tratamentos são avaliados separadamente, observa-se que a elevação nos teores de bases trocáveis no solo também pode ser explicada por fenômenos químicos que envolvem tanto o solo como solo+hidrogéis. A exemplo, o teor de K no solo

respondendo à interação entre os fatores de tratamento é indicativo da competição entre K e Na pelos sítios de troca (MARSCHNER, 1995), já que existe excesso de sítios devido a adição dos polímeros no solo (LIMA, 2007; PEDROTTI *et al.*, 2015; QUEIRÓS; BEZERRA; FEITOSA, 2017). O maior teor de K no solo no tratamento HC é resultado da disponibilização do íon potássio da estrutura do polímero ao solo (NASCIMENTO, 2020; NAVROSKI *et al.*, 2014).

A elevação nos teores de Ca e Mg é indicativo de que as águas utilizadas na irrigação não apresentaram RAS (Relação de Adsorção de Sódio) elevada, que impactou de forma mais acentuada o tratamento SH. Este é um forte indicativo que a combinação do uso de hidrogéis com águas de baixa qualidade para a irrigação traz benefícios como amenizar o excesso de sódio. Além desse fato, a proporção de sódio na água de irrigação não foi elevada a ponto de ocasionar problemas com sodicidade e deslocamento dos outros cátions por efeito de massa.

As alterações ocorridas nos teores de Ca, Mg, K e Na em função dos tratamentos com hidrogel e salinidade crescente influenciaram os valores dos atributos calculados do solo como no valor de T, V% e SB, conforme já observado por outros autores (BARRETO; NASCIMENTO; MEDEIROS, 2013; NASCIMENTO e FILHO, 2015). Conforme observado na Figura 15A, a CTC foi maior no tratamento SH ($7,16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), com valor que não diferiu estatisticamente de HA ($6,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e HC ($6,77 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) que, por sua vez, não diferiu estatisticamente de HA (Figura 15A). A saturação por bases foi maior para SH (37,66%) e menor para HA e HC, cujos valores não diferiram estatisticamente (34,52 e 34,96 %, respectivamente) (Figura 15C), similarmente ao que ocorreu para a soma de bases (Figura 15E).

Figura 15 - Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (V%) e soma de bases (SB) no solo cultivado com alface em função de condutividade elétrica (CE) crescente da água de irrigação.



Fonte: Autor, 2021.

Os valores de T encontrados após retirada das plantas são considerados bons, para V% valores abaixo de 50 são considerados baixos (TANAMATI, 2012). As necessidades nutricionais da alface respondem essa redução da saturação de bases ao final do experimento, dos macro elementos o elemento mais requerido é o K, depois do nitrogênio, sendo responsável por funções metabólicas e crescimento; os elementos Mg e Ca são os menos extraídos do solo pela alface (CANCELLIER *et al.*, 2010; GRANGEIRO *et al.*, 2006). Deste modo, a saturação

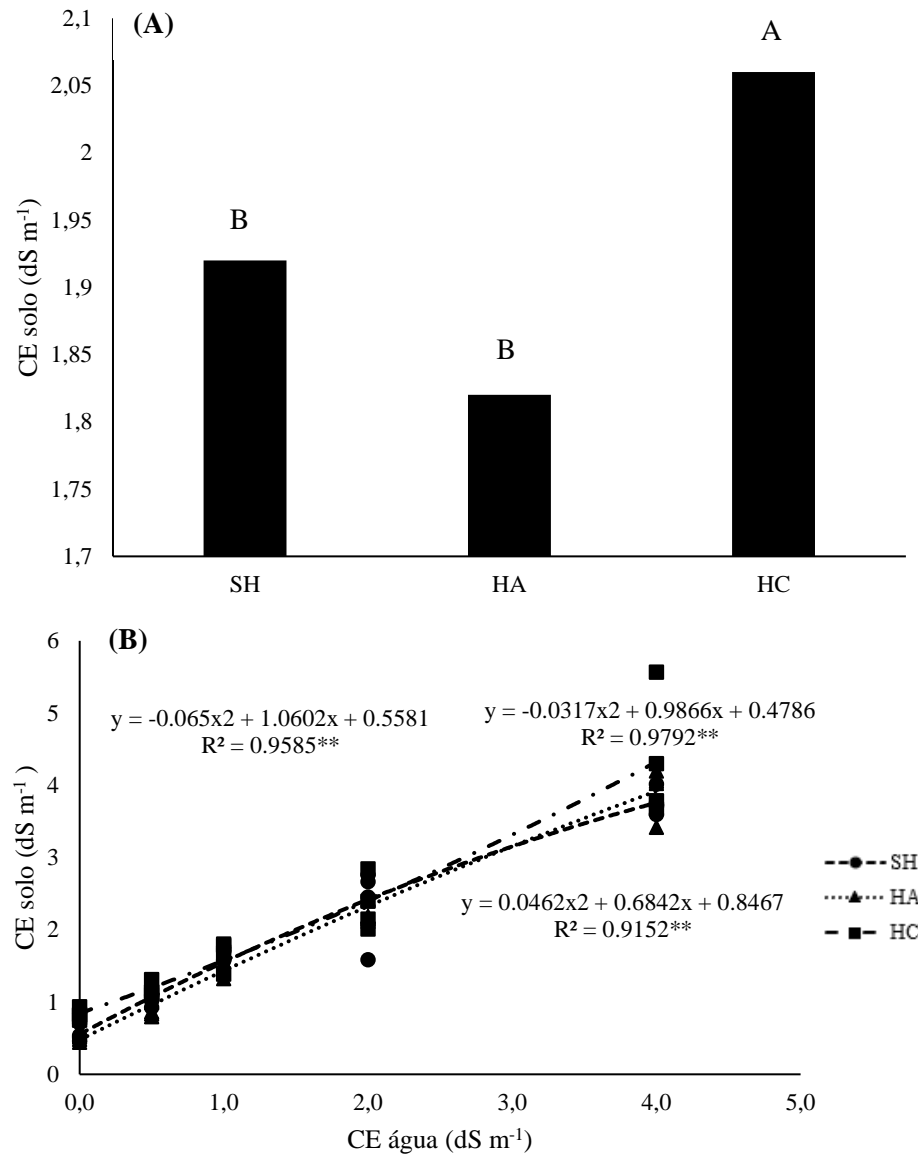
por bases na cultura da alface deve ser composta principalmente por potássio para o ótimo da cultura.

