



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA  
DOUTORADO EM FITOTECNIA

JEFFERSON BITTENCOURT VENÂNCIO

**PRODUÇÃO, MORFOFISIOLOGIA E QUALIDADE DE CEBOLA SOB  
SALINIDADE E APLICAÇÃO DE SILÍCIO**

MOSSORÓ

2021

JEFFERSON BITTENCOURT VENÂNCIO

**PRODUÇÃO, MORFOFISIOLOGIA E QUALIDADE DE CEBOLA SOB  
SALINIDADE E APLICAÇÃO DE SILÍCIO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito do programa para obtenção do grau de Doutor em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Nildo da Silva Dias, Prof. Dr.

Co-orientador: José Francismar de Medeiros, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

V448p Venancio, Jefferson Bittencourt.  
Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola  
sob salinidade e aplicação de silício / Jefferson  
Bittencourt Venancio. - 2021.  
147 f. : il.

Orientador: Nildo da Silva Dias.  
Coorientador: José Francismar de Medeiros.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural  
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Fitotecnia, 2021.

1. Allium cepa L.. 2. Terra diatomácea. 3.  
Melosira granulata. 4. Fisiologia de hortaliças.  
5. Nutrição mineral. I. Dias, Nildo da Silva,  
orient. II. Medeiros, José Francismar de, co-  
orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JEFFERSON BITTENCOURT VENÂNCIO

**PRODUÇÃO, MORFOFISIOLOGIA E QUALIDADE DE CEBOLA SOB  
SALINIDADE E APLICAÇÃO DE SILÍCIO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito do programa para obtenção do grau de Doutor em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Solos e Nutrição de Plantas

Defendida em: 28 / 09 / 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



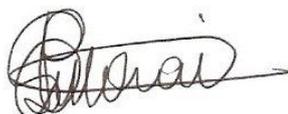
---

Nildo da Silva Dias, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente (orientador)



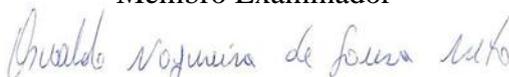
---

José Francismar de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador (co-orientador)



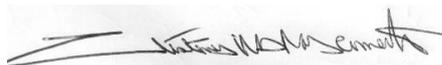
---

Patrícia Ligia Dantas de Moraes, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador



---

Osvaldo Nogueira de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador



---

Clístenes Williams Araújo do Nascimento, Prof. Dr. (UFRPE)  
Membro Examinador



---

Hamilton Seron Pereira, Prof. Dr. (UFU)  
Membro Examinador

*Aos meus pais, Antônio Venâncio e Célia Maria Bittencourt Venâncio, pela dedicação e apoio na educação fraterna e formal;*

*Ao meu filho, Calebe Marinho Venâncio, por ser a minha fonte de amor, inspiração, paz e alívio;*

*À minha esposa, Katiany Marinho Bittencourt, por ser o conforto do meu coração, a virtude em pessoa, o aconchego, a alegria e a força edificadora do nosso lar...*

***...Dedico***

*À Jesus, por me orientar no caminho das pedras, ser o consolador nos momentos difíceis, ser o suprimento de espírito e verdade e ser a fonte de vida em abundância...*

***...Ofereço em Ação de Graça***

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo milagre da vida, por nos constituir seres inteligentes, por nos abençoar com bom ânimo na busca por nossos objetivos e por nos fortalecer o espírito para suportar as tensões das batalhas.

Aos meus pais, Antônio Venâncio e Célia Maria Bittencourt Venâncio, pelo investimento na minha educação fraterna e formal e orientação social e por me ensinarem a ser focado, perseverante e resiliente.

À minha esposa amada e meu filho, Katiany Marinho Bittencourt e Calebe Marinho Venâncio, pelo amor, companheirismo, paciência, confiança e respeito.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pelo excelente serviço socioeducacional e pelo esforço da equipe administrativa do programa na manutenção dos padrões de excelência e obtenção dos recursos necessários para a execução das pesquisas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nildo da Silva Dias, pelo acolhimento, confiança e dedicação. Ao meu co-orientador, Prof. Dr. José Francismar de Medeiros, pela disponibilização da área com a infraestrutura necessária para a instalação da pesquisa experimental. Aos professores Dr. Leilson Costa Grangeiro e Dra. Patrícia Lígia Dantas de Moraes, por viabilizarem o experimento de campo e apoiarem as análises laboratoriais.

Aos membros da banca examinadora: Nildo da Silva Dias, Prof. Dr., José Francismar de Medeiros, Prof. Dr., Patrícia Lígia Dantas de Moraes, Prof<sup>ª</sup>. Dra., Osvaldo Nogueira de Sousa Neto, Prof. Dr., Clístenes Williams Araújo do Nascimento, Prof. Dr., Hamilton Seron Pereira, Prof. Dr., Gaspar Henrique Korndorfer, Prof. Dr., por aceitarem o convite e contribuir para melhorar o trabalho.

Aos funcionários da UFERSA, locados no Centro de Pesquisas Vegetais do Semiárido Nordeste (CPVSA), Paulo Sérgio, Bruno Fernandes, Lidiane Martins, Cristiane Noronha e Juliana Silva, pela pronta disposição nas questões técnico-laboratoriais.

Ao Dr. Chagas Gonçalves, por todo o apoio durante a condução dos experimentos na Fazenda Experimental Rafael Fernandes da UFERSA, e por estar sempre à disposição quando precisei.

Aos integrantes do grupo de pesquisa em Nutrição e Adubação de Hortaliças, coordenado pelo professor Leilson Costa Grangeiro, pela ajuda na condução dos experimentos,

pelos momentos de confraternização e também companheirismo durante as longas horas de trabalho e análise em laboratório: João Paulo Costa, Núbia Marisa Ferreira Bertino, Rodolfo Lacerda, Anderson Alves, Romualdo Cortez, Régis Vieira, Ana Paula, Larissa e demais integrantes.

Aos funcionários da Horta Didática e da Fazenda Experimental da UFERSA: Nanan, Alderi, Flabenio, Pepeta, Fabrício e ao Sr. Antônio.

Aos omissos, mas que contribuíram, direta ou indiretamente, mesmo que com pequena participação durante a execução do trabalho.

**Muito obrigado!**

“Semeou Isaque naquela terra e, no mesmo ano, recolheu cento por um, porque o SENHOR o abençoava”. (Gênesis 26:12)

“Porque haverá sementeira de paz; a vide dará o seu fruto, a terra a sua novidade, e os céus, o seu orvalho; e farei que o resto deste povo herde tudo isso”. (Zacarias 8:12)

## RESUMO

A salinidade limita a produtividade agrícola nas regiões áridas e semiáridas do mundo e também pode limitar a vida de prateleira e a qualidade pós-colheita dos produtos hortícolas. Por outro lado, o silício (Si) é benéfico às plantas e pode ser utilizado como atenuador de estresses abióticos. Os efeitos benéficos do Si nos aspectos de desenvolvimento, produção, qualidade e vida de prateleira de bulbos pós-colheita em plantas de cebola ainda não foram completamente esclarecidos, razão pela qual um experimento de campo foi conduzido no semiárido brasileiro, visando a avaliar os efeitos da fertilização com Si e da salinidade da água de irrigação no cultivo da cebola sobre os aspectos produtivos, morfofisiológicos de plantas e bulbos, bem como a qualidade dos bulbos e a vida de prateleira pós-colheita. O experimento foi em blocos completos casualizados, com quatro repetições, e tratamentos organizados em parcelas sub-subdividas. As parcelas foram quatro níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE: 0,65; 1,7; 2,8 e 4,1 dS m<sup>-1</sup>), as subparcelas foram cinco níveis de adubação com Si (DS: 0; 41,6; 83,2; 124,8 e 166,4 kg ha<sup>-1</sup>), na forma fertilizante à base de Terra diatomácea de *Melosira granulata*. Para avaliar a vida de prateleira da cebola, os bulbos foram ainda armazenados por 60 dias após a colheita, sendo avaliados em quatro níveis de tempo de prateleira (0; 20; 40 e 60 dias após a colheita), constituindo as sub-subparcelas. O aumento da salinidade da água de irrigação diminuiu significativamente a produtividade e a massa de matéria fresca dos bulbos de cebola e aumentou a produção de bulbos pequenos (<50 mm), em contraste com a aplicação de Si, que melhorou esses aspectos da produção. A salinidade prejudicou a fisiologia das plantas, aumentando a instabilidade relativa da membrana e diminuindo o conteúdo relativo de água. As plantas de cebola responderam ao aumento de salinidade aumentando os teores de clorofilas e carotenoides totais, até CE de 2,8 dS m<sup>-1</sup>, em uma relação de dependência com o aumento das doses de Si. Em relação aos aspectos morfofisiológicos dos bulbos pós-colheita, o estresse salino induziu redução de firmeza, pH e relação SS/AT, ao passo que afetou diferencialmente os teores de açúcares solúveis, concentração de sólidos solúveis e acidez titulável, bem como as concentrações dos ácidos ascórbico e pirúvico. Adicionalmente, o fornecimento de Si para as plantas também afetou a fisiologia das plantas e dos bulbos pós-colheita, melhorando a concentração de clorofilas e carotenoides, além das concentrações de açúcares, ácidos ascórbico e pirúvico e sólidos solúveis totais. O Si melhorou a relação SS/AT, na ausência de salinidade, ao passo que, sob condições de salinidade, promoveu redução de SS/AT. As variáveis analisadas também foram afetadas pela salinidade e Si sob condições de armazenamento em prateleira. A salinidade desencadeou respostas aclimatativas relacionadas

à síntese de AsA e ácidos orgânicos detectáveis por meio da AT, bem como síntese de moléculas de enxofre (S) detectáveis por meio da análise de ACP. A salinidade da água de irrigação e o tempo de prateleira reduziram a firmeza e aumentaram a perda de massa dos bulbos durante a vida útil da cebola. Por outro lado, a adubação com Si não afetou significativamente essas variáveis. A coloração da túnica não foi afetada significativamente pelos efeitos da salinidade e nutrição com Si, mas foi significativamente alterada pelo tempo de prateleira, em relação aos parâmetros CIE L\*, a\*, b\*, C\* e °H. O tempo de prateleira mostrou consumo inicial de açúcares e sólidos solúveis totais, sendo mínimos aos 13,2 e 16,7 dias; posteriormente, elevando-se até os 47,6 dias e 43,7 dias; e voltando ambos a reduzir no final da vida de prateleira, aos 60 dias. A salinidade, o fornecimento de Si e o tempo de prateleira aumentaram as concentrações dos ácidos pirúvico e ascórbico nos bulbos de cebola durante a vida de prateleira, mostrando respostas aclimatativas relacionadas à síntese de ácidos orgânicos e metabólitos contendo enxofre, precursores de ácido pirúvico. A adubação com Si contribuiu para melhorar as respostas aclimatativas da cebola sob estresse do ambiente semiárido e salinidade, recomendando-se a dose de 27,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si, sob cultivo com a utilização de água de boa qualidade, ou baixa salinidade (0,65 ± 0,3 dS m<sup>-1</sup>) na irrigação; ou a dose de 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si, sob cultivo com a utilização de água salina com salinidade de 1,7 ± 0,3 dSm<sup>-1</sup>. A salinidade estimulou o catabolismo de metabólitos durante a vida de prateleira da cebola, ao passo que a nutrição com Si atenuou os impactos causados pela salinidade moderada, contribuindo para aumentar a síntese de metabólitos e prolongar a vida de prateleira dos bulbos de cebola.

**Palavras-chave:** *Allium cepa* L.; Fisiologia de hortaliças; Pós-colheita; Vida de prateleira; Horticultura; Nutrição mineral; Fertilidade do solo; Terra diatomácea; *Melosira granulata*.

## ABSTRACT

Salinity limits agricultural productivity in the arid and semi-arid regions of the world and can also limit the shelf life and post-harvest quality of vegetables. On the other hand, silicon (Si) is beneficial to plants and can be used to mitigate abiotic stresses. The beneficial effects of Si on the aspects of development, production, quality and shelf life of postharvest bulbs in onion plants have not been fully elucidated, which is why a field experiment was carried out in the Brazilian semiarid region, aiming to evaluate the effects of Si fertilization and the salinity of irrigation water in onion cultivation, on the productive, morphophysiological aspects of plants and bulbs, as well as the quality of the bulbs and post-harvest shelf life. The experiment was in randomized complete blocks, with four replications, and treatments were organized in sub-subdivided plots. The plots were four levels of electrical conductivity of irrigation water (EC: 0.65; 1.7; 2.8; and 4.1 dS m<sup>-1</sup>), the subplots were five levels of fertilization with Si (SD: 0; 41.6; 83.2; 124.8 and 166.4 kg ha<sup>-1</sup>), in the form of *Melosira granulata* diatomaceous earth. To assess the shelf life of the onion, the bulbs were stored for 60 days after harvest, being evaluated at four levels of shelf life (0; 20; 40 and 60 days after harvest), constituting the sub-subplots. The increase in irrigation water salinity significantly decreased the yield and fresh matter mass of onion bulbs and increased the production of small bulbs (<50 mm), in contrast to the application of Si, which improved these aspects of production. Salinity affected plant physiology by increasing the relative instability of the membrane and decreasing the relative water content. Onion plants responded to the increase in salinity by increasing the contents of total chlorophylls and carotenoids, up to EC of 2.8 dS m<sup>-1</sup>, in a relationship of dependence with the increase in Si doses. Regarding the morphophysiological aspects of postharvest bulbs, salt stress induced a reduction in firmness, pH and SS/AT ratio, while it differentially affected the soluble sugar contents, soluble solids concentration and titratable acidity, as well as the concentrations of ascorbic and pyruvic acids. Additionally, the supply of Si to the plants also affected the physiology of plants and postharvest bulbs, improving the concentration of chlorophylls and carotenoids; and the concentrations of sugars, ascorbic and pyruvic acids and total soluble solids. Si improved the SS/AT ratio in the absence of salinity; while, under salinity conditions, it promoted a reduction in SS/AT. The analyzed variables were also affected by salinity and Si under shelf storage conditions. Salinity triggered acclimatization responses related to the synthesis of AsA and detectable organic acids through AT, as well as the synthesis of detectable sulfur (S) molecules through ACP analysis. The salinity of irrigation water and shelf life reduced firmness and increased mass loss of onion bulbs during shelf life. On the other

hand, fertilization with Si did not significantly affect these variables. The tunic color was not significantly affected by salinity and Si nutrition effects, but was significantly altered by shelf life, in relation to CIE L\*, a\*, b\*, C\* and oH parameters. Shelf life showed initial consumption of sugars and total soluble solids, being minimal at 13.2 and 16.7 days; later, rising to 47.6 days and 43.7 days; and both to reduce again at the end of shelf life, at 60 days. Salinity, Si supply and shelf life increased the concentrations of pyruvic and ascorbic acids in onion bulbs during shelf life, showing acclimatic responses related to the synthesis of organic acids and metabolites containing sulfur, precursors of pyruvic acid. Fertilization with Si contributed to improve the acclimatization responses of onions under stress from the semiarid environment and salinity, recommending a dose of 27.8 kg ha<sup>-1</sup> of Si, under cultivation using good quality water or low salinity (0.65 ± 0.3 dS m<sup>-1</sup>) in irrigation; or a dose of 166.4 kg ha<sup>-1</sup> of Si, under cultivation using saline water with a salinity of 1.7 ± 0.3 dSm<sup>-1</sup>. Salinity stimulated metabolite catabolism during onion shelf life, while Si nutrition attenuated the impacts caused by moderate salinity, contributing to increase metabolite synthesis and prolong onion bulb shelf life.

**Keywords:** *Allium cepa L.*; Physiology of vegetables; Post-harvest; Shelf Life; Horticulture; Mineral nutrition; Soil fertility; Diatomaceous earth; *Melosira granulata*.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Temperaturas do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) – média ( $T_{\text{média}}$ ), máxima ( $T_{\text{máxima}}$ ) e mínima ( $T_{\text{mínima}}$ ); e do ponto de orvalho – média ( $T_{\text{ponto de orvalho - média}}$ ), máxima ( $T_{\text{ponto de orvalho - máxima}}$ ) e mínima ( $T_{\text{ponto de orvalho - mínima}}$ ) (A); umidades relativas do ar (%) – média ( $UR_{\text{média}}$ ), máxima ( $UR_{\text{máxima}}$ ) e mínima ( $UR_{\text{mínima}}$ ); e das folhas à  $45^{\circ}\text{C}$  – média ( $UR_{\text{foliar } (45^{\circ}\text{C}) - média}$ ), máxima ( $UR_{\text{foliar } (45^{\circ}\text{C}) - máxima}$ ) e mínima ( $UR_{\text{foliar } (45^{\circ}\text{C}) - mínima}$ ) (B); precipitação acumulada (mm) e evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith FAO ( $ET_0$  PMF) (ALLEN; PEREIRA; RAES; SMITH, 1998) (C); ao longo do ciclo da cebola híbrida ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019..... **39**
- Figura 2.** Desdobramento dos níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) dentro de cada nível de adubação com silício (Si), para as variáveis: produtividade (PROD,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (A); produção de bulbos por caixas de classificação (PROD<sub>C1</sub>, PROD<sub>C2</sub>, PROD<sub>C3</sub> e PROD<sub>C4</sub>,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (B, C, D e E); e massa de matéria fresca dos bulbos (MFB,  $\text{g bulbo}^{-1}$ ) (F), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019..... **48**
- Figura 3.** Desdobramento dos níveis de adubação com silício (Si), dentro de cada nível de condutividade elétrica da água de irrigação (CE), para as variáveis: produtividade (PROD,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (A); produção de bulbos por caixas de classificação (PROD<sub>C1</sub>, PROD<sub>C2</sub>, PROD<sub>C3</sub> e PROD<sub>C4</sub>,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (B, C, D e E); e massa de matéria fresca dos bulbos (MFB,  $\text{g bulbo}^{-1}$ ), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’ (F). Mossoró-RN, Brasil, 2019..... **50**
- Figura 4.** Desdobramento da interação entre níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) (A) e níveis de adubação com silício no solo (Si) (B), para a variável Eficiência de Uso da Água (EUA,  $\text{kg m}^{-3}$  de água), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **52**
- Figura 4.** Desdobramento da interação entre os níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) e os níveis de adubação com silício (Si), para as variáveis: Conteúdo Relativo de Água (CRA, %) (A); e Índice de Instabilidade da Membrana (DM, %), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019..... **53**
- Figura 6.** Desdobramento da interação entre os níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) e os níveis de adubação com silício (Si), para as variáveis: Concentração de clorofila *a* (Chl *a*,  $\text{mg kg}^{-1}$  de MF) (A); Concentração de clorofila *b* (Chl *b*,  $\text{mg kg}^{-1}$  de MF) (B); Concentração de clorofila *a + b* (Chl *a + b*,  $\text{mg kg}^{-1}$  de MF) (C); e Concentração de carotenóides totais (Chl *a*,  $\text{mg kg}^{-1}$  de MF) (D), em plantas de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **55**
- Figura 7.** Efeitos da salinidade da água de irrigação (CE,  $\text{dS m}^{-1}$ ) e de doses de Si (Si,  $\text{kg ha}^{-1}$ ), nas variáveis: firmeza de bulbo (FB, N) (A e D); teor de açúcar solúvel (AS, %) (B e E); e pH (C e F), em bulbos de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **56**
- Figura 8.** Efeitos da salinidade da água de irrigação (CE,  $\text{dS m}^{-1}$ ) e de doses de Si (Si,  $\text{kg ha}^{-1}$ ), sobre a acidez titulável (AT, %) (A e D); e efeito da interação entre a

- condutividade elétrica da água de irrigação [ $CE_{(água)}$ ] e aumento da fertilização do solo com Si [ $DS_{(Si)}$ ] [ $CE_{(água)}$  vs  $DS_{(Si)}$ ] sobre o teor de sólidos solúveis (SS, °Brix) (B e E) e relação SS/AT (C e F), em bulbos de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **60**
- Figura 9.** Efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e aumento da fertilização do solo com Si (CE vs DS), sobre a concentração de ácido pirúvico (ACP,  $\mu M g^{-1}$  de MF) (A); e efeito principal da salinidade da água de irrigação (CE,  $dS m^{-1}$ ) (B) e doses de Si (Si,  $kg ha^{-1}$ ) (C) na concentração de ácido ascórbico (AsA,  $mg 100 g^{-1}$  de MF), em bulbos de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **65**
- Figura 10.** Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE), dose de silício (Si), com tempo de prateleira (TP), para as variáveis: firmeza de bulbo (FB, em N) (A e B); e perda de massa (PM, %) (C e D), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **88**
- Figura 11.** Efeito de salinidade (CE) (A), doses de silício (Si) (B) e tempos de prateleira (TP) (C) crescentes, sobre a coloração de bulbos de cebola “Rio das Antas”, parametrizados segundo a padrão CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e °H. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **91**
- Figura 12.** Efeito de níveis de salinidade (CE) (A), doses de silício (Si) (B) e tempos de prateleira (TP) (C) sobre o teor de açúcares solúveis totais (AS) nos bulbos de cebola “Rio das Antas”. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **92**
- Figura 13.** Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) (A) e dose de silício (Si) (B), com tempo de prateleira (TP), para a variável potencial hidrogeniônico (pH), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **95**
- Figura 14.** Efeito de níveis de salinidade (CE) (A), doses de silício (Si) (B) e tempos de prateleira (TP) (C) sobre o teor de sólidos solúveis totais (SS) nos bulbos de cebola “Rio das Antas”. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **96**
- Figura 15.** Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) (A) e dose de silício (Si) (B), com tempo de prateleira (TP), para a variável acidez titulável (AT, %), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **97**
- Figura 16.** Efeito da interação entre os níveis de salinidade da água de irrigação (CE) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a variável SS/AT, em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **99**
- Figura 17.** Efeito da interação entre os níveis de dose de Si (DS) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a variável SS/AT, em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **101**
- Figura 18.** Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) (A) e dose de silício (Si) (B), com tempo de prateleira (TP), para a variável concentração de ácido pirúvico (ACP,  $\mu M g^{-1}$  de MF), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **102**

- Figura 19.** Efeito da interação entre os níveis de salinidade da água de irrigação (CE) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a concentração de ácido ascórbico (AsA), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **105**
- Figura 20.** Efeito da interação entre os níveis de dose de Si (DS) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a concentração de ácido ascórbico (AsA), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. .... **106**

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Análise química para caracterização da disponibilidade inicial de macronutrientes no solo da área experimental para o cultivo da cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.....**40**
- Tabela 2.** Disponibilidade inicial de micronutrientes e granulometria do solo da área da área experimental para o cultivo da cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.....**40**
- Tabela 3.** Manejo da irrigação utilizado para cultura da cebola ‘Rio das Antas’ nas condições experimental. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido. ....**41**
- Tabela 4.** Resultados das análises químicas da água de irrigação, para o cultivo da cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido. ....**42**
- Tabela 5.** Quantidade de sais adicionada por cada parcela via água de irrigação, nos diferentes níveis de salinidade, durante o período experimental. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido. ....**43**

## SUMÁRIO

### Capítulo 1

<b>INTRODUÇÃO GERAL (REVISÃO DE LITERATURA)</b> .....	20
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	27

### Capítulo 2

<b>PRODUÇÃO E MORFOFISIOLOGIA DE CEBOLA CULTIVADA SOB SALINIDADE E ADUBAÇÃO COM SILÍCIO</b> .....	34
---	----

<b>RESUMO</b> .....	34
---------------------	----

<b>2.1 INTRODUÇÃO</b> .....	36
-----------------------------	----

<b>2.2 MATERIAL E METODOS</b> .....	39
-------------------------------------	----

2.2.1 Localização, material vegetal e condições de crescimento .....	39
--	----

2.2.2 Delineamento experimental.....	42
--------------------------------------	----

2.2.3 Fisiologia das plantas e dos bulbos .....	43
---	----

2.2.3.1 Avaliação do conteúdo relativo de água (CRA) e índice de instabilidade da membrana (DM).....	43
--	----

2.2.3.2 Avaliação das concentrações de clorofilas <i>a</i> , <i>b</i> , <i>a+b</i> ( <i>Chl a</i> , <i>Chl b</i> e <i>Chl a+b</i> ) e carotenoides totais ( <i>Car</i> ).....	44
---	----

2.2.3.3 Avaliação da firmeza dos bulbos.....	44
--	----

2.2.3.4 Avaliação dos açúcares solúveis (AS), sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT), relação SS/AT e potencial de hidrogênio iônico (pH) .....	44
---	----

2.2.3.5 Avaliação das concentrações de ácido pirúvico (ACP) e ácido ascórbico (AsA).....	45
--	----

2.2.4 Colheita e avaliação da produção e componentes produtivos e eficiência de uso da água (EUA).....	46
--	----

2.2.5 Análise estatística .....	46
---------------------------------	----

<b>2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	47
---	----

2.3.1 Produtividade, componentes produtivos e eficiência de uso da água (EUA) .....	47
---	----

2.3.2 Fisiologia das plantas .....	52
------------------------------------	----

2.3.3 Fisiologia dos bulbos pós-colheita .....	56
--	----

<b>2.4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>65</b>	
<b>2.5</b>	<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>66</b>	
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>	
<b>Capítulo 3</b>			
<b>EFEITO DA SALINIDADE E DE DOSES DE SILÍCIO NA QUALIDADE PÓS-COLHEITA E VIDA DE PRATELEIRA DA CEBOLA</b> .....			<b>78</b>
	<b>RESUMO</b> .....	<b>78</b>	
<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>80</b>	
<b>3.2</b>	<b>MATERIAL E METODOS</b> .....	<b>82</b>	
3.2.1	Localização experimental e condições climáticas.....	82	
3.2.2	Material vegetal, tratamentos pré-colheita e condições de armazenamento pós-colheita .....	82	
3.2.3	Delineamento experimental.....	83	
3.2.4	Características morfológicas e qualitativas pós-colheita dos bulbos .....	83	
3.2.4.1	Avaliação da firmeza dos bulbos e perda de massa .....	84	
3.2.4.2	Avaliação da cor dos bulbos.....	84	
3.2.4.3	Avaliação dos açúcares solúveis (AS), sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT), relação SS/AT e potencial de hidrogênio iônico (pH) .....	85	
3.2.4.4	Avaliação das concentrações de ácido pirúvico (ACP) e ácido ascórbico (AsA).....	85	
3.2.5	Análise estatística.....	86	
<b>3.3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>86</b>	
3.3.1	Firmeza e perda de massa dos bulbos .....	86	
3.3.2	Cor da túnica .....	90	
3.3.3	Açúcares solúveis e potencial de hidrogênio iônico nos bulbos .....	92	
3.3.4	Sólidos solúveis, acidez titulável, relação SS/AT nos bulbos.....	95	
3.3.5	Concentração dos ácidos pirúvico e ascórbico.....	101	
<b>3.4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>107</b>	
<b>3.5</b>	<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>108</b>	

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>117</b>

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO GERAL (REVISÃO DE LITERATURA)

#### 1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A cebola (*Allium cepa* L.) é uma liliopsida da família Alliaceae, que possui ciclo bienal para produção de sementes e anual para produção de bulbos (ABDOU et al., 2015). A espécie é uma importante hortaliça no mundo; apreciada por suas características alimentares, culturais, terapêuticas e medicinais (PATHAK, 2000; ABDOU et al., 2015; ANJUM e BARMON, 2017; RADY et al., 2018). O bulbo é a parte comercial, a qual se consome diversamente na culinária (fresco, em saladas variadas, cozidos, fritos, assados) ou como produto industrializado (flocos desidratados, pó, pastas, conservas).

A cebola é a segunda hortaliça mais produzida no mundo (atrás do tomate) ou a terceira, se consideradas as batatas. No Brasil, o valor atual da produção aproxima-se dos US\$635 milhões, com cerca de 1,6 milhão de toneladas produzidas (FAOSTAT, 2021). A cebolicultura é importante social e economicamente no Brasil, pois demanda grande número de pessoas em operações manuais, gerando milhares de empregos dentro da cadeia produtiva (RESENDE et al.; 2015). Além disso, a atividade é praticada essencialmente por agricultores de pequeno porte, geralmente, em unidades produtoras familiares de 1-5 hectares, gerando renda e reduzindo a evasão rural em mais de 50 mil unidades produtoras de cebola no país (IBGE, 2020; RESENDE, 2015). A área total colhida no Brasil é aproximadamente 48 mil hectares, com média de produtividade aproximada de 32 t ha<sup>-1</sup>. Entretanto, a produtividade da cebola no Brasil varia de 24-65 t ha<sup>-1</sup>, entre as diferentes regiões produtoras do país (IBGE, 2020), as quais se diferenciam pela alta variabilidade de condições ambientais relacionadas ao clima, níveis de altitude e condições de fotoperíodo, bem como por seus diferentes níveis de tecnologia e técnicas de cultivo aplicadas.

A região Nordeste do Brasil contribui com aproximadamente 20% da produção nacional de cebola, em área total colhida de aproximadamente 9 mil hectares (IBGE, 2017). A cebola nordestina é produzida principalmente nos perímetros irrigados do submédio São Francisco, sob diversos graus tecnológicos e categorias de sistemas de irrigação, incluindo a aspersão convencional, pivô central, inundação temporária, irrigação por sulcos e gotejamento (MAROUELLI et al., 2005).

A região Nordeste está inserida, predominantemente, no bioma de Caatinga, sob o domínio climático de classificação semiárida. As precipitações totais na zona semiárida brasileira variam de 400 e 700 mm ano<sup>-1</sup> (OLIVEIRA, 2015), ao passo que as taxas de evapotranspiração variam de 1.500 a 2000 mm ano<sup>-1</sup> (CUNHA et al., 2010), em suas diversas sub-regiões climáticas. O semiárido brasileiro concorre com fenômenos de secas prolongadas, baixos índices de aridez, corpos hídricos superficiais intermitentes e solos e águas superficiais e subterrâneas frequentemente com problemas de salinidade, em diversos níveis de intensidade (BARROSO et al., 2011).

A salinização dos solos e corpos hídricos é frequente nas zonas áridas e semiáridas do mundo (BARROSO et al., 2011; PESSARAKLI; SZABOLCS, 2011), seja por causas naturais (salinização primária) ou antrópicas (salinização secundária). A salinização natural decorre do acúmulo de sais que derivam diretamente de processos relacionados ao intemperismo das rochas e/ou dos movimentos das águas oceânicas, ao passo que a salinização antrópica (secundária) ocorre quando os sais acumulados derivam de adições artificiais, em atividades de natureza humana (DALIAKOPOULOS et al., 2016). As causas da salinização nas zonas áridas residem, principalmente, nas condições de alta temperatura, baixa oferta hídrica e elevada demanda evapotranspirométrica do sistema hidrológico. Nas zonas áridas, as precipitações não contêm energia suficiente para a lixiviação dos íons com potencial de salinização, liberados a partir do intemperismo dos minerais primários e secundários existentes no solo, ao passo que a evapotranspiração é suficientemente alta para elevar a concentração dos íons com potencial de salinização em solos e corpos hídricos, muitas vezes formando precipitados salinos nas superfícies dos solos ou elevando a condutividade elétrica das águas (PESSARAKLI e SZABOLCS, 2011).

No semiárido do Brasil, é comum a salinização natural e antrópica dos solos e corpos hídricos. A salinização natural tem origem nas relações entre as condições hidrológicas, climáticas e geológicas (ANA, 2005; BARROSO et al., 2011), ao passo que as causas antrópicas se originam principalmente do águas salobras em sistemas irrigados de produção agrícola (CORDEIRO, 2003; BARROSO et al., 2011; FAO, 2015).

A geologia e os ciclos hidrológico e climáticos são as principais causas da salinização dos corpos hídricos formados nas regiões semiáridas do Brasil (BARROSO et al., 2011). No semiárido do Rio Grande do Norte, região na qual foi realizado o presente trabalho, há quatro sistemas de aquíferos importantes para agricultura irrigada: os Aquíferos Barreiras, Jandaíra, Açu e Cristalino (ANA, 2005), cada qual com características específicas em relação à qualidade

da água para fins de utilização em sistemas agrícolas e seus respectivos níveis de condutividade elétrica.

O sistema Barreiras é composto por aquíferos do tipo poroso formados predominantemente por rochas sedimentares de litologia heterogênea (envolvendo desde arenitos pouco argilosos a conglomeráticos, até argilas), com inúmeros espaços vazios que permitem o fluxo onidirecional da água e recarga do aquífero (TROLEI e SILVA, 2018). As águas desses aquíferos não possui restrição para o uso agrícola, sendo pouco mineralizadas e tendendo a serem cloretadas sódicas e bicarbonatadas, com salinidade baixa e condutividade elétrica variando entre 0,046 e 0,113 dS m<sup>-1</sup> (STEIN et al., 2012).

Os sistemas Jandaíra e Açú são constituídos por aquíferos do tipo cárstico e são formados predominantemente por rochas calcárias, dolimíticas, areníticas e outros sedimentos cársticos que, por ocasião de dissolução, formam extensa rede de fluxo subterrânea, com alta capacidade de armazenamento de água (DINIZ FILHO et al., 2000; TROLEI e SILVA, 2018). As águas desses aquíferos são muito utilizadas para a irrigação, mas exibem limitações de uso, uma vez que exibem concentrações elevadas de sólidos dissolvidos de composição cloretadas sódicas e mistas, com condutividade elétrica variando entre 1,29 e 3,23 dS m<sup>-1</sup> (DINIZ FILHO et al., 2000). Segundo Mendonça et al. (2002), os processos de salinização das águas desses aquíferos se dão via processos de dissolução da calcita (CaCO<sub>3</sub>) e dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), que compõem os minerais predominantes na matriz rochosa, e bischofita (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) e gipsita (CaSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O), que ocorrem como minerais traço.

O sistema Cristalino é constituído por aquíferos do tipo fraturado e compreende a formação do cristalino, sendo frequente a ocorrência de manto intempérico pouco espesso ou inexistente, fraturas isoladas de rochas e baixa capacidade de infiltração (SANTIAGO et al. 2000; ANA, 2005). No semiárido do Nordeste, as águas desses aquíferos apresentam altas concentrações salinas e condutividade elétrica variando entre 0,42 e 12,77 dS m<sup>-1</sup> (DINIZ FILHO et al., 2000; SANTIAGO et al., 2000). Segundo Santiago et al. (2000), os processos mais prováveis de salinização das águas dos aquíferos cristalinos são os produtos de intemperismo e, nas regiões litorâneas, os resíduos de aerossóis depositados no solo e anualmente lixiviados e transportados pelo escoamento superficial para as fraturas. Esses autores comentam ainda que esse processo é favorecido pela ocorrência de sistemas de drenagem naturais coincidentes com as feições tectônicas do cristalino.

A água salobra limita a agricultura irrigada e produtividade das culturas no semiárido brasileiro, uma vez que degrada o potencial produtivo do solo, reduz o potencial da água disponível e causa os estresses osmótico e iônico nas plantas (HASENGAWA, 2013;

FARAHANI et al., 2018a; FARAHANI et al., 2018b). Atualmente, estima-se que 25 a 30% das áreas produtivas do semiárido do Nordeste se encontram em processos de salinização (FAO, 2015). Isso ocorre porque as águas disponíveis para irrigação são geralmente de poços sobre fraturas que, na maioria dos casos, são salobras (BARROSO et al., 2011).

A salinização causa degradação dos solos e afeta a dinâmica biológica dos ecossistemas. O problema vem aumentando progressivamente no mundo em virtude da gestão inapropriada dos recursos naturais e resíduos sólidos, bem como da intensificação forçada da agricultura para o suprimento alimentar, especialmente sob sistemas irrigados (SHAHID, 2013). Nas zonas áridas, os sistemas irrigados, normalmente sem previsões do manejo de lixiviação e drenagem, tendem a aumentar a salinidade dos solos devido ao acúmulo de sais na zona radicular, causado pela adição constante de sais junto à utilização de águas salobras.

O acúmulo de sais altera as propriedades químicas, físicas, hídricas e morfológicas dos solos (TEDESCHI; DELL'AQUILA, 2005; BUELOW et al., 2015; FARAHANI et al., 2018a; FARAHANI et al., 2018b).

As alterações químicas incluem a elevação das concentrações de íons formadores de sais no solo, predominando aqueles com maior mobilidade geoquímica (Ca, Na, K, Mg, Cl, B, I, S, C), os quais dependem do material de origem do solo e/ou do processo de salinização envolvido (CHHABRA, 1996). As alterações físicas-hídricas incluem mudanças nas relações físico-químicas entre as partículas dos sistemas coloidais do solo, as quais podem levar a fenômenos de floculação ou dispersão das partículas de argilas do solo, dependendo das propriedades elétricas dos íons acumulados e mineralogia do solo (FARAHANI et al., 2018a; FARAHANI et al., 2018b). As alterações morfológicas, por outro lado, incluem mudanças geralmente de caráter genético, sendo mais comuns as relacionadas aos caracteres salino e sódico, expressões morfológicas de planificação em camadas e horizontes e expressões de cores de matiz, valor e croma do solo com padrões mais acinzentados e claros devido aos processos de hidromorfismo geralmente associados (SANTOS et al., 2012; CIPRIANO-SILVA et al., 2014; BOMFIM et al., 2015; RIBEIRO et al., 2016).

A dispersão de argila é causada pelo predomínio de íons monovalentes, como o  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , promovendo redução da permeabilidade hídrica e gasosa do solo, desestruturação física e aumento da suscetibilidade erosiva do solo (TEDESCHI e DELL'AQUILA, 2005; PAES et al., 2013; BUELOW et al., 2015; FARAHANI et al., 2018a; FARAHANI et al., 2018b). Esse problema é especialmente grave em solos de textura argilosa, com predomínio de argilominerais silicatados. Por outro lado, a floculação das argilas é causada pelo predomínio de íons divalentes, como o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , promovendo agregação de partículas, estruturação

em flocos e aumento da permeabilidade hidráulica (MAURI et al., 2011; FARAHANI et al., 2018a; FARAHANI et al., 2018b). Contudo, em ambos os casos, o aumento da salinidade nos solos causa elevação da condutividade elétrica do solo, normalmente em níveis acima do limite crítico tolerado pela maioria das plantas, causando problemas no desenvolvimento dos vegetais e perdas de produtividade.

As salinidades da água e do solo causam estresses às plantas, a partir de dupla tensão osmótica e iônica. Essas tensões estimulam programas genéticos de aclimatação, incluindo alterações nos níveis morfológico, bioquímico e fisiológico (TAIE et al., 2013; HANCI; CEBECI, 2015; HANCI et al., 2016; RADY et al., 2018).

A salinidade interfere especialmente nas relações hídricas e nutricionais das plantas (SINGH et al., 2015). A pressão osmótica no sistema radicular, induzida pelo aumento da salinidade na solução do solo, pode desencadear processos metabólicos de síntese e sinalização de ABA, induzindo o fechamento estomático e causando redução na condutância de vapor de água e trocas gasosas da planta (HASEGAWA, 2013). A redução na condutância estomática e a limitação das trocas gasosas trazem a consequência das reduções do fluxo transpiratório e da baixa difusão e fixação de CO<sub>2</sub> nos sítios de carboxilação da Rubisco, afetando negativamente as relações hídricas e nutricionais da planta, bem como as vias do sistema de transferência de elétrons da fotossíntese (JAJOO et al., 2013; MELO et al., 2017). Além disso, a salinidade prolongada pode causar acúmulo de íons específicos nos órgãos fotossintéticos, causando citotoxicidade por ionização ou, indiretamente, por produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO), incluindo radicais superóxidos, peróxido de hidrogênio e radicais hidroxila, que causam degradação de clorofilas, peroxidação do lipídio da membrana e danos em lipídios, proteínas, DNA e RNA (ALY-SALAMA; AL-MUTAWA, 2009; SEMIDA et al., 2016; RADY et al., 2018). Não obstante, as ERO também podem desencadear processos autocatalíticos de oxidação de membranas, resultando na produção progressiva de moléculas de radicais lipídicos, que podem provocar a degradação de organelas e morte celular programada (MITTLER; BLUMWALD, 2017).

Muitos trabalhos realizados com a cultura da cebola nas condições do semiárido brasileiro mostraram seu alto potencial produtivo na região (AGUIAR NETO et al., 2014; RESENDE; COSTA, 2014; MARROCOS et al., 2018; SANTOS et al., 2018). Entretanto, esses trabalhos foram realizados em condições tecnológicas incluindo uso de fertirrigação, altas densidades de plantio, emprego de materiais híbridos e solos e água de baixa condutividade elétrica, o que está acessível a apenas uma parte dos produtores dessa geolocalização, capitalizados para a perfuração de poços profundos, que apresentam águas de boa qualidade.

A cebola é uma espécie sensível ao sal e excludentes de  $\text{Na}^{2+}$  e  $\text{Cl}^-$  (SHANNON; GRIEVE, 1998). Shannon e Grieve (1998) relataram que a cultura exibe um limiar de CE de  $1,4 \text{ dS m}^{-1}$ , com declínio de 50% do rendimento quando a CE atinge  $4,1 \text{ dS m}^{-1}$ . Os efeitos da salinidade na cebola incluem: redução do diâmetro e peso do bulbo; redução da altura da planta e do número de folhas por planta, além de redução do crescimento do sistema radicular (SHANNON; GRIEVE, 2018; GARCIA et al., 2015). Pessoa et al. (2012), trabalhando com cebola sob irrigação com água salina nas condições do semiárido de Pernambuco, em Neossolos Flúvicos de duas texturas, verificaram os efeitos negativos da salinidade sobre o crescimento da cebola, quando irrigada com água de CE de  $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ .

A salinidade parece regular transcricionalmente a expressão, síntese ou degradação de células, organelas, moléculas e metabólitos relacionadas à osmorregulação, metabolismos antioxidantes e redox celulares, fotossíntese ou respiração (FOYER; NOCTOR, 2005; MEYER; HELL, 2005; RUIZ-SOLA et al., 2014; SINGH et al., 2015; KUREPIN et al., 2017; AHMAD et al., 2018; TAKAHASHI et al., 2018; WANG et al., 2018; AHMAD et al., 2019; CHEN et al., 2019). Os efeitos da salinidade na cultura da cebola foram exibidos nos trabalhos de Hanci et al. (2016), que verificaram reduções significativas nos teores de clorofila e carotenoides, além de aumento no teor de prolina e nas concentrações foliares de  $\text{Na}^{2+}$  e  $\text{Cl}^-$ , em virtude do aumento da salinidade na solução nutritiva. Além disso, outras alterações endógenas na cebola foram observadas por Rady et al. (2018), que verificaram efeito negativo da salinidade nas variáveis: conteúdo de clorofilas foliares, eficiência da fotossíntese, condutância estomática, conteúdo relativo de água e índice de estabilidade da membrana, ao passo que houve efeito positivo nas variáveis teores de glicina betaína, colina, glutathione, ácido ascórbico, catalase, superóxido dismutase e ascorbato peroxidase, além de redução na atividade da glutathione redutase; por outro lado, os conteúdos de prolina livre e açúcares solúveis não foram afetados.

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre – 28,8% (WEDEPOHL, 1995), porém sua essencialidade às plantas foi identificada apenas para algumas espécies (MARSCHNER, 2012). Embora o Si seja categorizado como elemento não essencial à maioria das plantas, ainda se enquadra como benéfico para muitas espécies, apresentando como principal função a melhoria no crescimento e na produtividade, especialmente quando sob condição de múltiplos estresses, tanto bióticos quanto abióticos (SAHEBI et al., 2015).

O Si é absorvido do solo pelas plantas, mediado por transportadores específicos localizados na exoderme e endoderme das raízes, na forma de ácido silícico (MA et al., 2002; MA et al., 2006; MA e YAMAJI, 2006). Após a absorção, o Si é translocado para a parte aérea,

via transpiração apoplástica, na forma ácido silícico monomérico, o qual se deposita nas paredes das células epidérmicas das plantas, polimerizando-se na forma de sílica amorfa hidratada (MA et al., 2006; KUMAR et al., 2017). Entretanto, devido às diferenças nas capacidades de absorção de Si nas raízes (MA e YAMAJI, 2006), muitas espécies não expressam o hábito acumulador de Si na parte aérea (EPSTEIN, 1999; EPSTEIN, 2001), sendo essas espécies muitas vezes negligenciadas nos estudos sobre nutrição mineral de Si e nas recomendações de adubação das plantas e reposição ao solo. Por outro lado, estudo conduzido por Fleck et al. (2015) mostrou a possibilidade de culturas não acumuladoras de Si, como a cebola, se beneficiarem na nutrição com Si, a partir da indução ao desenvolvimento precoce de bandas de caspari na exoderme e endoderme radicular, além do maior acúmulo de Si nas raízes, sugerindo melhorias no controle do desvio de fluxo apoplástico e limitação à translocação de íons potencialmente tóxicos para a parte aérea da planta, via fluxo de massa.

Muitos trabalhos documentam os benefícios do fornecimento nutricional de Si para diversas plantas cultivadas sob condição de estresses abióticos (RIZWAN et al., 2015; HAYNES, 2017; ETESAMI e JEONG, 2018; LI et al., 2018). Greger e Landberg (2015) demonstraram que a adubação silicatada reduziu significativamente a absorção e os efeitos adversos de metais pesados como Cádmio (Cd) e Arsênio (As), em diversos vegetais, inclusive cebola. Além disso, o efeito de alívio por Si sobre as adversidades da seca (AMIN et al., 2018) e da salinidade (SIENKIEWICS-CHOLEWA et al., 2018) também foram documentados em outras obras. Rizwan et al. (2015) relataram os mecanismos de alívio dos estresses salino e hídrico mediado por Si nas plantas incluem alterações de nível fisiológico, bioquímico e morfológico. Segundo os autores, o Si aumenta a tolerância ao sal por meio dos seguintes mecanismos: aumento da absorção de potássio (K) em detrimento ao sódio (Na); melhorias na condutância estomática e absorção de nutrientes essenciais; melhorias na assimilação de CO<sub>2</sub> e taxa de fotossíntese; melhorias nas defesas antioxidantes enzimáticas e não enzimáticas; alterações na síntese e sinalização de fitormônios e metabólitos osmorreguladores, além de aumento da proteção física via deposição de Si no apoplasto foliar.

A resposta interativa entre a fertilização com Si e os estresses hídrico e salino variam consideravelmente entre as espécies (LIANG et al., 2005; LEE et al., 2010; KOSTOPOULOU e THERIOS, 2014; LI et al., 2015; QIN et al., 2016; AMIN et al., 2018; SIENKIEWICS-CHOLEWA et al., 2018). Na cebola, estudos conduzidos por Bybordi et al. (2018) mostraram que a adubação com Si, zeólita e selênio (Se) aumentou a produtividade e a produção de bulbos grandes e melhorou suas características qualitativas dos bulbos (matéria seca de bulbo, sólidos solúveis e teor de proteínas). Além disso, foi observado que o Si melhorou as características

fisiológicas (atividade enzimática, níveis de clorofila e atividade fotossintética) e nutricionais (aumento nas concentrações de nitrogênio, nitrato e potássio; diminuição na concentração de sódio) da planta, sob condição de solo salino e água de irrigação salobra.

Embora haja ampla gama de estudos demonstrando os efeitos de melhorias mediadas por Si em plantas cultivadas sob estresse de sal, pouco se sabe dos efeitos desta interação na cultura da cebola, apesar de que Bybordi et al. (2017) demonstraram os efeitos de melhorias mediadas pela interação entre selênio, zeólito e Si. Além disso, muitas características associadas à qualidade pós-colheita dos bulbos e suas alterações durante a vida de útil ainda não foram avaliadas.

Neste trabalho, examinaremos os efeitos de níveis crescentes de salinidade da água de irrigação e da adubação com Si na cultura da cebola sobre a produtividade e componentes produtivos, bem como algumas características morfofisiológicas da planta durante o crescimento, além da qualidade e vida útil pós-colheita dos bulbos de cebola.

## REFERÊNCIAS

ABDOU, R.; BAKASSO, Y.; ADAM, T.; SAADOU, M. *et al.* Biology, diversity and tools for diversity analysis of the onion (*Allium cepa* L.). A review. **Biotechnologie Agronomie Societe Et Environnement**, 19, n. 2, p. 184-196, 2015. Article.

AGUIAR NETO, P.; GRANGEIRO, L. C.; MENDES, A. M. S.; COSTA, N. D. *et al.* Crescimento e acúmulo de macronutrientes na cultura da cebola em Baraúna (RN) e Petrolina (PE). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18, n. 4, p. 370-380, 2014.

AHMAD, P.; AHANGER, M. A.; ALYEMENI, M. N.; WIJAYA, L. *et al.* Mitigation of sodium chloride toxicity in *Solanum lycopersicum* L. by supplementation of jasmonic acid and nitric oxide. **Journal of Plant Interactions**, 13, n. 1, p. 64-72, 2018.

AHMAD, R.; HUSSAIN, S.; ANJUM, M. A.; KHALID, M. F. *et al.* Oxidative stress and antioxidant defense mechanisms in plants under salt stress. *In*: HASANUZZAMAN, M.; HAKEEM, K. R., *et al.* (Ed.). **Plant abiotic stress tolerance: agronomic, molecular and biotechnological approaches**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 191-205.

ALY-SALAMA, K. H.; AL-MUTAWA, M. Glutathione-triggered mitigation in salt-induced alterations in plasmalemma of onion epidermal cells. **International Journal of Agriculture and Biology (Pakistan)**, 11, n. 5, p. 639-642, 2009.

AMIN, M.; AHMAD, R.; ALI, A.; HUSSAIN, I. *et al.* Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. **Silicon**, 10, n. 2, p. 177-183, 2018.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Caderno de recursos hídricos: panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Brasília: ANA, MMA: 74 p. 2005.

ANJUM, A.; BARMON, B. K. Profitability and Comparative Advantage of Onion (*Allium cepa*) Production in Bangladesh: An Economic Study in Some Selected Areas. **The Agriculturists**, 15, n. 2, p. 66-78, 2017.

BARROSO, A. A. F.; GOMES, G. E.; LIMA, A. E. O.; PALÁCIO, H. A. Q. *et al.* Avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15, n. 6, p. 588-593, 2011-06 2011.

BOMFIM, M. R.; SANTOS, J. A. G.; COSTA, O. V.; OTERO, X. L. *et al.* Genesis, Characterization, and Classification of Mangrove Soils in the Subaé River Basin, Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39, n. 5, p. 1247-1260, 2015.

BUELOW, M. C.; STEENWERTH, K.; PARIKH, S. J. The effect of mineral-ion interactions on soil hydraulic conductivity. **Agricultural Water Management**, 152, p. 277-285, 2015.

BYBORDI, A.; SAADAT, S.; ZARGARIPOUR, P. The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 64, n. 4, p. 520-530, 2018.

CHEN, S.; WU, F.; LI, Y.; QIAN, Y. *et al.* NtMYB4 and NtCHS1 are critical factors in the regulation of flavonoid biosynthesis and are involved in salinity responsiveness. **Frontiers in plant science**, 10, n. 178, 2019. Original Research.

CHHABRA, R. **Soil Salinity and Water Quality**. Rotterdam: CRC Press, 1996. 284p. p. 9054107278.

CIPRIANO-SILVA, R.; VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D. Caracterização de Organossolos em ambientes de várzea do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38, n. 1, p. 26-38, 2014.

CORDEIRO, G. G. **Salinidade em áreas irrigadas**. Petrolina: Embrapa Semiárido (DOCUMENTOS), 2003. 32 p.

CUNHA, T. J. F.; PETRERE, V. G.; SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S. *et al.* Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. *In*: SÁ, I. B. e SILVA, P. C. G. (Ed.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. cap. 2, p. 50-87.

DALIAKOPOULOS, I. N.; TSANIS, I. K.; KOUTROULIS, A.; KOURGIALAS, N. N. *et al.* The threat of soil salinity: A European scale review. **Science of The Total Environment**, 573, p. 727-739, 2016.

DINIZ FILHO, J. B.; MELO, J. G.; BARROSO, T. T.; DUARTE, U. Potencialidades e consumo de águas subterrâneas no médio e baixo curso da bacia hidrográfica do rio Ceará Mirim/RN. **Revista Águas Subterrâneas**, Supl. Anais do XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas n. 1, 2000.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual review of plant biology**, 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E. Chapter 1 Silicon in plants: Facts vs. concepts. *In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H., et al (Ed.). Studies in Plant Science: Elsevier, 2001. v. 8, p. 1-15.*

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, 147, p. 881-896, 2018.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Status of the World's Soil Resources. Roma: FAO: 608 p. 2015.

FARAHANI, E.; EMAMI, H.; KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure. Part II. Results of two Swiss soils. **International Agrophysics**, 32, n. 1, p. 69-80, 2018a.

FARAHANI, E.; EMAMI, H.; KELLER, T.; FOTOVAT, A. *et al.* Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil. **International Agrophysics**, 32, n. 1, p. 57-67, 2018b.

FLECK, A. T.; SCHULZE, S.; HINRICHS, M.; SPECHT, A. *et al.* Silicon Promotes Exodermal Casparian Band Formation in Si-Accumulating and Si-Excluding Species by Forming Phenol Complexes. **PLOS ONE**, 10, n. 9, p. e0138555, 2015.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005.

GARCÍA, G.; GARCÍA, M.; RAMÍREZ, H. Comportamiento de siete cultivares de *Allium cepa* L. ante diferentes niveles de estrés salino. **Bioagro**, 27, n. 2, p. 93-102, 2015.

GREGER, M.; LANDBERG, T. Silicon reduces cadmium and arsenic levels in field-grown crops. **Silicon**, p. 1-5, 2015.

HANCI, F.; CEBECI, E. Comparison of salinity and drought stress effects on some morphological and physiological parameters in onion (*Allium Cepa* L.) during early growth phase. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, 21, n. 6, p. 1204-1210, 2015.

HANCI, F.; CEBECI, E.; UYSAL, E.; DASGAN, H. Effects of salt stress on some physiological parameters and mineral element contents of onion (*Allium cepa* L.) plants. **Acta horticulturae**, n. 1143, p. 179-186, 2016.

HANCI, F.; CEBECI, E.; UYSAL, E.; DASGAN, H. Y. Effects of salt stress on some physiological parameters and mineral element contents of onion (*Allium cepa* L.) plants. *In: GOKCE, A. F. (Ed.). VII International Symposium on Edible Alliaceae. Leuven 1: Int Soc Horticultural Science, 2016. v. 1143, p. 179-185. (Acta Horticulturae).*

HASEGAWA, P. M. Sodium (Na<sup>+</sup>) homeostasis and salt tolerance of plants. **Environmental and Experimental Botany**, 92, p. 19-31, 2013.

HAYNES, R. J. Chapter Three - Significance and Role of Si in Crop Production. *In: SPARKS, D. L. (Ed.). Advances in Agronomy: Academic Press, 2017. v. 146, p. 83-166.*

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal - PAM**. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

JAJOO, A. Changes in Photosystem II in Response to Salt Stress. *In: AHMAD, P.; AZOOZ, M. M., et al (Ed.). **Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress***. New York, NY: Springer New York, 2013. p. 149-168.

KOSTOPOULOU, Z.; THERIOS, I. Growth and inorganic composition of 'Nova' mandarin plants grafted on two commercial rootstocks in response to salinity and silicon. **Acta physiologiae plantarum**, 36, n. 6, p. 1363-1372, 2014.

KUMAR, S.; SOUKUP, M.; ELBAUM, R. Silicification in grasses: variation between different cell types. **Frontiers in plant science**, 8, n. 438, 2017. Mini Review.

KUREPIN, L. V.; IVANOV, A. G.; ZAMAN, M.; PHARIS, R. P. *et al.* Interaction of glycine betaine and plant hormones: protection of the photosynthetic apparatus during abiotic stress. *In: HOU, H. J. M.; NAJAFPOUR, M. M., et al (Ed.). **Photosynthesis: structures, mechanisms, and applications***. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 185-202.

LEE, S.; SOHN, E.; HAMAYUN, M.; YOON, J. *et al.* Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. **Agroforestry systems**, 80, n. 3, p. 333-340, 2010.

LI, H.; ZHU, Y.; HU, Y.; HAN, W. *et al.* Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. **Acta physiologiae plantarum**, 37, n. 4, p. 71, 2015.

LI, Z.; SONG, Z.; YAN, Z.; HAO, Q. *et al.* Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, 38, n. 3, p. 26, 2018.

LIANG, Y.; ZHANG, W.; CHEN, Q.; DING, R. Effects of silicon on H<sup>+</sup>-ATPase and H<sup>+</sup>-PPase activity, fatty acid composition and fluidity of tonoplast vesicles from roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environmental and Experimental Botany**, 53, n. 1, p. 29-37, 2005.

MA, J. F.; TAMAI, K.; ICHII, M.; WU, G. F. A Rice Mutant Defective in Si Uptake. **Plant Physiology**, 130, n. 4, p. 2111-2117, 2002.

MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N. *et al.* A silicon transporter in rice. **Nature**, 440, p. 688-691, 2006.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, 11, n. 8, p. 392-397, 2006.

MARQUELLI, W.; COSTA, E.; SILVA, H. **Irrigação da cultura da cebola**. 1<sup>a</sup> ed. ed. Brasília: Embrapa Hortaliças - Circular Técnica 37, 2005. 17 p. 1415-3033.

MARROCOS, S. D. E. T.; GRANGEIRO, L. C.; SOUSA, V. D. E. F. L. D. E.; RIBEIRO, R. M. P. *et al.* Potassium fertilization for optimization of onion production. **Revista Caatinga**, 31, n. 2, p. 379-384, 2018.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. San Diego: Academic Press, 2012. 672 p. 978-0-12-384905-2.

MAURI, J.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; KER, J. C. *et al.* Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, n. 4, p. 1277-1284, 2011.

MELO, H. F. D.; SOUZA, E. R. D.; DUARTE, H. H. F.; CUNHA, J. C. *et al.* Gas exchange and photosynthetic pigments in bell pepper irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21, n. 1, p. 38-43, 2017.

MENDONÇA, L. A. R.; SANTIAGO, M. M. F.; FERNANDES, M. A. B.; FRISCHKORN, H. *et al.* Mecanismos de salinização dos aquíferos cársticos nas chapadas do Araripe e do Apodi. **Águas Subterrâneas**, Supl. Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas n. 1, 2002.

MEYER, A. J.; HELL, R. Glutathione homeostasis and redox-regulation by sulfhydryl groups. **Photosynthesis Research**, 86, n. 3, p. 435-457, 2005.

MITTLER, R.; BLUMWALD, E. Estresse abiótico. *In*: TAIZ, L.; ZEIGER, E., *et al* (Ed.). **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. cap. 24, p. 731-761.

OLIVEIRA, L. B. Uso e manejo da água na região semiárida do nordeste do Brasil. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, 11, p. 50-64, 2016.

PAES, J. L. D. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; FREIRE, M. B. G. D. S. *et al.* Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 17, n. 11, p. 1135-1142, 2013.

PATHAK, C. S. Hybrid Seed Production in Onion. **Journal of New Seeds**, 1, n. 3-4, p. 89-108, 2000/04/30 2000.

PESSARAKLI, M.; SZABOLCS, I. Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. *In*: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of plant and crop stress**. 3 ed. London: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2011. cap. 1, p. 3-21.

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J.; MENEZES, D. Crescimento de cebola irrigada com águas salinas em solos do semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 7, n. 3, p. 527-534, 2012.

QIN, L.; KANG, W.-H.; QI, Y.-L.; ZHANG, Z.-W. *et al.* The influence of silicon application on growth and photosynthesis response of salt stressed grapevines (*Vitis vinifera* L.). **Acta physiologiae plantarum**, 38, n. 3, p. 68, 2016.

RADY, M. O. A.; SEMIDA, W. M.; ABD EL-MAGEED, T. A.; HEMIDA, K. A. *et al.* Up-regulation of antioxidative defense systems by glycine betaine foliar application in onion plants confer tolerance to salinity stress. **Scientia horticulturae**, 240, p. 614-622, 2018/10/20/ 2018.

RESENDE, G. M.; ASSIS, R. P.; SOUZA, R. J.; ARAÚJO, J. C. Importância econômica. *In*: SOUZA, R. J.; ASSIS, R. P., *et al* (Ed.). **Cultura da Cebola: tecnologias de produção e comercialização**. Lavras - MG: UFLA, 2015. p. 21-29.

RESENDE, G. M. D.; COSTA, N. D. Effects of levels of potassium and nitrogen on yields and post-harvest conservation of onions in winter. **Revista Ceres**, 61, n. 4, p. 572-577, 2014.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. D. S., *et al* (Ed.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2 ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. p. 11-19.

RIZWAN, M.; ALI, S.; IBRAHIM, M.; FARID, M. *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 22, n. 20, p. 15416-15431, 2015.

RUIZ-SOLA, M. Á.; ARBONA, V.; GÓMEZ-CADENAS, A.; RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, M. *et al.* A root specific Induction of carotenoid biosynthesis contributes to ABA production upon salt stress in Arabidopsis. **PLOS ONE**, 9, n. 3, p. e90765, 2014.

SAHEBI, M.; HANAFI, M. M.; AKMAR, A. S. N.; RAFII, M. Y. *et al.* Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. **BioMed research international**, 2015, p. 1-16, 2015.

SANTIAGO, M. M. F.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J. Mecanismos de salinização em águas do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí. **Águas Subterrâneas**, 2000.

SANTOS, J. C. B. D.; SOUZA JÚNIOR, V. S. D.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R. *et al.* Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36, n. 3, p. 683-696, 2012.

SANTOS, J. P. D.; GRANGEIRO, L. C.; SOUSA, V. D. F. L. D.; GONÇALVES, F. D. C. *et al.* Performance of onion cultivars as a function of spacing between plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22, n. 3, p. 212-217, 2018.

SEMIDA, W. M.; EL-MAGEED, T. A. A.; HOWLADAR, S. M.; RADY, M. M. Foliar-applied alpha-tocopherol enhances salt-tolerance in onion plants by improving antioxidant defence system. **Australian Journal of Crop Science**, 10, n. 7, p. 1030-1039, 2016.

SHAHID, S. A. Developments in Soil Salinity Assessment, Modeling, Mapping, and Monitoring from Regional to Submicroscopic Scales. *In*: SHAHID, S. A.; ABDELFATTAH, M. A., *et al* (Ed.). **Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 3-43.

SHANNON, M.; GRIEVE, C. Tolerance of vegetable crops to salinity. **Scientia horticulturae**, 78, n. 1-4, p. 5-38, 1998.

SHANNON, M. C.; GRIEVE, C. M. Tolerance of vegetable crops to salinity. **Scientia horticulturae**, 78, n. 1, p. 5-38, 1998.

SIENKIEWICZ-CHOLEWA, U.; SUMISŁAWSKA, J.; SACAŁA, E.; DZIĄGWA-BECKER, M. *et al.* Influence of silicon on spring wheat seedlings under salt stress. **Acta physiologiae plantarum**, 40, n. 3, p. 54, 2018.

SINGH, M.; KUMAR, J.; SINGH, S.; SINGH, V. P. *et al.* Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 14, n. 3, p. 407-426, 2015. journal article.

STEIN, P.; DINIZ FILHO, J. B.; LUCENA, L. R. F.; CABRAL, N. M. T. Qualidade das águas do aquífero Barreiras no setor sul de Natal e norte de Parnamirim, Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 42, n. supl. 1, p. 226-237, 2012.

TAIE, H. A. A.; ABDELHAMID, M. T.; DAWOOD, M. G.; NASSAR, R. M. Pre-sowing seed treatment with proline improves some physiological, biochemical and anatomical attributes of faba bean plants under sea water stress. **J Appl Sci Res**, 9, n. 4, p. 2853-2867, 2013.

TAKAHASHI, Y.; TAHARA, M.; YAMADA, Y.; MITSUDOMI, Y. *et al.* Characterization of the polyamine biosynthetic pathways and salt stress response in *Brachypodium distachyon*. **Journal of Plant Growth Regulation**, 37, n. 2, p. 625-634, 2018.

TEDESCHI, A.; DELL'AQUILA, R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. **Agricultural Water Management**, 77, n. 1, p. 308-322, 2005.

TROLEI, A. L.; SILVA, B. L. Os recursos hídricos do Rio Grande do Norte: uma análise da vulnerabilidade territorial ao colapso no abastecimento de água. **Confins [On Line]**, 34, 2018.

WANG, Y.; ZHAO, H.; QIN, H.; LI, Z. *et al.* The synthesis of ascorbic acid in rice roots plays an important role in the salt tolerance of rice by scavenging ROS. **International Journal of Molecular Sciences**, 19, n. 11, p. 3347, 2018.

WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. **Geochimica et cosmochimica Acta**, 59, n. 7, p. 1217-1232, 1995.

## Capítulo 2

# PRODUÇÃO E MORFOFISIOLOGIA DE CEBOLA CULTIVADA SOB SALINIDADE E ADUBAÇÃO COM SILÍCIO

## RESUMO

A salinidade limita a produtividade agrícola nas regiões áridas e semiáridas do mundo. O silício (Si) é benéfico às plantas e pode ser utilizado como atenuador de estresses abióticos. O efeito benéfico do Si ainda não foi completamente esclarecido na cebola. Um experimento de campo foi conduzido no semiárido brasileiro, visando a avaliar os efeitos da fertilização com Si no cultivo de cebola, sob irrigação com água salina. O experimento foi delineado em blocos completos casualizados, com quatro repetições, e tratamentos organizados em parcelas subdivididas. As parcelas foram quatro níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE: 0,65; 1,7; 2,8 e 4,1 dS m<sup>-1</sup>) e as subparcelas foram cinco níveis de adubação com Si (DS: 0; 41,6; 83,2; 124,8 e 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si), na forma de fertilizante à base de Terra diatomácea derivada da espécie *Melosira granulata*. O aumento da salinidade da água de irrigação diminuiu significativamente a produtividade (PROD) e a massa de matéria fresca dos bulbos de cebola (MFB) e aumentou a produção de bulbos pequenos (<50 mm). A salinidade prejudicou a fisiologia das plantas, aumentando o índice de instabilidade da membrana (DM, %) e diminuindo o conteúdo relativo de água (CRA, %). As plantas responderam ao aumento de salinidade aumentando os teores de clorofilas (Chl *a*, *b* e *a+b*) e carotenoides totais (Car), em uma relação de dependência com o aumento das doses de Si. Na fisiologia dos bulbos, em pós-colheita, o estresse salino induziu redução de firmeza (FM), pH, concentração de sólidos solúveis (SS, °Brix) e relação SS/AT; por outro lado, a salinidade aumentou teores de açúcares solúveis (AS, %), a acidez titulável (AT, %) e as concentrações dos ácidos ascórbico (AsA, mg 100 g<sup>-1</sup> de MF) e pirúvico (ACP, μM g<sup>-1</sup> de MF). Em relação à aplicação de Si, o aumento das doses de Si melhorou a PROD, a MFB e a produção de bulbos grandes (≥ 50 mm) na cebola, além de atenuar o estresse salino, melhorando a PROD e a produção de bulbos grandes na cebola, sob salinidade de 1,7 dSm<sup>-1</sup>. O incremento de Si no solo também afetou a fisiologia das plantas e dos bulbos pós-colheita, melhorando a concentração de clorofilas e carotenoides, além das concentrações de AS, AsA, ACP e SS. Adicionalmente, o Si melhorou a relação SS/AT na ausência de salinidade, ao passo que sob condições de salinidade promoveu redução de SS/AT.

A salinidade desencadeou respostas aclimatativas relacionadas à síntese de AsA e ácidos orgânicos detectáveis por meio da AT, bem como síntese de moléculas de enxofre (S) identificáveis na análise de ACP. A adubação com Si contribuiu para melhorar as respostas aclimatativas da cebola sob estresse do ambiente semiárido e salinidade, recomendando-se a dose de 27,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si, sob cultivo com a utilização de água de boa qualidade, ou baixa salinidade (0,65 ± 0,3 dS m<sup>-1</sup>) na irrigação ou a dose de 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si, sob cultivo com a utilização de água salina com salinidade de 1,7 ± 0,3 dSm<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** *Allium cepa* L.; Fisiologia de hortaliças; Nutrição mineral; Horticultura; Fertilidade do solo; Terra diatomácea; *Melosira granulata*.

## **PRODUCTION AND PHYSIOLOGY OF ONION CULTIVATED UNDER SALINITY AND SILICON FERTILIZATION**

### **ABSTRACT**

Salinity limits agricultural productivity in the arid and semi-arid regions of the world. Silicon (Si) is beneficial to plants and can be used as an attenuator for abiotic stresses. The beneficial effect of Si has not yet been fully clarified in the onion. A field experiment was carried out in the Brazilian semiarid region, aiming to evaluate the effects of fertilization with Si on onion cultivation, under irrigation with saline water. The experiment was designed in complete randomized blocks, with four replications, and treatments organized in subdivided plots. The plots were four levels of electrical conductivity of the irrigation water (EC: 0.65; 1.7; 2.8 and 4.1 dS m<sup>-1</sup>) and the subplots were five levels of fertilization with Si (SD: 0; 41.6; 83.2; 124.8 and 166.4 kg ha<sup>-1</sup> of Si), in the form of *Melosira granulata* diatomaceous earth. The increase in the salinity of the irrigation water significantly decreased the productivity (PROD) and the mass of fresh matter of the onion bulbs (MFB) and increased the production of small bulbs (<50 mm). Salinity impaired plant physiology by increasing the membrane instability index (DM, %) and decreasing the relative water content (CRA, %). The plants responded to the increase in salinity by increasing the levels of chlorophylls (Chl *a*, *b* and *a* + *b*) and total carotenoids (Car) in a dependence relationship with the increase in Si doses. In the physiology of the bulbs, in post-harvest, saline stress induced a reduction in firmness (FM), pH, concentration of soluble solids (SS, °Brix) and SS/AT ratio; on the other hand, salinity increased levels of soluble sugars (AS, %), titratable acidity (AT, %) and the concentrations of ascorbic (AsA, mg 100 g<sup>-1</sup> MF)

and pyruvic (ACP,  $\mu\text{M g}^{-1}$  of MF). Regarding the application of Si, the increase in Si doses improved PROD, MFB and the production of large bulbs ( $\geq 50$  mm) in the onion, besides attenuating the salt stress, improving the PROD and the production of large bulbs in the onion, under salinity conditions of  $1.7 \text{ dSm}^{-1}$ . The increase in Si in the soil also affected the physiology of plants and post-harvest bulbs, improving the concentration of chlorophylls and carotenoids; and the concentrations of AS, AsA, ACP and SS. Additionally, Si improved the SS/AT ratio in the absence of salinity, while, under salinity conditions, it promoted a reduction in SS/AT. Salinity triggered acclimative responses related to the synthesis of AsA and organic acids detectable through AT, as well as the synthesis of sulfur (S) molecules detectable through the analysis of ACP. The fertilization with Si contributed to improve the acclimative responses of the onion under stress of the semiarid environment and salinity, recommending a dose of  $41.6 \text{ kg ha}^{-1}$  of Si, under cultivation with the use of good quality water, or low salinity. ( $0.65 \pm 0.3 \text{ dS m}^{-1}$ ) in irrigation; or the dose of  $166.4 \text{ kg ha}^{-1}$  of Si, under cultivation using saline water with salinity of  $1.7 \pm 0.3 \text{ dSm}^{-1}$ .

**Keywords:** *Allium cepa* L.; Vegetable physiology; Mineral nutrition; Horticulture; Soil fertility; Diatomaceous earth; *Melosira granulata*.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A cebola (*Allium cepa* L.) é uma hortaliça apreciada em todo o mundo devido às suas características alimentares, nutricionais e medicinais (PATHAK, 2000; ABDON et al., 2015; ANJUM e BARMON, 2017; RADY et al., 2018; RICCIARDI et al., 2020). Neste ínterim, o bulbo carnoso é o objeto de interesse comercial, o qual se consome na forma fresca, condimentar ou industrializado.

A cebolicultura é praticada em mais de 140 países e o Brasil está entre os 10 maiores produtores mundiais (FAO, 2021). Essa atividade é importante no contexto socioeconômico do Brasil, uma vez que se pratica, essencialmente, em áreas de 1 a 5 hectares, por agricultores familiares (IBGE, 2020). A produtividade brasileira ocorre em torno de  $29 \text{ Mg ha}^{-1}$ , em área total cultivada de aproximadamente 57 mil hectares (FAO, 2021). A Região Nordeste do Brasil contribui com 20% da produção nacional de cebola e representa 15,2% das unidades produtoras (IBGE, 2020). Essa produção se concentra no semiárido, especialmente no perímetro irrigado do submédio São Francisco (MAROUELLI et al., 2005).

A salinidade e a seca são problemas sérios, ameaçando a agricultura nas zonas áridas e semiáridas no mundo (FAO, 2021), onde as culturas podem ser adversamente afetadas pelos sais acumulados naturalmente no solo e/ou na água de corpos hídricos subterrâneos e superficiais, em virtude de baixos índices de precipitação pluviométrica e elevada evapotranspiração e/ou devido às práticas inapropriadas de irrigação, como o uso de águas concentradas em sais dissolvidos, contendo alta dureza e salinidade (PESSARAKLI e SZABOLCS, 2011; HASENGAWA, 2013).

No semiárido do Nordeste brasileiro, as águas disponíveis para irrigação são geralmente provenientes de corpos hídricos subterrâneos, com elevados níveis de dureza e salinidade (BARROSO et al., 2011). A maior parte das terras se insere no embasamento cristalino e frequentemente sobre rocha calcária ou recoberta por manto intempérico pouco espesso ou inexistente. A geomorfologia e clima corroboram com o escoamento superficial e a concentração dos sais nas águas (ANA, 2005); a geohidrologia, para a formação de corpos hídricos subterrâneos em fraturas isoladas do cristalino ou de rochas calcárias cársticas, com elevada concentração de sais dissolvidos (SANTIAGO et al., 2000). A água subterrânea salobra constitui fator limitante à agricultura irrigada e à produtividade das culturas no semiárido, estimando-se processos de salinização em 25 a 30% das áreas produtivas do perímetro (FAO, 2015).

A cebola é sensível ao estresse salino, e um declínio linear de rendimento de 18,52% é esperado para cada unidade de CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ) adicionada ao meio de cultivo, a partir do limiar de CE de  $1,4 \text{ dS m}^{-1}$  (SHANNON e GRIEVE, 1998). Os efeitos da salinidade na cebola incluem: reduções no peso e diâmetro dos bulbos; decréscimo na altura e no número de folhas por planta; redução no crescimento do sistema radicular, além de possibilidade de redução do ciclo da cultura (GARCIA et al., 2015; SHANNON e GRIEVE, 1998). No semiárido de Pernambuco, a irrigação com água salina ( $\text{CE} = 2,0 \text{ dS m}^{-1}$ ) inibiu significativamente o crescimento da cebola, em solo classificado como Neossolo Flúvico (PESSOA et al., 2012).