Embora hidrogéis possam elevar a CTC do solo, deve existir certa quantidade de cargas negativas na matriz polimérica para que tenha sítios de troca (AZEVEDO, 2012). Adicionalmente, a CTC do solo foi determinada neste estudo de forma indireta, ou seja, a partir dos teores de bases trocáveis e acidez. A quantificação da CTC de forma direta poderia identificar alguma diferença na quantidade de cargas negativas disponíveis nos tratamentos que receberam os hidrogéis em relação ao tratamento sem o polímero.

Na análise das curvas de regressão se constata aumentos nos valores de CTC, V% e SB com a salinidade da água de irrigação, sendo superiores no tratamento SH (Figuras 15B, 15D e 15F). Esses atributos aumentam com a salinidade em virtude dos cátions presentes na solução salina que não foram lixiviados devido ao reduzido volume de água aplicado. O aumento nos atributos mencionados para o tratamento HC também se deve ao K existente no polímero e que foi liberado ao solo.

Quanto aos atributos indicadores da salinidade no solo, o tratamento HC resultou em maior CE (2,06 dS/m) em relação aos tratamentos HA e SH cujos valores de CE não diferiram significativamente (1,82 e 1,92 dS/m, respectivamente), como pode ser observado na Figura 16A.

Figura 16 - Condutividade elétrica do solo em resposta ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC).



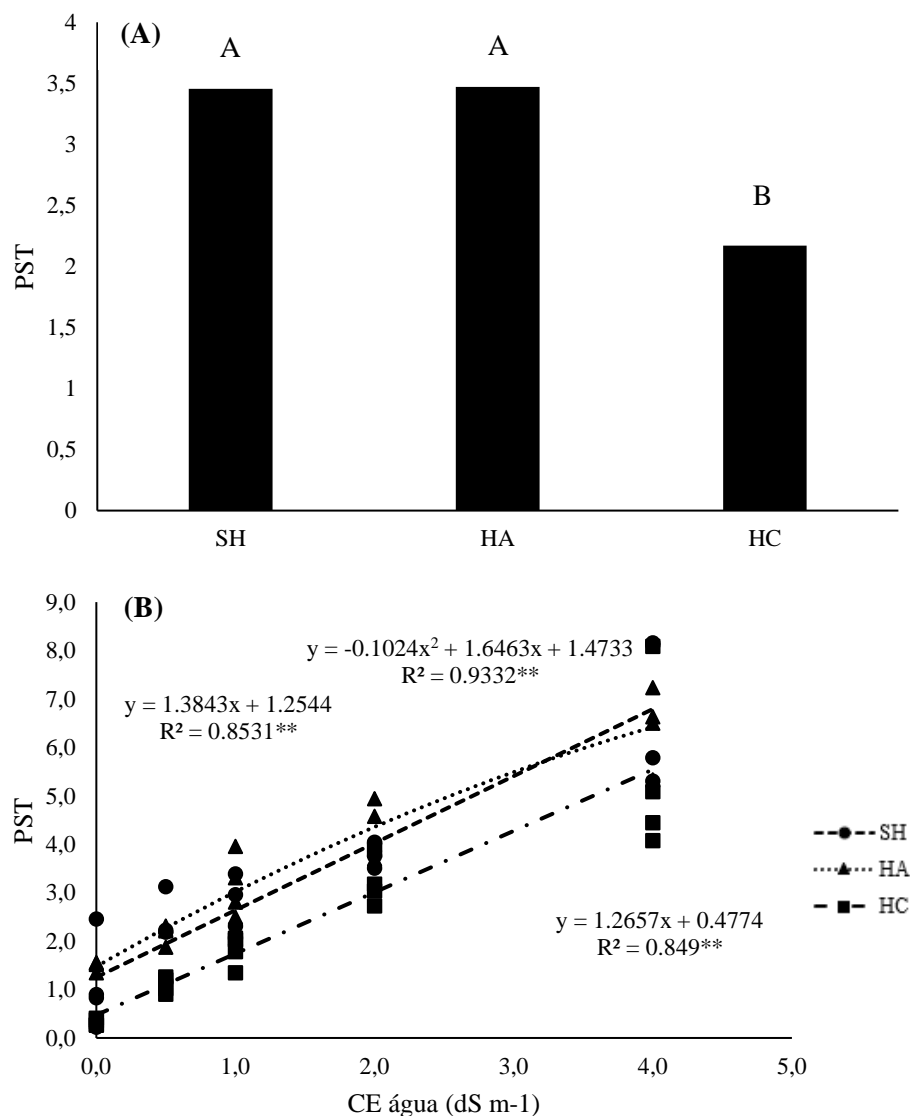
Fonte: Autor, 2021.

Os valores de CE do solo não são considerados indicativos para a classificação de solo salino nos tratamentos SH e HC mesmo na maior CE da água de irrigação (4 dS/m), 3,71 e 3,91 dS/m, respectivamente; e o maior valor observado no tratamento HC está associada à disponibilização de K da composição do polímero (YIPING *et al.*, 2016; ALBUQUERQUE, 2019).

Na análise da curva de regressão, se constata aumento nos valores de CE do solo

com o aumento da CE na água de irrigação, conforme esperado. Na maior CE da água de irrigação (4 dS/m) foi observada maior CE na solução do solo vinculada ao tratamento HC (Figura 16B). Os valores de CE do solo são considerados indicativos para a classificação de solo salino no tratamento HC (4,32 dS/m) na maior condutividade elétrica de água aplicada (Figura 16B), devido ao valor maior ou igual a 4 dS/m (USSS STAFF., 1954)

Figura 17 - Porcentagem de sódio trocável do solo em resposta ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação para os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e hidrogel comercial (HC).