As plantas respondem à salinidade regulando processos de desenvolvimento, fisiológicos e metabólicos, mediante programas genéticos de aclimação (HASEGAWA, 2013). Assim, metabólitos relacionados ao redox celular e à osmorregulação (por exemplo, açúcares, prolina, glicina betaína, poliaminas, ascorbato, glutatona, tocoferóis, carotenoides, tióis e flavonoides) exibem alterações ao nível de expressional, como resultado de adequações transcricionais (FOYER e NOCTOR, 2005; MEYER e HELL, 2005; RUIZ-SOLA et al., 2014; SINGH et al., 2015; KUREPIN et al., 2017; AHMAD et al., 2018; TAKAHASHI et al., 2018; WANG et al., 2018b; CHEN et al., 2019). Trabalhos conduzidos com a cebola mostraram

alterações significativas nos níveis de prolina, compostos fenólicos e precursores do ácido pirúvico, sob salinidade (AMAL e ALY, 2008; HANCI et al., 2016). Por outro lado, ainda não foi investigado se as alterações metabólicas da cebola cultivada sob salinidade se estendem a outras características metabólicas associadas à qualidade dos bulbos pós-colheita, como o pH, ácido pirúvico, ácido ascórbico total, açúcares solúveis, sólidos solúveis e acidez titulável.

O silício (Si) é abundante na crosta terrestre (WEDEPOHL, 1995), mas sua disponibilidade do solo para as plantas foi associada ao ciclismo fitogênico de Si, o qual tem sido severamente esgotado em ecossistemas agrícolas, em virtude da exportação nos produtos colhidos (HAYNES, 2014; HAYNES, 2017). A dessilicação é mais pronunciada em solos bem drenados, pobres em matéria orgânica do solo e altamente intemperizados. Grande população dos solos utilizados para a agricultura no semiárido do nordeste brasileiro apresenta essas características, além de possuir pH de neutro a elevado e textura arenosa, sendo, portanto, propensa a responder à fertilização com Si (NASCIMENTO et al., 2020).

A essencialidade do Si às plantas não foi identificada para a maioria das espécies (MARSCHNER, 2012), sendo o elemento considerado benéfico ou quase essencial (RIZWAN et al., 2015). Foi relatado que o Si é eficiente em aumentar a produtividade de algumas culturas, especialmente sob situações de estresses bióticos e abióticos (ETESAMI; JEONG, 2018). Na cebola, estudos conduzidos por Bybordi et al. (2018) mostraram que a adubação com Si, em interação com zeólita e selênio (Se), aumentou a produtividade e a produção de bulbos grandes e melhorou suas características qualitativas dos bulbos (matéria seca de bulbo, sólidos solúveis e teor de proteínas). Além disso, foi observado que o Si melhorou as características fisiológicas (atividade enzimática, níveis de clorofila e atividade fotossintética) e nutricionais (aumento nas concentrações de nitrogênio, nitrato e potássio; diminuição na concentração de sódio) da planta, sob condição de solo salino e água de irrigação salobra.

O efeito do suprimento de Si às plantas, sob condições de salinidade, varia consideravelmente entre as espécies e as diferentes condições de cultivo (LIANG et al., 2005; LEE et al., 2010; KOSTOPOULOU e THERIOS, 2014; LI et al., 2015; QIN et al., 2016; SIENKIEWICZ-CHOLEWA et al., 2018). Nesse sentido, ainda não sabemos como a fertilização com Si pode afetar os aspectos produtivos e qualitativos das colheitas de cebola no semiárido brasileiro; ou se o Si é capaz de atenuar o estresse causado pelo uso de água salina na irrigação.

Neste trabalho, examinaremos os efeitos de níveis crescentes de salinidade da água de irrigação e adubação com Si na cultura da cebola sobre a produtividade e os componentes

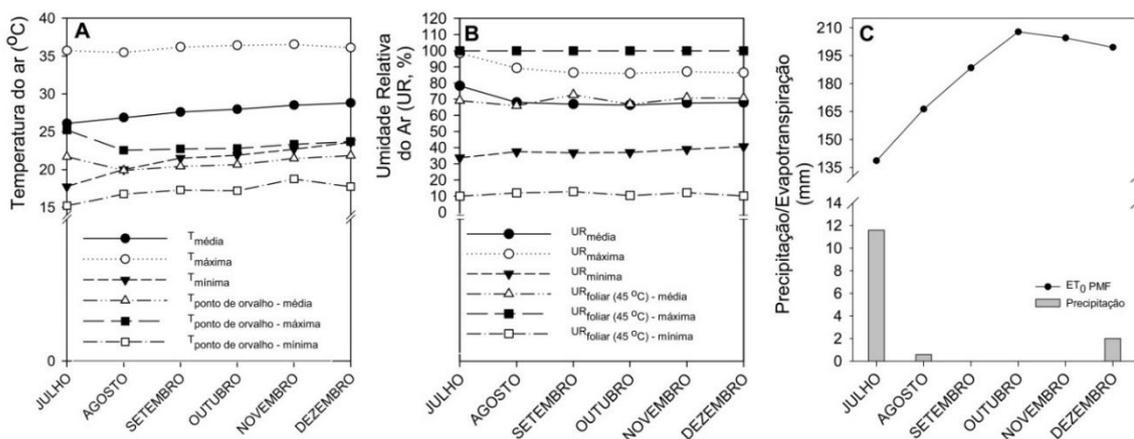
produtivos, bem como sobre algumas características fisiológicas das plantas durante o crescimento e qualidade pós-colheita dos bulbos.

## 2.2 MATERIAL E METODOS

### 2.2.1 Localização, material vegetal e condições de crescimento

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no distrito da Alagoinha, Mossoró – RN, Brasil ( $5^{\circ} 03' 37''\text{S}$ ;  $37^{\circ} 23' 50''\text{W}$  e altitude de 72 m). A região registra precipitação anual média de 625 mm, com estação seca entre os meses de junho a janeiro. A média anual de temperatura do ar registra mínima de  $21,3^{\circ}\text{C}$  e máxima de  $34,5^{\circ}\text{C}$  e o clima é classificado como semiárido (BSh), seco e muito quente, segundo sistema de classificação de Köppen (CARMO FILHO et al., 1991).

As variáveis climáticas observadas na área experimental, incluindo temperatura, unidade relativa e evapotranspiração de referência, foram registradas diariamente durante a condução da pesquisa (Figuras 1 A, B e C). Todos os dados meteorológicos foram coletados da estação automática instalada na área da fazenda, sendo a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) calculada pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998) (Figura 1C).



**Figura 1.** Temperaturas do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) – média ( $T_{\text{média}}$ ), máxima ( $T_{\text{máxima}}$ ) e mínima ( $T_{\text{mínima}}$ ); e do ponto de orvalho – média ( $T_{\text{ponto de orvalho - média}}$ ), máxima ( $T_{\text{ponto de orvalho - máxima}}$ ) e mínima ( $T_{\text{ponto de orvalho - mínima}}$ ) (A); umidades relativas do ar (%) – média ( $UR_{\text{média}}$ ), máxima ( $UR_{\text{máxima}}$ ) e mínima ( $UR_{\text{mínima}}$ ); e das folhas à  $45^{\circ}\text{C}$  – média ( $UR_{\text{foliar (45}^{\circ}\text{C) - média}}$ ), máxima ( $UR_{\text{foliar (45}^{\circ}\text{C) - máxima}}$ ) e mínima ( $UR_{\text{foliar (45}^{\circ}\text{C) - mínima}}$ ) (B); precipitação acumulada (mm) e evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith FAO ( $ET_0$  PMF) (ALLEN; PEREIRA; RAES; SMITH, 1998) (C); ao longo do ciclo da cebola híbrida ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

O solo da área é classificado como ARGISSOLO VERMELHO distrófico típico, de textura Franco-Argilo-Arenosa (726 g kg<sup>-1</sup> de areia, 48 g kg<sup>-1</sup> de silte e 226 g kg<sup>-1</sup> de argila, no horizonte B diagnóstico) (RÊGO et al., 2016), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) (SANTOS et al., 2013). As Tabelas 1 e 2 exibem as propriedades químicas e as características granulométricas analisadas na camada de 0-20 cm, de acordo com o Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (SILVA, 2009) e Manual de Métodos de Análise de Solo (TEIXEIRA et al., 2017), respectivamente.

**Tabela 1. Análise química para caracterização da disponibilidade inicial de macronutrientes no solo da área experimental para o cultivo da cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.**

Prof. (cm)	pH	Complexo sortivo <sup>(1)</sup>							V	PST	P	M.O.	
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	S					T
		cmoldm <sup>-3</sup>							----- % -----	mg dm <sup>-3</sup>		g kg <sup>-1</sup>	
0-20	7,3	1,6	0,41	0,14	0,07	-	0,44	2,22	2,66	83,5	2,6	31,08	4,65

<sup>(1)</sup> pH em água (1:2,5); Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; K<sup>+</sup> e P: extrator mehlich-1; H+Al: extrator acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>; M.O.: matéria orgânica por Walkey – Black; S: soma de bases trocáveis; T: CTC a pH 7,0; V: índice de saturação por bases; m: índice de saturação por alumínio.

**Tabela 2. Disponibilidade inicial de micronutrientes e granulometria do solo da área experimental para o cultivo da cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.**

Prof. (cm)	Micronutrientes <sup>(1)</sup>						Granulometria			
	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Si	Argila	Silte	Areia	
		mg dm <sup>-3</sup>						g kg <sup>-1</sup>		
0-20	56,0	2,7	1,0	33,0	0,20	0,10	29	21	950	

<sup>(1)</sup> Zn, Fe, Mn e Cu: extrator mehlich-1; B: extrator água quente; Si: extrator ácido acético 0,05 mol L<sup>-1</sup>.

O solo foi condicionado para o cultivo por meio de aração, gradagem e confecção de canteiros. Os canteiros foram confeccionados utilizando enxada rotativa encanteiradora de 1,0 m de largura e as sementes de cebola (*Allium cepa* L.) foram semeadas manual e diretamente nos canteiros, em 16 de julho de 2019. O material genético foi o híbrido ‘Rio das Antas’, um cultivar comum no semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. Foi adotado um espaçamento de 10 × 6 cm, entre as linhas e plantas de cultivo, respectivamente, fazendo-se uso de oito linhas de plantas por canteiro (isto é, 1.000.000 plantas por hectare).

A adubação mineral foi realizada seguindo as recomendações e as necessidades nutricionais da cultura, de acordo com os princípios de conservação do solo e considerando o balanço de nutrientes disponíveis e capacidade de tamponamento do solo (Tabelas 1 e 2). A adubação fosfatada foi realizada em pré-semeadura (15 dias pré-semeadura - DPS), com uma dose de 235 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A fonte mineral de P foi o superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 16% de Ca; e 10% de S); e o método de aplicação foi manual ao lançamento, incorporado ao solo a 5

cm de profundidade. Adubações com nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Zn, Mn e Mo) foram administradas por meio da técnica de fertirrigação, em 10 eventos de cobertura realizados entre os 25 e 89 dias após a semeadura (DAS), de acordo com a marcha de absorção preconizada para a cultura da cebola (AGUIAR NETO et al., 2014; MARTINS e BOLFARINI et al., 2017; BACKES et al., 2018). As doses totais, em fertirrigação, compuseram 99,1 kg ha<sup>-1</sup> de N, 18,6 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 230,6 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, 13,8 kg ha<sup>-1</sup> de Mg e 47,5 kg ha<sup>-1</sup> de Ca. As fontes fertilizantes utilizadas foram: ureia (50% de N), fosfato monoamônico (MAP) purificado (60% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 11% de N), nitrato de potássio (22% de N e 34% de K), nitrato de cálcio (14% de N e 28% de Ca), cloreto de potássio (66% de K) e sulfato de magnésio (9% de Mg e 14% de S). A necessidade de micronutrientes foi atendida pela aplicação de 3,5 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante Yara Vita<sup>TM</sup> Rexolin® BRA (11,6% de K<sub>2</sub>O; 1,28% de S; 0,86% de Mg; 2,1% B; 0,36% Cu; 2,66% de Fe; 2,48% de Mn; 0,036% de Mo; 3,38% de Zn), junto às adubações de cobertura. Além disso, utilizaram-se, também, 5 L ha<sup>-1</sup> do fertilizante organomineral para fertirrigação, Soil-Plex® Root (5% de N, 5% de K<sub>2</sub>O, 8,76% de carbono orgânico e complexantes aminoácidos), como bioestimulante promotor de enraizamento.

Os tratos culturais incluíram eventos de capinas manuais, durante o período crítico de interferência da cultura; controle preventivo de pragas e patógenos, por meio da utilização de sementes sadias e tratadas, com produtos registrados no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), além de pulverizações com agroquímicos registrados, imediatamente após a identificação dos insetos pragas e doenças, de acordo com o nível de dano econômico da praga ou patógeno.

A demanda hídrica das plantas foi suprida diariamente utilizando o método de irrigação localizada do tipo gotejamento, sendo distribuídas em cada canteiro quatro linhas laterais de 16 mm espaçadas em 20 cm alocadas entre as linhas de plantio. As tubulações das linhas laterais foram do tipo mangueira com gotejadores autocompensantes embutidos, espaçados 30 cm de distância, com vazão de 1,6 L h<sup>-1</sup> (1,0 bar). As lâminas de água de irrigação foram estimadas com base na evapotranspiração da cultura de referência (ET<sub>0</sub>), multiplicada pelos respectivos valores de kc da cultura da cebola (ET<sub>c</sub>) – variável para cada estágio de desenvolvimento da cultura (ALLEN et al., 1998) (Tabela 3). A programação da irrigação iniciou-se com o solo à capacidade de campo e pelo método de microaspersão, o qual perdurou até 20 dias após a semeadura, em fase de estabelecimento das plântulas. Durante o estabelecimento, as lâminas de irrigação foram igualmente aplicadas, em todas as unidades experimentais, com a água preconizada para o tratamento testemunha. As unidades

experimentais contempladas com os tratamentos de irrigação com água salina iniciaram aos 25 dias após a emergência das plantas, permanecendo até o final do ciclo da cultura, quando as plantas se encontravam em estado fisiológico de 70% estaladas. A lâmina total de irrigação foi de 909,41 mm, desde plantio até a colheita dos bulbos de cebola. Amostras da água utilizada para a irrigação do tratamento testemunha e para o preparo das demais águas com adição de sais foram coletadas para a caracterização físico-química, a qual se encontra na Tabela 4.

**Tabela 3. Manejo da irrigação utilizado para cultura da cebola ‘Rio das Antas’ nas condições experimental. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.**

Estádio	Kc ajustado <sup>1</sup>	ET0 (mm)	Período	Lâmina aplicada (mm)
Inicial (1)	0,95	4,693137	16/07 a 05/08	98,16
Vegetativo (2)	0,75	5,515387	06/08 a 05/09	138,75
Bulbição (3)	1,49	6,448128	06/09 a 16/10	429,15
Maturação (4)	0,65	6,738205	17/10 a 06/12	243,35
Total				909,41

<sup>1</sup>Considerando 90% de eficiência do sistema de aplicação.

**Tabela 4. Resultados das análises químicas da água de irrigação, para o cultivo da cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.**

ID	pH (água)	CE dS m <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NO <sub>3</sub> mg l <sup>-1</sup>	RAS (mmolc l <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	Dureza mg l <sup>-1</sup>
Poço	7,10	0,61	0,65	1,73	2,50	1,90	1,60	-	4,00	-	1,2	2,2

## 2.2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos causalizados, com quatro repetições; esquematizados em parcelas subdivididas. As parcelas foram compostas por quatro níveis de salinidade da água de irrigação (0,61; 1,74; 2,87 e 4,0 dS m<sup>-1</sup>), ao passo que as subparcelas compuseram cinco níveis de adubação com silício (0; 41,6; 83,2; 124,8 e 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si). A salinidade da água de irrigação foi elevada por meio da adição dos sais de cloreto de sódio, cloreto de cálcio e sulfato de magnésio, utilizando uma proporção molar de carga de 7:2:1 (Tabela 5). O Si foi aplicado por ocasião do plantio; incorporado 5 cm ao lado e abaixo da posição de plantio, coincidindo com suas entrelinhas, e cada linha de adubação atendeu a duas linhas de plantas. A fonte de Si utilizada foi o fertilizante granulado ( $\leq 2,75$  mm, alterado para esta pesquisa) Agrisilica<sup>TM</sup> (26% de Si; 0,07% de N; 0,02% de P; 0,08% de K; 0,09% de S; 1,4% de Ca; 1,1% de Mg; 1,3% de Fe; 219 mg kg<sup>-1</sup> de Mn; < 5 mg kg<sup>-1</sup> de B; 22 mg kg<sup>-1</sup> de Cu; 18 mg kg<sup>-1</sup> de Zn; e 2,1 mg kg<sup>-1</sup> de Mo) da empresa Agripower Australia Limited; um fertilizante à base de uma terra diatomácea natural derivada da espécie *Melosira granulata*.

**Tabela 5. Quantidade de sais adicionada por cada parcela via água de irrigação, nos diferentes níveis de salinidade, durante o período experimental. Mossoró-RN, Brasil, 2019. Perímetro semiárido.**

Nível de Salinidade	cloreto de sódio (NaCl)	cloreto de cálcio (CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O)	sulfato de magnésio (MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O)
	----- g/parcela -----		
A1	-	-	-
A2	5625,401	2021,552	1694,598
A3	11250,8	4043,104	3389,195
A4	16876,2	6064,655	5083,793

A área experimental totalizou 560 m<sup>2</sup> (16 × 35 m), incluindo os espaços reservados entre os canteiros e áreas de trânsito. A área efetiva do experimento foi de 240 m<sup>2</sup>, constituída por 16 parcelas de 15 m<sup>2</sup> (1,0 × 15 m), sendo cada parcela subdividida em 5 subparcelas de 3,0 m<sup>2</sup> (1,0 × 3,0 m). O experimento contemplou 80 unidades experimentais e a área útil de cada unidade foi de 1,66 m<sup>2</sup> (0,6 × 2,76 m). A densidade populacional foi de 167 plantas m<sup>-2</sup> de canteiro.

### 2.2.3 Fisiologia das plantas e dos bulbos

As análises fisiológicas das plantas foram determinadas a partir de amostras de folhas fisiologicamente desenvolvidas, coletadas de oito plantas em cada unidade experimental, sendo a folha mais alta aos 60 dias após a semeadura (DAS) (RIBEIRO et al., 1999). As amostras foram coletadas no campo e imediatamente armazenadas em caixas refrigeradas e levadas ao laboratório de nutrição mineral e análise de plantas, para a análise imediata do conteúdo relativo de água, índice de instabilidade de membrana e teor de pigmentos do sistema de fotossíntese (clorofilas *a*, *b*, *a+b* e carotenoides totais).

#### 2.2.3.1 Avaliação do conteúdo relativo de água e índice de instabilidade da membrana

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado pelo método de Catski (1974), a partir de discos foliares de 10 mm de diâmetro. Os discos foram pesados e levados para saturação em placa de Petri contendo água destilada e deionizada, por 24 horas, no escuro. Os discos foram enxutos e pesados e levados à desidratação em estufa de circulação de ar forçada a 70 °C até peso constante. A massa de matéria seca foi anotada e o CRA foi calculado, de acordo com a seguinte fórmula (RADY, 2011):

$$CRA = \frac{\text{massa fresca} - \text{massa seca}}{\text{massa saturada} - \text{massa seca}} \times 100, \% \quad (1)$$

O índice de instabilidade de membrana (DM) foi avaliado de acordo com Shanahan et al. (1990), por meio do vazamento de eletrólitos. Amostras de discos foliares de 10 mm de diâmetro foram reservadas em tubo de ensaio contendo 10 cm<sup>3</sup> de água destilada e deionizada. Um conjunto de amostras foi aquecido em banho Maria por oito horas, a 30 °C, e a condutividade elétrica (CE1) foi registrada. O segundo conjunto de amostras foi aquecido em banho fervente a 100 °C, por 1 hora, para o registro da condutividade elétrica (CE2) e o índice de instabilidade da membrana foi determinado como dano relativo (dano de membrana, DM), a partir da razão entre o CE1 e CE2, ou seja:

$$DM = \frac{CE1}{CE2} \times 100, \% \quad (2)$$

#### 2.2.3.2 Avaliação das concentrações de clorofilas *a*, *b*, *a+b* e carotenoides totais

As clorofilas e os carotenoides foram extraídos a partir de discos foliares de 10 mm de diâmetro, devidamente pesados para determinação por grama de matéria fresca (MF). A extração foi realizada em tubos de ensaio contendo 10 ml de acetona (80%), após reserva por 72 horas a 4 °C. Após extração, as concentrações de clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*), clorofila *a+b* (Chl *a+b*) e carotenoides totais (Car) foram estimadas conforme Lichtenthaler (1987), utilizando um espectrofotômetro (Even® UV/VIS) nas faixas de absorvância de 470, 646,8 e 663,2 nm.

#### 2.2.3.3 Avaliação da firmeza dos bulbos

A firmeza dos bulbos, medida em força Newton (N), foi avaliada por meio da utilização de um penetrômetro Lutron® modelo PTR-300, com ponteira de 8 mm de diâmetro e penetração a uma profundidade de 7 mm. As leituras foram realizadas na porção equatorial média dos bulbos em dois pontos equidistantes, em lados opostos, após a remoção da túnica seca dos bulbos.

#### 2.2.3.4 Avaliação dos açúcares solúveis, sólidos solúveis, acidez titulável, relação SS/AT e potencial de hidrogênio iônico

Os teores de açúcar solúvel (AS) e acidez titulável (AT) foram avaliados nos bulbos da cebola, segundo os métodos descritos por Yemm e Willis (1954) e pelo Instituto Adolfo Lutz

(2008), respectivamente. O AS foi extraído de amostras de 1 g de suco dos bulbos frescos, dissolvidas em 100 mL de água pura desmineralizada. As determinações foram realizadas por colorimetria, a partir de alíquotas de 50 µL retiradas dos extratos. Para as leituras, as alíquotas dos extratos (50 µL) foram misturadas com 950 µL água pura e 2000 µL de reagente de antrona ( $2 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), aquecidas (banho-maria a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por 8 minutos) e resfriadas (banho de gelo). As leituras foram registradas na faixa espectral de 620 nm e os conteúdos de AS foram calculados a partir uma curva padrão de glicose. A AT foi determinada a partir de amostras de 1 g de suco de bulbos de cebola, dissolvidos em 50 mL de água pura desmineralizada; por meio de titulação com NaOH 0,1 N e indicador fenolftaleína a 1%.

Os teores de sólidos solúveis (SS) e o potencial de hidrogênio iônico (pH) dos bulbos da cebola foram determinados diretamente no suco dos bulbos, por meio de um equipamento medidor de refração luminosa, convertido na escala de Brix (%); e um medidor de potencial elétrico (mV) (convertido na escala de pH), respectivamente. O equipamento utilizado para medir o SS foi o refratômetro digital modelo DBR45 (índice de refração de 1,3330-1,4098), com compensação de temperatura automática, ao passo que o equipamento utilizado para medir o pH foi o potenciômetro de bancada Hanna® modelo HI 2221, com eletrodo de pH modelo HI-1131B e sonda de compensação automática de temperatura modelo HI 7662. A relação SS/AT, logicamente, foi obtida por meio da razão matemática entre os valores de observados para SS e AT.

#### 2.2.3.5 Avaliação das concentrações dos ácidos pirúvico e ascórbico

As concentrações dos ácidos pirúvico (ACP) e ascórbico (AsA) foram avaliadas nos bulbos da cebola, segundo os métodos descritos por Schwimmer e Weston (1961) e Strohecker et al. (1967), respectivamente. O ACP foi extraído de amostras de 0,5 g de suco dos bulbos frescos, dissolvidas em 1,5 mL de ácido tricloroacético (TCA) 5% e 18 mL de água pura desmineralizada. As determinações foram realizadas por colorimetria, a partir de alíquotas de 1 mL retiradas dos extratos. Para as leituras, as alíquotas dos extratos (1 mL) foram misturadas com 1 mL de solução de 2,4-dinitrofenilhidrazina (2,4-DNPH)  $0,125 \text{ g L}^{-1}$  de HCl 2N e 1 mL de água pura; depois aquecidas (banho-maria a  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  por 10 minutos), resfriadas (banho de gelo) e misturadas com 5 mL de NaOH 0,6N. As leituras foram registradas na faixa espectral de 420 nm e os conteúdos de ACP calculados a partir uma curva padrão de piruvato de sódio. O AsA foi extraído a partir de amostras de 1 g de suco de bulbos de cebola, dissolvidos em 50 mL de ácido oxálico 0,5%. As determinações foram obtidas por meio de titulação com solução de

Tillman (2,6-dicloro-fenol indofenol) 0,02% (refrigerada), a partir de 5 mL do extrato dissolvidos em um volume de 50 ml à base de água pura desmineralizada. Os conteúdos foram calculados por razões proporcionais, a partir do título de uma solução padrão de ácido ascórbico.

#### **2.2.4 Colheita e avaliação da produção e componentes produtivos e eficiência de uso da água**

A colheita foi realizada em 16 de dezembro de 2019, após o processo de cura dos bulbos no campo. A cura teve duração de 10 dias e o início do processo foi definido quando 70% da população das plantas apresentavam-se no estado fisiologicamente maduro (isto é, estaladas), momento que também definiu a paralisação do fornecimento de água por irrigação.

Os bulbos colhidos foram classificados segundo o diâmetro equatorial dos bulbos e os padrões mínimos de qualidade comercial preconizados pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil (BRASIL, 1995) e a Companhia de Entrepostos de Armazéns de São Paulo (CEAGESPE, 2001), em: não comerciais (C1): bulbos com diâmetro < 35 mm e sem qualidade mínima de comercialização; Caixa 2 (C2): bulbos com diâmetro de 35-50 mm; Caixa 3: bulbos com diâmetro de 51-70 mm; Caixa 4 (C4): bulbos com diâmetro de 71-90 mm.

A produtividade foi avaliada segundo a produção total dos bulbos (kg ha<sup>-1</sup>) e a produção de bulbos (kg ha<sup>-1</sup>) em suas respectivas categorias comerciais e não comerciais (C1, C2, C3 e C4). Além disso, também foi calculada a massa média da matéria fresca dos bulbos (MFB), pela razão produção total/ estande plantas; e eficiência de uso da água (EUA, em kg m<sup>-3</sup> de água), pela razão produção total/ volume de água aplicado.

#### **2.2.5 Análise estatística**

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e testes de regressão polinomial, em seguida ajustados a equações de regressão polinomial, por meio de modelos de regressões lineares e não lineares. Os critérios para as escolhas de modelos foram os significados biológicos, a significância dos estimadores dos parâmetros de regressão e os valores do ajuste R<sup>2</sup>.

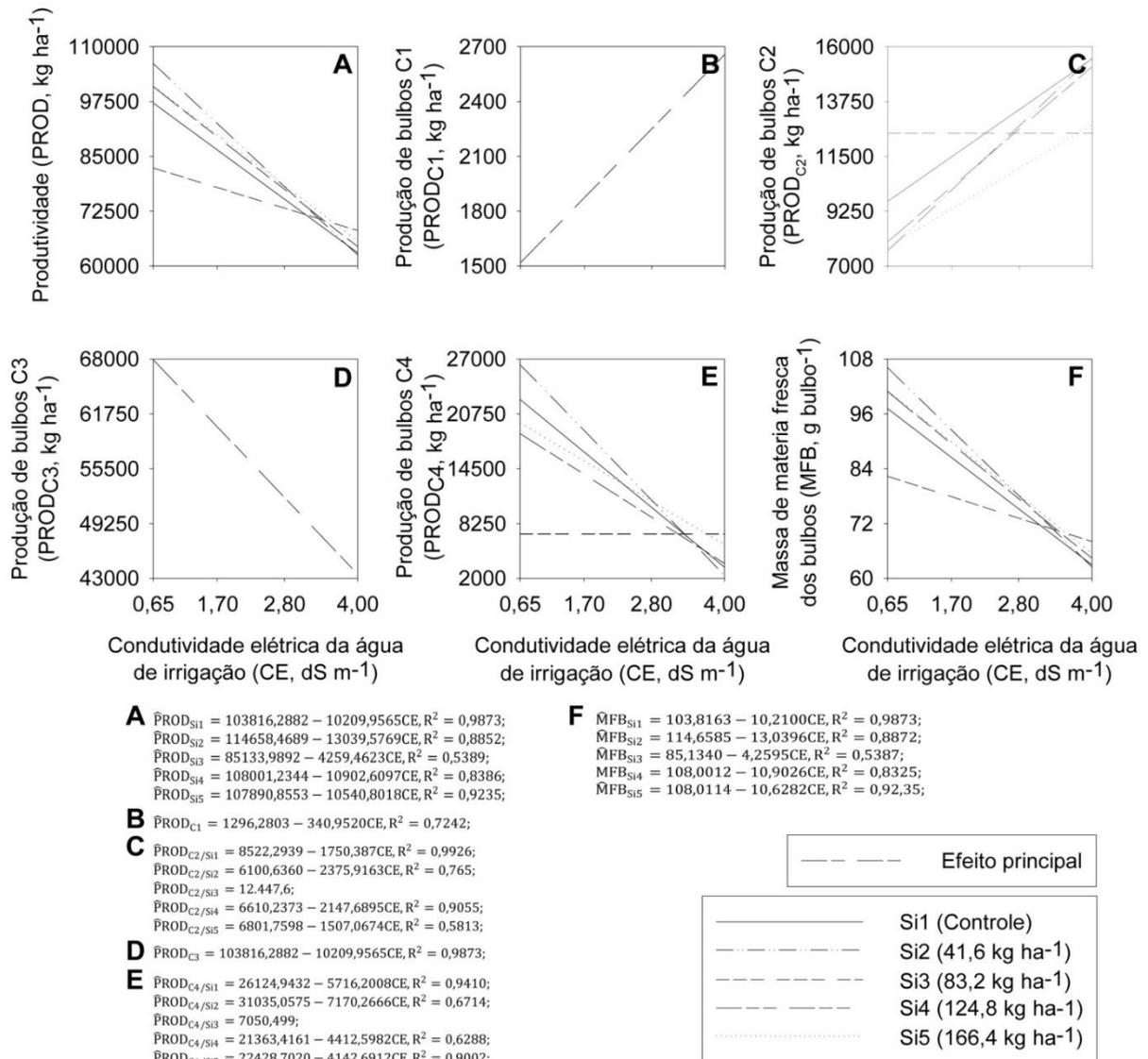
## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 Produtividade, componentes produtivos e eficiência de uso da água

Houve efeito de interação significativa entre os fatores Salinidade da Água (Condutividade Elétrica da água de irrigação – CE,  $\text{dS m}^{-1}$ ) e Doses de Silício no Solo (DS,  $\text{kg ha}^{-1}$ ), para as variáveis produtividade total (PROD, em  $\text{kg ha}^{-1}$ ), produção de bulbos de padrão caixa 2 e 4 (C2 e C4, em  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente) e massa de matéria fresca dos bulbos (MFB, em  $\text{g planta}^{-1}$ ) (Figuras 2 e 3: A, C, E e F). Além disso, houve efeito principal significativo de fator CE para a produção de bulbos dos padrões caixa 1 e 3 (C1 e C3, em  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente), bem como de fator DS, para a produção de bulbos de padrão C3 (Figuras 2 e 3: B e D). Em geral, o aumento da salinidade da água de irrigação induziu diminuição de MFB da cebola “Rio das Antas”, provovendo diminuições nas produções de bulbos grandes (C3 e C4) e PROD (Figuras 2), ao passo que a adubação com Si, por outro lado, promoveu aumento de MFB, resultando em aumentos nas produções de bulbos grandes (C3 e C4) e PROD na cebola (Figura 3).

A cebola é sensível à salinidade, sendo afetada ao nível de planta inteira, com taxas dependentes do genótipo (SHANNON e GRIEVE, 1998; GARCÍA et al., 2015). Testes realizados em casa de vegetação mostraram que o aumento da salinidade do meio de cultivo diminuiu o acúmulo de biomassa seca e fresca da parte aérea e sistema radicular, além de diminuir o diâmetro e massa de matéria fresca de bulbos. Estes resultados foram observados nas sete cultivares avaliadas de cebola, porém sob diferentes taxas (GARCÍA et al., 2015). Sob condições de cultivo protegido, Coca et al. (2012) mostraram que o aumento da salinidade induziu redução do número e da área foliar, concomitantemente à diminuição das taxas de assimilação líquida de carbono e dos crescimentos absoluto e relativo das plantas.

Trabalhos de campo relatando os efeitos do aumento da salinidade de água irrigação sobre a produção e a produtividade da cebola são escassos. Bybordi et al. (2018), trabalhando nas condições do Leste Azerbaijão, Irã, em solo salino e água de irrigação salina (CE =  $8,0 \text{ dSm}^{-1}$  e CE =  $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente), obtiveram produtividade de  $33 \text{ t ha}^{-1}$  para a cultivar de cebola ‘Azar Shahr’. Rady et al. (2018), por sua vez, relataram produtividade de  $20 \text{ t ha}^{-1}$ , trabalhando com a variedade de cebola ‘Giza 20’, nas condições de aridez do Sudeste de Fayoum, Egito, em um solo salino de CE =  $4,8 \text{ dS m}^{-1}$ . Em nossos resultados, obtivemos média de produtividade de  $65 \text{ t ha}^{-1}$ , sob as condições do Semiárido do Rio Grande do Norte, usando água de irrigação com salinidade de CE =  $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ , em solo arenoso (Figura 2A).

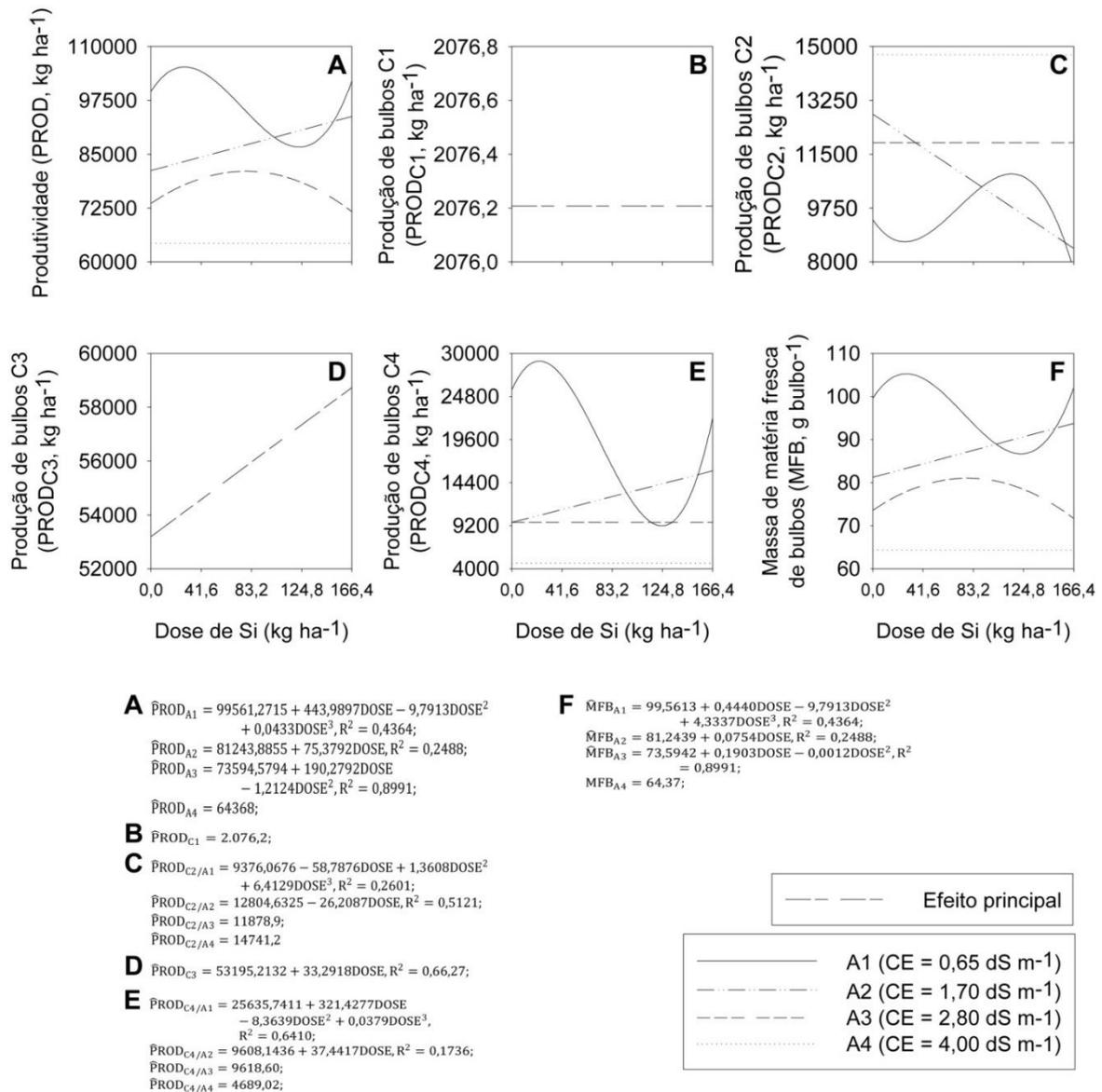


**Figura 2.** Desdobramento dos níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) dentro de cada nível de adubação com silício (Si), para as variáveis: produtividade (PROD, kg ha<sup>-1</sup>) (A); produção de bulbos por caixas de classificação (PRODC<sub>1</sub>, PRODC<sub>2</sub>, PRODC<sub>3</sub> e PRODC<sub>4</sub>, kg ha<sup>-1</sup>) (B, C, D e E); e massa de matéria fresca dos bulbos (MFB, g bulbo<sup>-1</sup>) (F), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

A adubação com Si aumentou significativamente a PROD e a MFB da cebola ‘Rio das Antas’, exceto no nível de salinidade A4 (CE = 4,0 dS m<sup>-1</sup>) (Figuras 3A e F). As produções de bulbos de classe comercial C3 e C4 também foram aumentadas, ao passo que houve redução na produção de bulbos não comerciais e pequenos (C1 e C2, respectivamente) (Figuras 3: B, C e D).

No nível de salinidade A1 (controle, 0,65 dS m<sup>-1</sup>), o incremento de Si aumentou a PROD e a MFB da cebola, oscilando cubicamente (Figuras 3A e F). As máximas PROD’s (105 e 102 t ha<sup>-1</sup>) foram obtidas com as doses de 27,8 e 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si, ao passo que a mínima

(87 t ha<sup>-1</sup>) ocorreu com a dose de 122,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si. Efeitos fitotóxicos do Si na cultura da cebola ainda não foram registrados na literatura, para que pudéssemos justificar a diminuição da PROD obtida no intervalo entre as doses de 27,8 e 122,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si. Curiosamente, foi relatado efeito de fitotoxicidade contra alta concentração de Si em espécies de plantas ornamentais como *Dendrobium secundum*, *Dendrobium moniliforme* e *Cymbidium antiochense*, porém usando modo de aplicação foliar (MANTOVANI et al., 2018; MANTOVANI et al., 2020). Em nosso caso, por outro lado, aceitamos a possibilidade de polimerização e/ou adsorção de Si no solo (BROADLEY et al., 2012; HAYNES, 2014; HAYNES, 2017), decorrentes da alta variabilidade espacial natural dos solos do semiárido, em curtas distâncias (SANTOS et al., 2009); das altas concentrações de Si aplicadas localizadamente no solo; e/ou das variações de pH do solo, resultantes dos turnos diários de rega, com água de pH elevado e alto teor de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Tabela 3). Contudo, as questões específicas da química do Si no complexo sortivo do solo precisam ser analisadas experimentalmente. Os aumentos da PROD e MFB da cebola, promovidos pela adubação com Si dentro do nível de salinidade A1, parecem contrários à literatura (FLECK et al., 2015; LEWIN e REIMANN, 1969). Entretanto, a razão para isso pode estar nas condições ideais de cultivo desses experimentos, com solução nutritiva e ambiente climatizado, portanto sem estresses a serem aliviados pela aplicação de Si (EPSTEIN, 1999), diferindo das nossas condições de cultivo de campo, sob o clima semiárido e sujeito a estresses múltiplos, como variações de temperatura, luminosidade, umidade, vento, desidratação, etc. (Figura 1). Em trabalho recente, Hu et al. (2020) mostraram que fornecimento de Si para plantas de Poinsetia submetidas a estresse térmico aliviou as tensões de temperatura regulando a abertura estomática e aumentando a cera epicuticular. Além disso, as plantas tratadas com Si exibiram maiores taxas de fotossíntese e menores concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e malonaldeído do que plantas não tratadas. Esses resultados, associados aos resultados apresentados por Bybordi et al. (2018), que mostraram aumento de fotossíntese e redução das atividades de catalase e peroxidase em cebola tratada com Si, fornecem fortes evidências de mecanismo semelhantes de controle de transpiracional estomático na cultura da cebola, embora essa hipótese necessite de comprovação experimental.



**Figura 3.** Desdobramento dos níveis de adubação com silício (Si), dentro de cada nível de condutividade elétrica da água de irrigação (CE), para as variáveis: produtividade (PROD, kg ha<sup>-1</sup>) (A); produção de bulbos por caixas de classificação (PRODC<sub>1</sub>, PRODC<sub>2</sub>, PRODC<sub>3</sub> e PRODC<sub>4</sub>, kg ha<sup>-1</sup>) (B, C, D e E); e massa de matéria fresca dos bulbos (MFB, g bulbo<sup>-1</sup>), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’ (F). Mossoró-RN, Brasil, 2019.

Nos níveis de salinidade A2 (CE = 1,7 dS m<sup>-1</sup>) e A3 (CE = 2,8 dS m<sup>-1</sup>), a adição de Si no solo melhorou a PROD e a MFB da cebola, ajustando-se aos modelos linear e quadrático, respectivamente. No nível de salinidade A4 (CE = 4,0 dS m<sup>-1</sup>), o efeito da adubação com Si foi não significativo (Figuras 3A e F). Em A2, os máximos de PROD (93,8 t ha<sup>-1</sup>) e MFB (81,2 g bulbo<sup>-1</sup>) foram obtidos com a aplicação de 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si ao solo. Em A3, os máximos (81,2 t ha<sup>-1</sup> e 81,2 g bulbo<sup>-1</sup>) foram obtidos com a aplicação de 78,5 kg ha<sup>-1</sup> de Si. Em A4, a adubação com Si não atenuou os efeitos do estresse salino, exibindo PROD de 64,4 t ha<sup>-1</sup> e

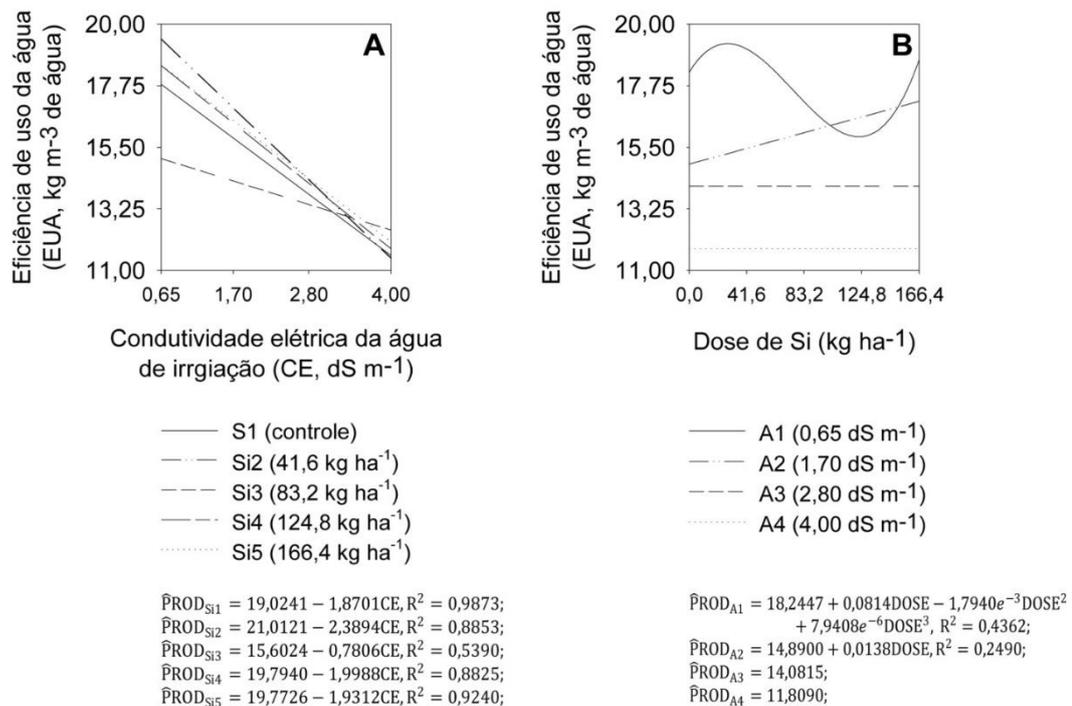
MFB de 64,4 g bulbo<sup>-1</sup>. Embora a cebola apresente hábito não acumulador de Si (Bybordi et al., 2018), um trabalho recente de Fleck et al. (2015) demonstrou que os efeitos benéficos do Si para as plantas não se restringem às acumuladoras de Si na parte aérea. Usando a cebola como material de estudo não acumulador de Si, os autores mostraram que o Si atua na formação das bandas de Caspari na exoderme e endoderme da cebola, o que foi correlacionado à disponibilidade de Si no tecido radicular. Outros estudos mostraram que a formação intensificada de bandas Casparianas no sistema radicular limitou o desvio de fluxo apoplástico e a translocação de íons potencialmente tóxicos, incluindo Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>, potenciais causadores de perda de produção de biomassa e produtividade das culturas (FLECK et al., 2015; GONG et al., 2006). Assim, o aumento da disponibilidade de Si no solo por meio da adubação pode contribuir para a fortificação da banda de Caspari no sistema radicular e redução na absorção de íons tóxicos na cebola, melhorando a produtividade. Um trabalho recente desenvolvido por Bybordi et al. (2018) mostrou que o aumento da dose de Si no solo diminuiu a concentração foliar de Na<sup>+</sup> em cebola cultivada sob condição de salinidade, ao passo que aumentaram as concentrações de K<sup>+</sup>, relação K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>, N total e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, concomitantemente a um incremento em produtividade.

A eficiência de uso da água (EUA, kg m<sup>-3</sup> de água) nos diferentes tratamentos apresentou padrão de resposta proporcional à PROD e à MFB da cebola, uma vez que as lâminas de irrigação foram igualmente aplicadas nas unidades experimentais. Assim, o aumento da salinidade da água de irrigação reduziu a EUA, ao passo que o aumento das doses de Si no solo melhorou a EUA sob salinidade, exceto no nível A4 (Figura 4: A e B).

A EUA é conceituada como a quantidade de carbono assimilado como biomassa por unidade de água utilizada pela cultura (HATFIELD e DOLD, 2019). No nível foliar, a EUA representa a razão entre a fotossíntese e a transpiração das plantas (FLEXAS et al., 2016). A salinidade desencadeia processos fisiológicos que afetam negativamente a absorção de água e nutrientes na cebola, causando a redução da EUA (HANCI e CEBECI, 2015; HANCI et al., 2016; RADY et al., 2018). A dupla tensão osmótica e iônica reduz o K<sup>+</sup> intracelular nas plantas, que atua como regulador nas relações osmóticas. Além disso, essas tensões estimulam a síntese e sinalização de moléculas químicas como o ABA, que atuam no fechamento estomático e controle do fluxo transpiratório (LOVEYS et al., 2000; HANCI e CEBECI, 2015; HANCI et al., 2016; RADY et al., 2018). Contudo, a consequência inevitável desse processo é a restrição parcial ou total do fluxo difusivo de CO<sub>2</sub> para os sítios de carboxilação na Rubisco, que causa redução na fotossíntese líquida e metabolismo assimilatório do carbono, bem como a destruição de biomoléculas por estresse oxidativo e ionicidade (MELO et al., 2017). Assim, a maior

intensidade de fechamento estomático induzida pelas tensões osmótica e iônica causada por salinidade pode resultar em menor eficiência de uso da água, uma vez que o vapor de água e influxo de CO<sub>2</sub> compartilham a mesma via estomática na superfície das folhas. Um estudo conduzido por Rady et al. (2018) mostrou que a salinidade reduziu o crescimento das plantas de cebola, reduzindo significativamente sua produção de bulbos e a EUA.

O aumento das doses de Si melhorou a EUA da cebola, mostrando o importante papel da adubação do solo com Si para melhorar a captação de água pelas plantas. Como o Si contribui para o controle do fluxo apoplástico via indução no desenvolvimento das bandas de Caspari na cebola (FLECK et al., 2015), uma melhoria na EUA da cebola pode resultar do fechamento parcial dos estômatos sob condições de estresse e da consequente melhoria nos processos de absorção seletiva de nutrientes, via controle de fluxo apoplástico.

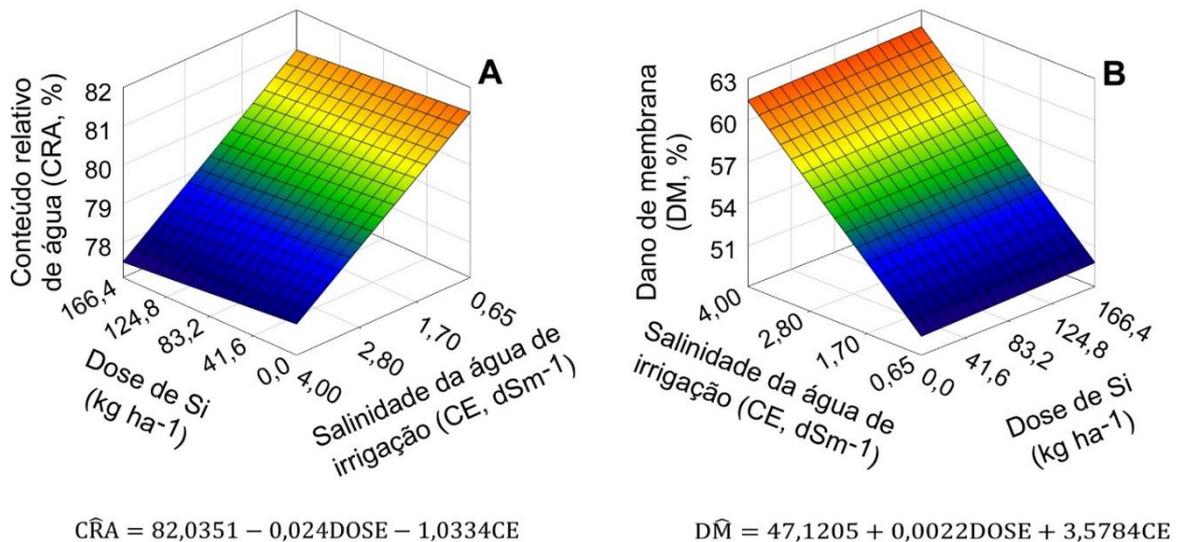


**Figura 4. Desdobramento da interação entre níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) (A) e níveis de adubação com silício no solo (Si) (B), para a variável Eficiência de Uso da Água (EUA, kg m<sup>-3</sup> de água), em plantas de cebola 'Rio da Antas'. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

### 2.3.2 Fisiologia das plantas

Houve efeito significativo de interação entre CE e DS para as variáveis conteúdo relativo de água (CRA, %), índice de instabilidade da membrana (DM, %) e concentrações de clorofilas (Chl *a*, Chl *b* e Chl *a* + *b*, mg kg<sup>-1</sup> de MF) e carotenoides totais (Car, mg kg<sup>-1</sup> de MF).

O aumento da salinidade da água de irrigação, dentro de cada nível de Si, reduziu significativamente o CRA e aumentou o DM, além de alterar significativamente a Chl *a*, Chl *b* e Chl *a + b* e Car. Por outro lado, o aumento das doses de Si, dentro de cada nível de salinidade, não promoveu alteração significativa nessas variáveis (Figuras 4 e 5).



**Figura 5. Desdobramento da interação entre os níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) e os níveis de adubação com silício (Si), para as variáveis: Conteúdo Relativo de Água (CRA, %) (A); e Índice de Instabilidade da Membrana (DM, %), em plantas de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

Sob salinidade, as plantas de cebola são afetadas por estresse osmótico e iônico (Secção 3.1), que causam redução no CRA e aumento no vazamento dos íons através da membrana (RADY et al., 2018), corroborando com os respectivos resultados de redução e aumento significativos da CRA e DM, em função do aumento da CE da água de irrigação observados nesta pesquisa.

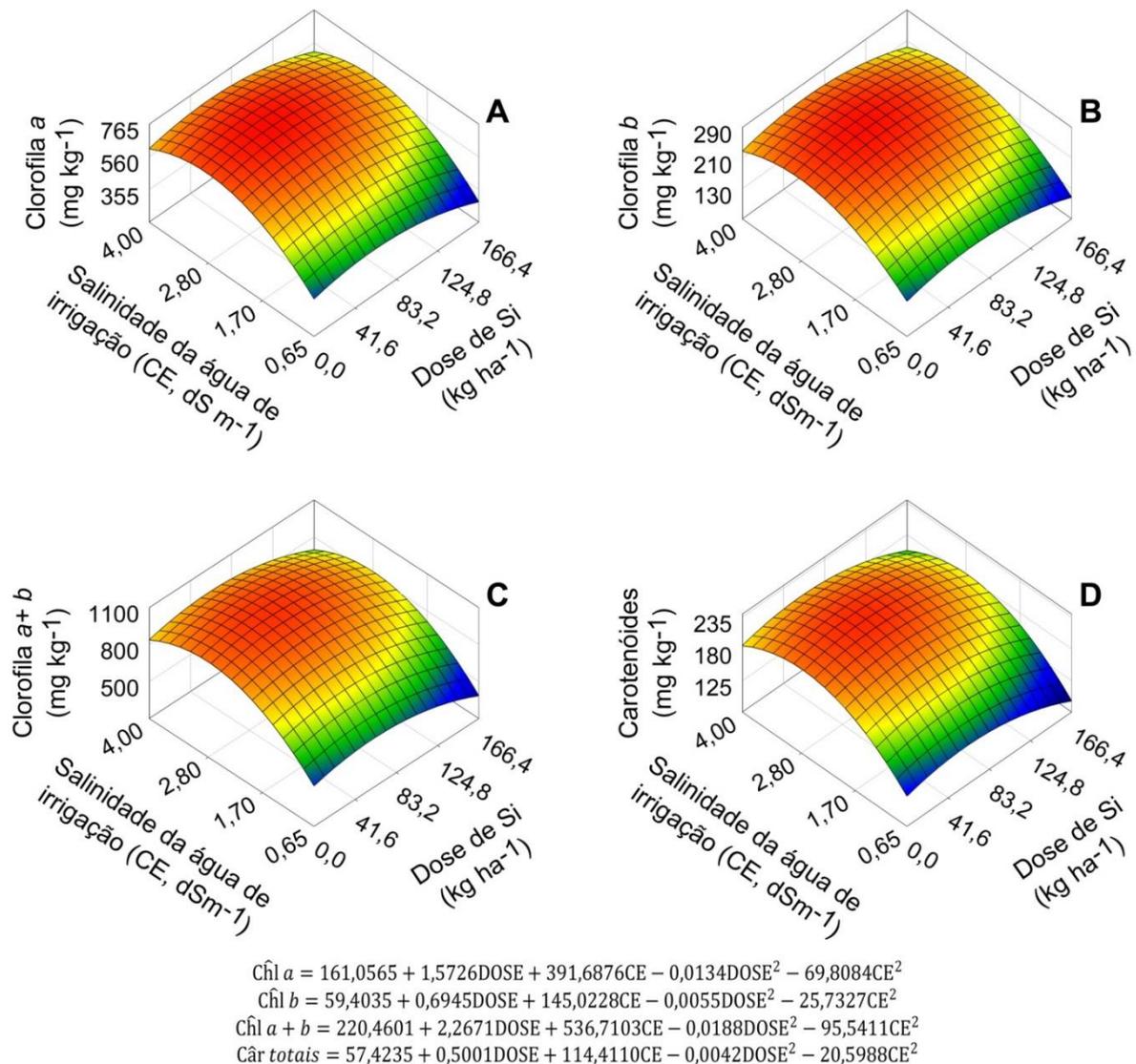
A água de irrigação salina aumenta a tensão de solutos na solução solo e diminui o potencial da água disponível (potencial hídrico,  $\Psi_w$ ) às plantas (OLIVEIRA et al., 2016). Nessas condições, o baixo  $\Psi_w$  da solução do solo restringe a absorção de água pelas raízes, resultando em perda de turgor e diminuição do CRA, devido ao estresse osmótico e à plasmolização dos sistemas celulares (PASSIOURA, 2010).

Na zona radicular, níveis de  $Na^+$ , em concentração acima do ideal para as plantas, restringem o desenvolvimento das raízes (SNAPP e SHENNAN, 1992), limitando a disposição espacial dos pelos absorventes de água e nutrientes ( $H_2PO_3^-$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , etc), bem como a discriminação entre  $Na^+$  e  $K^+$ , que competem pelos mesmos canais de retificação interna

(BENITO et al., 2014; HANCI et al., 2016; KEISHAM et al., 2018). A falta de discriminação entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  nos transportadores (especialmente, Transportadores de Potássio de Alta e Baixa Afinidade – *High-Affinity Potassium Transporter*, HKT1; e *Low-Affinity Potassium Transporter*, AKT1, respectivamente) possibilita, portanto, a captação de  $\text{Na}^+$  em detrimento do  $\text{K}^+$ , interrompendo a homeostase desses íons no citosol e, conseqüentemente, o equilíbrio intercelular da relação  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  (SERRANO e RODRIGUEZ-NAVARRO, 2001; BENITO et al., 2014; HASEGAWA, 2013). Com o aumento na concentração intercelular de  $\text{Na}^+$ , induzida pelo aumento da CE da água de irrigação, o resultado é um maior vazamento relativo de eletrólitos, por ocasião da imersão dos discos foliares em água deionizada, além de maior instabilidade da membrana plasmática (DM), em virtude de lesões membranares causadas por ionização específica de  $\text{Na}^+$  ou, indiretamente, por espécies reativas de oxigênio (ERO). Nesse sentido, nossos resultados corroboram com as observações de Gupta et al. (2002), Dkhil e Denden (2012), Rady et al. (2017) e Rady et al. (2018).

As respostas da interação CE  $\times$  DS, para as concentrações dos pigmentos clorofilas *a*, *b* e *a+b* e carotenoides totais, foram significativamente ajustadas ao modelo tridimensional parabólico, conforme apresentado na Figura 6. Os ajustes das curvas de regressão apresentaram-se significativos para os parâmetros relacionados com a CE, ao passo que os parâmetros relacionados com a DS apresentaram ajustes não significativos. A salinidade aumentou a concentração das clorofilas e carotenoides até a CE de 2,8 dS  $\text{m}^{-1}$  e foram correlacionadas com doses de Si no solo, variando entre 59 e 63 kg  $\text{ha}^{-1}$  (Figuras 6).

De acordo com relatórios anteriores (HANCI e CEBECI, 2015; HANCI et al., 2016; RADY et al., 2018), parece pouco provável que a salinidade aumente a biossíntese de clorofila em plantas de cebola. Entretanto, uma vez que nossos resultados exibiram efeito de redução significativa do CRA da cebola em função do aumento da CE, aceitamos a hipótese de efeito de concentração dos pigmentos no aparato fotossintético, até a CE de 2,8 dS  $\text{m}^{-1}$  (devido a redução do CRA), a partir da qual houve redução drástica na concentração de pigmentos da planta.



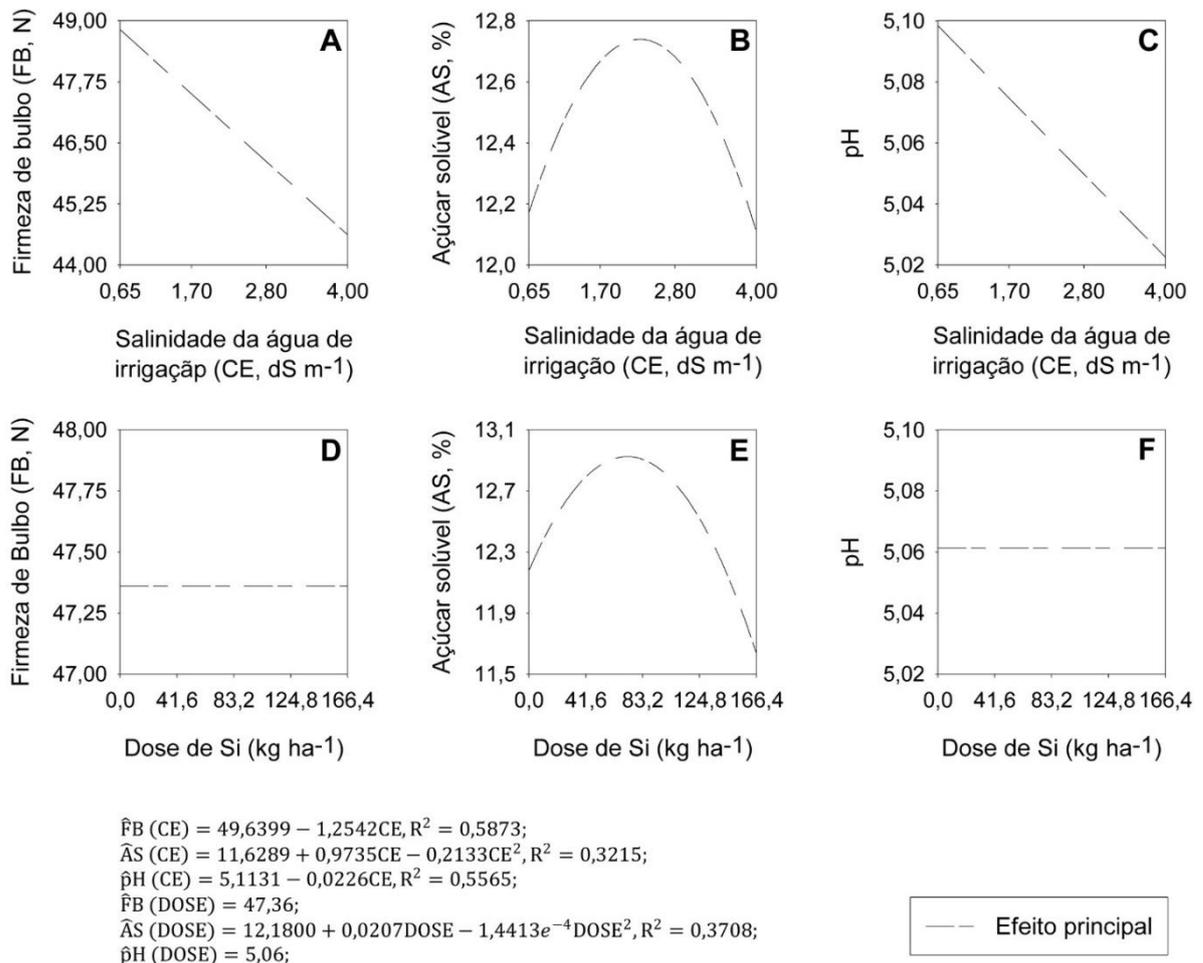
**Figura 6.** Desdobramento da interação entre os níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE) e os níveis de adubação com silício (Si), para as variáveis: Concentração de clorofila *a* (Chl *a*, mg kg<sup>-1</sup> de MF) (A); Concentração de clorofila *b* (Chl *b*, mg kg<sup>-1</sup> de MF) (B); Concentração de clorofila *a* + *b* (Chl *a* + *b*, mg kg<sup>-1</sup> de MF) (C); e Concentração de carotenóides totais (Chl *a*, mg kg<sup>-1</sup> de MF) (D), em plantas de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

As proteínas e organelas do aparato fotossintético são os programas genéticos mais afetados negativamente pela citotoxicidade iônica e hiperosmolidade induzidas pela salinidade (LÄUCHLI e GRATTAN, 2007; MUNNS e TESTER, 2008; CHAVES et al., 2009; IBRAHIM, 2016). Os efeitos podem resultar da ação direta dos íons, como a ionização causada por Na<sup>+</sup> e a consequente desidratação das membranas, organelas, bases nitrogenadas e aminoácidos; ou da ação indireta, como as reações de (per)oxidação dos lipídios com espécies reativas de oxidativo (ERO), que causam desestruturação e catálise das membranas plasmáticas e organelas do aparato fotossintético, incluindo as membranas de moléculas como as clorofilas e

carotenoides e as proteínas D1 e D2, diretamente ligadas ao fotossistema II (PSII) (CHAVES et al., 2009; POSPÍŠIL, 2016; MELO et al., 2017).

### 2.3.3 Fisiologia dos bulbos pós-colheita

A salinidade afetou a firmeza (FB, N) e o pH dos bulbos de cebola, ao passo que a salinidade e a adubação com Si influenciaram o teor de açúcar solúvel (AS, %) (Figura 7). A FB e o pH ajustaram-se aos modelos: linear decrescente e não significativo, em função dos aumentos de CE (Figura 1: A e C) e DS (Figura 1: D e F), respectivamente. Por outro lado, os AS's ajustaram-se ao modelo quadrático crescente, em função dos aumentos de CE e DS (Figura 1: B e E).



**Figura 7.** Efeitos da salinidade da água de irrigação (CE, dS m<sup>-1</sup>) e de doses de Si (Si, kg ha<sup>-1</sup>), nas variáveis: firmeza de bulbo (FB, N) (A e D); teor de açúcar solúvel (AS, %) (B e E); e pH (C e F), em bulbos de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

A FB da cebola apresentou redução de 2,53% para o incremento de cada unidade de CE na água de irrigação, partindo de 49,64 N (Figura 7A). Por outro lado, a FB não exibiu alterações significativas em resposta ao aumento de DS, sendo em média 47,36 N.

A firmeza é uma característica associada à estrutura e coesão celular e aos metabólitos que conferem textura aos tecidos vegetais, incluindo sólidos insolúveis em álcool, teores de pectina total, protopectina e pectina solúvel, teores de celulose e hemicelulose (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Em trabalhos anteriores, a redução nos níveis de firmeza foi associada ao processo de desmontagem da lamela média das paredes celulares primárias, como resultado de um conjunto de reações bioquímicas, relacionadas a atividade de diversas enzimas modificadoras da parede celular, incluindo pectinametilesterase, poligalacturonase, celulase e outras glucanoidrolases e transglusidades, que atacam os carboidratos estruturais das paredes celulares (CHITARRA e CHITARRA, 2005; WEI et al., 2010; ROSE et al., 2018). Até o momento, não sabemos como a salinidade regula a atividade e a expressão gênica de enzimas relacionadas à degradação de parede em bulbos de cebola pós-colheita. Por outro lado, muitos estudos mostraram que a salinidade aumenta significativamente o dano oxidativo na parte aérea da cebola, reduzindo significativamente o conteúdo relativo de água e o índice de estabilidade das membranas nos tecidos foliares e bulbares (EL-BAKY et al., 2003; RADY et al., 2018; SEMIDA et al., 2020). Condições como essas podem provocar o rompimento das membranas celulares, possibilitando reações oxidativas e hidrolisantes, mediante viabilização do contato entre enzimas e substratos (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Além disso, os baixos conteúdos relativos de água nos tecidos possibilitam a perda de pressão e coesão intercelular, favorecendo a descolagem da lamela média nas paredes celulares por cisalhamento (SAFAR; WYATT; MIHAI, 2017).

O Si é relatado por depositar-se no retículo endoplasmático, nas paredes celulares e nos espaços intercelulares, na forma de sílica amorfa hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Além disso, o Si forma complexos polifenólicos alternativos à lignina, conferindo resistência às paredes celulares (FLECK et al., 2015; KUMAR et al., 2017; FERRÓN-CARRILLO e URRESTARAZU, 2021). Na cebola, o incremento de Si, via fertilização do solo, não alterou significativamente a resistência dos bulbos pós-colheita à força de penetração (FB) (Figura 7D). Possivelmente, os efeitos de aumento da resistência das paredes celulares induzidos por Si não se estenderam aos bulbos de cebola devido o hábito não acumulador de Si na parte aérea, por esta espécie. Bybordi et al., (2018) verificaram que o aumento da fertilização de Si não alterou significativamente as concentrações de Si nas folhas de plantas de cebola. Em cebola, a deposição de Si foi reconhecida nas raízes (FLECK et al., 2015), mas ainda não sabemos como

o elemento está presente nas folhas ou os mecanismos à jusante ao processo de silicificação das paredes celulares. Segundo Kumar et al. (2017), os processos de silicificação das paredes celulares na parte aérea das plantas dependem da espécie e são específicos para cada tipo de celular.

A salinidade aumentou o AS da cebola ao teor máximo de 12,73%, com inflexão em CE de 2,28 dS m<sup>-1</sup>, passando a reduzir a partir deste ponto. A adubação com Si, entretanto, aumentou o AS ao teor máximo de 12,93%, com inflexão na dose de 72 kg ha<sup>-1</sup>, passando a reduzir em doses mais altas.

Os açúcares são moléculas sinalizadoras importantes nos programas genéticos vegetais relacionados ao crescimento, fotossíntese, partição de carbono, metabolismo de carboidratos e lipídios, osmoregulação, estabilização de membranas, síntese de proteínas e expressão gênica desencadeada por estresse abiótico (ROSA et al., 2009; EVELAND e JACKSON, 2012; SAMI et al., 2016; THALMANN et al., 2016; THALMANN e SANTELIA, 2017). Foi relatado que a salinidade aumenta o teor de açúcares solúveis totais em diversas espécies vegetais (GILL et al., 2003; YIN et al., 2010), sendo essa resposta relacionada com à osmoregulação e o ajuste osmótico das células durante as condições de estresse (RADY et al., 2018). GILL et al. (2003) mostraram que a síntese de açúcares ocorre nos estágios iniciais do estresse, para a manutenção do turgor e osmoregulação celular. Um elegante experimento apresentado por Yin et al. (2010) mostrou que a salinidade induz o acúmulo de açúcares em frutos tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. 'Micro-Tom'), independentemente de ABA e estresse osmótico, mostrando especificidade de resposta ao estresse salino no tomate. Até o momento, não temos conhecimento dos mecanismos envolvidos no acúmulo de açúcares nos bulbos de cebola na fase de pós-colheita. Nesse sentido, mais estudos são necessários para compreendermos os mecanismos envolvidos no processo.

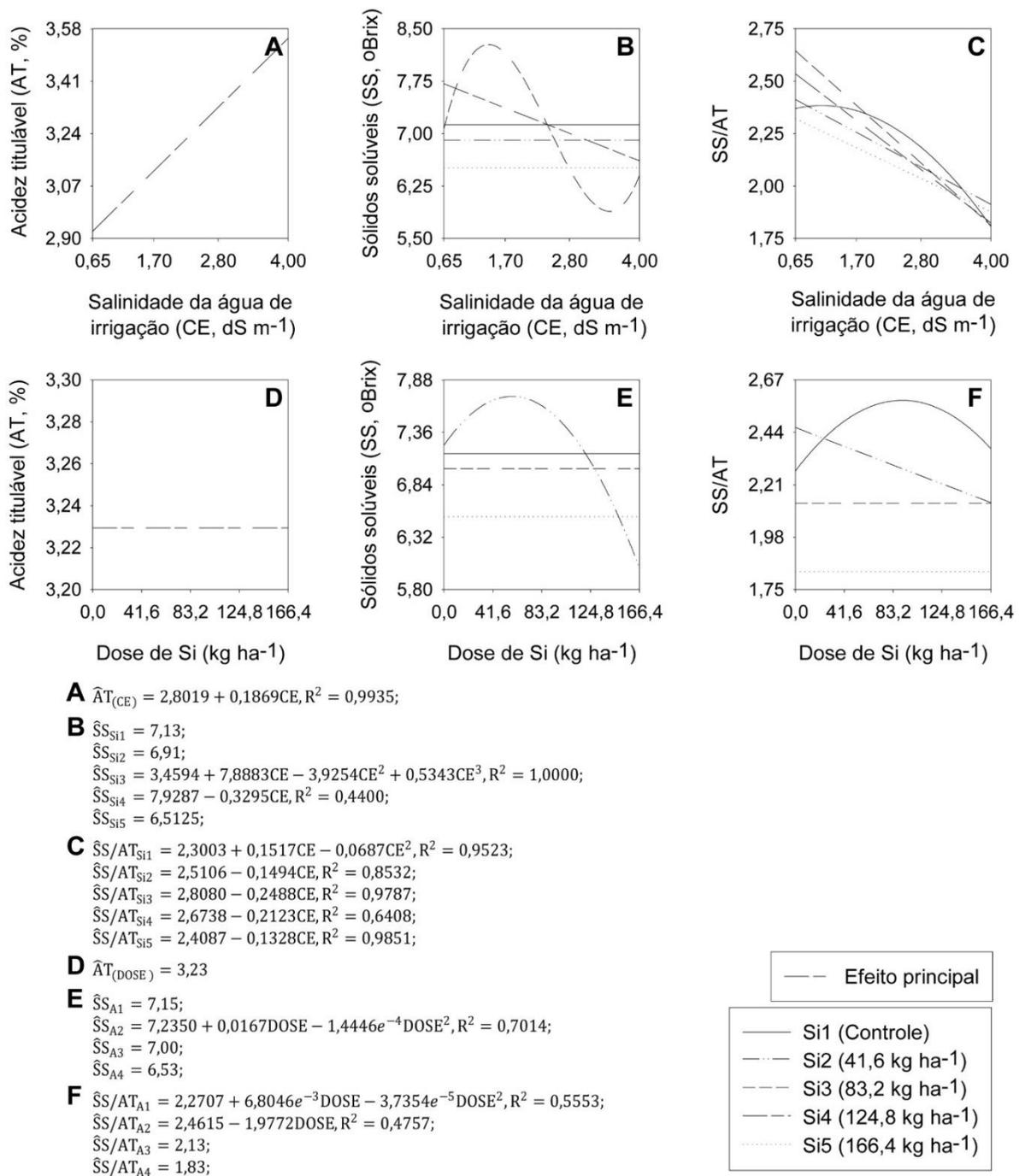
O Si foi relatado por reduzir o potencial osmótico e aumentar a pressão de turgor em plantas sob estresse salino (YIN et al., 2013). Esses efeitos foram correlacionados com aumentos nas concentrações de sacarose e frutose, bem como à redução de [Na<sup>+</sup>] na parte aérea das plantas. Pei et al. (2010) verificaram que as plantas afetadas por estresse osmótico e tratadas com Si apresentaram maior concentração de açúcares solúveis do que as plantas não tratadas, o que foi atribuído à menor taxa de catabolismo de açúcares solúveis nas plantas tratadas com Si. Entretanto, esses trabalhos foram avaliados em espécies acumuladoras de Si na parte aérea. Nos trabalhos conduzidos por Pei et al. (2010), Sonobe et al. (2010), Yin et al. (2013) e outros, como Zhu e Gong (2014), Zhu et al. (2015) e Zhu et al. (2019), é possível verificar que as respostas do metabolismo de carboidratos nas plantas, em função da nutrição de Si, variam

amplamente de acordo com a espécie, a variedade dentro da espécie e com o hábito acumulador de Si da espécie. Portanto, mais estudos são necessários para compreendermos completamente o efeito da nutrição com Si no metabolismo de carboidratos da cebola.