Fonte: Autor, 2021.

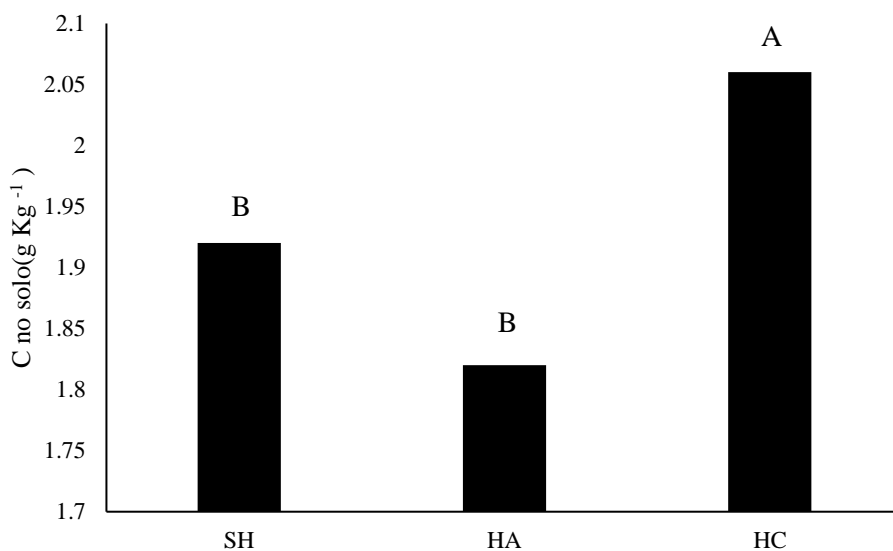
Os tratamentos SH e HA apresentaram maior porcentagem de sódio trocável PST (3,45 e 3,47, respectivamente) em relação ao tratamento HC cuja PST foi 2,17 (Figura 17A). Vale ressaltar que esse mesmo comportamento foi encontrado para os teores de Na^+ no solo.

Como a PST é obtida a partir do teor de sódio em relação à CTC do solo, os resultados indicam que no tratamento HC houve menor quantidade de Na em detrimento aos demais cátions que preenchem a CTC do solo.

Na análise da curva de regressão se constata que o valor da PST aumenta com a concentração de sais na água utilizada para a irrigação, conforme já observado por outros autores (ALBUQUERQUE *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2015; SILVA; NASCIMENTO, 2019). O aumento da PST foi menos expressivo para o tratamento HC, indicando diminuição no papel de Na em relação aos demais cátions que são importantes ao desenvolvimento vegetal. O potássio liberado pela estrutura do polímero no tratamento HC, somado à adubação potássica realizada, aumentou o teor de K trocável no solo, reduziu a influência do Na trocável e aumentou o acúmulo de MSPA em HC (Figura 6).

Para o teor de carbono orgânico no solo (Figura 18) foi constatada significância em resposta à aplicação de hidrogel, com o tratamento HC resultando no maior teor ($2,06 \text{ g kg}^{-1}$).

Figura 18 - Teor de carbono do solo cultivado com alface com os tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC).

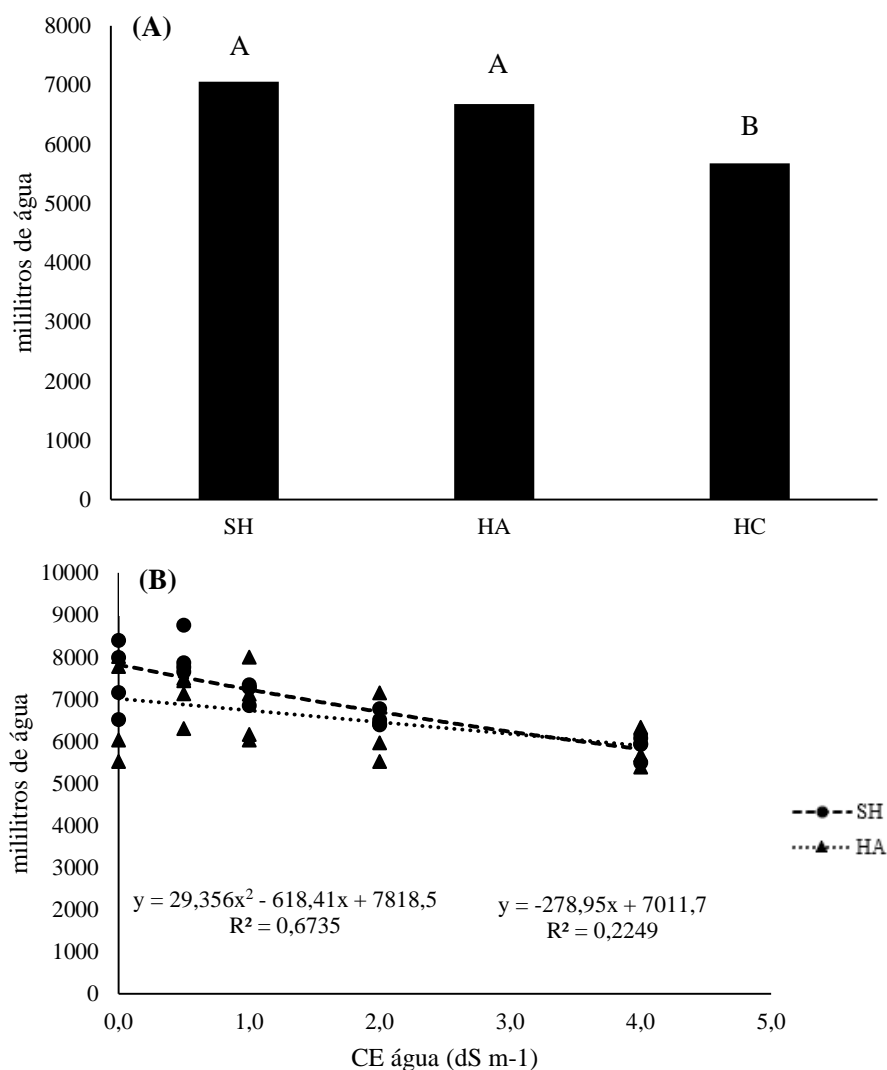


Fonte: Autor, 2021.