O pH apresentou redução de 0,44%, partindo do valor de 5,11, para cada unidade de CE aumentada na água de irrigação. Por outro lado, não foram observadas alterações significativas no pH da cebola, o qual apresentou média de 5,06 unidades, em função da fertilização do solo com o Si (Figura 7: C e F). Por convenção, discutiremos os efeitos da salinidade e do Si no pH da cebola, juntamente com seus efeitos sobre as variáveis acidez titulável (AT, %), teor de sólidos solúveis (SS, °Brix), relação SS/AT e teores dos ácidos pirúvico (ACP,  $\mu\text{M g}^{-1}$  de MF) e ascórbico (AsA, mg 100  $\text{g}^{-1}$  de MF).

A AT e o AsA foram afetadas significativamente pelo tratamento principal CE, mas apenas AsA foi afetado significativamente por DS (Figuras 8: A e D; e 9: B e C). O teor de SS, a relação SS/AT e a concentração de ACP, por outro lado, responderam significativamente à interação CE  $\times$  DS (Figuras 8: B, C, E e F e 9: A).

Acidez da cebola é atribuída aos ácidos orgânicos, predominantemente os ácidos glutâmico ( $325 \pm 133$  mg / 100 g), cítrico ( $48,5 \pm 24,1$  mg / 100 g), málico ( $43,6 \pm 10,4$  mg / 100 g) e, em menor proporção, os ácidos relacionados ao ciclo do ácido tricarbóxico (TCA), como as formas di- ou tri-aniônica do malato e do citrato (GALDÓN et al., 2008). Respectivamente, a salinidade reduziu e aumentou significativamente o pH e a AT do suco dos bulbos de cebola, pós-colheita. O aumento da concentração de sais na solução do solo, em função do aumento da salinidade da água de irrigação, afeta o balanço de nutricional da cebola, aumentando significativamente a concentração interna de cátions, principalmente  $\text{Na}^+$  (HANCI et al., 2016). Nessas condições, os ânions orgânicos são sintetizados nas folhas para tamponar o excesso de cátions absorvidos pelas raízes (VALLARINO e OSORIO, 2019) e balancear a condutividade elétrica das células. Na bulbificação, os cátions translocados por meio da seiva seriam, então, acompanhados de uma concentração equivalente de ânions, especialmente malato, explicando o aumento pós-colheita do pH nos bulbos de cebola. Em contrapartida, esse mecanismo não explica o aumento da AT, uma vez que as formas protonadas dos ácidos não seriam translocadas aos bulbos. Isso implica que o aumento da AT em resposta à salinidade pode estar afetando a síntese ou o armazenamento vacuolar dentro dos próprios bulbos. Apesar da consistência dos nossos resultados, os mecanismos de transporte vacuolar e/ou síntese de ácidos orgânicos nos bulbos de cebola ainda carecem de comprovação experimental, além da possibilidade de efeito de concentração dos ácidos orgânicos dever ser considerada, considerando redução de CRA e MFB, em função do aumento de CE na cebola.



**Figura 8.** Efeitos da salinidade da água de irrigação (CE, dS m<sup>-1</sup>) e de doses de Si (Si, kg ha<sup>-1</sup>), sobre a acidez titulável (AT, %) (A e D); e efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação [CE(água)] e aumento da fertilização do solo com Si [Ds(Si)] [[CE(água) vs Ds(Si)] sobre o teor de sólidos solúveis (SS, °Brix) (B e E) e relação SS/AT (C e F), em bulbos de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

Os teores de SS foram significativamente alterados pelo aumento de CE, dentro dos níveis Si3 (83,2 kg ha<sup>-1</sup>) e Si4 (124,8 kg ha<sup>-1</sup>), e pelo aumento da DS, dentro do nível A2 (CE

= 1,7 dS m<sup>-1</sup>) (Figura 8: B e E). Dentro do nível de fertilização Si3, a salinidade alterou os teores de SS, com pontos de máximo e mínimo. O máximo SS foi de 8,28 °Brix, respondendo à CE de 1,41 dS m<sup>-1</sup>; o mínimo, 5,89 °Brix, respondendo à CE de 3,49 dS m<sup>-1</sup>. Dentro do nível de fertilização Si4, houve redução linear de 4,16%, para cada unidade de CE aumentada na água de irrigação. Nos níveis Si1, Si2 e Si5, não houve dependência significativa de CE, sendo as médias 7,13, 6,91 e 6,51 °Brix, respectivamente.

Os SS são compostos celulares sólidos encontrados na alíquota de um suco vegetal, detectáveis por meio de difratrometria calibrada a partir de uma solução de sacarose. Embora haja correlação significativa entre os valores obtidos e a solução de sacarose, tais sólidos incluem diversos componentes orgânicos e inorgânicos, como carboidratos, ácidos orgânicos, proteínas, gorduras e minerais.

O efeito da salinidade sobre o teor de SS no suco dos bulbos de cebola dependeu da dose de Si utilizada (Figura 8B). Sob fertilização com Si, no nível Si4, a salinidade diminuiu significativamente o teor de SS. Por outro lado, no nível Si3, a CE de 1,41 dS m<sup>-1</sup> aumentou ao máximo teor de SS de 8,28 °Brix, passando a reduzir a 5,89 °Brix, quando a salinidade atingiu a CE de 3,49 dS m<sup>-1</sup>.

A resposta da cebola ao estresse salino depende do material genético e das condições de cultivo (CHANG e RANDLE, 2005; GARCÍA et al., 2015; SIVRITEPE e SIVRITEPE, 2007). Sob condições controladas, Coca et al (2012) verificaram que o aumento da salinidade da solução nutritiva não afetou significativamente o teor de SS na cebola, mas enfatizaram forte tendência de aumento. Por outro lado, Chang e Randle (2005) verificaram que o teor de SS aumentou quadraticamente no suco dos bulbos de cebola, porém, em função do tempo de duração do estresse salino. Entretanto, em ambos os experimentos anteriores, tanto os níveis de salinidade utilizados nos intervalos entre os pontos da curva de calibração quanto o período de exposição da planta ao estresse salino se diferenciaram em relação aos que foram utilizados neste presente experimento. Portanto, o efeito da salinidade sobre o teor de SS nos bulbos de cebola possivelmente está relacionado a níveis mais baixos de salinidade e/ou diferenças nos modos de cultivos e durações do estresse salino no desenvolvimento fenológico. Outros estudos usando diferentes modos de cultivo e duração do estresse em cultivares de cebola precisam ser feitos para confirmar isso.

A fertilização com Si foi eficiente para aumentar o teor de SS nos bulbos de cebola, sob a salinidade de CE = 1,7 dS m<sup>-1</sup>. A adubação aumentou o SS da cebola ao teor máximo de 7,72 °Brix, com inflexão na dose de 57,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si, a partir do qual houve redução (Figura 8E). Sob condições de solo salino e irrigação com água salina, Bybordi et al. (2018) relataram

que o aumento das doses de Si resultou em aumento significativo do teor de SS nos bulbos. Como a cebola é uma espécie conhecida por não acumular Si na parte aérea (BYBORDI et al., 2018; FLECK et al., 2015; LEWIN e REIMANN, 1969), é possível que os benefícios da regulação do fluxo apoplástico (FLECK et al., 2015; GONG et al., 2006) e a melhoria na homeostase de nutrientes, especialmente o aumento na  $[K^+]$  na parte aérea (BYBORDI et al., 2018), afetem indiretamente a parte aérea da cebola, atenuando os impactos negativos da salinidade e melhorando o teor de SS nos bulbos, até certo ponto. As melhorias no teor de SS, bem como [AsA] e níveis de pungência, já foram correlacionadas ao aumento dos teores internos de  $K^+$  na parte aérea de cebola, em trabalhos anteriores (BOLANDNAZAR et al., 2012).

A relação SS/AT reduziu significativamente com o aumento de CE. No nível de silício Si1 (controle), a SS/AT aumentou até o máximo valor de 2,28 unidades, com ponto de inflexão na CE de  $1,10 \text{ dS m}^{-1}$ . Nos níveis Si2, Si3, Si4 e Si5, houve reduções lineares de 5,95, 8,86, 7,94 e 5,51%, para cada unidade de CE aumentada na água de irrigação, respectivamente (Figura 8D).

A redução da relação SS/AT mostra que a salinidade aumentou a proporção de ácidos orgânicos, em relação aos sólidos totais presentes no suco dos bulbos de cebola. No desdobramento de DS, dentro de cada nível de CE, verificamos que o Si reduziu significativamente a relação SS/AT, sob a salinidade A2, ao passo que nos níveis A1, A3 e A4 os efeitos foram: quadrático positivo, aumentando até 2,58 unidades, com aplicação de  $91,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ; e não significativos, com médias de 2,13 e 1,83 unidades, respectivamente. Assim, os resultados mostraram que a adubação com Si atenuou o estresse de salinidade baixa, aumentando a proporção de ácidos orgânicos na composição dos sólidos totais. Os ácidos orgânicos são moléculas importantes na manutenção do equilíbrio iônico e regulação do redox celular das plantas, atuando no tamponamento do excesso de cátions absorvidos e em reações de oxiredução, para a regeneração de pares redox como NAD, NADP, glutathiona e ascorbato, além de enzimas do ciclo Halliwell-Asada (glutathiona-ascorbato, AsA-GSH) (IGAMBERDIEV e BYKOVA, 2018; VALLARINO e OSORIO, 2019). Além disso, veremos adiante que a salinidade e o Si aumentaram significativamente o pool de AsA e níveis de pungência nos bulbos, reforçando a teoria de respostas de aclimatativas das plantas de cebola ao estresse salino e doses de Si, a partir da síntese de ácidos orgânicos e compostos de enxofre precursores da pungência, para a regulação do redox celular.

A salinidade e a fertilização com Si aumentaram significativamente os teores de AsA nos bulbos de cebola pós-colheita, em 2,1 e 0,057%, para o aumento de cada unidade de CE e DS, respectivamente (Figura 9: B e C).

O AsA é conhecido como antioxidante e tampão redox de muitos processos biológicos, incluindo: fotossíntese, desintoxicação de ERO e eliminação de moléculas radicais (FOYER e NOCTOR, 2005; DO et al., 2016; SHARMA et al., 2016; AKRAM et al., 2017; CAO et al., 2017; SHARMA et al., 2017; YOSHIMURA e ISHIKAWA, 2017; ISHIKAWA et al., 2018). Existem fortes evidências de que a biossíntese de AsA é regulada por condições ambientais adversas, incluindo estresse de salinidade (AKRAM et al., 2017; CAO et al., 2017; WANG et al., 2018). O AsA pode eliminar diretamente as moléculas de  $O_2^{\cdot-}$ ,  $\cdot OH$  e  $^1O_2$  ou reagir com radicais gerados biologicamente, como o tocoferoxil (isto é, regeneração de tocoferóis) e o alcoxil/peroxil. Além disso, o AsA pode reduzir as moléculas de  $H_2O_2$  a  $H_2O$ , atuando como cofator nas reações peroxidativas de Mehler, catalisadas pela ascorbato peroxidase (APX). Adicionalmente, foi relatado que o AsA atua na extinção do excesso de energia das moléculas de  $^3Chl$  e  $^1O_2$ , como um cofator na reação catalítica da violaxantina de-epoxidase (VDE), que faz a conversão da violaxantina em zeaxantina (ESKLING et al., 1997; GIORGIA et al., 2010; CHANG et al., 2017; SMIRNOFF, 2018; GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2019).

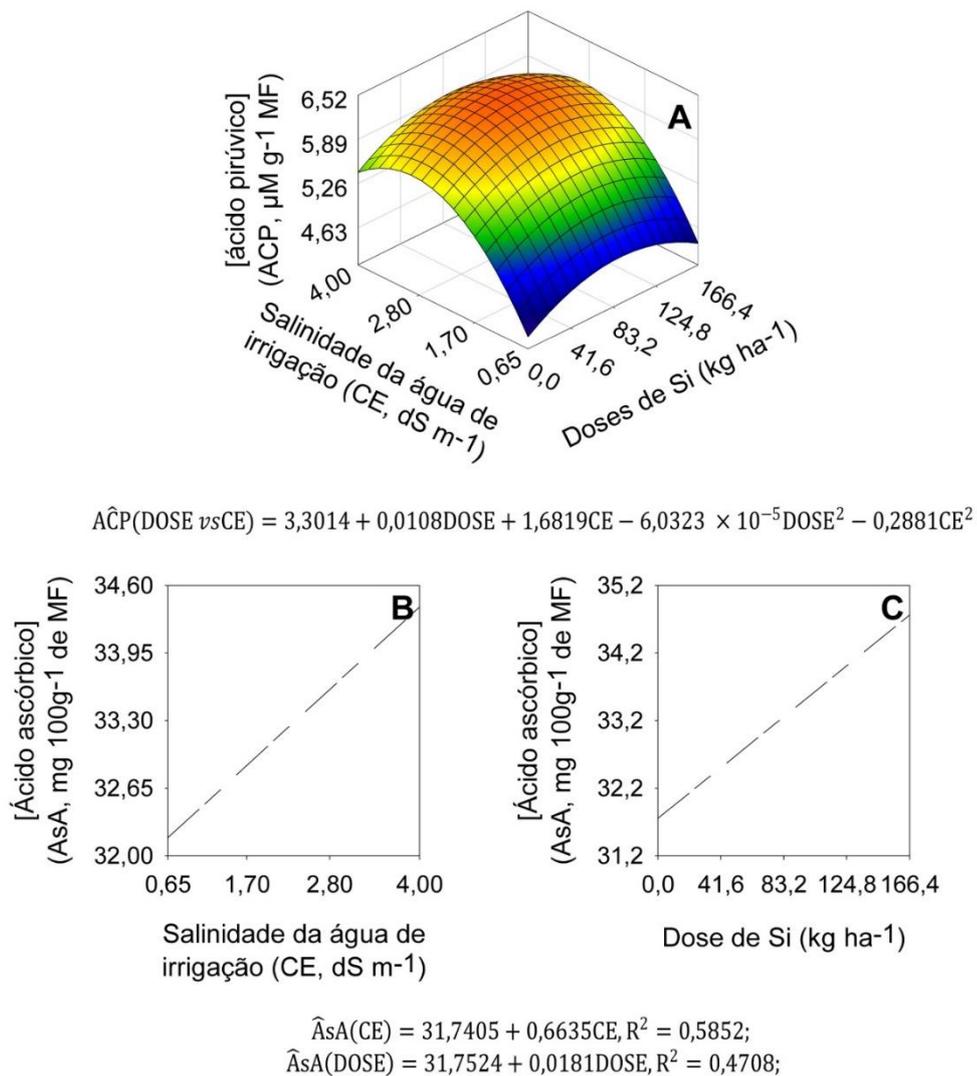
Estudos conduzidos em *Acácia gerrardii* Benth e *Triticum aestivum*, sob estresse salinidade e suprimento de Si, mostraram melhoria significativa nos teores de AsA devido ao suprimento de Si (SAQIB et al., 2008; AL-HUQAIL et al., 2017). Em nosso estudo, a salinidade e o Si aumentaram significativamente a concentração de AsA nos bulbos de cebola pós-colheita, corroborando com os estudos anteriores. Por outro lado, os mecanismos à montante desse processo ainda estão longe de serem plenamente compreendidos, uma vez que os mecanismos e respostas das plantas à salinidade e Si variam com as diferentes espécies, os genótipos dentro da espécie, a duração do estresse, o estágio fenológico e a parte da planta avaliada (PEI et al., 2010; CAO et al., 2017; WANG et al., 2018). Assim, outros estudos mais detalhados e específicos, como a descrição de perfis proteômicos e metabolômicos, são necessários para compreendermos melhor os mecanismos subjacentes ao processo de síntese de AsA nas plantas de cebola sob condição de estresse salino e suprimento de Si.

A salinidade e o Si aumentaram significativamente a [ACP] nos bulbos de cebola, ajustando-se ao modelo de interação parabólico, com parâmetros significativos tanto para CE como para DS. O ponto de máxima ACP foi atingido com a CE e DS de 2,91 dS m<sup>-1</sup> e 89,5 kg ha<sup>-1</sup> de Si, respectivamente, produzindo 6,24 µM g<sup>-1</sup> de MF (Figura 9A).

O ACP é um derivado de sulfóxidos de *S*-alq(en)il-L-cisteína, gerado a partir de catalise por aliinase, juntamente com ácido sulfênico e amônia (YOSHIMOTO e SAITO, 2019). Os Sulfóxidos de *S*-alq(en)il-L-cisteína são localizados no citosol das células mesofílicas dos tecidos de armazenamento, ao passo que a aliinase é sequestrada no vacúolo das células da bainha vascular. Portanto, a formação de ACP ocorre por ocasião do rompimento das células por corte ou esmagamento, quando o contato enzima-substrato é viabilizado (SHIMON et al., 2007).

O aumento de ACP nos bulbos de cebola pós-colheita é uma forte evidência de alteração significativa no metabolismo do enxofre (S) nas plantas de cebola, por ocasião de estresse de salinidade e suprimento de Si. Foi relatado que muitas enzimas controladoras taxa no metabolismo e assimilação de S nas plantas exibem atividades e expressões gênicas moduladas pelo estresse de salinidade (KHAN et al., 2014). Além disso, o suprimento de Si às plantas também alterou o metabolismo do S, aumentando a absorção do nutriente e regulando a síntese de aminoácidos e poliaminas envolvidos na resposta e tolerância ao estresse (ALI et al., 2018; MAILLARD et al., 2018).

A defesa antioxidante enzimática relacionada ao ciclo AsA-GSH depende das vias metabólicas do S (RÉTHORÉ et al., 2020). Adicionalmente, os domínios moleculares contendo tiol são, direta ou indiretamente, para oxidar ERO e gerar produtos de oxidação com conformações físicas ou atividades bioquímicas modificadas e relativamente mais estáveis. Além disso, outras espécies de *S*-cisteína (*S*-Cys) oxidadas, incluindo ácido sulfênico, Cys glutationilada, grupos sulfenilamida e ligações sulfúrico metálicas, são particularmente importantes na sinalização redox e na regulação do metabolismo de ERO em proteínas, fatores de transcrição e níveis de expressão gênica (FOYER; NOCTOR, 2005). Curiosamente, nossos resultados mostraram que a salinidade e o suprimento de Si aumentaram significativamente a concentração de compostos sulfurosos nos bulbos de cebola pós-colheita, como evidenciado pelo aumento na concentração de ACP.



**Figura 9.** Efeito da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação e aumento da fertilização do solo com Si (CE vs DS), sobre a concentração de ácido pirúvico (ACP,  $\mu\text{M g}^{-1}$  de MF) (A); e efeito principal da salinidade da água de irrigação (CE,  $\text{dS m}^{-1}$ ) (B) e doses de Si (Si,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) (C) na concentração de ácido ascórbico (AsA,  $\text{mg } 100 \text{g}^{-1}$  de MF), em bulbos de cebola ‘Rio das Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

## 2.4 CONCLUSÕES

Nossos resultados mostram que o aumento da salinidade da água de irrigação afeta negativamente a fisiologia das plantas de cebola ‘Rio das Antas’, provocando reduções de massa de matéria fresca dos bulbos, produção de bulbos grandes, produtividade de bulbos e de eficiência de uso da água. Além disso, a salinidade também afeta negativamente a qualidade dos bulbos de cebola, reduzindo a firmeza da túnica e o pH dos bulbos.

A adubação do solo com Si melhora a qualidade dos bulbos de cebola, bem como a tolerância das plantas à salinidade, por meio de melhorias nas produções de osmólitos, ácidos orgânicos, antioxidantes não enzimáticos, pigmentos do sistema de fotossíntese e compostos de S precursores da pungência (detectáveis por meio da análise de ACP), sob estresse de salinidade de irrigação com condutividade elétrica variando entre 1,70 e 2,8 dS m<sup>-1</sup>.

De acordo com nossos resultados, recomendamos a adubação com Si com a dose de 27,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si, para o cultivo irrigado da cebola, na ausência de restrição de uso da água devido à salinidade, nas condições do semiárido do Nordeste brasileiro, ao passo que as doses 166,4 e 78,5 kg ha<sup>-1</sup> de Si são recomendadas para água de irrigação salina com condutividade elétrica de 1,70 e 2,8 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente. Não obstante, para otimizar a eficácia do cultivo de cebola sob condições de salinidade, recomenda-se a utilização integrada de um conjunto de práticas preconizadas de convivência com o problema da salinidade e a não tomada de decisão baseada em uma única medida de atenuação do problema. Portanto, nossos estudos podem contribuir para definição de diretrizes procedimentais para a convivência com as condições semiáridas e de salinidade no cultivo da cebola nas condições do Nordeste brasileiro, por meio da fertilização com Si.

## 2.5 AGRADECIMENTOS

O autor agradece à CAPES (Processo 8888.182041/2018-01); à Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) e ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia (PGFITO), pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa e pelas bolsas de estudo.

## REFERÊNCIAS

ABDOU, R.; BAKASSO, Y.; ADAM, T.; SAADOU, M. *et al.* Biology, diversity and tools for diversity analysis of the onion (*Allium cepa* L.). A review. **Biotechnologie Agronomie Societe Et Environnement**, 19, n. 2, p. 184-196, 2015. Article.

AGUIAR NETO, P.; GRANGEIRO, L. C.; MENDES, A. M. S.; COSTA, N. D. *et al.* Crescimento e acúmulo de macronutrientes na cultura da cebola em Baraúna (RN) e Petrolina (PE). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18, n. 4, p. 370-380, 2014.

AHMAD, P.; AHANGER, M. A.; ALYEMENI, M. N.; WIJAYA, L. *et al.* Mitigation of sodium chloride toxicity in *Solanum lycopersicum* L. by supplementation of jasmonic acid and nitric oxide. **Journal of Plant Interactions**, 13, n. 1, p. 64-72, 2018.

AKRAM, N. A.; SHAFIQ, F.; ASHRAF, M. Ascorbic acid - A potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. **Frontiers in plant science**, 8, n. 613, 2017. Review.

AL-HUQAIL, A. A.; ALQARAWI, A. A.; HASHEM, A.; AHMAD MALIK, J. *et al.* Silicon supplementation modulates antioxidant system and osmolyte accumulation to balance salt stress in *Acacia gerrardii* Benth. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 2017/11/24/ 2017.

ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. Regulatory Role of Silicon in Mediating Differential Stress Tolerance Responses in Two Contrasting Tomato Genotypes Under Osmotic Stress. **Frontiers in plant science**, 9, n. 1475, 2018-October-08 2018. Original Research.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome, p. D05109, 1998. ISSN 92-5-104219-5. Disponível em: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm>. Acesso em: 9.

AMAL, A.; ALY, A. Alteration of some secondary metabolites and enzymes activity by using exogenous antioxidant compound in onion plants growth under seawater salt stress. **American Eurasian Journal of Science Research**, 3, p. 139-146, 2008.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Caderno de recursos hídricos: panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Brasília: ANA, MMA: 74 p. 2005.

ANJUM, A.; BARMON, B. K. Profitability and Comparative Advantage of Onion (*Allium cepa*) Production in Bangladesh: An Economic Study in Some Selected Areas. **The Agriculturists**, 15, n. 2, p. 66-78, 2017.

BACKES, C.; VILLAS BÔAS, R. L.; GODOY, L. J. G.; VARGAS, P. F. *et al.* Determination of growth and nutrient accumulation in Bella Vista onion. **Revista Caatinga**, 31, n. 1, p. 246-254, 2018.

BARROSO, A. A. F.; GOMES, G. E.; LIMA, A. E. O.; PALÁCIO, H. A. Q. *et al.* Avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15, n. 6, p. 588-593, 2011-06 2011.

BENITO, B.; HARO, R.; AMTMANN, A.; CUIN, T. A. *et al.* The twins K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> in plants. **Journal of Plant Physiology**, 171, n. 9, p. 723-731, 2014.

BOLANDNAZAR, S.; MOLLAVALI, M.; TABATABAEI, S. J. Influence of NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> and K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on qualitative characteristics of onion. **Scientia horticultrae**, 136, p. 24-28, 2012/03/01/ 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Portaria n. 529 de 18 agosto de 1995. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil: 13513 p. 1995.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; MA, J. F. *et al.* Chapter 8 - Beneficial Elements. *In: MARSCHNER, P. (Ed.). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)*. San Diego: Academic Press, 2012. p. 249-269.

BYBORDI, A.; SAADAT, S.; ZARGARIPOUR, P. The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 64, n. 4, p. 520-530, 2018.

CAO, S.; DU, X. H.; LI, L. H.; LIU, Y. D. *et al.* Overexpression of *Populus tomentosa* cytosolic ascorbate peroxidase enhances abiotic stress tolerance in tobacco plants. **Russian Journal of Plant Physiology**, 64, n. 2, p. 224-234, 2017.

CARMO FILHO, F.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. **Dados climatológicos de Mossoró: um município semi-árido nordestino**. Mossoró: ESAM, 1991. 121p p.

CATSKI, J. Water saturation déficit: relative water content. *In*: SLAVIK, K. (Ed.). **Methods of studying plant water relations**. Berlin: Springer-Verlag, 1974. p. 136-154.

CEAGESPE - COMPANHIA DE ENTREPOSTOS E ARMAZÉNS GERAIS DE SÃO PAULO. **Classificação comercial**. Hortaliças, 2001. Disponível em: <http://www.ceagesp.gov.br/entrepostos/servicos-entrepotagem/produtos/classificacao/>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CHANG, H.-Y.; LIN, S.-T.; KO, T.-P.; WU, S.-M. *et al.* Enzymatic characterization and crystal structure analysis of *Chlamydomonas reinhardtii* dehydroascorbate reductase and their implications for oxidative stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, 120, p. 144-155, 2017.

CHANG, P.-T.; RANDLE, W. M. Sodium Chloride Timing and Length of Exposure Affect Onion Growth and Flavor. **Journal of Plant Nutrition**, 28, n. 10, p. 1755-1766, 2005/10/01 2005.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, 103, n. 4, p. 551-560, 2009.

CHEN, S.; WU, F.; LI, Y.; QIAN, Y. *et al.* NtMYB4 and NtCHS1 are critical factors in the regulation of flavonoid biosynthesis and are involved in salinity responsiveness. **Frontiers in plant science**, 10, n. 178, 2019. Original Research.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2.ed revisada e ampliada ed. Lavras: UFLA, 2005. 785 p. 85-87692-27-5.

COCA, C. A.; CARRANZA, C. E.; MIRANDA, D.; RODRÍGUEZ, M. H. Efecto del NaCl sobre los parámetros de crecimiento, rendimiento y calidad de la cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) bajo condiciones controladas. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, 6, n. 2, p. 196-212, 2012.

DKHIL, B. B.; DENDEN, M. Effect of salt stress on growth, anthocyanins, membrane permeability and chlorophyll fluorescence of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) seedlings. **American Journal of Plant Physiology**, 7, n. 4, p. 174-183, 2012.

DO, H.; KIM, I.-S.; JEON, B. W.; LEE, C. W. *et al.* Structural understanding of the recycling of oxidized ascorbate by dehydroascorbate reductase (OsDHAR) from *Oryza sativa* L. *japonica*. **Scientific Reports**, 6, n. 1, p. 19498, 2016.

EL-BAKY, A.; HANAA, H.; AMAL, A.; HUSSEIN, M. Influence of salinity on lipid peroxidation, antioxidant enzymes and electrophoretic patterns of protein and isoenzymes in leaves of some onion cultivars. **Asian J. Plant Sci**, 2, n. 17-24, p. 1220-1227, 2003.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual review of plant biology**, 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

ESKLING, M.; ARVIDSSON, P.-O.; ÅKERLUND, H.-E. The xanthophyll cycle, its regulation and components. **Physiologia Plantarum**, 100, n. 4, p. 806-816, 1997.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, 147, p. 881-896, 2018.

EVELAND, A. L.; JACKSON, D. P. Sugars, signalling, and plant development. **Journal of Experimental Botany**, 63, n. 9, p. 3367-3377, 2012.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Status of the World's Soil Resources. Roma: FAO: 608 p. 2015.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Value of Agricultural Production**. FAOSTAT, 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

FERRÓN-CARRILLO, F.; URRESTARAZU, M. Effects of Si in nutrient solution on leaf cuticles. **Scientia horticultrae**, 278, p. 109863, 2021/02/27/ 2021.

FLECK, A. T.; SCHULZE, S.; HINRICHS, M.; SPECHT, A. *et al.* Silicon Promotes Exodermal Casparian Band Formation in Si-Accumulating and Si-Excluding Species by Forming Phenol Complexes. **PLOS ONE**, 10, n. 9, p. e0138555, 2015.

FLEXAS, J.; DÍAZ-ESPEJO, A.; CONESA, M. A.; COOPMAN, R. E. *et al.* Mesophyll conductance to CO<sub>2</sub> and Rubisco as targets for improving intrinsic water use efficiency in C<sub>3</sub> plants. **Plant, Cell & Environment**, 39, n. 5, p. 965-982, 2016/05/01 2016. <https://doi.org/10.1111/pce.12622>.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005.

GALDÓN, B. R.; RODRÍGUEZ, C. T.; RODRÍGUEZ, E. R.; ROMERO, C. D. Organic Acid Contents in Onion Cultivars (*Allium cepa* L.). **Journal of agricultural and food chemistry**, 56, n. 15, p. 6512-6519, 2008/08/01 2008.

GARCÍA-CAPARRÓS, P.; HASANUZZAMAN, M.; LAO, M. T. Oxidative Stress and Antioxidant Defense in Plants Under Salinity. *In*: HASANUZZAMAN, M.; FOTOPoulos, V., *et al.* (Ed.). **Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2019. cap. 12, p. 291-309.

GARCÍA, G.; GARCÍA, M.; RAMÍREZ, H. Comportamiento de siete cultivares de *Allium cepa* L. ante diferentes niveles de estrés salino. **Bioagro**, 27, n. 2, p. 93-102, 2015.

GILL, P. K.; SHARMA, A. D.; SINGH, P.; BHULLAR, S. S. Changes in germination, growth and soluble sugar contents of *Sorghum bicolor* (L.) Moench seeds under various abiotic stresses. **Plant Growth Regulation**, 40, n. 2, p. 157-162, 2003/06/01 2003.

GIORGIA, S.; GIORGETTI, A.; FUFUZAN, C.; GIACOMETTI, G. M. *et al.* Mutation analysis of violaxanthin de-epoxidase identifies substrate-binding sites and residues involved in catalysis. **Journal of Biological Chemistry**, 285, n. 31, p. 23763-23770, 2010.

GONG, H. J.; RANDALL, D. P.; FLOWERS, T. J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. **Plant, Cell & Environment**, 29, n. 10, p. 1970-1979, 2006/10/01 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>.

GUPTA, N. K.; MEENA, S. K.; GUPTA, S.; KHANDELWAL, S. K. Gas Exchange, Membrane Permeability, and Ion Uptake in Two Species of Indian Jujube Differing in Salt Tolerance. **Photosynthetica**, 40, n. 4, p. 535-539, 2002// 2002.

HANCI, F.; CEBECI, E. Comparison of salinity and drought stress effects on some morphological and physiological parameters in onion (*Allium Cepa* L.) during early growth phase. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, 21, n. 6, p. 1204-1210, 2015.

HANCI, F.; CEBECI, E.; UYSAL, E.; DASGAN, H. Effects of salt stress on some physiological parameters and mineral element contents of onion (*Allium cepa* L.) plants. **Acta horticulturae**, n. 1143, p. 179-186, 2016.

HASEGAWA, P. M. Sodium (Na<sup>+</sup>) homeostasis and salt tolerance of plants. **Environmental and Experimental Botany**, 92, p. 19-31, 2013.

HATFIELD, J. L.; DOLD, C. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. **Frontiers in plant science**, 10, n. 103, 2019-February-19 2019. Review.

HAYNES, R. J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 177, n. 6, p. 831-844, 2014.

HAYNES, R. J. Chapter Three - Significance and Role of Si in Crop Production. *In*: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in Agronomy**: Academic Press, 2017. v. 146, p. 83-166.

HU, J.; LI, Y.; JEONG, B. R. Silicon Alleviates Temperature Stresses in Poinsettia by Regulating Stomata, Photosynthesis, and Oxidative Damages. **Agronomy**, 10, n. 9, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal - PAM**. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

IBRAHIM, E. A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. **Journal of Plant Physiology**, 192, p. 38-46, 2016.

IGAMBERDIEV, A. U.; BYKOVA, N. V. Role of organic acids in the integration of cellular redox metabolism and mediation of redox signalling in photosynthetic tissues of higher plants. **Free Radical Biology and Medicine**, 122, p. 74-85, 2018/07/01/ 2018.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p. Disponível em: <http://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodos-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos>. Acesso em: 16/10/2020.

ISHIKAWA, T.; MARUTA, T.; YOSHIMURA, K.; SMIRNOFF, N. Biosynthesis and regulation of ascorbic acid in plants. *In*: GUPTA, D. K.; PALMA, J. M., *et al* (Ed.). **Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 163-179.

KEISHAM, M.; MUKHERJEE, S.; BHATLA, S. C. Mechanisms of Sodium Transport in Plants-Progresses and Challenges. **International Journal of Molecular Sciences**, 19, n. 3, p. 647, 2018.

KHAN, N. A.; KHAN, M. I. R.; ASGHER, M.; FATMA, M. *et al*. Salinity tolerance in plants: revisiting the role of sulfur metabolites. **J Plant Biochem Physiol**, 2, n. 120, p. 2-8, 2014.

KOSTOPOULOU, Z.; THERIOS, I. Growth and inorganic composition of 'Nova' mandarin plants grafted on two commercial rootstocks in response to salinity and silicon. **Acta physiologiae plantarum**, 36, n. 6, p. 1363-1372, 2014.

KUMAR, S.; SOUKUP, M.; ELBAUM, R. Silicification in grasses: variation between different cell types. **Frontiers in plant science**, 8, n. 438, 2017. Mini Review.

KUREPIN, L. V.; IVANOV, A. G.; ZAMAN, M.; PHARIS, R. P. *et al*. Interaction of glycine betaine and plant hormones: protection of the photosynthetic apparatus during abiotic stress. *In*: HOU, H. J. M.; NAJAFPOUR, M. M., *et al* (Ed.). **Photosynthesis: structures, mechanisms, and applications**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 185-202.

LÄUCHLI, A.; GRATTAN, S. R. Plant Growth And Development Under Salinity Stress. *In*: JENKS, M. A.; HASEGAWA, P. M., *et al* (Ed.). **Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. p. 1-32.

LEE, S.; SOHN, E.; HAMAYUN, M.; YOON, J. *et al*. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. **Agroforestry systems**, 80, n. 3, p. 333-340, 2010.

LEWIN, J.; REIMANN, B. E. F. Silicon and Plant Growth. **Annual Review of Plant Physiology**, 20, n. 1, p. 289-304, 1969/06/01 1969.

LI, H.; ZHU, Y.; HU, Y.; HAN, W. *et al*. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. **Acta physiologiae plantarum**, 37, n. 4, p. 71, 2015.

LIANG, Y.; ZHANG, W.; CHEN, Q.; DING, R. Effects of silicon on H<sup>+</sup>-ATPase and H<sup>+</sup>-PPase activity, fatty acid composition and fluidity of tonoplast vesicles from roots of salt-

stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environmental and Experimental Botany**, 53, n. 1, p. 29-37, 2005.

LICHTENTHALER, H. K. [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *In: Methods in Enzymology*: Academic Press, 1987. v. 148, p. 350-382.

LOVEYS, B. R.; DRY, P. R.; STOLL, M.; MC CARTHY, M. G., 2000, **Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops**. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. 187-197. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.19>.

MAILLARD, A.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F. *et al.* Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, 155, p. 394-410, 2018/11/01/ 2018.

MANTOVANI, C.; PIVETTA, K. F. L.; DE MELLO PRADO, R.; DE SOUZA, J. P. *et al.* Silicon toxicity induced by different concentrations and sources added to in vitro culture of epiphytic orchids. **Scientia horticultrae**, 265, p. 109272, 2020/04/30/ 2020.

MANTOVANI, C.; PRADO, R. D. M.; PIVETTA, K. F. L. Silicon foliar application on nutrition and growth of *Phalaenopsis* and *Dendrobium* orchids. **Scientia horticultrae**, 241, p. 83-92, 2018/11/18/ 2018.

MARQUELLI, W.; COSTA, E.; SILVA, H. **Irrigação da cultura da cebola**. 1ª ed. ed. Brasília: Embrapa Hortaliças - Circular Técnica 37, 2005. 17 p. 1415-3033.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. San Diego: Academic Press, 2012. 672 p. 978-0-12-384905-2.

MARTINS, B. N. M.; BOLFORINI, A. C. B.; NASSER, M. D.; VILLAS BOAS, R. L. Estudos da marcha de absorção de nutrientes para recomendação de adubação no cultivo da cebola **Revista Mirante**, 10, n. 2, p. 92-107, 2017.

MELO, H. F. D.; SOUZA, E. R. D.; DUARTE, H. H. F.; CUNHA, J. C. *et al.* Gas exchange and photosynthetic pigments in bell pepper irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21, n. 1, p. 38-43, 2017.

MEYER, A. J.; HELL, R. Glutathione homeostasis and redox-regulation by sulfhydryl groups. **Photosynthesis Research**, 86, n. 3, p. 435-457, 2005.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of Salinity Tolerance. **Annual review of plant biology**, 59, n. 1, p. 651-681, 2008.

NASCIMENTO, C. W. A.; NUNES, G. H. D. S.; PRESTON, H. A. F.; SILVA, F. B. V. *et al.* Influence of Silicon Fertilization on Nutrient Accumulation, Yield and Fruit Quality of Melon Grown in Northeastern Brazil. **Silicon**, 12, n. 4, p. 937-943, 2020.

OLIVEIRA, W. J. D.; SOUZA, E. R. D.; ALMEIDA, B. G. D.; SILVA, Ê. F. D. F. E. *et al.* Soil water energetic status and cowpea beans irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 20, n. 8, p. 685-691, 2016.

PASSIOURA, J. B. Plant–Water Relations. *In: eLS*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. Disponível em: <http://www.els.net>.

PATHAK, C. S. Hybrid Seed Production in Onion. **Journal of New Seeds**, 1, n. 3-4, p. 89-108, 2000/04/30 2000.

PEI, Z. F.; MING, D. F.; LIU, D.; WAN, G. L. *et al.* Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, 29, n. 1, p. 106-115, 2010/03/01 2010.

PESSARAKLI, M.; SZABOLCS, I. Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. *In: PESSARAKLI, M. (Ed.)*. **Handbook of plant and crop stress**. 3 ed. London: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2011. cap. 1, p. 3-21.

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J.; MENEZES, D. Crescimento de cebola irrigada com águas salinas em solos do semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 7, n. 3, p. 527-534, 2012.

POSPÍŠIL, P. Production of Reactive Oxygen Species by Photosystem II as a Response to Light and Temperature Stress. **Frontiers in plant science**, 7, n. 1950, 2016. Review.

QIN, L.; KANG, W.-H.; QI, Y.-L.; ZHANG, Z.-W. *et al.* The influence of silicon application on growth and photosynthesis response of salt stressed grapevines (*Vitis vinifera* L.). **Acta physiologiae plantarum**, 38, n. 3, p. 68, 2016.

RADY, M. M. Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. **Scientia horticulturae**, 129, n. 2, p. 232-237, 2011/06/10/ 2011.

RADY, M. M.; TAHA, R. S.; SEMIDA, W. M.; ALHARBY, H. F. Modulation of salt stress effects on *Vicia faba* L. plants grown on a reclaimed-saline soil by salicylic acid application. **Romanian Agricultural Research**, 34, p. 175-185, 2017.

RADY, M. O. A.; SEMIDA, W. M.; ABD EL-MAGEED, T. A.; HEMIDA, K. A. *et al.* Up-regulation of antioxidative defense systems by glycine betaine foliar application in onion plants confer tolerance to salinity stress. **Scientia horticulturae**, 240, p. 614-622, 2018/10/20/ 2018.

RÊGO, L. G. D. S.; MARTINS, C. M.; SILVA, E. F. D.; SILVA, J. J. A. D. A. *et al.* Pedogenesis and soil classification of an experimental farm in Mossoró, state of Rio Grande do Norte, Brazil. **Revista Caatinga**, 29, n. 4, p. 1036-1042, 2016-12 2016.

RÉTHORÉ, E.; ALI, N.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. Silicon Regulates Source to Sink Metabolic Homeostasis and Promotes Growth of Rice Plants under Sulfur Deficiency. **International Journal of Molecular Sciences**, 21, n. 10, 2020.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação ed. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359 p.

RICCIARDI, L.; MAZZEO, R.; MARCOTRIGIANO, A. R.; RAINALDI, G. *et al.* Assessment of Genetic Diversity of the “Acquaviva Red Onion” (*Allium cepa* L.) Apulian Landrace. **Plants**, 9, n. 2, 2020.

RIZWAN, M.; ALI, S.; IBRAHIM, M.; FARID, M. *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 22, n. 20, p. 15416-15431, 2015.

ROSA, M.; PRADO, C.; PODAZZA, G.; INTERDONATO, R. *et al.* Soluble sugars. **Plant Signaling & Behavior**, 4, n. 5, p. 388-393, 2009.

ROSE, J. K. C.; CATALÁ, C.; GONZALEZ-CARRANZA, Z. H.; ROBERTS, J. A. Cell Wall Disassembly. *In: Annual Plant Reviews online: The Plant Cell Wall*: Wiley Online, 2018. v. 8, p. 264-324. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119312994.apr0075>.

RUIZ-SOLA, M. Á.; ARBONA, V.; GÓMEZ-CADENAS, A.; RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, M. *et al.* A root specific Induction of carotenoid biosynthesis contributes to ABA production upon salt stress in Arabidopsis. **PLOS ONE**, 9, n. 3, p. e90765, 2014.

SAFAR, A.; WYATT, H. L.; MIHAI, L. A. Debonding of cellular structures under shear deformation. *In: 25th Conference of the UK Association for Computational Mechanics, 2017, University of Birmingham, Birmingham, UK. 11-13 April 2017*. Disponível em: <http://orca.cf.ac.uk/98636/>. Acesso em: 21/01/2021.

SAMI, F.; YUSUF, M.; FAIZAN, M.; FARAZ, A. *et al.* Role of sugars under abiotic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, 109, p. 54-61, 2016.

SANTIAGO, M. M. F.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J. Mecanismos de salinização em águas do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí. **Águas Subterrâneas**, 2000.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T. D.; ARRUDA, J. A. D.; LOPES, A. R. D. S. *et al.* Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função da variabilidade de suas características químicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13, p. 849-854, 2009-12 2009.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 Ed. Revisada e ampliada ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

SAQIB, M.; ZÖRB, C.; SCHUBERT, S. Silicon-mediated improvement in the salt resistance of wheat (*Triticum aestivum*) results from increased sodium exclusion and resistance to oxidative stress. **Functional Plant Biology**, 35, n. 7, p. 633-639, 2008.

SCHWIMMER, S.; WESTON, W. J. Onion Flavor and Odor, Enzymatic Development of Pyruvic Acid in Onion as a Measure of Pungency. **Journal of agricultural and food chemistry**, 9, n. 4, p. 301-304, 1961/07/01 1961.

SEMIDA, W. M.; ABDELKHALIK, A.; RADY, M. O. A.; MAREY, R. A. *et al.* Exogenously applied proline enhances growth and productivity of drought stressed onion by improving photosynthetic efficiency, water use efficiency and up-regulating osmoprotectants. **Scientia horticulturae**, 272, p. 109580, 2020/10/15/ 2020.

SERRANO, R.; RODRIGUEZ-NAVARRO, A. Ion homeostasis during salt stress in plants. **Current Opinion in Cell Biology**, 13, n. 4, p. 399-404, 2001.

SHANAHAN, J. F.; EDWARDS, I. B.; QUICK, J. S.; FENWICK, J. R. Membrane Thermostability and Heat Tolerance of Spring Wheat. **Crop Science**, 30, n. 2, p. 247-251, 1990.

SHANNON, M. C.; GRIEVE, C. M. Tolerance of vegetable crops to salinity. **Scientia horticulturae**, 78, n. 1, p. 5-38, 1998.

SHARMA, S.; KIRAN, U.; SOPORY, S. K. Developing stress-tolerant plants by manipulating components involved in oxidative stress. *In*: ABDIN, M. Z.; KIRAN, U., *et al.* (Ed.). **Plant Biotechnology: Principles and Applications**. Singapore: Springer Singapore, 2017. p. 233-248.

SHARMA, S.; SEHRAWAT, A.; DESWAL, R. Asada-Halliwell pathway maintains redox status in *Dioscorea alata* tuber which helps in germination. **Plant Science**, 250, p. 20-29, 2016.

SHIMON, L. J. W.; RABINKOV, A.; SHIN, I.; MIRON, T. *et al.* Two Structures of Alliinase from *Allium sativum* L.: Apo Form and Ternary Complex with Aminoacrylate Reaction Intermediate Covalently Bound to the PLP Cofactor. **Journal of Molecular Biology**, 366, n. 2, p. 611-625, 2007/02/16/ 2007.

SIENKIEWICZ-CHOLEWA, U.; SUMISŁAWSKA, J.; SACAŁA, E.; DZIĄGWA-BECKER, M. *et al.* Influence of silicon on spring wheat seedlings under salt stress. **Acta physiologiae plantarum**, 40, n. 3, p. 54, 2018.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Revisada e ampliada ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2009. 627 p. 978-85-7383-430-7.

SINGH, M.; KUMAR, J.; SINGH, S.; SINGH, V. P. *et al.* Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 14, n. 3, p. 407-426, 2015. journal article.

SIVRITEPE, H. O.; SIVRITEPE, N., 2007, **NaCl priming affects salt tolerance of onion (*Allium cepa* L.) Seedlings**. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. 157-161. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.729.24>.

SMIRNOFF, N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. **Free Radical Biology and Medicine**, 122, p. 116-129, 2018.

SNAPP, S. S.; SHENNAN, C. Effects of salinity on root growth and death dynamics of tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill. **New Phytologist**, 121, n. 1, p. 71-79, 1992/05/01 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01094.x>.

SONOBE, K.; HATTORI, T.; AN, P.; TSUJI, W. *et al.* Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. **Journal of Plant Nutrition**, 34, n. 1, p. 71-82, 2010/12/01 2010.

STROHECKER, R.; ZARAGOZA, F. M.; HENNING, H. M. **Analisis de vitaminas: métodos comprobados**. Madrid: Editorial Paz Montalvo, 1967. 428 p.

TAKAHASHI, Y.; TAHARA, M.; YAMADA, Y.; MITSUDOMI, Y. *et al.* Characterization of the polyamine biosynthetic pathways and salt stress response in *Brachypodium distachyon*. **Journal of Plant Growth Regulation**, 37, n. 2, p. 625-634, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Revisada e ampliada ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 574 p. 978-85-7035-771-7.

THALMANN, M.; PAZMINO, D.; SEUNG, D.; HERRER, D. *et al.* Regulation of leaf starch degradation by abscisic acid is important for osmotic stress tolerance in plants. **The Plant Cell**, 28, n. 8, p. 1860, 2016.

THALMANN, M.; SANTELIA, D. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. **New Phytologist**, 214, n. 3, p. 943-951, 2017.

VALLARINO, J. G.; OSORIO, S. Chapter 10 - Organic Acids. *In*: YAHIA, E. M. (Ed.). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**: Woodhead Publishing, 2019. p. 207-224.

WANG, Y.; ZHAO, H.; QIN, H.; LI, Z. *et al.* The synthesis of ascorbic acid in rice roots plays an important role in the salt tolerance of rice by scavenging ROS. **International Journal of Molecular Sciences**, 19, n. 11, p. 3347, 2018.

WANG, Y.; ZHAO, H.; QIN, H.; LI, Z. *et al.* The synthesis of ascorbic acid in rice roots plays an important role in the salt tolerance of rice by scavenging ROS. **International Journal of Molecular Sciences**, 19, n. 11, p. 3347, 2018b.

WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. **Geochimica et cosmochimica Acta**, 59, n. 7, p. 1217-1232, 1995.

WEI, J.; MA, F.; SHI, S.; QI, X. *et al.* Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. **Postharvest Biology and Technology**, 56, n. 2, p. 147-154, 2010.

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **The Biochemical journal**, 57, n. 3, p. 508-514, 1954.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K. *et al.* Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta physiologiae plantarum**, 35, n. 11, p. 3099-3107, 2013/11/01 2013.

YIN, Y.-G.; KOBAYASHI, Y.; SANUKI, A.; KONDO, S. *et al.* Salinity induces carbohydrate accumulation and sugar-regulated starch biosynthetic genes in tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. 'Micro-Tom') fruits in an ABA- and osmotic stress-independent manner. **Journal of Experimental Botany**, 61, n. 2, p. 563-574, 2010.

YOSHIMOTO, N.; SAITO, K. S-Alk(en)ylcysteine sulfoxides in the genus *Allium*: proposed biosynthesis, chemical conversion, and bioactivities. **Journal of Experimental Botany**, 70, n. 16, p. 4123-4137, 2019.

YOSHIMURA, K.; ISHIKAWA, T. Chemistry and metabolism of ascorbic acid in plants. *In*: HOSSAIN, M. A.; MUNNÉ-BOSCH, S., *et al* (Ed.). **Ascorbic acid in plant growth, development and stress tolerance**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1-23.

ZHU, Y.-X.; GONG, H.-J.; YIN, J.-L. Role of Silicon in Mediating Salt Tolerance in Plants: A Review. **Plants**, 8, n. 6, 2019.

ZHU, Y.-X.; XU, X.-B.; HU, Y.-H.; HAN, W.-H. *et al.* Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant Cell Reports**, 34, n. 9, p. 1629-1646, 2015/09/01 2015.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, 34, n. 2, p. 455-472, 2014.

### Capítulo 3

## EFEITO DA SALINIDADE E DE DOSES DE SILÍCIO NA QUALIDADE E VIDA ÚTIL PÓS-COLHEITA DA CEBOLA

### RESUMO

A salinidade, em pré-colheita, limita a vida de prateleira e a qualidade pós-colheita dos produtos hortícolas. Por outro lado, a nutrição de plantas com silício (Si) vem sendo utilizada para atenuar os efeitos da salinidade nas plantas. Os efeitos da salinidade e nutrição com Si ainda não foram totalmente compreendidos para muitas espécies, especialmente sob o aspecto de conservação pós-colheita e qualidade de bulbos de cebola. Assim, um experimento foi conduzido para avaliar os efeitos da salinidade e fertilização com Si sobre as características morfofisiológicas de bulbos de cebola, durante a vida de prateleira. O experimento foi em blocos completos casualizados, com quatro repetições, e tratamentos organizados em parcelas sub-subdividas. As parcelas foram quatro níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CE: 0,65; 1,7; 2,8; e 4,1 dS m<sup>-1</sup>), as subparcelas foram cinco níveis de adubação com Si (DS: 0; 41,6; 83,2; 124,8; e 166,4 kg ha<sup>-1</sup>) e as sub-subparcelas foram quatro tempos de prateleira (TP: 0; 20; 40; e 60 dias após a colheita). A salinidade da água de irrigação e o tempo de prateleira reduziram a firmeza e aumentaram a perda de massa dos bulbos de cebola durante a vida de prateleira, convergindo em 30,07N e 9,23%, ambos com a CE de 4,0 dSm<sup>-1</sup>, aos 28,4 e 60 dias de prateleira, respectivamente. A adubação com Si não afetou significativamente essas variáveis. Os parâmetros de cor CIE L\*, a\*, b\*, C\* e °H\* não foram afetados significativamente pelos efeitos da salinidade e nutrição com Si, sendo em média 70,50, 9,71, 32,05, 33,78 e 72,96, respectivamente. O tempo de prateleira, por outro lado, alterou significativamente a cor da túnica, as taxas de reduções lineares linear de 0,2328, 0,3945, 0,3142 e 0,2565% por cada dia de prateleira, para os parâmetros CIE L\*, b\*, C\* e °H\*, respectivamente, além da taxa de aumento linear de 0,8643%, para o parâmetro a\*. O estresse salino reduziu os teores de açúcares e sólidos solúveis totais dos bulbos de cebola às taxas de 2,1521% e 1,0922%, por cada dS m<sup>-1</sup> acrescentado na água de irrigação, respectivamente. O fornecimento de Si aumentou os teores de açúcares e sólidos solúveis totais nos bulbos de cebola, sendo máximos aos 12,44% e 6,40 °Brix, com as doses de 127,0 kg ha<sup>-1</sup> e 121,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si. O tempo de prateleira mostrou consumo inicial de açúcares, sendo mínimos aos 10,47% e 5,99 °Brix, aos 13,2 e 16,7 dias; elevando-se a 13,95% e 6,62 °Brix, aos 47,6 dias e 43,7 dias; e reduzindo a 12,25% e 5,65 °Brix, ambos aos 60 dias de prateleira. A salinidade reduziu o pH e aumentou a acidez titulável, ao mínimo de 5,05 e máximo de 3,43%, ambos com a CE de 4,0 dS m<sup>-1</sup>, no tempo de prateleira

inicial, respectivamente, ao passo que a nutrição com Si não afetou essas variáveis. Em contraste, o tempo de prateleira causou aumento do pH e redução da acidez titulável total dos bulbos, ao máximo de 5,21 e mínimo de 2,79%, ambos com a CE de 0,65 dS m<sup>-1</sup>, aos 60 dias de prateleira, respectivamente. A salinidade, o fornecimento de Si e o tempo de prateleira aumentaram as concentrações dos ácidos pirúvico e ascórbico nos bulbos de cebola durante a vida de prateleira, sendo as máximas concentrações de ácido pirúvico, em 6,93 e 6,75 µM g<sup>-1</sup> de MF, com as CE e DS de 2,81 dS m<sup>-1</sup> e 78,3 kg ha<sup>-1</sup> de Si, ambas aos 22,1 dias de vida de prateleira; e as máximas concentrações de ácido ascórbico de 83,45 e 70,20 mg 100 g<sup>-1</sup> de MF, com as CE e DS de 4,00 dS m<sup>-1</sup> e 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si, respectivamente, ambas aos 20 dias de vida de prateleira. A salinidade estimulou o catabolismo de metabólitos durante a vida de prateleira da cebola, ao passo que a nutrição com Si atenuou os impactos causados pela salinidade moderada, contribuindo para aumentar a síntese de metabólitos e prolongar a vida de prateleira dos bulbos de cebola.

**Palavras-chaves:** *Allium cepa* L.; Fisiologia de hortaliças pós-colheita; Nutrição mineral; Horticultura; Fertilidade do solo; Terra diatomácea; *Melosira granulata*.

## ABSTRACT

Pre-harvest salinity limits the shelf life and post-harvest quality of vegetables. On the other hand, plant nutrition with silicon (Si) has been used to mitigate the effects of salinity on plants. The effects of salinity and Si nutrition are still not fully understood for many species, especially in terms of postharvest conservation and quality of shelf life of onion bulbs. Thus, an experiment was conducted to evaluate the effects of salinity and Si fertilization on the morphophysiological characteristics of onion bulbs during shelf life. The experiment was in randomized complete blocks, with four replications, and treatments were organized in sub-subdivided plots. The plots were four levels of electrical conductivity of the irrigation water (EC: 0.65; 1.7; 2.8 and 4.1 dS m<sup>-1</sup>), the subplots were five levels of fertilization with Si (SD: 0; 41.6; 83.2; 124.8 and 166.4 kg ha<sup>-1</sup>) and the sub-subplots were four shelf life (0; 20; 40 and 60 days after harvest). Irrigation water salinity and shelf life reduced firmness and increased mass loss of onion bulbs during shelf life, converging at 30.07N and 9.23%, both with EC of 4.0 dS m<sup>-1</sup>, at 28.4 and 60 days of shelf life, respectively. Fertilization with Si did not significantly affect these variables. The color parameters CIE L\*, a\*, b\*, C\* and °H\* were not significantly affected by the effects of salinity and nutrition with Si, being on average 70.50, 9.71, 32.05, 33, 78 and 72.96, respectively. Shelf time, on the other hand, significantly changed the color of the

tunic, at linear linear reduction rates of 0.2328, 0.3945, 0.3142 and 0.2565%, for each day of shelf life, for the CIE parameters  $L^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  and  $^{\circ}H^*$ , respectively; and at the linear increase rate of 0.8643%, for parameter  $a^*$ . Salt stress reduced the sugar and total soluble solids content of onion bulbs, at rates of 2.1521% and 1.0922%, for each  $dS\ m^{-1}$  added to the irrigation water, respectively. The supply of Si increased the contents of sugars and total soluble solids in the onion bulbs, being maximum at 12.44% and 6.40  $^{\circ}Brix$ , with the doses of 127.0  $kg\ ha^{-1}$  and 121.8  $kg\ ha^{-1}$  of Si. Shelf life showed initial sugar consumption, being minimal at 10.47% and 5.99  $^{\circ}Brix$ , at 13.2 and 16.7 days; rising to 13.95% and 6.62  $^{\circ}Brix$ , at 47.6 days and 43.7 days; and reducing to 12.25% and 5.65  $^{\circ}Brix$ , both after 60 days of shelf life. Salinity reduced the pH and increased titratable acidity to a minimum of 5.05 and a maximum of 3.43%, both with EC of 4.0  $dS\ m^{-1}$ , in the initial shelf life, respectively; while Si nutrition did not affect these variables. In contrast, shelf life caused an increase in pH and a reduction in the total titratable acidity of the bulbs, at a maximum of 5.21 and a minimum of 2.79%, both with EC of 0.65  $dS\ m^{-1}$ , at 60 days of shelf, respectively. Salinity, Si supply and shelf life increased pyruvic and ascorbic acid concentrations in onion bulbs during shelf life, with maximum pyruvic acid concentrations being 6.93 and 6.75  $\mu M\ g^{-1}$  of MF, with EC of 2.81  $dS\ m^{-1}$  and DS of 78.3  $kg\ ha^{-1}$  of Si, both at 22.1 days of shelf life; and the maximum ascorbic acid concentrations of 83.45 and 70.20  $mg\ 100\ g^{-1}$  of MF, with CE and DS of 4.00  $dS\ m^{-1}$  and 166.4  $kg\ ha^{-1}$  of Si, respectively, both at 20 days of shelf life. Salinity stimulated metabolite catabolism during onion shelf life, while Si nutrition attenuated the impacts caused by moderate salinity, contributing to increase metabolite synthesis and prolong onion bulb shelf life.

**Keywords:** *Allium cepa* L.; Physiology of postharvest vegetables; Mineral nutrition; Horticulture; Soil fertility; diatomaceous earth; Granular Mellosira.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A cebola (*Allium cepa* L.) é uma hortaliça apreciada em todo o mundo devido às suas características alimentares, nutricionais e medicinais (PATHAK, 2000; ABDU et al., 2015; ANJUM; BARMON, 2017; RADY et al., 2018; RICCIARDI et al., 2020). A demanda por cebola ocorre o ano todo, sendo os bulbos geralmente armazenados devido às limitações logísticas e à sazonalidade das colheitas da cultura (OHANENYE et al., 2019).

A conservação e qualidade pós-colheita dos produtos hortícolas são afetadas pelos aspectos da pré-colheita relacionados às técnicas de manejo da cultura, como a nutrição mineral, irrigação, cultivar ou outras condições agrônômicas; ou aspectos relacionados ao ambiente, como a ocorrência de estresses bióticos e abióticos, a incidência de patógenos ou exposição a extremos de temperatura, radiação solar, luz, ventos, salinidade ou outros (CHITARRA; CHITARRA, 2005; VALVERDE-MIRANDA et al., 2021).

A salinidade regula o desenvolvimento, fisiologia e metabolismo das plantas, por meio de programas de aclimatação (HASEGAWA, 2013). O metabolismo redox e a osmorregulação celular são alterados ao nível de expressão gênica, para produzir moléculas antioxidantes e compatíveis (açúcares, prolina, glicina betaína, poliaminas, ascorbato, glutatona, tocoferóis, carotenoides, tióis e flavonoides) capazes de atenuar os efeitos negativos dos estresses hiperosmótico, iônico e oxidativo (FOYER; NOCTOR, 2005; MEYER; HELL, 2005; RUIZ-SOLA et al., 2014; SINGH et al., 2015; KUREPIN et al., 2017; AHMAD et al., 2018; TAKAHASHI et al., 2018; WANG et al., 2018; CHEN et al., 2019). Na cultura da cebola, foi relatado, em trabalhos anteriores (AMAL; ALY, 2008; HANCI et al., 2016), que a salinidade alterou os níveis de produção de prolina e compostos fenólicos e precursores de ácido pirúvico. Por outro lado, até o momento, não há relatos de alterações na produção de metabólitos relacionados às características associadas à qualidade e conservação dos bulbos, como o pH, ácido ascórbico, açúcares e sólidos solúveis totais, além de acidez titulável total.

O silício é um elemento considerado benéfico às plantas (RIZWAN et al., 2015), por melhorar a aclimatação dos vegetais ao meio ambiente, especialmente sob condições de estresses múltiplos, incluindo o de salinidade e toxicidade iônica (ETESAMI; JEONG, 2018). Em situações de estresse salino, foi relatado que o Si pode melhorar a absorção de nutrientes essenciais às plantas, os sistemas de defesa antioxidantes e a síntese de osmólitos e fitormônios (RIZWAN et al., 2015). Na cebola, estudos conduzidos por Bybordi et al. (2018) mostraram que a adubação com Si, em interação com zeólita e selênio (Se), melhorou algumas características qualitativas dos bulbos como a produção de bulbos grandes e teores de matéria seca de bulbo, sólidos solúveis e proteínas. Além disso, foi observado que o Si melhorou as características fisiológicas (atividade enzimática, níveis de clorofila e atividade fotossintética) e nutricionais da planta (aumento nas concentrações de nitrogênio, nitrato e potássio; diminuição na concentração de sódio), sob condição de solo salino e água de irrigação salobra. Embora existam estudos mostrando algumas alterações nas características fisiológicas e qualitativas dos bulbos na pós-colheita da cebola, causadas pela fertilização com Si, ainda não estão claros os efeitos da adubação com Si e de níveis de salinidade sobre muitas características

qualitativas dos bulbos na pós-colheita e conservação prolongada da cebola sob armazenamento em condições de clima ambiente.

Neste trabalho, examinaremos os efeitos de níveis crescentes de salinidade da água de irrigação e da adubação com Si sobre as características de qualidade de bulbos de cebola e sua conservação pós-colheita.

## 3.2 MATERIAL E METODOS

### 3.2.1 Localização experimental e condições climáticas

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no distrito da Alagoinha, Mossoró – RN, Brasil (5° 03' 37"S; 37° 23' 50"W e altitude de 72 m). A região registra precipitação anual média de 625 mm, com estação seca entre os meses de junho a janeiro. A média anual de temperatura do ar registra mínima de 21,3 °C e máxima de 34,5 °C e o clima é classificado como semiárido (BSh), seco e muito quente, segundo sistema de classificação de Köppen (CARMO FILHO et al., 1991).

### 3.2.2 Material vegetal, tratamentos pré-colheita e condições de armazenamento pós-colheita

O experimento foi realizado com cebolas (*Allium cepa* L.) semeadas em 16 de julho de 2019. O material genético utilizado foi o híbrido 'Rio das Antas', um cultivar comum no semiárido nordestino do Brasil. O cultivo, as adubações, a irrigação foram de acordo com as recomendações locais, as necessidades da cultura e a disponibilidade de água e nutrientes no solo (CHAUHAN et al., 2007; AGUIAR NETO et al., 2014; BEHAIRY et al., 2015; MARROCOS et al., 2018).

Os tratamentos foram quatro níveis de salinidade da água de irrigação (0,61; 1,74; 2,87 e 4,0 dS m<sup>-1</sup>) e cinco níveis de adubação com silício (0; 41,6; 83,2; 124,8 e 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si), delineados em parcelas e subparcelas, respectivamente. A salinidade da água foi elevada pela adição de sais de cloreto de sódio, cloreto de cálcio e sulfato de magnésio, em uma fração molar de carga de 7:2:1. A adubação com Si foi realizada no plantio, com um fertilizante à base de terra diatomácea natural derivada da espécie *Melosira granulata* – Agrisilica<sup>TM</sup> (26% de Si; 0,07% de N; 0,02% de P; 0,08% de K; 0,09% de S; 1,4% de Ca; 1,1% de Mg; 1,3% de Fe; 219 mg kg<sup>-1</sup> de Mn; < 5 mg kg<sup>-1</sup> de B; 22 mg kg<sup>-1</sup> de Cu; 18 mg kg<sup>-1</sup> de Zn; e 2,1 mg kg<sup>-1</sup> de Mo), produzida pela Agripower Australia Limited.

A colheita foi realizada em 16 de dezembro de 2019, após um processo natural de cura dos bulbos, por 10 dias, em condições de campo. O início da cura foi definido quando 70% da população das plantas se apresentavam no estado fisiologicamente maduro (isto é, estaladas), quando também se definiu a paralisação do fornecimento de água por irrigação. Os bulbos colhidos foram selecionados segundo a classe de diâmetro comercial, entre 50-70 mm; em seguida, acondicionados sobre prateleiras, em redes de polietileno (malha de 10 mm), por 0, 20, 40 e 60 dias, sob condição de armazenamento ambiente, à temperatura média do ar de  $29,5 \pm 0,7$  °C e umidade relativa  $67 \pm 5\%$ .

### **3.2.3 Delineamento experimental**

O delineamento experimental foi em blocos causalizados, esquematizados em parcelas sub-subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram quatro níveis de salinidade da água de irrigação (CE: 0,61; 1,74; 2,87 e 4,0 dS m<sup>-1</sup>), as subparcelas foram cinco níveis de adubação com silício (DS: 0; 41,6; 83,2; 124,8 e 166,4 kg ha<sup>-1</sup> de Si) e as sub-subparcelas foram quatro tempos de conservação (0, 20, 40 e 60 dias após a colheita), totalizando 320 unidades experimentais. A amostra foi composta de cinco bulbos de cebola por unidade experimental, totalizando 1600 bulbos. As amostras foram etiquetadas e levadas ao Laboratório de Fisiologia e Tecnologia Pós-colheita da UFERSA, para avaliação da qualidade pós-colheita dos bulbos, dentro de seus respectivos tempos de conservação.

### **3.2.4 Características avaliadas**

As análises morfológicas das plantas foram da firmeza (FB), perda de massa (PM) e cor (COR) dos bulbos de cebola, determinadas aos 0, 20, 40 e 60 dias após a colheita (DAC). As análises de FB e COR foram determinadas separadamente em cada um dos bulbos da amostra, tomando-se nota da média dos cinco bulbos para cada repetição de tratamento. A determinação da PM foi realizada por relação porcentual, tomando-se nota dos pesos inicial e final do conjunto de cinco bulbos de cada amostra.

A qualidade pós-colheita dos bulbos foi avaliada por meio da determinação dos teores de açúcar solúvel (AS), sólidos solúveis totais (SS), acidez titulável total (AT) e relação SS/AT, bem como pH e concentração dos ácidos pirúvico (ACP) e ascórbico (AsA). As avaliações foram realizadas a partir do suco homogeneizado dos cinco bulbos de cebola pertencentes à amostra, obtido por meio de um extrator de suco centrífugo – Homeleader®, com lâminas de inox.

### 3.2.4.1 Avaliação da firmeza dos bulbos e perda de massa

A firmeza dos bulbos, medida em força Newton (N), foi avaliada por meio da utilização de um penetrômetro Lutron® modelo PTR-300, com ponteira de 8 mm de diâmetro e penetração a uma profundidade de 7 mm. As leituras foram realizadas na porção equatorial média dos bulbos em dois pontos equidistantes, em lados opostos, após a remoção da túnica seca dos bulbos.

A perda de massa foi obtida por meio da relação porcentual entre o peso dos bulbos de cebola no tempo de prateleira inicial (0 DAC) e o peso dos bulbos em seu respectivo tempo de prateleira, por ocasião da avaliação, de acordo com a seguinte equação:

$$PM (\%) = \left( \frac{M_i}{M_f} - 1 \right) \times 100 \times (-1) \quad (1)$$

Em que,

PM é a perda de massa, em %;

M<sub>i</sub> é a massa da matéria fresca da amostra no início do armazenamento, em g; e

M<sub>f</sub> é a massa da matéria fresca da amostra no tempo de prateleira avaliado, em g.

### 3.2.4.2 Avaliação da cor dos bulbos

A coloração dos bulbos foi avaliada a partir da sensação de cor preconizada pela Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Eclairage* – CIE), quantificada pela determinação dos parâmetros de cloração L\* (luminosidade ou brilho), a\* (variação de cor entre verde e vermelho), b\* (variação de cor entre azul e amarelo), C\* (cromaticidade ou saturação) e oH (angulação de tonalidade ou matiz). As coordenadas CIE L\*, a\* e b\* foram obtidas por um colorímetro Konica Minolta® modelo CR-410 (variação de refletância Y: de 0,01% a 160,00%), com detector de fotocélulas de silício e fonte de luz na forma de flash de xenônio, utilizando um cabeçote de medição de cor de iluminação de área ampla, refletindo diretamente na região polar superior dos bulbos da cebola, cobrindo uma área circular com 50 mm de diâmetro. O padrão observador foi correspondente ao Padrão 2º CIE 1931 ( $\bar{x}2\lambda$ ,  $\bar{y}\lambda$ ,  $\bar{z}\lambda$ ). Os

espaços de cor CIE C\* e °H\* foram calculados a partir das coordenadas CIE L\*, a\* e b\*, por meio das seguintes aplicações matemáticas (PETROPOULOS; FERNANDES; BARROS; FERREIRA et al., 2015):

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, \quad (2)$$

$$h^* = 180 + \left[ \frac{\left( \arctan \frac{b^*}{a^*} \right)}{6,2832} \right] \times 360, \text{ quando } a^* < 0 \text{ ou} \quad (3)$$

$$h^* = \left[ \frac{\left( \arctan \frac{b^*}{a^*} \right)}{6,2832} \right] \times 360, \text{ quando } a^* > 0 \quad (4)$$

### 3.2.4.3 Avaliação dos açúcares solúveis (AS), sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT), relação SS/AT e potencial hidrogênio iônico (pH)

Os teores de açúcar solúvel (AS) e acidez titulável (AT) foram avaliados nos bulbos da cebola, segundo os métodos descritos por Yemm e Willis (1954) e pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), respectivamente. O AS foi extraído de amostras de 1 g de suco dos bulbos frescos, dissolvidas em 100 mL de água pura desmineralizada. As determinações foram realizadas por colorimetria, a partir de alíquotas de 50 µL retiradas dos extratos. Para as leituras, as alíquotas dos extratos (50 µL) foram misturadas com 950 µL água pura e 2000 µL de reagente de antrona (2 g L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), aquecidas (banho-maria a 100 °C por 8 minutos) e resfriadas (banho de gelo). As leituras foram registradas na faixa espectral de 620 nm e os conteúdos de AS foram calculados a partir de uma curva padrão de glicose. A AT foi determinada a partir de amostras de 1 g de suco de bulbos de cebola, dissolvidos em 50 mL de água pura desmineralizada, por meio de titulação com NaOH 0,1 N e indicador fenolftaleína a 1%.

Os teores de sólidos solúveis (SS) e o potencial de hidrogênio iônico (pH) dos bulbos da cebola foram determinados diretamente no suco dos bulbos, por meio de um equipamento medidor de refração luminosa, convertido na escala de Brix (%), e de um medidor de potencial elétrico (mV), convertido na escala de pH, respectivamente. O equipamento utilizado para medir o SS foi o refratômetro digital modelo DBR45 (índice de refatividade de 1,3330-1,4098), com compensação de temperatura automática, ao passo que o equipamento utilizado para medir o pH foi o potenciômetro de bancada Hanna® modelo HI 2221, com eletrodo de pH modelo HI-1131B e sonda de compensação automática de temperatura modelo HI 7662.

A relação SS/AT, logicamente, foi obtida por meio da razão matemática entre os valores de observados para SS e AT.

### 3.2.4.4 Avaliação das concentrações de ácido pirúvico e ácido ascórbico

As concentrações de ácido pirúvico (ACP) e ácido ascórbico (AsA) foram avaliadas nos bulbos da cebola, segundo os métodos descritos por Schwimmer e Weston (1961) e

Strohecker et al. (1967), respectivamente. O ACP foi extraído de amostras de 0,5 g de suco dos bulbos frescos, dissolvidas em 1,5 mL de ácido tricloroacético (TCA) 5% e 18 mL de água pura desmineralizada. As determinações foram realizadas por colorimetria, a partir de alíquotas de 1 mL retiradas dos extratos. Para as leituras, as alíquotas dos extratos (1 mL) foram misturadas com 1 mL de solução de 2,4-dinitrofenilhidrazina (2,4-DNPH) 0,125 g L<sup>-1</sup> de HCl 2N e 1 mL de água pura; depois aquecidas (banho-maria a 37 °C por 10 minutos), resfriadas (banho de gelo) e misturadas com 5 mL de NaOH 0,6N. As leituras foram registradas na faixa espectral de 420 nm e os conteúdos de ACP foram calculados a partir de uma curva padrão de piruvato de sódio. O AsA foi extraído a partir de amostras de 1 g de suco de bulbos de cebola, dissolvidos em 50 mL de ácido oxálico 0,5%. As determinações foram obtidas por meio de titulação com solução de Tillman (2,6-dicloro-fenol indofenol) 0,02% (refrigerada), a partir de 5 mL do extrato dissolvidos em um volume de 50 mL à base de água pura desmineralizada. Os conteúdos foram calculados por razões proporcionais, a partir do título de uma solução padrão de ácido ascórbico.

### 3.2.5 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e testes de regressão polinomial, em seguida ajustados a equações de regressão polinomial, por meio de modelos de regressões lineares e não lineares. Os critérios para as escolhas de modelos foram os significados biológicos, a significância dos estimadores dos parâmetros de regressão e os valores do ajuste R<sup>2</sup>.