Os tratamentos SH e HA não diferiram estatisticamente e apresentaram menores teores de carbono orgânico ($1,92$ e $1,82 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente) em relação ao HC (Figura 18). Os menores teores de carbono orgânico em SH e HA podem estar associados aos maiores teores de Na encontrados no solo para esses dois tratamentos. O íon Na^+ é um elemento chave no que se refere aos teores de carbono em solos afetados por sais, uma vez que facilita a decomposição da matéria orgânica pela população bacteriana do solo (NELSON; LADD; OADES, 1996; WONG *et al.*, 2010)

Por fim, foi avaliado o volume total de água requerido para que a irrigação dos tratamentos fosse suficiente para manter a umidade do solo em 60 % da capacidade de campo durante a condução do experimento. Nos tratamentos SH e HA foram demandados maiores volumes de água (7054,62 e 6677,57 mL , respectivamente) que não diferiram entre si (Figura 19A). Já o tratamento (HC) demandou menos água (5676 mL) em relação aos demais tratamentos avaliados (Figura 19A).

Figura 19 - Volume de água necessário para irrigar plantas de alface nos tratamentos sem hidrogel (SH), com hidrogel alternativo (HA) e comercial (HC) submetidas à condutividade elétrica (CE) crescente da água de irrigação.



Fonte: Autor, 2021.

O uso da água nos tratamentos refletiu os indicadores MFPA e MSPA, em que ambos foram superiores em HA, seguido por HC e SH (Figura 5). Desse modo, com a maior produção de biomassa, houve maior evapotranspiração resultando em maior demanda por

irrigação. Apesar da maior água disponível no solo associada ao tratamento HA (Figura 3), a maior produção de biomassa nesse tratamento levando à maior demanda por irrigação, confirma a baixa disponibilidade de água ao longo do estudo.

No tratamento HC, além da baixa disponibilidade de água também houve baixa demanda de água para a irrigação (Figuras 3 e 19A). Isso ocorreu devido ao menor consumo de água pelas plantas quando há aumento ou níveis elevados de salinidade no solo, desta forma a transpiração é afetada pelo potencial mátrico do solo (DIAS *et al.*, 2005b). Esses efeitos não foram acentuados nos tratamentos SH e HA, já que mesmo com a ausência da lixiviação dos sais e a adição de cargas de superfície, respectivamente, ocorreu o processo de transpiração e absorção de água pelas plantas.

Na análise da curva de regressão se constata que o aumento da condutividade elétrica reduziu a demanda por água de irrigação de forma significativa para os tratamentos SH e HA (Figura 19B). Isso é explicado pela redução na produção de biomassa em resposta à salinidade, conforme apresentado na Figura 3B, que levou à diminuição da evapotranspiração e na demanda por água de irrigação. O uso de águas com diferentes condutividades elétricas produz resultados distintos no seu uso para irrigação. Com o aumento da condutividade elétrica da água de irrigação ocorre a redução do consumo hídrico da planta por limitação da evapotranspiração, oriunda do ajuste osmótico necessário para amenizar os efeitos dos estresses hídrico e salino, afetando diretamente a produção de biomassa (BRAZ, 2018; PAULUS *et al.*, 2012; SOARES, 2007).

5 CONCLUSÕES

O limite de salinidade da água de irrigação que proporciona maior retenção de água pelo polímero alternativo à base de cálcio é superior ao polímero comercial. Além disso, o polímero alternativo apresenta maior número e frequência de poros ocupados até 2dS/m.

O polímero contendo carbonato de cálcio promove maior retenção e disponibilidade de água às plantas quando comparado ao polímero a base de acrilamida e acrilato de potássio, favorecendo a produção e a qualidade da alface sob as condições dos estresses impostos neste estudo.

Devido aos resultados superiores do polímero alternativo, ele distingue-se do polímero comercial e da ausência do polímero no solo devido a redução dos efeitos do estresse hídrico e salino possibilitando maior acúmulo de biomassa, maior acúmulo de potássio, menor produção de indicadores de estresse, maior absorção dos macronutrientes e atenuação dos efeitos do excesso de sódio no solo. Desta forma, a aplicabilidade do polímero a base de carbonato de cálcio torna-se válida como condicionador do solo para a horticultura em condições salinas.

REFERÊNCIAS

- AHMED, E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. **Journal of Advanced Research**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 105–121, 2015.
- AL JABRI, S. A.; ABDEL RAHMAN, H. A.; IBRAHIM, A. M. Agricultural Polymers Revisited: Salinity Interactions and Soil-Water Conservation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 46, n. 21, p. 2661–2674, 2015.
- ALBUQUERQUE, A. S. *et al.* Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis juliflora*. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 61, p. 1–8, 2018.
- ALBUQUERQUE, G. H. D. S. **Hidrogel de acrilamida e acrilato para estratégias de recuperação de um argissolo em processo de degradação**. 2019. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- ANDRADE, R. DA S. ; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado Estimation of moisture at field capacity in soils under ‘ Cerrado ’. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.
- ANDRY, H. *et al.* Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 373, n. 1–2, p. 177–183, 2009.
- AOUADA, A. F.; MATTOSO, L. H. C. Hidrogéis Biodegradáveis: uma opção na aplicação como veículos carreadores de sistemas de liberação controlada de pesticidas. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, [s. l.], v. 28, p. 32, 2009.
- AOUADA, F. A. *et al.* Correlação entre parâmetros da cinética de intumescimento com características estruturais e hidrofílicas de hidrogéis de poliacrilamida e metilcelulose. **Química Nova**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1482–1490, 2009.
- ARAGÃO, R. M. *et al.* Absorção, fluxo no xilema e assimilação do nitrato em feijão-caupi submetido à salinidade. **Revista Ciencia Agronomica**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 100–106, 2010.
- ARAÚJO, W. F. *et al.* Rendimento e eficiência do uso da água pela alface em função da lâmina de irrigação. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 115–120, 2010.
- AZEVEDO, J. M. G. DE. **Produção de mudas de cafeeiros sob efeitos de lâminas de irrigação, hidrorretentor e recipientes**. 2012. 87 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2012.
- BALENA, S. P. **Efeito de polímeros hidroretentores nas propriedades físicas e hidráulicas de dois meios porosos**. 1998. 57 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.
- BARRETO, A. N.; NASCIMENTO, J. J. V. R.; MEDEIROS, E. P. DE. Changes in chemical attributes of a Fluvent cultivated with castor bean and irrigated with wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 480–486, 2013.