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.3.1 Firmeza e perda de massa dos bulbos

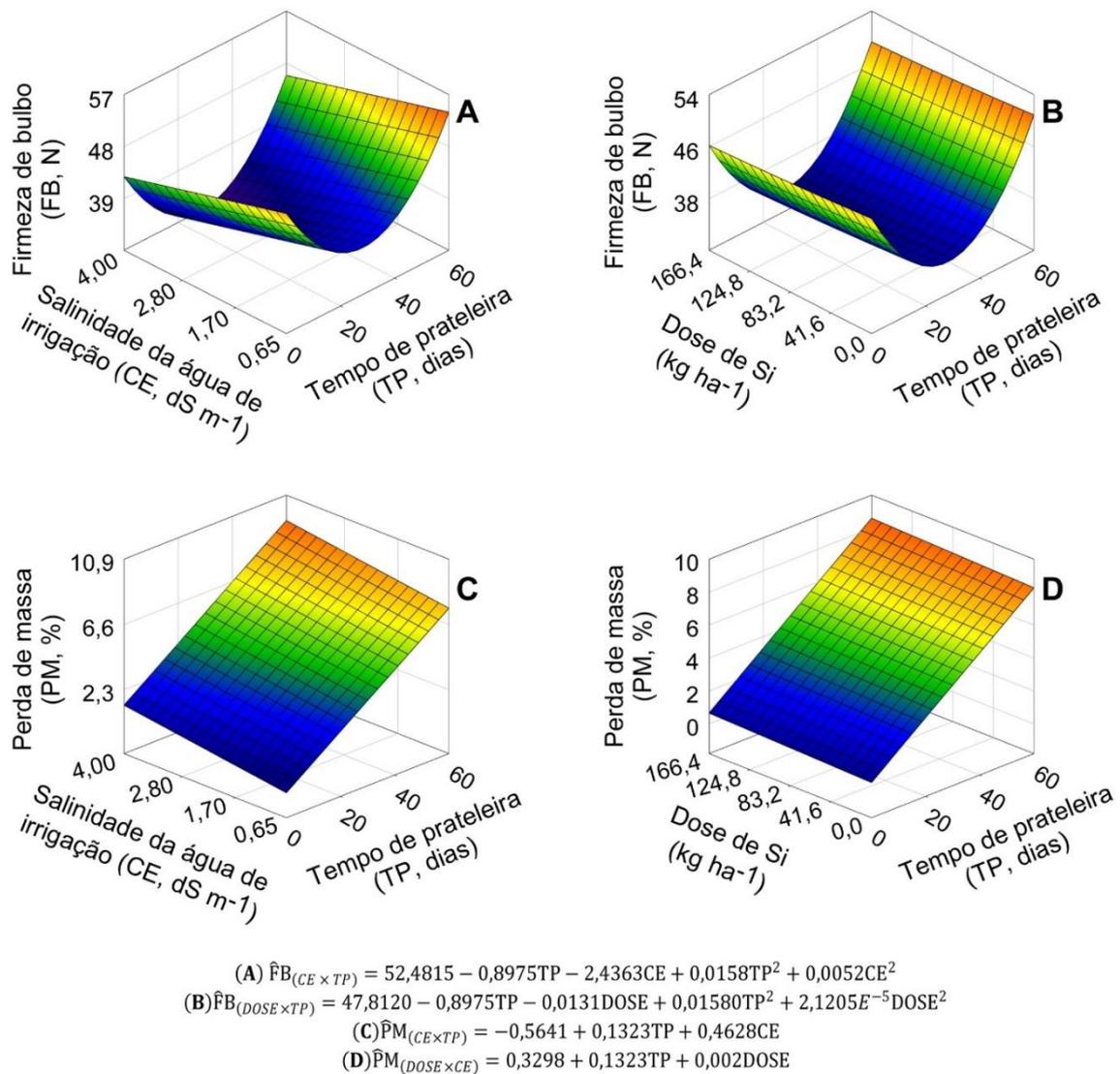
A análise de variância geral (ANOVA) mostrou efeito significativo para os fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) e tempo de prateleira (TP), além de efeito não significativo para o fator dose de Si (DS), em relação às variáveis firmeza de bulbos (FB) e perda de massa (PM).

A FB da cebola ‘Rio das Antas’ reduziu significativamente com os aumentos de CE e TP, ajustando-se ao modelo não linear parabólico (Figura 10A). A FB mínima foi de 30,07N e ocorreu com a CE de 4,0 dSm<sup>-1</sup>, aos 28,4 dias de prateleira.

A elevada firmeza dos bulbos de cebola na colheita foi relacionada às concentrações endógenas de ácido urônico e relação entre as pectinas total e solúvel em água (COOLONG et

al., 2008). O efeito da salinidade nessas variáveis ainda não foi verificado, mas outros atributos relacionados à perda de textura foram significativamente alterados (EL-BAKY et al., 2003; RADY et al., 2018; SEMIDA et al., 2020). Foi relatado que a salinidade causou danos oxidativos na parte aérea da cebola e reduziu o conteúdo relativo de água e o índice de estabilidade das membranas nos tecidos foliares e bulbares (EL-BAKY et al., 2003; RADY et al., 2018; SEMIDA et al., 2020). Assim, a redução da FB da cebola pela salinidade pode ser o resultado da perda de integridade das membranas celulares dos bulbos, o que, segundo Chitarra e Chitarra (2005), possibilita o vazamento de eletrólitos e, portanto, a ocorrência de reações oxidativas e hidrolisantes devido à viabilização do contato entre enzimas e substratos. Além disso, os baixos conteúdos relativos de água nos tecidos bulbares possibilitam a perda de pressão e coesão intercelular, o que favorece a descolagem da lamela média das paredes celulares, por cisalhamento (SAFAR et al., 2017).

No armazenamento, a firmeza dos bulbos de cebola foi associada às estruturas da lamela média e da parede celular primária, bem como às atividades de enzimas como a poligalacturonase e pectinametilesterase (COOLONG et al., 2008), que atacam os carboidratos estruturais das paredes celulares (WEI et al., 2010; ROSE et al., 2018). Foi relatado que a poligalacturanase pode hidrolisar as cadeias de ácido galacturônico, resultando em despolimerização da pectina e potencial amolecimento, ao passo que a pectinametilesterase pode metilesterificar as cadeias de ácido poligalacturônico, formando polímeros que se ligam a íons de  $\text{Ca}^{2+}$  livres que resultam em cadeias de pectinas reticuladas de alta firmeza (NG et al., 2000; MICHELI, 2001; COOLONG et al., 2008; HONG; LEE, 2017). Assim, a redução da FB da cebola 'Rio das Antas', até o 28º dia de armazenamento, e o posterior aumento, até o 60º dia (Figura 10: A e B), possivelmente estão relacionados às atividades da poligalacturanase e pectinametilesterase, respectivamente. Além disso, o aumento da FB da cebola, observado após o 28º dia de prateleira, pode estar relacionado às propriedades elásticas dos tecidos epidérmicos dos catafilos bulbares (NG et al., 2000), que podem aumentar a resistência à penetração em bulbos de cebola, devido à diminuição do turgor celular decorrente da perda de umidade dos bulbos durante a vida de prateleira.



**Figura 10. Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE), dose de silício (Si), com tempo de prateleira (TP), para as variáveis: firmeza de bulbo (FB, em N) (A e B); e perda de massa (PM, %) (C e D), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

A PM dos bulbos de cebola aumentou significativamente com os aumentos de CE e TP, ajustando-se ao modelo não linear plano (Figura 10C). A PM máxima foi de 9,23% e ocorreu aos 60 dias de prateleira, com a CE de 4,0 dSm<sup>-1</sup>.

A PM em cebola é geralmente um processo atribuído à perda de água dos tecidos bulbares, por transpiração (ESHEL et al., 2014; MAW; MULLINIX, 2005). Neste experimento, foi observado que o aumento da salinidade da água de irrigação aumentou significativamente a PM da cebola ‘Rio das Antas’, prejudicando a vida de prateleira da cebola (Figura 10C). Possivelmente, o estresse osmótico induzido pela salinidade na pré-colheita causou déficit hídrico nos bulbos de cebola após a colheita, provocando aumento da taxa de desidratação da membrana celular durante a vida de prateleira (DÍAZ-PÉREZ, 2019). Em geral, a salinidade

aumenta a produção de ERO nos espaços intra e intercelulares, como a cadeia transportadora de elétrons mitocondrial e região apoplástica (SZYMAŃSKA et al., 2019), que causam peroxidação de lipídios em membranas, organelas, proteínas e DNA, resultando em morte celular, vazamento de eletrólitos, senescência e, conseqüentemente, desidratação aumentada dos tecidos vegetais nos produtos alimentícios frescos (DÍAZ-PÉREZ, 2019; MADANI et al., 2019).

Embora a salinidade tenha aumentado a PM dos bulbos de cebola durante a conservação, a máxima PM de 9,23%, atingida com a CE de  $4,00 \text{ dS m}^{-1}$ , ao final dos 60 dias de armazenamento, foi um pouco inferior à máxima perda de massa tolerável de 10%, antes que a cebola seja considerada não comercial (DÍAZ-PÉREZ, 2019). A perda de água reduz a vida de útil dos vegetais, revelando alterações em características qualitativas relacionadas à textura, como amolecimento e murchamento visível, importantes na indicação de deterioração dos produtos frescos (GALINDO et al., 2004; DÍAZ-PÉREZ, 2019).

Os bulbos de cebola podem ser armazenados por longos períodos (até 8 meses) quando mantidos sob condições de refrigeração (temperatura,  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e alta umidade relativa (UR, 98%) (ESHEL et al., 2014). Neste experimento, verificou-se que cada dia de conservação aumentou 0,1323 unidades de porcentagem de PM, sob condições de temperatura média do ar de  $29,5 \pm 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e UR de  $67 \pm 5\%$ . A transpiração é diretamente proporcional ao gradiente de vapor de água entre a superfície do vegetal e o ar circundante (DÍAZ-PÉREZ, 2019), sendo, portanto, fortemente influenciada pelas condições ambientais de armazenamento. Assim, a PM relativamente alta, dentro do período de prateleira avaliado neste experimento, se deve às condições de temperatura e umidade relativa local.

A adubação com Si não influenciou significativamente a FB e a PM da cebola. Entretanto, os desdobramentos de  $\text{DS} \times \text{TP}$ , para as variáveis FB e PM, foram ajustados aos modelos tridimensionais parabólico e plano, respectivamente, devido ao efeito significativo do fator TP (Figura 10: B e D).

A FB mínima da cebola variou de 33,47 – 35,07 N, entre as doses de Si, ocorrendo aos 28,4 dias de prateleira (Figura 10B), ao passo que a PM variou de 8,27 – 8,60% entre as doses, sendo máxima aos 60 dias de prateleira (Figura 10D).

O Si é relatado por depositar-se no retículo endoplasmático, nas paredes celulares e nos espaços intercelulares, na forma de sílica amorfa hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), ou formar complexos polifenólicos alternativos à lignina junto às paredes celulares (FERRÓN-CARRILLO; URRESTARAZU, 2021; FLECK et al., 2015; KUMAR et al., 2017). Assim, essas propriedades especiais do Si nas plantas conferem capacidade potencial do Si para

umentar a resistência das paredes celulares das plantas (RIZWAN et al., 2015) e/ou reduzir os processos transpiratórios dos tecidos, por aumentar interfaces de resistência à transpiração junto às camadas cuticulares (GALINDO et al., 2004). Neste experimento, o incremento de Si na fertilização do solo não alterou significativamente a resistência (FB) e a PM dos bulbos de cebola (Figura 10: B e D). Possivelmente, os efeitos benéficos do Si nos tecidos da parte aérea não ocorreram nos bulbos de cebola devido ao hábito não acumulador de Si na parte aérea, por esta espécie (FLECK et al., 2015). Bybordí et al. (2018) verificaram que o aumento da fertilização de Si não alterou significativamente as concentrações de Si na parte aérea de plantas de cebola e, segundo Kumar et al. (2017), os processos de silicificação das paredes celulares na parte aérea das plantas dependem da espécie e são específicos para cada tipo de tecido celular. Até o momento, sabemos apenas que a cebola responde à adubação com Si aumentando seu conteúdo e melhorando a anatomia das raízes (FLECK et al., 2015).

### 3.3.2 Cor da túnica

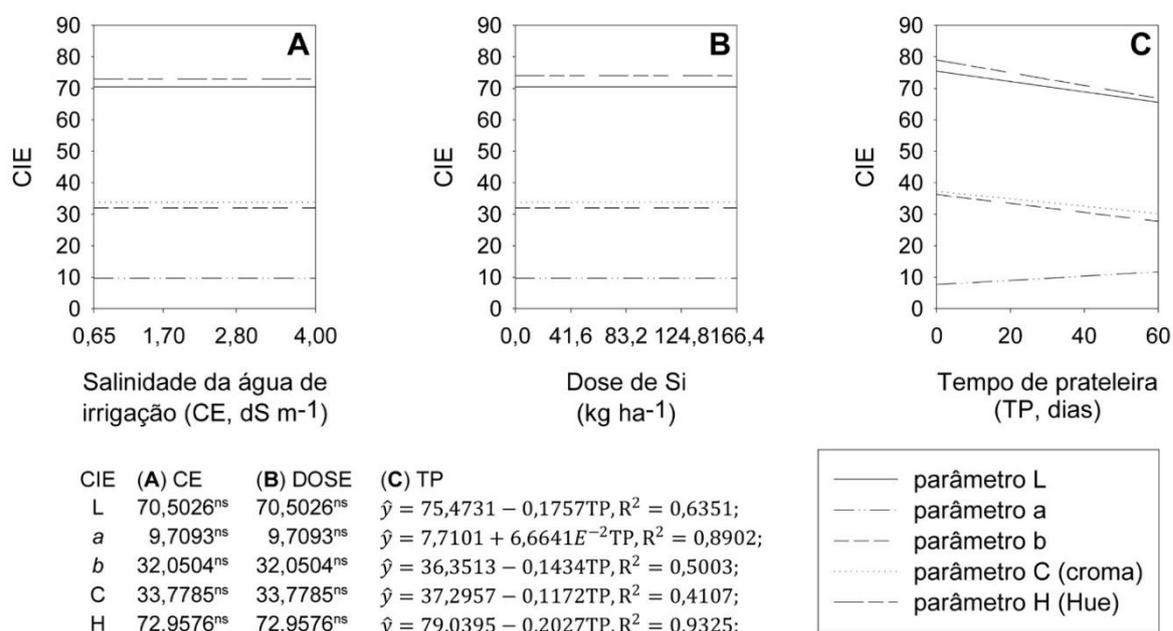
A salinidade da água de irrigação e a adubação com Si não influenciou significativamente a coloração dos bulbos de cebola, de acordo com a ANOVA. Por outro lado, o tempo de prateleira afetou a coloração dos bulbos, alterando significativamente os parâmetros de coloração CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $^{\circ}H^*$ .

Nos fatores CE e DS, os parâmetros CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $^{\circ}H^*$  foram, em média, 70,50, 9,71, 32,05, 33,78 e 72,96, respectivamente (Figura 11: A e B). Já, em relação à TP, para cada dia de armazenamento, houve redução linear de 0,2328, 0,3945, 0,3142 e 0,2565% nos parâmetros CIE  $L^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $^{\circ}H^*$ , respectivamente; e aumento linear de 0,8643% no parâmetro CIE  $a^*$  (Figura 11C).

As reduções de  $L^*$ ,  $b^*$  e  $C^*$  indicam, respectivamente, escurecimento, redução da tonalidade da cor amarela e perda de saturação dos bulbos de cebola no decurso da vida de prateleira. Por outro lado, o aumento do parâmetro  $a^*$  e a redução do ângulo de tonalidade ( $^{\circ}H$ ) indicam que o tempo de prateleira aumentou a tonalidade da coloração vermelha dos bulbos.

O escurecimento da túnica da cebola foi relacionado à senescência e suberização da epiderme dos catafilos externos do bulbo (ESHEL et al., 2014). O tecido suberizado exhibe a cor marrom, progredindo para tonalidades mais escuras com a evolução da senescência dos catafilos externos para os internos e conseqüente aumento do número de camadas peridérmicas suberizadas (ESHEL et al., 2014). A expressão da cor marrom, no entanto, se deve ao acúmulo dos produtos da oxidação de flavonoides como a quercetina 4-glicosídeo e quercetina 3,4-

diglicosídeo, em reações dependentes de peroxidases; ou de quercetina, em reações auto-oxidativas de desprotonação (TAKAHAMA, 2004).



**Figura 11. Efeito de salinidade (CE) (A), doses de silício (Si) (B) e tempos de prateleira (TP) (C) crescentes, sobre a coloração de bulbos de cebola “Rio das Antas”, parametrizados segundo a padrão CIE L\*, a\*, b\*, C\* e °H. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

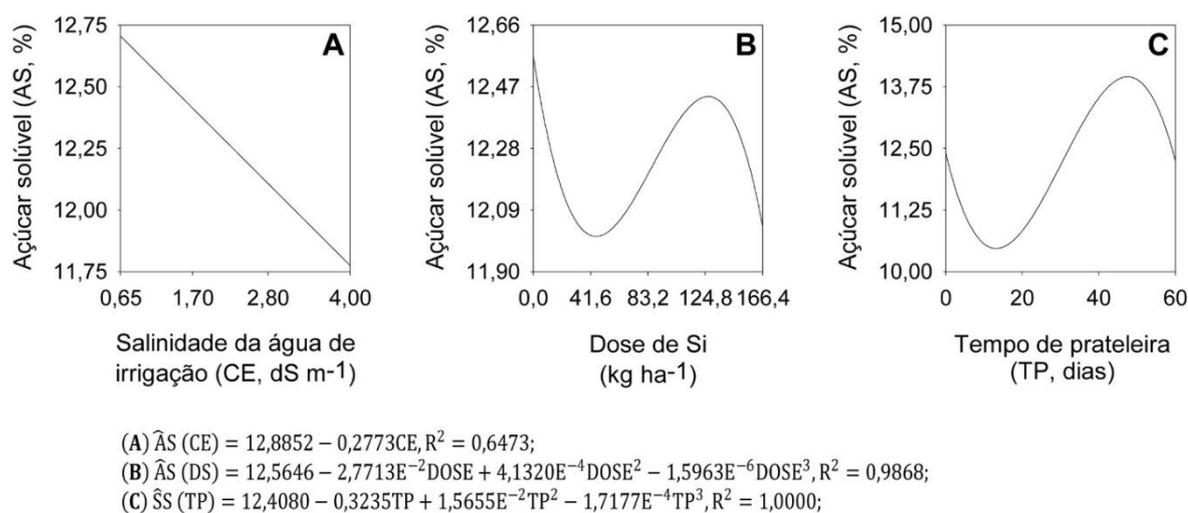
As reduções de CIE b\* e C\* dos bulbos sugere degradação dos compostos fenólicos de quercetina durante a vida de prateleira da cebola. Ko et al. (2015) relataram que o aumento da concentração de flavonoides como quercetina 7,4-diglicosídeo, quercetina 3,4-diglicosídeo, quercetina 3-glicosídeo e quercetina 4-glicosídeo são responsáveis por conferir coloração amarela na túnica da cebola. Segundo Takahama (2004), uma vez que a quercetina é compartimentalizada nas zonas de transição entre as células vivas e mortas do processo de suberização da epiderme, a degradação da aglicona de flavonol pode ser viabilizada por um processo de oxidação auto-catalítico, desencadeado pela geração de moléculas radicais de quercetina e radical superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ).

A redução do ângulo do °H e o aumento de CIE a\* possivelmente estão relacionados ao escurecimento da túnica da cebola, observada durante a vida útil dos bulbos. Neste experimento, o ângulo de matiz (°H) e a pontuação do parâmetro CIE a\* foram, respectivamente, positiva e negativamente correlacionados à pontuação CIE L\* ( $P < 0,01$ ) (dados não apresentados), corroborando com as observações de Downes et al. (2009). Além disso, foi constatado que as cebolas amarelas curadas apresentam alteração de cor da túnica dos bulbos, passando de castanho-esbranquiçado claro para castanho-avermelhado escuro,

concomitantemente à redução gradual do ângulo de matiz ( $^{\circ}$ H) (ESHEL et al., 2014). Não obstante, Downes et al. (2009) verificaram que o ângulo de matiz da túnica de foi negativamente correlacionado com o teor de antocianina e flavonoides totais em cebolas vermelhas ('Red Baron'). Entretanto, nas cultivares de cebola amarela ('Sherpa' e 'Wellington'), essa correlação não foi confirmada (DOWNES et al., 2009).

### 3.3.3 Açúcares solúveis e potencial de hidrogênio iônico nos bulbos

Houve efeito principal significativo dos fatores de tratamento CE e DS com TP, para a variável açúcares solúveis (AS), de acordo com a ANOVA. As análises de regressão mostraram que CE, DS e TP afetaram diferencialmente o metabolismo dos açúcares solúveis durante a vida de prateleira, ajustando-se aos modelos linear, cúbico e cúbico, respectivamente (Figura 12).



**Figura 12. Efeito de níveis de salinidade (CE) (A), doses de silício (Si) (B) e tempos de prateleira (TP) (C) sobre o teor de açúcares solúveis totais (AS) nos bulbos de cebola “Rio das Antas”. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

A salinidade reduziu significativamente o teor de AS dos bulbos de cebola durante a vida de prateleira, partindo do teor inicial de AS de 12,89% e o aumento da salinidade causou redução à taxa de 2,15%, para cada unidade de CE acrescentada na água de irrigação (Figura 12A).

A salinidade aumenta a produção de ERO mitocondrial e a geração de moléculas radicais livres em produtos colhidos (MADANI et al., 2019). Em contraste, a degradação de açúcares solúveis pode alimentar as vias metabólicas produtoras de NADPH, como na via oxidativa das pentoses fosfato, além de contribuir para a eliminação de ERO e regulação do redox celular (HU et al., 2012; OBATA et al., 2015), em diversas vias do sistema de defesa

antioxidante, como na recuperação de cofatores enzimáticos do ciclo Asada-Halliwel e na alimentação da rota biossintética de prolina (MELONI et al., 2003; SHARMA et al., 2012; KHANNA-CHOPRA et al., 2019). Assim, espera-se maiores consumo e produção de açúcares solúveis em plantas cultivadas sob condição de alta salinidade, devido à sua função multifacetada nas respostas fisiológicas das plantas ao estresse abiótico (SAMI et al., 2016). Após a colheita, entretanto, as partes vegetais drenos encontram-se desconectadas de suas respectivas fontes de açúcares e iniciam os processos de degradação respiratória de carboidratos e senescência (YAHIA et al., 2019). Contudo, na vida de prateleira, os produtos cultivados sob condições pré-colheita de salinidade, além de exibirem o catabolismo natural de açúcares nos processos de senescência e respiração, exibem os consumos energéticos exacerbados devido à regulação do metabolismo osmoprotetor, antioxidante (eliminador de ERO) e equilíbrio do redox celular (FOYER; NOCTOR, 2005; FOYER et al., 2017; MADANI et al., 2019).

A adubação com Si afetou significativamente o teor de AS dos bulbos de cebola, ajustando-se ao modelo de regressão cúbica. O teor de AS mínimo foi de 12,01%, com a dose de 45,6 kg ha<sup>-1</sup> de Si, ao passo que o máximo foi de 12,44%, com a dose de 127,0 kg ha<sup>-1</sup> de Si (Figura 12B).

As respostas do metabolismo de carboidratos em relação ao fornecimento nutricional de Si variam amplamente com a espécie, material genético dentro da espécie, hábito de nutricional específico de Si e condições ambientais (PEI et al., 2010; YIN; WANG et al., 2013; ZHU; GONG, 2014; ZHU et al., 2015; ZHU et al., 2019). Pei et al. (2010) e Yin et al. (2013) verificaram que Si aumentou a concentração de açúcares solúveis em plantas sob condições de salinidade, reduzindo as tensões celulares causadas pelos estresses osmótico e iônico. Esse efeito foi atribuído à menor taxa catabólica de açúcares solúveis em plantas tratadas com Si, comparado às plantas não tratadas. Embora nossos resultados tenham mostrado oscilação nos teores de AS em função das doses de Si, a redução inicial de AS possivelmente se deve à diluição nos tecidos bulbares, uma vez que esse resultado coincidiu com o tratamento que exibiu a maior produção de massa de matéria fresca dos bulbos (dados não apresentados). Curiosamente, verificou-se que os teores de AS exibiram correlação negativa com a massa de matéria fresca dos bulbos, pelo método de correlação de Pearson ( $P < 0,01$ ). Contudo, mais estudos são necessários para compreendermos completamente o efeito da nutrição com Si no metabolismo de carboidratos na vida de prateleira de cebolas cultivadas sob condições de salinidade pré-colheita.

O TP afetou significativamente o teor de AS dos bulbos de cebola ajustando-se ao modelo de regressão cúbica. O teor de AS mínimo foi de 10,47%, aos 13,2 dias de vida de prateleira, ao passo que o máximo foi de 13,95%, aos 47,6 dias (Figura 12C).

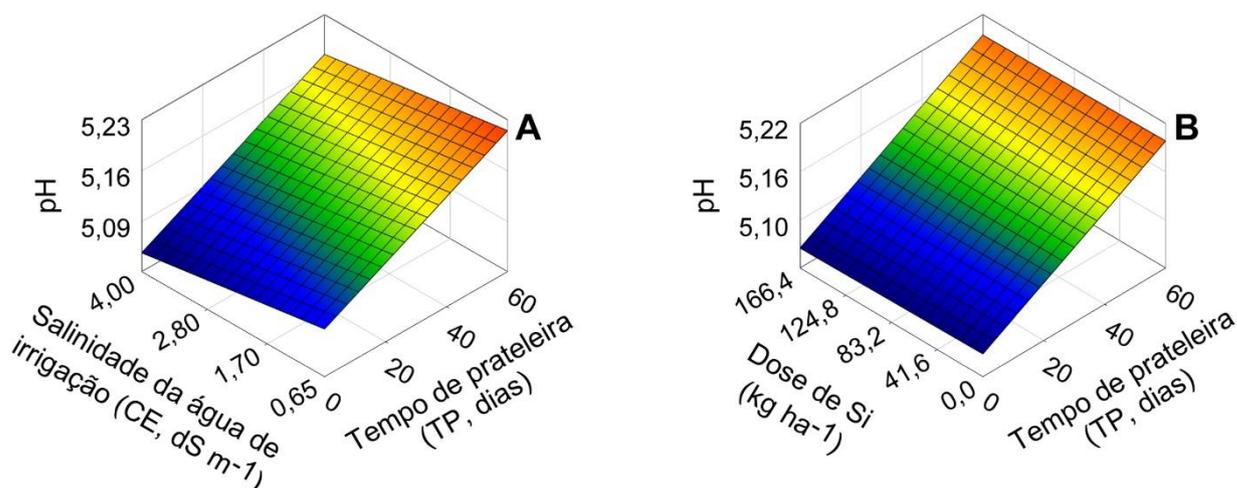
A redução de AS nos primeiros dias da vida de prateleira possivelmente se deve ao consumo respiratório e produção de etileno, que são acelerados inicialmente em resposta a estímulos relacionados à regeneração de lesões ocorridas no processo de colheita (SALTVEIT, 2019; YAHIA et al., 2019). Além disso, as condições da atmosfera do sistema de armazenamento (temperatura média do ar de  $29,5 \pm 0,7$  °C e umidade relativa  $67 \pm 5\%$ ) foram favoráveis ao desencadeamento de atividades enzimáticas e, conseqüentemente, consumos energéticos celulares (YAHIA et al., 2019), o que possivelmente contribuiu para o maior consumo inicial de AS na vida de prateleira da cebola.

O aumento do teor de AS dos bulbos entre 13,2 e 47,6 dias de vida de prateleira pode estar relacionado ao aumento da atividade da celulase e enzimas solubilizadoras de substâncias pécnicas, bem como outras enzimas que degradam carboidratos, convergindo na degradação de celulose e conversão em glicose (YAHIA et al., 2019). Coolong et al. (2008) verificaram redução de 40% nas concentrações de celulose e alterações nas atividades de enzimas modificadoras de parede (poligalacturonase e pectinametilesterase) em linhagens de cebola sob condições de armazenamento, o que foi relacionado com a diminuição da resistência da parede celular. Além disso, houve aumento significativo no teor de sólidos solúveis concomitante à redução do teor de celulose na linhagem de cebola MBL87-WOPL indicando provável degradação de celulose em açúcares em bulbos armazenados.

A redução de AS entre 47,6 a 60 dias de prateleira possivelmente se deveu às mudanças relacionadas ao processo de quebra de dormência dos bulbos (OHANENYE et al., 2019). O aumento da taxa respiração em relação à quebra de dormência de bulbos sob condição de armazenamento prolongado foi relatado (BENKEBLIA; SHIOMI, 2004; WANG et al., 2016). Embora não tenham sido observados sinais visíveis de bulbos germinados no final do armazenamento, o aumento da taxa respiratória foi constatado no período entre a quebra da dormência e o início da germinação, mesmo em bulbos com rebentos não emergentes do pescoço (BENKEBLIA; SHIOMI, 2004). Trabalhos anteriores relataram que alterações na distribuição do açúcares em bulbos de cebola armazenada são marcadores potenciais de quebra de dormência (OHANENYE et al., 2019) e que o teor de AS dos bulbos foram abruptamente reduzidos no final do armazenamento, concomitantemente à germinação dos bulbos (BENKEBLIA; SHIOMI, 2004).

A variável pH dos bulbos de cebola foi influenciada significativamente pela interação entre os fatores CE, DS e TP. Os efeitos de tratamentos foram significativos para os parâmetros dos fatores CE e TP, mas não houve parametrização significativa para DS.

As respostas de pH aos desdobramentos CE×TP e DS×TP ajustaram-se ao modelo tridimensional plano (Figura 13). No desdobramento CE×TP, o pH basal foi 5,09 e o aumento de CE causou redução do pH à taxa de 0,2336%, por cada unidade de CE, ao passo que o aumento de TP causou aumento de pH à taxa de 0,0412%, por cada dia de vida em prateleira (Figura 13A). Por outro lado, no desdobramento DS×TP, o pH basal foi de 5,07 e o aumento de DS não causou variação significativa no pH, ao passo que TP causou aumento de 0,04114%, por cada dia de vida em prateleira (Figura 13B).



$$(A) \hat{pH}_{(CE \times TP)} = 5,0947 + 0,0021TP - 0,0119CE$$

$$(B) \hat{pH}_{(DOSE \times TP)} = 5,0692 + 0,0021TP - 2,1784E^{-5}DOSE$$

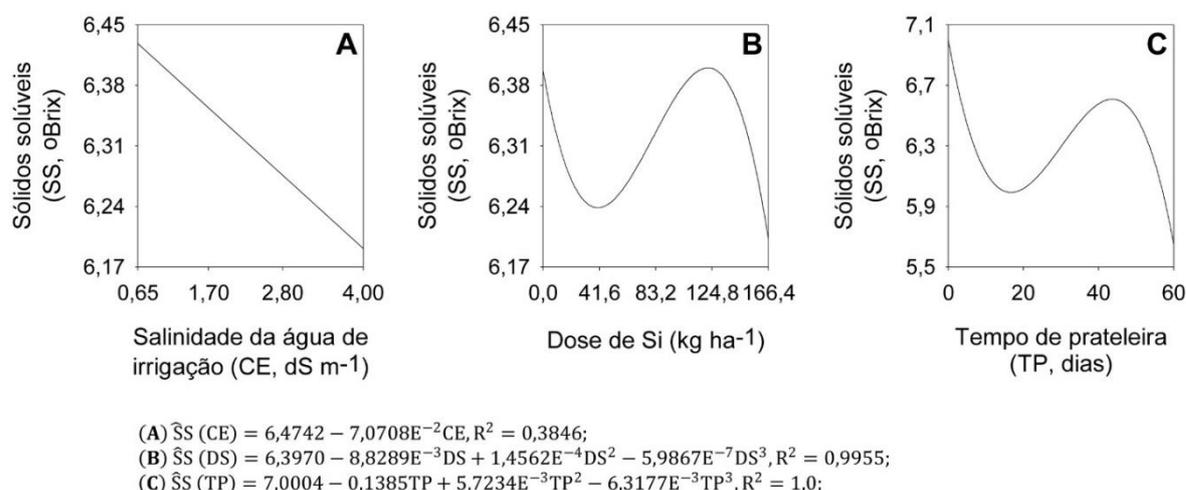
**Figura 13. Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) (A) e dose de silício (Si) (B), com tempo de prateleira (TP), para a variável potencial hidrogeniônico (pH), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

O aumento de pH por efeito de aumento da salinidade possivelmente se deve ao aumento da concentração catiônica intracelular, especialmente  $Na^+$  (HANCI et al., 2016). Em geral, altas concentrações celulares de cátions desencadeiam programas de síntese de ânions orgânicos nas folhas, para o tamponamento do excesso de cátions absorvidos pelas raízes (VALLARINO; OSORIO, 2019). Na bulbificação, os cátions podem ser translocados das folhas para os bulbos, em pares iônicos com os ânions sintetizados (especialmente malato), causando a redução do pH. Por outro lado, o aumento do pH dos bulbos por efeito do tempo de prateleira possivelmente se deve ao catabolismo respiratório dos ácidos orgânicos, por meio de oxidação terminal a  $CO_2$  e  $H_2O$  (SALTVEIT, 2019).

### 3.3.4 Sólidos solúveis, acidez titulável, relação SS/AT nos bulbos

Houve efeito principal significativo dos fatores de tratamento CE e DS com TP, para a variável sólidos solúveis total (SS), de acordo com as análises de regressão polinomial (Figura 14). Além disso, foi identificada interação significativa entre as médias das variáveis acidez titulável total (AT) e SS/AT, em relação aos fatores de tratamento CE, DS e TP (Figuras 15, 16 e 17).

O aumento da salinidade da água de irrigação reduziu significativamente o teor de SS dos bulbos de cebola durante a vida de prateleira. Partindo do teor inicial de SS de 6,47 °Brix, houve redução de 1,09% para cada unidade de CE acrescentada na água de irrigação (Figura 14A). Por outro lado, o fornecimento de Si causou variação cúbica nos teores de SS dos bulbos de cebola durante a vida de prateleira, sendo: 6,40 °Brix, no tratamento controle; 6,24 °Brix, com a dose de 40,4 kg ha<sup>-1</sup>; 6,40 °Brix, com a dose de 121,8 kg ha<sup>-1</sup>; e 6,20 °Brix, com a dose de 166,4 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 14B). Em relação à vida de prateleira, o aumento do tempo de exposição dos bulbos causou variação cúbica em SS, sendo: 7,00 °Brix, no início da vida de prateleira; 5,99 °Brix, aos 16,7 dias; 6,62 °Brix, aos 43,7 dias; e 5,65 °Brix, aos 60 dias de prateleira (Figura 14C).



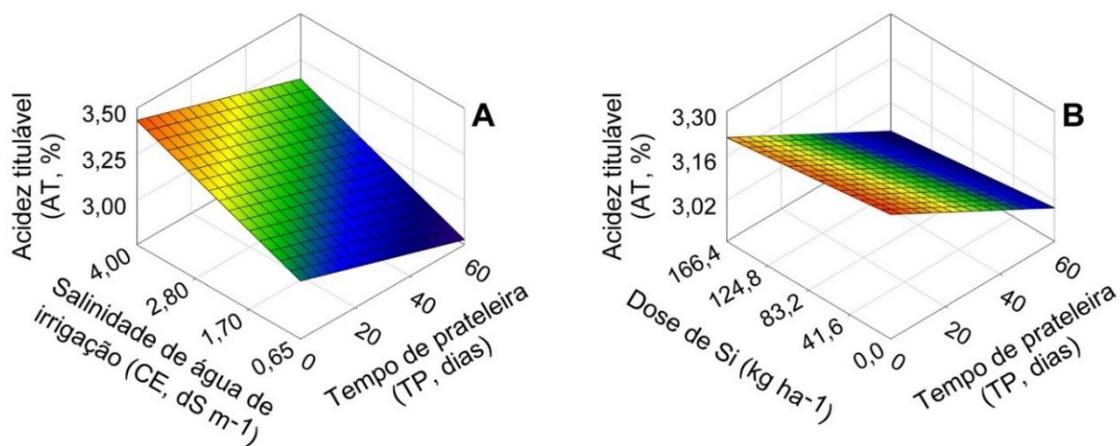
**Figura 14. Efeito de níveis de salinidade (CE) (A), doses de silício (Si) (B) e tempos de prateleira (TP) (C) sobre o teor de sólidos solúveis totais (SS) nos bulbos de cebola “Rio das Antas”. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

Coca et al. (2012) verificaram que o aumento da salinidade na solução de cultivo não causou alterações significativas nos teores de SS dos bulbos de cebola pós-colheita. Por outro lado, Chang e Randle (2005) verificaram que os teores de SS dos bulbos aumentaram quadraticamente em função de períodos decrescentes de duração do estresse salino no decurso do ciclo fenológico da planta. Em relação à adubação com Si, Bybordi et al. (2018) relataram

aumento nos teores de SS dos bulbos pós-colheita, em função do aumento das doses de Si no campo. Na vida pós-colheita, as flutuações nos teores de SS dos bulbos de cebola variam consideravelmente entre os materiais genéticos e fatores relacionados à tecnologia e manuseio pré e pós-colheita (CHANG; RANDLE, 2005; CHOPE et al., 2006; COOLONG et al., 2008; COCA et al, 2012; SOHANY et al., 2016; BYBORDI et al, 2018; SHARMA et al., 2020). Sharma et al. (2020) sugeriram que as variações dos teores de SS nos bulbos de cebola, durante o armazenamento pós-colheita, se deveram às flutuações nas taxas respiratórias e teores endógenos de açúcares solúveis.