- BARROS, M. DE F. C. *et al.* Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 59–64, 2004.
- BARROS, M. F. C. *et al.* Avaliação de níveis de gesso para correção de sodicidade de solos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 17–22, 2006.
- BERNARDI, M. R. *et al.* Crescimento de mudas de Corumbiara citriodora em função do uso de hidrogel e adubação. **Cerne, Lavras**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 67–74, 2012.
- BHARDWAJ, A. K. *et al.* Water Retention and Hydraulic Conductivity of Cross-Linked Polyacrylamides in Sandy Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 71, n. 2, p. 406–412, 2007.
- BOUYOUCOS, G. J. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils 1. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 54, n. 5, p. 464–465, 1962.
- BRAZ, R. D. S. **Efeitos da adubação nitrogenada na cultura do milho sob estresse salino em dois solos**. 2018. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BRITO, A. DOS S. *et al.* Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 1939–1948, 2011.
- BRITO, C. W. D. Q. *et al.* Síntese e caracterização de hidrogéis compósitos a partir de copolímeros acrilamida-acrilato e caulim efeito da constituição de diferentes caulins do nordeste brasileiro. **Quimica Nova**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 40–45, 2013.
- CAMARA, G. R. *et al.* Avaliação do desenvolvimento do cafeeiro Conilon robusta tropical mediante uso de polímeros hidroretentores e diferentes turnos de rega. **Enciclopédia Biosfera**, [s. l.], v. 7, n. 13, p. 135–146, 2011.
- CANCELLIER, L. L. *et al.* Doses de potássio nas respostas morfofisiológicas de alface. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 21–27, 2010.
- CANNAZZA, G. *et al.* Experimental assessment of the use of a novel superabsorbent polymer (SAP) for the optimization of water consumption in agricultural irrigation process. **Water (Switzerland)**, v. 6, n. 7, p. 2056–2069, 2014.
- CARVALHO, K. DOS S. *et al.* Rúcula submetida à adubação nitrogenada via fertirrigação. **Enciclopédia Biosfera**, [s. l.], v. 8, n. 15, p. 1445–1553, 2012.
- CÁSSARO, F. A. M. *et al.* Funil de haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 2555–2562, 2008.
- CATALDO, D. A. *et al.* Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 6, n. 1, p.

71–80, 1975a.

CATALDO, D. A. *et al.* Rapid Colorimetric Determination of Nitrate in Plant-Tissue by Nitration of extremely sensitive Nitrate Extraction is L.) Nitrate in soils quantitatively. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 71-80, 1975b.

CECÍLIO FILHO, A. B. *et al.* Doses de potássio na produção da alface. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 217–227, 4 jul. 2018.

CHANG, C.; ZHANG, L. Cellulose-based hydrogels: Present status and application prospects. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 40–53, 2011.

CHAVES, L. H. G.; GHEYI, H. R.; RIBEIRO, S. Consumo de água e eficiência do uso para cultivar de mamona paraguaçu submetida à fertilização nitrogenada. **Engenharia Ambiental**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 126–133, 2011.

CHEN, X. *et al.* Characteristics and mechanisms of acrylate polymer damage to maize seedlings. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 129, p. 228–234, 2016.

CHUNG, J. B.; JIN, S. J.; CHO, H. J. Low water potential in saline soils enhances nitrate accumulation of lettuce. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 36, n. 13–14, p. 1773–1785, 2005.

CLAESSEN, M. E. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 19. ed. (Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS. v. 26.

COELHO, J. E.; VITTI, C.; VIEGAS, P. H. Polímero hidroretentor no desenvolvimento inicial da cultura da cana-de-açúcar. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 66–72, 2015.

CONAB. **Boletim Hortigranjeiro**. v. 7, n. 2, Brasília, fevereiro, 2021.

CUNHA, T. J. F. *et al.* Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Embrapa Se ed. Petrolina: 2010, 2010. p. 49–88.

DA SILVA, W. R. *et al.* Irrigation levels and use of hydro retainer polymer in greenhouse lettuce production. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 406–412, 2019.

DE PAULA DA SILVA, E. M. N. C. *et al.* Desempenho agrônômico de alface orgânica influenciado pelo sombreamento, época de plantio e preparo do solo no acre. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 50, n. 6, p. 468–474, 2015.

DIAS, N. D. S. *et al.* Produção De Alface Sob Diferentes Níveis De Salinidade Do Solo. **Irriga**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 20–29, 2005a.

DIAS, N. DA S. *et al.* Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 496–504, 2005b.

DOS SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciencia Rural**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 576–586, 2008.

DOS SANTOS, H. T. *et al.* Cultivo de alface em solos com hidrogel utilizando irrigação automatizada. **Engenharia Agricola**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 852–862, 2015.

ENGLER, M. P. DE C. **Desenvolvimento de metodologia para a determinação da mobilidade de água no solo**. 2007. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FERRARI, M. *et al.* Hidroretentores: alternativa para maior tolerância ao déficit hídrico na cultura da soja. **Global Science and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 21–29, 2015.

FERREIRA, E. P. *et al.* Uso eficiente da água de chuva armazenada em cisterna para produção de hortaliças Efficient use of stored rain water in cistern to vegetable production in Semiarid pernambucano. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [s. l.], v. 11, p. 1–7, 2016.

FERNANDES, Gabriel Siqueira Tavares; LIMA, Edivania de Araujo; ALVES, Adriana Ursulino; BRITO, Victor Alves; SOARES, Lucas Carvalho. Condicionamento Agrometeorológico em Cultivares de Alface. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 34, n. 4, p. 505-514, dez. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786344064>.

FLORES, P. *et al.* Response to salinity of tomato seedlings with a split-root system: Nitrate uptake and reduction. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 177–187, 2002.

FLORY, P. J. **Principles of polymer stability**. Cornell University Press: New York, 1953.

FRANCO-NAVARRO, J. D. *et al.* Chloride as macronutrient increases water use efficiency by anatomically-driven reduced stomatal conductance and increased mesophyll diffusion to CO_2 . **The Plant Journal**, [s. l.], v. 99, n. 5, p. 815–831, 31 maio 2019.

FREIRE, J. L. DE O.; NASCIMENTO, G. DOS S.; DE ASSIS MEDEIROS, A. K. Teores e acúmulos de nutrientes em mudas de maracujazeiros sob salinidade hídrica e uso de urina de vaca. **Nativa**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 464–475, 31 jul. 2020.

FREITAS, J. S. *et al.* Fotodegradação de hidrogel de poli(acrilamida) na presença de substâncias químicas para o uso na agricultura. **Revista Materia**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 8, 2019.

GARCIA, J. A. F.; MOURA, M. R. DE; AOUADA, F. A. Efeito do pH, espécie e concentração iônica na absorção de água de hidrogéis bionanocompósitos constituídos de cmc/Paam/laponita RDS. **Quimica Nova**, [s. l.], v. 42, n. 8, p. 831–837, 2019.

GERVÁSIO, E. S.; CARVALHO, J. DE A.; SANTANA, M. J. DE. Efeito da salinidade da água de irrigação na produção do pimentão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 125–128, 2000.

GHEYI, H. *et al.* **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados.** Fortaleza - CE:INCTSal, 2016.

GRACIANO, E. S. A. *et al.* Crescimento e capacidade fotossintética da cultivar de amendoim BR 1 sob condições de salinidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 794–800, 2011.

GRANGEIRO, L. C. *et al.* Acúmulo de nutrientes por três cultivares de alface cultivadas em condições do Semi-Árido. **Horticultura Brasileira**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 190–194, 2006.

Goulart, R. G. T., dos Santos, C. A., de Oliveira, C. M., Costa, E. S. P., de Oliveira, F. A., Andrade, N. F. de, & do Carmo, M. G. F. (2018). Desempenho agrônômico de cultivares de alface sob adubação orgânica em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira De Agropecuária Sustentável**, [s. l.], 8(3). <https://doi.org/10.21206/rbas.v8i3.3011>

GURGEL, M. T. *et al.* Uso De Águas Salinas Na Produção De Mudanças Enxertadas De Aceroleira Use of Saline Waters in Seedling Production of. **REVISTA CAATINGA**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 16–23, 2007.

HEIDARI, S. *et al.* Synthesis of an efficient copolymer of acrylamide and acrylic acid and determination of its swelling behavior. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 1331–1340, 2018.

HENZ, G. P.; SUINAGA, F. Comunicado Técnico 75: Tipos de alface cultivados no Brasil. **Embrapa Hortaliças - Infoteca-E**, v. 75, p. 7, 2009.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. The water footprint of humanity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 109, n. 9, p. 3232–3237, 2012.

KAVI KISHOR, P. B. *et al.* Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. **Current Science**, [s. l.], v. 88, n. 3, p. 424–438, 2005.

KAWASAKI, T.; SHIMIZU, G.; MORITSUGU, M. Effects of high concentrations of sodium chloride and polyethylene glycol on the growth and ion absorption in plants - II. Multi-compartment transport box experiment with excised roots of barley. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 75, n. 1, p. 87–93, 1983.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 857–867, 2002.

KOETZ, M. *et al.* Efeito de doses de potássio e da frequência de irrigação na produção da alface americana em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 730–737, 2006.

KONO, H.; FUJITA, S. Biodegradable superabsorbent hydrogels derived from cellulose by esterification crosslinking with 1,2,3,4-butanetetracarboxylic dianhydride. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 87, n. 4, p. 2582–2588, 2012.

LEE, W.-F.; HSU, C.-H. Superabsorbent Polymeric Material. V.Synthesis and Swelling Behavior of Sodium Acrylate and Sodium 2-Acrylamido-2-methylpropanesulfonate Copolymeric Gels.pdf. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 69, p. 229–237, 1998.

LI, A.; WANG, A. Synthesis and properties of clay-based superabsorbent composite. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 1630–1637, jul. 2005.

LI, R. *et al.* Evaluation of Chlorophyll Content and Fluorescence Parameters as Indicators. **Agricultural Sciences in China**, [s. l.], v. 5, n. October, p. 751–757, 2006.

LIMA, A. B. T. **Aplicações de cargas minerais em polímeros**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 21 mar. 2007.

LIMA, J. R. DE S. *et al.* Atributos Físico-Hídricos De Um Latossolo Amarelo Cultivado E Sob Mata Nativa no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 599–605, 2014.

LIMA JÚNIOR, J. A. DE *et al.* Efeito da irrigação sobre o rendimento produtivo da alface americana, em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 797–803, 2010.

LIMA, L. A. *et al.* Tolerância da berinjela à salinidade da água de irrigação. **Revista Agro@ambiente On-line**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 27–34, 2015.

LIMA, L. A.; GRISMER, M. E.; NIELSEN, D. R. **Salinity effects on yolo loam hydraulic properties Soil Science**, 1990.

LIMA, M. DA G. DE S. *et al.* Efeito do estresse salino sobre a concentração de pigmentos e prolina em folhas de arroz. **Bragantia**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 335–340, 2004.

LIRA, J. B. DE *et al.* Production of Pearl Millet Irrigated with Different Levels of Brackish Water and Organic Matter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 701–709, 2020.

LOPES, J. C.; DE MACEDO, C. M. P. Germinação de sementes de couve chinesa sob influência do teor de água, substrato e estresse salino. **Revista Brasileira de Sementes**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 079–085, 2008.

MAGALHÃES, A. S. G. *et al.* Superabsorbent hydrogel composite with minerals aimed at water sustainability. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 304–313, 2013.

MAGALHÃES, F. F. *et al.* Produção de Cultivares de Alface Tipo Crespa sob Diferentes Lâminas de Irrigação. **Water Resources and Irrigation Management**, [s. l.], v. 4, n. 1–3, p. 41–50, 2015.

MAGALHÃES, P. C. *et al.* Caracterização Ecofisiológica de Linhagens de Milho Submetidas a Baixa Disponibilidade Hídrica Durante o Florescimento. **Revista Brasileira de Milho e**

Sorgo, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 223–232, 2009.

MAHDAVINIA, G. R.; ZOHURIAAN-MEHR, M. J.; POURJAVADI, A. Modified chitosan III , superabsorbency , salt- and pH-sensitivity of smart ampholytic hydrogels from. **Polymers for Advanced Technologies**, [s. l.], v. 15, p. 173–180, 2004.

MAMEDOV, A. I. *et al.* Polyacrylamide Effects on Aggregate and Structure Stability of Soils with Different Clay Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 74, n. 5, p. 1720–1732, 2010.

MARENCO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**. Brasília, DF: Série Biodiversidade, v. 26, 2006.

MARENCO, J. A. *et al.* A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31, 2015.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. DE C.; SILVA, H. R. DA. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5. ed. Brasília, DF: rev. ampl, 1996.

MEDEIROS, J. F. DE. **Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo GAT nos estados do RN, PB e CE**. 1992. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992.

MIRDARIKVANDE, S. *et al.* Effect of pH, and salinity onto swelling properties of hydrogels based on H-alginate-g-poly(AMPS). **Biosciences Biotechnology Research Asia**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 205–209, 2014.

MONTESANO, F. F. *et al.* Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, [s. l.], v. 4, p. 451–458, 2015.

MUNNS, R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. **Plant, Cell & Environment**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 15–24, 1993.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 59, p. 651–681, 2008.

NASCIMENTO, C. D. V. *et al.* Potential of superabsorbent hydrogels to improve agriculture under abiotic stresses. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 189, n. May 2020, p. 104496, 2021.

NASCIMENTO, C. D. V. DO. **Hydrogels for application in soils under abiotic stresses of drylands**. 2020. 103 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

NASCIMENTO, J. DOS S.; FILHO, J. F. Crescimento, produção e alterações químicas do solo em algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 36–45, 2015.

- NAVROSKI, M. C. et al. Influência do Polímero Hidroretentor na Sobrevivência de Mudanças de *Eucalyptus dunnii* sob Diferentes Manejos Hídricos. **Nativa**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 108–113, 2014.
- NELSON, P. N.; LADD, J. N.; OADES, J. M. Decomposition of ¹⁴C-labelled plant material in a salt-affected soil. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 28, n. 4–5, p. 433–441, 1996.
- OLIVEIRA, N. L. C. DE *et al.* Efeito da urina de vaca no estado nutricional da alface. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 506–515, 2010.
- OMIDIAN, H. *et al.* Modified acrylic-based superabsorbent polymers (dependence on particle size and salinity). **Polymer**, [s. l.], v. 40, n. 7, p. 1753–1761, 1999.
- PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Effects of NaCl stress on nitrogen and phosphorous metabolism in a true mangrove *Bruguiera parviflora* grown under hydroponic culture. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 161, n. 8, p. 921–928, 2004.
- PAULUS, D. **Produção, qualidade, parâmetros fisiológicos e bioquímicos de alface sob hidroponia com águas salinas. 2008.** 105 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- PAULUS, D. *et al.* Produção e indicadores fisiológicos de alface sob hidroponia com água salina. **Horticultura Brasileira**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 29–35, 2010.
- PAULUS, D. *et al.* Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 110–117, 2012.
- PEDROTTI, A. *et al.* Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 1308–1324, 2015.
- PEREIRA, R. A. Semiárido Brasileiro: Um histórico de secas e degradação socioambiental. **Revista de Historia Regional**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 135–161, 2012.
- PERIN, K. **Reúso de efluente de lagoa de polimento no cultivo de alface hidropônica (*Lactuca sativa* L.) e de plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). 2006.** 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
- QUEIRÓS, M. V. A.; BEZERRA, M. N.; FEITOSA, J. P. A. Composite superabsorbent hydrogel of acrylic copolymer and eggshell: Effect of biofiller addition. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], v. 28, n. 10, p. 2004–2012, 2017.
- RABAT, N. E.; HASHIM, S.; MAJID, R. A. Effect of Different Monomers on Water Retention Properties of Slow Release Fertilizer Hydrogel. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 148, p. 201–207, 2016.
- REBOUÇAS, A. DA C. Água E Desenvolvimento Rural. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 15, n. 43, p. 327–344, 2001.
- RODRIGUES, F. *et al.* Aptidão de híbridos de milho para o consumo in natura. **Revista de**

Ciências Agrárias, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 484–492, 2018.

RODRIGUEZ, H. G. *et al.* Growth, Water Relations, and Accumulation of Organic and Inorganic Solutes in Roots of Maize Seedlings during Salt Stress. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 113, n. 3, p. 881–893, 1 mar. 1997.

SÁ, F. V. DA S. *et al.* Balanço de sais e crescimento inicial de mudas de pinheira (*Annona squamosa* L.) sob substratos irrigados com água salina. **Irriga**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 544–556, 2015.

SABADINI, R. **Redes poliméricas de macromoléculas naturais como hidrogéis superabsorventes**. 2018. 151 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SAHA, A.; SEKHARAN, S.; MANNA, U. Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 204, n. March, p. 104736, 2020.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 187–194, 2012.

SANTANA, M. J.; MANCIN, C. A.; RIBEIRO, A. A. Evapotranspiration and Culture Coefficient for the Lettuce and Roquette Cultivated in Uberaba-Mg. **Revista Inova Ciências & Tecnologia**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 7–13, 2016.

SCHAER-BARBOSA, M.; SANTOS, M. E. P. DOS; MEDEIROS, Y. D. P. Waste water reuse as a mitigating factor to the effects of droughts in the state of Bahia semi-arid viability study. **Ambiente e Sociedade**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 17–32, 2014.

SHARPLEY, A. N.; CURTIN, D.; SYERS, J. K. Changes in Water-extractability of Soil Inorganic Phosphate Induced by Sodium Saturation. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 637–640, 1988.

SILVA, D. M. R. *et al.* Evapotranspiração da cultura da alface : uma resposta à aplicação de diferentes lâminas de água. **Scientific Electronic Archives**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 34–37, 2019.

SILVA, M. C. S. DA; MURA, J. D. P. **Tratado de Alimentação, Nutrição e Dietoterapia**. Segunda Ed ed. São Paulo: Brasil, 2011.

SILVA, P. L. F. DA *et al.* Caracterização físico-hídrica de solos arenosos através da curva de retenção de água, índice S e distribuição de poros por tamanho. **Agrarian**, [s. l.], v. 13, n. 50, p. 478–492, 2020.

SILVA, J. R. I. *et al.* Estresse salino como desafio para produção de plantas forrageiras. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 127–139, 2018.

SILVA, P. V. S. R.; NASCIMENTO, P. DOS S. Salinidade Do Solo E Desenvolvimento Do Girassol Submetido À Irrigação Com Águas De Diferentes Qualidades. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 15, 2019.

SMITH, E. A.; PRUES, S. L.; OEHME, F. W. Environmental degradation of polyacrylamides. II. Effects of environmental (outdoor) exposure. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 76–91, 1997.

SOARES, T. M. **Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Utilização de águas salobras no cultivo da alface em sistema hidropônico NFT como alternativa agrícola condizente ao semi-árido brasileiro Tales Miler Soares Piracicaba**. 2007. 267 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SOUSA, T. P. DE *et al.* Produção de alface (*Lactuca sativa* L .), em função de diferentes concentrações e tipos de biofertilizantes. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 168–172, 2014.

SOUZA, Ê. G. F. *et al.* Produtividade de cultivares de alface em função da idade de colheita no semiárido Potiguar, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 282–288, 2018.

SUINAGA, F. A. *et al.* **Métodos de avaliação do florescimento precoce e identificação de fontes de tolerância ao calor em cultivares de alface do grupo varietal ‘crespa’**. Concórdia: EMBRAPA/CNPSA, 2013. 6 p. (EMBRAPA/CNPSA. Comunicado Técnico, 89).

TAGHIZADEHGHASAB, A.; SAFADOUST, A.; MOSADDEGHI, M. R. Effects of salinity and sodicity of water on friability of two texturally-different soils at different matric potentials. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 209, n. January, p. 104950, 2021.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal Diversidade vegetal**. Porto Alegre: ARTMED EDITORA LTDA, v. 6 ed, 2017.

TANAMATI, F. Y. **Fontes e doses de corretivos de acidez do solo na nutrição e produção de alface**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

TAVAKOL, M. *et al.* Synthesis and characterization of an in situ forming hydrogel using tyramine conjugated high methoxyl gum tragacanth. **Journal of Biomaterials Applications**, [s. l.], v. 30, n. 7, p. 1016–1025, 2016.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de metodos de analise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA SOLOS, 2017.

USSL STAFF., U. S. S. L. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils**. Handbook60. ed. Washington: U.S: Government Printing Office, 1954.

VAN GENUCHTEN, M. T. Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VAN LIER, Q. J. **Física do Solo - baseada em processos**. Piracicaba: Edição do autor, 2020.

- VIANA, S. B. A.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R. Germinação e formação de mudas de alface em diferentes níveis de salinidade de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 259–264, 2001.
- VILAS BOAS, R. C. *et al.* Efeito da irrigação no desenvolvimento da alface crespa, em ambiente protegido, em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 393–397, 2007.
- WARAICH, E. A. *et al.* Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 291–304, 2011.
- WONG, V. N. L. *et al.* Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. **Soil Use and Management**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 2–11, 2010.
- XIONG, B. *et al.* Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems. **npj Clean Water**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2018.
- YIPING, W. *et al.* Effect of cyclic wetting and drying on the microstructure of slip zone soils in Huangtupo Landslide. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 209–216, 2016.
- YONEZAWA, U. G.; MOURA, M. R. DE; AOUADA, F. A. Estado da arte: um estudo sobre polímeros biodegradáveis na germinação e desenvolvimento de plantas. **Caderno de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 69–75, 2017.
- ZHANG, M. *et al.* Synthesis, characterization, and swelling behaviors of salt-sensitive maize bran-poly(acrylic acid) superabsorbent hydrogel. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 62, n. 35, p. 8867–8874, 2014.
- ZHAO, C. *et al.* Salt-Tolerant Superabsorbent Polymer with High Capacity of Water-Nutrient Retention Derived from Sulfamic Acid-Modified Starch. **ACS Omega**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 5923–5930, 2019.
- ZHAO, Q. *et al.* Study of the properties of hydrolyzed polyacrylamide hydrogels with various pore structures and rapid pH-sensitivities. **Reactive and Functional Polymers**, [s. l.], v. 70, n. 9, p. 602–609, 2010.
- ZUFFO, Alan Mario; ZUFFO JÚNIOR, Joacir Mario; SILVA, Luana Maria Alves da; SILVA, Roberto Lustosa da; MENEZES, Karen Oliveira de. Análise de crescimento em cultivares de alface nas condições do sul do Piauí. **Revista Ceres**, [s.l.], v. 63, n. 2, p. 145-153, abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201663020005>.