Os desdobramentos dos fatores CE, DS e TP, para as variáveis AT e SS/AT, mostraram efeitos significativos para os parâmetros relacionados à CE e TP, mas não houve parametrização significativa para DS (Figuras 15, 16 e 17). As respostas de AT aos tratamentos CE×TP e DS×TP ajustaram-se ao modelo tridimensional plano (Figura 15: A e B). Por outro lado, as respostas de SS/AT a esses tratamentos ajustaram-se a diferentes modelos de regressão em polinômios lineares (Figuras 16 e 17).

No desdobramento CE×TP, a AT basal foi de 3,01%; o aumento da salinidade causou aumentos em AT à taxa de 3,5740%, por cada unidade de CE aumentada na água de irrigação; e o aumento de TP causou redução em AT à taxa de 0,1597%, por cada dia de vida de prateleira (Figura 15A). Por outro lado, no desdobramento DS×TP, AT inicial foi de 3,28%; o aumento de DS não causou alteração significativa em AT e o aumento de TP causou redução à taxa de 0,1462%, por cada dia de vida de prateleira (Figura 15B).



$$(A) \hat{AT}_{(CE \times TP)} = 3,0050 - 0,0048TP + 0,1074CE$$

$$(B) \hat{AT}_{(DOSE \times TP)} = 3,2837 - 0,0048TP - 0,0004DOSE$$

**Figura 15.** Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) (A) e dose de silício (Si) (B), com tempo de prateleira (TP), para a variável acidez titulável (AT, %), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

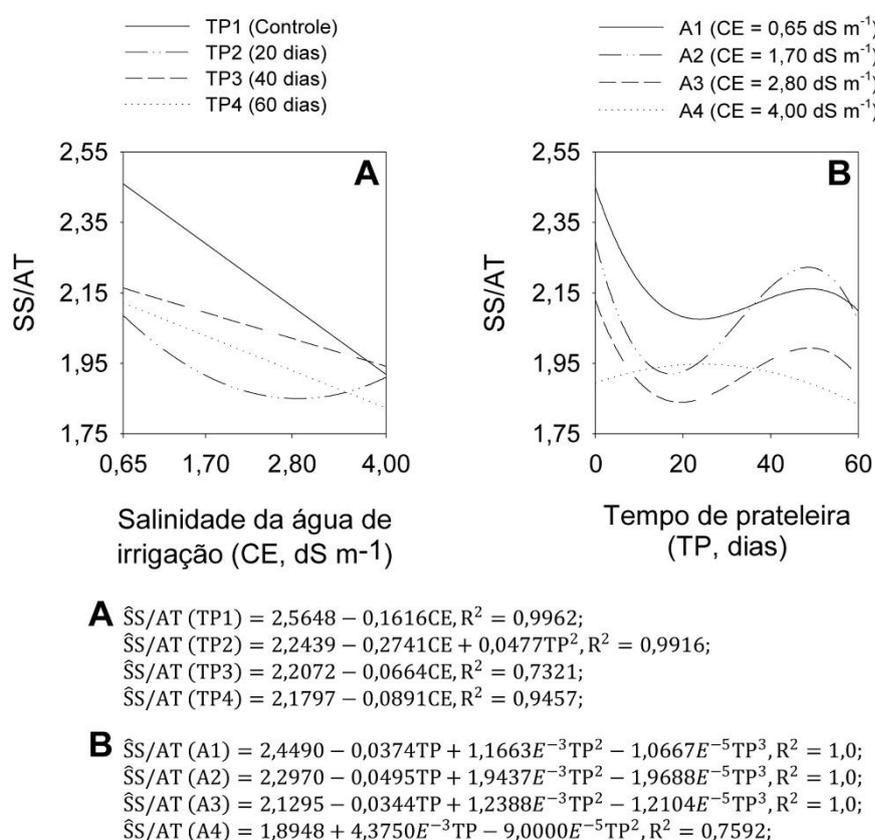
O aumento de AT por efeito de aumento da salinidade possivelmente se deve ao aumento da concentração vacuolar de ácidos orgânicos, uma vez que somente as formas protonadas dos ácidos orgânicos são identificadas por esse método de análise (VALLARINO; OSORIO, 2019). Igamberdiev e Eprintsev (2016) relataram que condições fotorrespiratórias e/ou com nível de pressão redutora elevada sinalizam para o fluxo parcial do ciclo do ácido tricarbóxico (TCA), induzindo à síntese de ácidos orgânicos e à consequente exportação desses ácidos das mitocôndrias para os vacúolos. Os ácidos orgânicos podem fornecer elétrons para a cadeia de transporte de elétrons mitocondrial ou podem ser acumulados por longos períodos como osmólitos, ou para fornecer energia redox quando necessários (IGAMBERDIEV; BYKOVA, 2018). Os ácidos orgânicos exibem maior flexibilidade metabólica do que as grandes coenzimas, como NADH e NADPH, podendo transferir facilmente elétrons e prótons através das membranas para outros compartimentos. Eles são, adicionalmente, importantes na produção e consumo de ATP, no suporte de gradientes protômicos e iônicos das membranas e na acidificação dos espaços extracelulares (IGAMBERDIEV; BYKOVA, 2018; IGAMBERDIEV; EPRINTSEV, 2016). Na vida de prateleira, a redução de AT nos bulbos de cebola possivelmente se deveu ao catabolismo respiratório dos ácidos orgânicos, para a obtenção da energia necessária aos processos relacionados ao amadurecimento e senescência dos bulbos, por meio de oxidação terminal dos ácidos orgânicos a  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (SALTVEIT, 2019).

As respostas de SS/AT dos bulbos de cebola aos tratamentos CE $\times$ TP e DS $\times$ TP apresentaram ajustes lineares diferenciais dentro de seus desdobramentos (Figuras 16 e 17).

Os desdobramentos de CE, dentro de cada TP, mostraram que o aumento da salinidade da água de irrigação reduziu a SS/AT dos bulbos de cebola, dependendo do tempo de prateleira. Em TP1, partindo da SS/AT inicial de 2,56, o aumento de cada unidade de CE causou redução linear de 6,30%. Em TP2, o aumento de CE causou redução quadrática na SS/AT, atingindo o valor mínimo de 1,85, com a CE de 2,87  $\text{dS m}^{-1}$ . Em TP3 e TP4, os aumentos de cada unidade de CE causaram reduções lineares de 3,00 e 4,09%, respectivamente, partindo das relações SS/AT iniciais de 2,21 e 2,18 (Figura 16A).

A redução de SS/AT nos bulbos de cebola, em função do aumento da salinidade da água de irrigação, se deveu ao maior catabolismo de açúcares solúveis em relação aos ácidos tituláveis totais. Possivelmente, os açúcares solúveis foram as formas preferenciais de reservas energéticas utilizadas pelos bulbos de cebola, para atender às maiores exigências de ATP e equivalentes redutores nos processos de respiração, manutenção do equilíbrio redox e desintoxicação enzimática de moléculas radicais lipídicas e ERO, causadas pelo aumento do

estresse oxidativo induzido por aumento de salinidade (FOYER; NOCTOR, 2005; HU et al., 2012; OBATA et al., 2015; FOYER et al., 2017; MADANI et al., 2019). Por outro lado, a distribuição de menores taxas de redução de SS/AT em função do aumento da salinidade, ao passar do nível inicial zero do tempo de prateleira, TP1, para os níveis subsequentes TP2, TP3 e TP4, evidencia aumento da contribuição dos ácidos orgânicos nos metabolismos respiratório e redox dos bulbos de cebola durante a vida de prateleira. A participação dos ácidos orgânicos nos processos respiratório e de regulação redox mitocondrial é amplamente discutida em revisões anteriores apresentadas por Igamberdiev e Eprintsev (2016), Igamberdiev e Bykova (2018) e Saltveit (2019).



**Figura 16. Efeito da interação entre os níveis de salinidade da água de irrigação (CE) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a variável SS/AT, em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

Os desdobramentos de TP, dentro de cada CE, mostraram que o aumento do tempo de prateleira afetou significativamente as relações SS/AT dos bulbos de cebola, as quais se ajustaram aos modelos: cúbico, nos níveis de salinidade A1, A2 e A3; quadrático, no nível A4 (Figura 16B). Nos níveis de salinidade A1, A2 e A3, as relações SS/AT foram máximas no início do período de prateleira, sendo 2,45, 2,30 e 2,13, caindo a 2,08, 1,92 e 1,84, aos 23,8, 17,3 e 19,4 dias de prateleira e aumentando para 2,16, 2,22 e 1,99 aos 49,1, 48,6 e 48,8 dias; reduziram aos mínimos e 2,1, 2,07 e 1,91 aos 60 dias, respectivamente. No nível A4, por outro

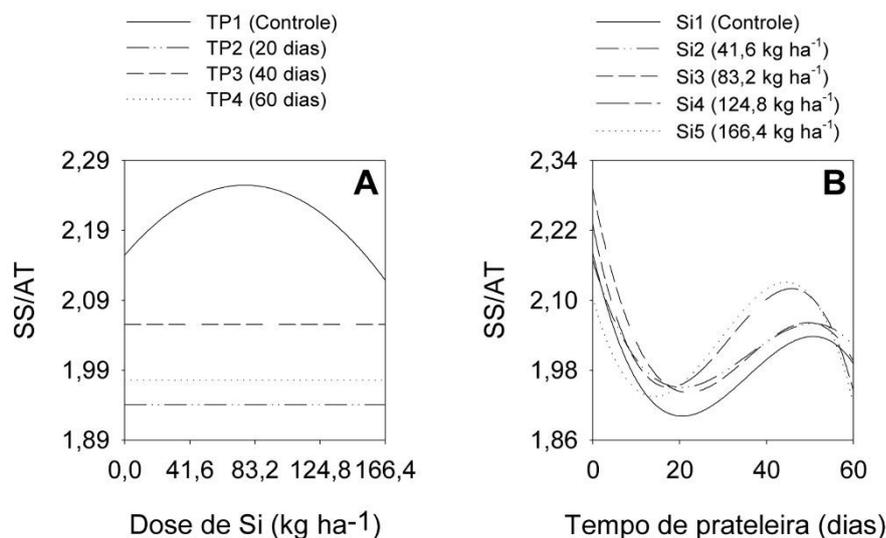
lado, a relação SS/AT basal foi de 1,89; atingiu a máxima de 1,95, aos 24,3 dias de vida de prateleira, e caiu a 1,83 aos 60 dias. Nos primeiros dias de prateleira, observou-se que os níveis de salinidade A2 e A3 exibiram valores de SS/AT mais baixos do que os valores ocorridos no nível de salinidade controle A1, evidenciando maior consumo de açúcares em relação aos ácidos tituláveis nesses tratamentos. Em contraste, no nível de salinidade A4, apesar dos valores observados serem inferiores, em relação ao tratamento controle, observou-se que o tempo de prateleira causou aumento da SS/AT da cebola, sugerindo preponderância no consumo de ácidos orgânicos tituláveis em comparação aos açúcares componentes de SS. Portanto, esses resultados evidenciam consumo de ácidos orgânicos na regulação do redox celular dos bulbos de cebola nos níveis de salinidade alta, como discutido nos tópicos anteriores.

O desdobramento de DS, dentro de cada nível de TP, mostrou que os efeitos do aumento da dose de Si sobre as relações SS/AT dos bulbos de cebola foram: significativo em TP1; não significativo em TP2, TP3 e TP4. Em TP1, as respostas de SS/AT às doses de Si ajustaram-se ao modelo quadrático, sendo o valor máximo igual a 2,25, com a dose de 76,9 kg ha<sup>-1</sup> de Si. Nos níveis TP2, TP3 e TP4, os valores foram, em média, 1,94, 2,06 e 1,98, respectivamente (Figura 17A).

O aumento da relação SS/AT dos bulbos, em função do fornecimento de Si, em TP1, possivelmente se deveu às melhorias nos metabolismos de: carboidratos e ajuste osmótico das plantas de cebola, sob condições de salinidade. Trabalhos anteriores relataram aumento na concentração de açúcares solúveis e regulação osmótica em plantas tratadas com Si, sob condições de estresses salino e hídrico (PEI et al., 2010; ZHU et al., 2015; ZHU et al., 2019). Entretanto, neste experimento o efeito significativo do fornecimento de Si sobre a SS/AT dos bulbos foi restrito ao nível de tempo de prateleira TP1 (colheita), e a ausência desse efeito, nos níveis TP2, TP3 e TP4, nos leva a especular sobre possível efeito transitório dos açúcares solúveis em bulbos de cebola, para fins de regulação osmótica das plantas, no período fenológico. Curiosamente, Zhu et al. (2015) verificaram que o aumento da concentração de açúcares solúveis em plantas de pepino ocorreu no sistema radicular e foi acompanhado de regulação positivada da expressão do gene aquaporina mediada por Si. Contudo, mais estudos são necessários para entender completamente o efeito do Si na regulação de mecanismos relacionados ao metabolismo dos açúcares e controle osmótico na cebola em pré e pós-colheita.

O desdobramento de TP, dentro de DS, mostrou que o aumento do tempo de prateleira reduziu cubicamente a SS/AT dos bulbos de cebola, dependendo da dose de Si aplicada (Figura 17B). Nos níveis Si1, Si2, Si3, Si4 e Si5, as relações SS/AT foram máximas no início do período de prateleira, sendo 2,18, 2,17, 2,29, 2,23 e 2,11, caindo a 1,90, 1,95, 1,94, 1,95 e 1,93 aos 20,6,

20,4, 21,5, 17,6 e 14,2 dias de prateleira e aumentando para 2,04, 2,06, 2,06, 2,12 e 2,13, aos 50,7, 50,6, 49,5, 45,7 e 44,5 dias; reduziram aos mínimos e 1,99, 2,02, 2,00, 1,95 e 1,92 aos 60 dias, respectivamente. Essas respostas de SS/AT seguiram o fluxo de consumo de AS total durante a vida de prateleira da cebola, sendo estas variáveis positivamente correlacionadas entre si, pelo teste de Pearson ( $P < 0,01$ ) (dados não apresentados).



**A**  $\hat{SS}/AT(TP1) = 2,1545 + 2,6054E^{-3}DOSE - 1,6948E^{-5}DOSE^2, R^2 = 0,6576;$   
 $\hat{SS}/AT(TP2) = 1,9408^{ns};$   
 $\hat{SS}/AT(TP3) = 2,0554^{ns};$   
 $\hat{SS}/AT(TP4) = 1,9759^{ns};$

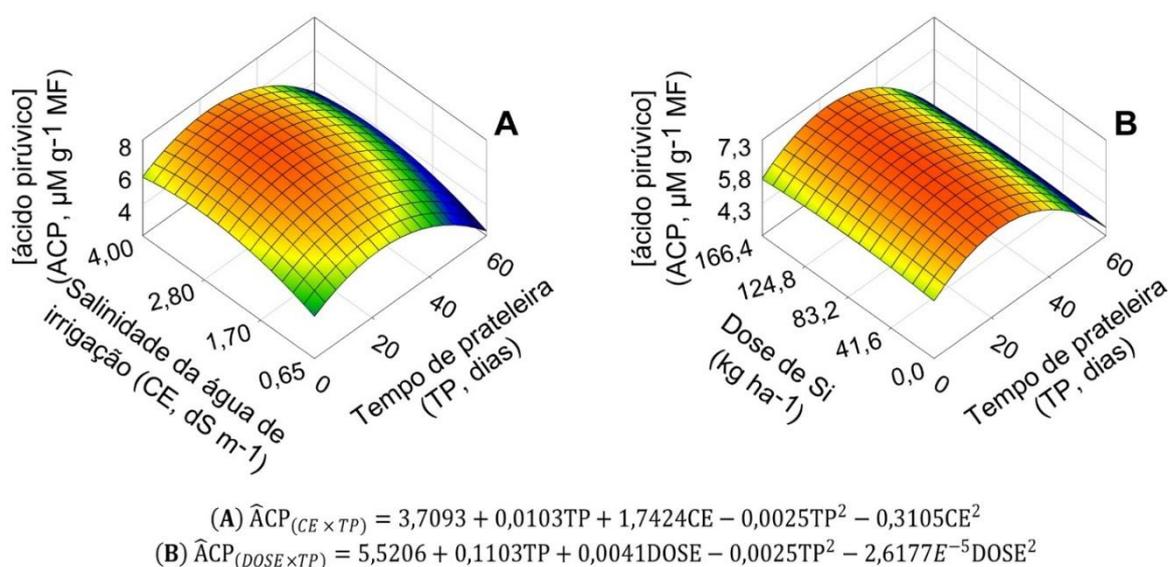
**B**  $\hat{SS}/AT(Si1) = 2,1806 - 0,0314TP + 1,0703E^{-3}TP^2 - 1,0000E^{-5}TP^3, R^2 = 1,0;$   
 $\hat{SS}/AT(Si2) = 2,1688 - 0,0247TP + 8,4688E^{-4}TP^2 - 7,9427E^{-6}TP^3, R^2 = 1,0;$   
 $\hat{SS}/AT(Si3) = 2,2913 - 0,0374TP + 1,2281E^{-3}TP^2 - 1,1458E^{-5}TP^3, R^2 = 1,0;$   
 $\hat{SS}/AT(Si4) = 2,2306 - 0,0365TP + 1,4391E^{-3}TP^2 - 1,5156E^{-5}TP^3, R^2 = 1,0;$   
 $\hat{SS}/AT(Si5) = 2,1050 - 0,0268TP + 1,2430E^{-3}TP^2 - 1,4115E^{-5}TP^3, R^2 = 1,0;$

**Figura 17. Efeito da interação entre os níveis de dose de Si (DS) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a variável SS/AT, em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

### 3.3.5 Concentração dos ácidos pirúvico e ascórbico

As ANOVA's das concentrações dos ácidos pirúvico (ACP) e ascórbico (AsA) mostraram efeitos significativos de interação entre os fatores de tratamento CE, DS e TP.

As respostas de ACP aos tratamentos CE×TP e DS×TP ajustaram-se ao modelo tridimensional parabólico, exibindo as máximas concentrações de 6,93 e 6,75  $\mu\text{M g}^{-1}$  de MF, com as CE e DS de 2,81 dS  $\text{m}^{-1}$  e 78,3  $\text{kg ha}^{-1}$  de Si, ambas aos 22,1 dias de vida de prateleira, respectivamente (Figura 18: A e B).



**Figura 18. Desdobramento dos fatores de tratamento salinidade da água de irrigação (CE) (A) e dose de silício (Si) (B), com tempo de prateleira (TP), para a variável concentração de ácido pirúvico (ACP,  $\mu\text{M g}^{-1}$  de MF), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

Os aumentos de ACP nos bulbos de cebola pós-colheita evidenciam alterações significativas no metabolismo do enxofre (S) nas plantas de cebola, em função de condições pré-colheita de aumentos de salinidade e de adubação com Si. As modulações de atividades e expressões gênicas de enzimas controladoras de taxa no metabolismo de assimilação e absorção de S nas plantas por estresse de salinidade foram relatadas anteriormente (KHAN et al., 2014). Além disso, foi identificado que o suprimento de Si altera o metabolismo do S em diferentes espécies de plantas, causando aumentos na absorção do S e regulando a síntese de aminoácidos e poliaminas envolvidos na resposta e tolerância ao estresse (ALI et al., 2018; MAILLARD et al., 2018). A defesa antioxidante relacionada ao ciclo AsA-GSH depende das vias metabólicas do S (RÉTHORÉ et al., 2020). Os domínios moleculares contendo tiol são, direta ou indiretamente, oxidados por ERO, gerando produtos de oxidação relativamente mais estáveis, com conformações físicas e/ou atividades bioquímicas modificadas. Além disso, espécies químicas de S-cisteína (S-Cys) oxidadas, incluindo o ácido sulfênico, Cys glutationilada, grupos sulfenilamida e ligações sulfúrico metálicas, são particularmente importantes na sinalização redox e na regulação do metabolismo de ERO, causando efeitos diretos em moléculas de proteínas, fatores de transcrição e níveis de expressão gênica (FOYER; NOCTOR, 2005). Curiosamente, nossos resultados mostraram que a salinidade e o suprimento de Si aumentaram significativamente a concentração de compostos sulfurosos nos bulbos de cebola pós-colheita, até certo ponto, como evidenciado pelo aumento na concentração de ACP.

O aumento de ACP, nos primeiros dias de vida de prateleira, e sua conseguinte redução após 22,1 dias podem se dever aos efeitos de concentração e degradação dos compostos sulfurosos precursores de ácido pirúvico nos bulbos de cebola, uma vez que observamos as seguintes correlações entre ACP: negativa com a perda de massa e positiva com SS e AT, isto é, os substratos do catabolismo respiratório dos bulbos de cebola (dados não apresentados).

As respostas de AsA dos bulbos de cebola aos tratamentos CE, DS e TP apresentaram ajustes lineares diferenciais dentro de seus desdobramentos (Figuras 19 e 20).

Os desdobramentos de CE, dentro de cada TP, mostraram que o aumento da salinidade da água de irrigação aumentou a AsA dos bulbos de cebola, dependendo do tempo de prateleira da cebola (Figura 19A). Em TP1, não houve efeito significativo do aumento da CE sobre a concentração de AsA nos bulbos, sendo, em média, 33,23 mg 100g<sup>-1</sup> de MF. Em TP2, partindo da AsA inicial de 42,21 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, o aumento de cada unidade de CE causou aumento linear de 24,43% na concentração de AsA dos bulbos. Em TP3, partindo da AsA inicial de 36,76 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, o aumento de CE causou aumento linear de 4,99% na concentração. Em TP4, partindo da AsA inicial de 54,44 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, o aumento de CE causou aumento linear de 4,50% na concentração.

O AsA é um antioxidante não enzimático e tampão redox de muitos processos biológicos, incluindo fotossíntese, desintoxicação de ERO e eliminação de moléculas radicais (FOYER; NOCTOR, 2005; DO et al., 2016; SHARMA et al., 2016; AKRAM et al., 2017; CAO et al., 2017; SHARMA et al., 2017; ISHIKAWA; MARUTA et al., 2018; YOSHIMURA; ISHIKAWA, 2017). Existem fortes evidências de que a biossíntese de AsA é regulada por condições ambientais adversas, incluindo estresse de salinidade (AKRAM et al., 2017; CAO; DU et al., 2017; WANG et al., 2018). O AsA pode eliminar diretamente as moléculas de O<sub>2</sub><sup>•-</sup>, <sup>•</sup>OH, <sup>1</sup>O<sub>2</sub> ou reagir com radicais gerados biologicamente, como o tocoferoxil (isto é, regeneração de tocoferóis) e o alcóxil/peróxil. Além disso, o AsA pode reduzir as moléculas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O, atuando como cofator nas reações peroxidativas de Mehler, catalisadas pela ascorbato peroxidase (APX). Adicionalmente, foi relatado que o AsA atua na extinção do excesso de energia das moléculas de <sup>3</sup>Chl e <sup>1</sup>O<sub>2</sub>, como um cofator na reação catalítica da violaxantina de-epoxidase (VDE), que faz a conversão da violaxantina em zeaxantina (ESKLING et al., 1997; GIORGIA et al., 2010; CHANG et al., 2017; SMIRNOFF, 2018; GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2019). A razão pela qual não houve resposta significativa de AsA ao aumento de salinidade, em TP1, possivelmente foi a diluição do AsA nos bulbos ainda entumecidos na fase de colheita, não permitindo a detecção de variâncias significativas pelo teste adotado. Contudo, as médias obtidas em TP1 mostraram leve aumento de AsA (não

significativo), em função do aumento da salinidade, enquanto as concentrações de AsA observadas em TP2, TP3 e TP4 exibiram aumentos lineares. Não obstante, os teores de AsA exibiram correlação positiva com a perda de massa dos bulbos.

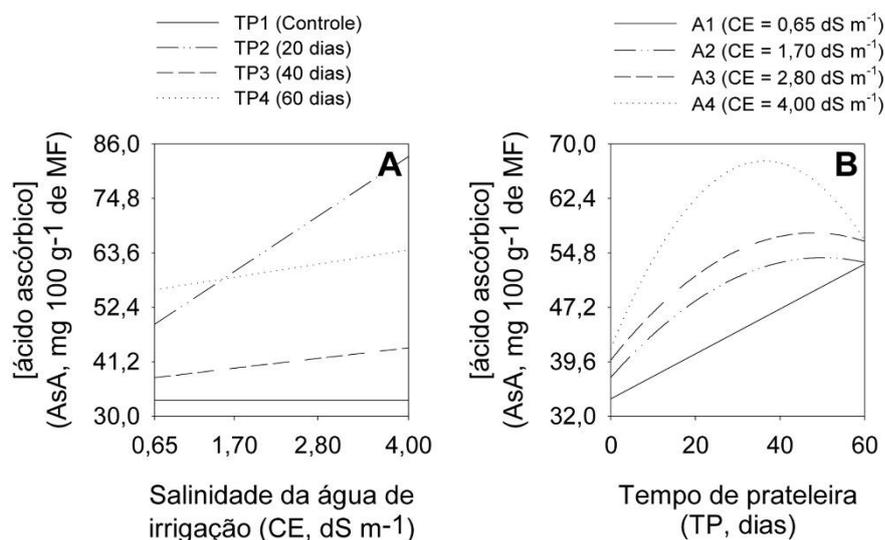
O desdobramento de TP, dentro de CE, mostrou que o aumento do tempo de prateleira aumentou a AsA dos bulbos de cebola, dependendo do nível de salinidade da água (Figura 19B). Em A1, partindo da AsA inicial de 34,40 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, o aumento de TP causou aumento linear de 0,91% na concentração. Em A2, o aumento de CE causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máximo AsA de 54,13 mg 100g<sup>-1</sup> de MF aos 50 dias de prateleira. Em A3, o aumento de CE causou aumento quadrático na AsA, atingindo o máximo AsA de 57,59 mg 100g<sup>-1</sup> de MF aos 47,7 dias de prateleira. Em A4, o aumento de CE causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máximo AsA de 67,63 mg 100g<sup>-1</sup> de MF aos 36,4 dias de prateleira.

O efeito de concentração de AsA devido à perda de massa foi uma resposta característica no tratamento controle (A1), evidenciando que o *pool* de AsA produzido foi suficiente para suportar as reações envolvidas nos processos naturais de senescência e amadurecimento. Por outro lado, nos tratamentos com salinidade, A2, A3 e A4, embora tenham ocorrido aumentos nos *pools* de AsA, houve também degradação de AsA no final do período de vida de prateleira. Além disso, o aumento da salinidade reduziu a vida de prateleira de AsA, evidenciando que a salinidade aumentou o consumo de AsA, possivelmente em virtude do aumento de reações relacionadas ao metabolismo de manutenção do redox celular e de catalisação de ERO e moléculas radicais geradas biologicamente.

O desdobramento de DS, dentro de TP, mostrou que o aumento da dose de Si aumentou a AsA dos bulbos de cebola, dependendo do tempo de prateleira da cebola (Figura 20A). Em TP1, não houve efeito significativo do aumento da DS sobre a concentração da AsA nos bulbos, sendo, em média, 33,23 mg 100g<sup>-1</sup> de MF. Em TP2, partindo da AsA inicial de 61,38 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, o aumento de cada DS causou aumento linear de 0,0863% na concentração. Em TP3, partindo da AsA inicial de 38,45 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, o aumento de cada DS causou aumento linear de 0,0785% na concentração de AsA. Em TP4, o aumento da DS aumentou a concentração de AsA nos bulbos, até o máximo de 61,17 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, com a dose de 71,3 kg ha<sup>-1</sup>.

Estudos conduzidos em *Acácia gerrardii* Benth e *Triticum aestivum*, sob estresse salinidade e suprimento de Si, mostraram melhorias significativas nos teores de AsA devido ao suprimento de Si (AL-HUQAIL et al., 2017; SAQIB; ZÖRB; SCHUBERT, 2008). Segundo Al-Huqail et al. (2017), a melhoria na defesa antioxidante mediada por Si foi apoiada pela

modulação na atividade enzimática (incluindo SOD, POD, CAT, APX e GR) e pela biossíntese de antioxidantes não enzimáticos, incluindo ácido ascórbico, prolina e glicina betaína. Nesta pesquisa, verificou-se que o aumento das doses de Si causou aumento da concentração de AsA dos bulbos de cebola somente nos tempos de prateleira de 20, 40 e 60 dias.



**A**  $\hat{A}sA$  (TP1) = 33,2581<sup>ns</sup>;  
 $\hat{A}sA$  (TP2) = 42,2053 + 10,3112CE,  $R^2 = 0,9768$ ;  
 $\hat{A}sA$  (TP3) = 36,7593 + 1,8360CE,  $R^2 = 0,7957$ ;  
 $\hat{A}sA$  (TP4) = 54,4445 + 2,4484CE,  $R^2 = 0,9429$ ;

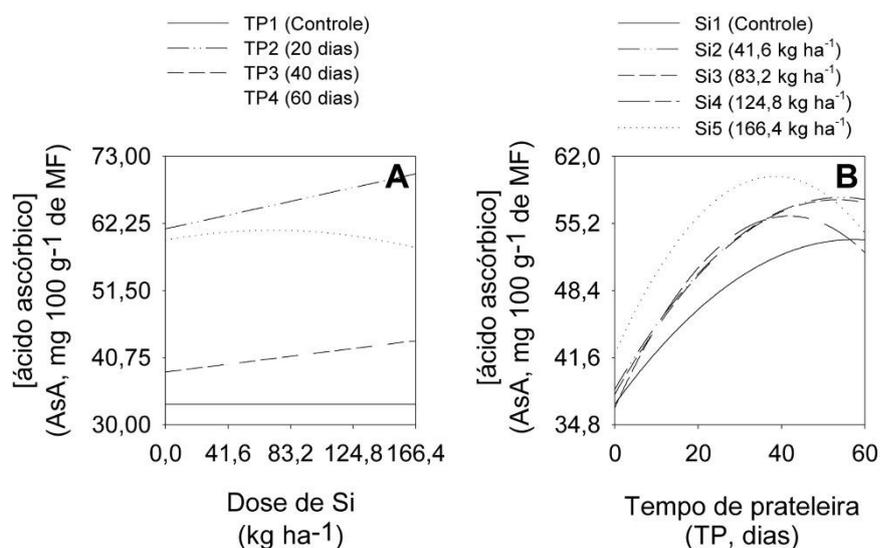
**B**  $\hat{A}sA$  (A1) = 34,3972 + 0,3136TP,  $R^2 = 0,4890$ ;  
 $\hat{A}sA$  (A2) = 37,3882 + 0,6697TP - 6,6969E<sup>-3</sup>TP<sup>2</sup>,  $R^2 = 0,3607$ ;  
 $\hat{A}sA$  (A3) = 39,7976 + 0,7456TP - 7,8122E<sup>-3</sup>TP<sup>2</sup>,  $R^2 = 0,2463$ ;  
 $\hat{A}sA$  (A4) = 41,4277 + 1,4408TP - 1,9809E<sup>-2</sup>TP<sup>2</sup>,  $R^2 = 0,2408$ ;

**Figura 19.** Efeito da interação entre os níveis de salinidade da água de irrigação (CE) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a concentração de ácido ascórbico (AsA), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.

O desdobramento de TP, dentro de DS, mostrou que o aumento do tempo de prateleira aumentou quadraticamente a AsA dos bulbos de cebola, dependendo da dose aplicada (Figura 20B). Em Si1, o aumento de TP causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máxima AsA de 53,56 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, aos 57,5 dias de prateleira. Em Si2, o aumento de TP causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máxima AsA de 57,84 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, aos 54,2 dias de prateleira. Em Si3, o aumento de TP causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máxima AsA de 57,60 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, aos 53,2 dias de prateleira. Em Si4, o aumento de TP causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máximo AsA de 55,95 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, aos 41,8 dias de prateleira. Em Si5, o aumento de TP causou aumento quadrático na AsA, atingindo a máximo AsA de 59,97 mg 100g<sup>-1</sup> de MF, aos 38,3 dias de prateleira.

Embora os níveis de AsA dos bulbos de cebola, em função do tempo de prateleira, tenham atingido topos mais altos com a elevação dos níveis de DS, observou-se que os topos

de AsA ocorreram em tempos de prateleira cada vez menores quanto mais alto o nível de DS. O papel da AsA na regulação da tolerância das plantas contra fatores de múltiplos estresses abióticos é amplamente conhecido, em muitas espécies (AKRAM et al., 2017; FAROOQ et al., 2020). Akram et al. (2017) relataram que o estado de redox do ascorbato e o nível do *pool* de AsA apoplástico afetam o equilíbrio hormonal das plantas, as cascatas de sinalização MAPK e as atividades enzimáticas antioxidantes, sendo, portanto, vitais na percepção do estresse ambiental, homeostase redox e regulação do estresse oxidativo e respostas físico-bioquímicas da planta. Entretanto, os mecanismos a montante pelos quais a salinidade e suprimento de Si podem regular as atividades e expressão dos componentes do sistema de defesa antioxidante em cebola, sob condições de armazenamento e nos processos de senescência e amadurecimento, ainda não são conhecidos. Contudo, outros estudos, como a descrição de perfis proteômicos, metabolômicos, identificação de genes e PCR no tempo, ainda são necessários para compreendermos melhor os mecanismos de sinalização e resposta às condições pré-colheita de estresse salino e suprimento de Si, em bulbos de cebola sob condição de armazenamento.



**A**  $\hat{A}sA$  (TP1) = 33,2581<sup>ns</sup>;  
 $\hat{A}sA$  (TP2) = 61,3839 + 5,2985E<sup>-2</sup>DOSE, R<sup>2</sup> = 0,5840;  
 $\hat{A}sA$  (TP3) = 38,4483 + 3,0179E<sup>-2</sup>DOSE, R<sup>2</sup> = 0,8852;  
 $\hat{A}sA$  (TP4) = 59,5834 + 4,4351E<sup>-2</sup>DOSE - 3,1090E<sup>-4</sup>DOSE<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> = 0,1759;

**B**  $\hat{A}sA$  (Si1) = 36,8720 + 0,5810TP - 5,0566E<sup>-3</sup>TP<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> = 0,2713;  
 $\hat{A}sA$  (Si2) = 38,3648 + 0,7184TP - 6,6258E<sup>-3</sup>TP<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> = 0,2833;  
 $\hat{A}sA$  (Si3) = 37,8626 + 0,7421TP - 6,9742E<sup>-3</sup>TP<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> = 0,3303;  
 $\hat{A}sA$  (Si4) = 36,4950 + 0,9319TP - 1,1161E<sup>-2</sup>TP<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> = 0,3586;  
 $\hat{A}sA$  (Si5) = 42,0178 + 0,9362TP - 1,2207E<sup>-2</sup>TP<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> = 0,2126;

**Figura 20. Efeito da interação entre os níveis de dose de Si (DS) (A) e tempo de prateleira (TP) (B) sobre a concentração de ácido ascórbico (AsA), em bulbos de cebola ‘Rio da Antas’. Mossoró-RN, Brasil, 2019.**

### 3.4 CONCLUSÕES

Os resultados da presente pesquisa mostram que o aumento da salinidade da água de irrigação e o tempo de prateleira reduzem a qualidade dos bulbos de cebola, causando redução da firmeza e maior perda de massa dos bulbos de cebola, ao passo que a adubação com Si não contribuiu significativamente para melhorar essas variáveis. Por outro lado, a salinidade e o Si não afetam significativamente a coloração da túnica dos bulbos de cebola, mostrando que a cebola cultivada sob tais condições ambientais podem ser encaminhadas ao mercado consumidor sem que haja aparente percepção negativa na recepção da *commodity*. Além disso, nossos estudos mostraram que o aumento da salinidade causa redução nos teores de açúcares e sólidos solúveis totais dos bulbos de cebola, bem como de pH e SS/AT, ao passo que aumenta as concentrações de ácidos tituláveis e de ácido pirúvico no decurso da vida de prateleira. Isso implica que os bulbos de cebola cultivados sob condições de salinidade podem exibir uma percepção de sabor mais adstringente e ácido ao consumidor, especialmente em casos de permanência prolongada sob a condição de prateleira. Em contraste, o aumento da adubação de Si com doses entre 121,8 e 127,0 kg ha<sup>-1</sup> contribui para aumentar os teores de açúcares e sólidos solúveis totais e reduzir a relação SS/AT, especialmente aos 20 dias de prateleira, havendo apenas leve aumento na concentração de ácido pirúvico. Isso implica que a adubação com Si pode melhorar as qualidades de sabor da cebola cultivada sob salinidade, promovendo melhor equilíbrio entre adstringência e doçura dos bulbos após o cozimento ou melhorando o fundo aromático de saladas e pratos culinários mediante aumento da expressão pungente. Embora a salinidade resulte em perdas de qualidade palatável nos bulbos de cebola, ela pode promover aumento na concentração de ácido ascórbico durante a vida de prateleira, até aproximadamente 36 dias de armazenamento. Adicionalmente, o aumento da adubação com Si, até a dose máxima de 166,4 kg ha<sup>-1</sup>, também promove aumento da concentração de ácido ascórbico nos bulbos durante a vida de prateleira, até aproximadamente 40 dias de armazenamento. Assim, tanto o aumento de salinidade da água de irrigação quanto o manejo da adubação com Si podem ser utilizados na cebola para fins de biofortificação de vitamina C. Portanto, nossos resultados podem ajudar na definição de diretrizes de fertilização com Si no cultivo da cebola sob condições de salinidade, focando no desenvolvimento de novos mercados baseados na qualidade dos produtos e de vida dos consumidores.

### 3.5 AGRADECIMENTOS

O autor agradece à CAPES (Processo 8888.182041/2018-01); à Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) e ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia (PGFITO), pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa e pelas bolsas de estudo.

### REFERÊNCIAS

ABDOU, R.; BAKASSO, Y.; ADAM, T.; SAADOU, M. *et al.* Biology, diversity and tools for diversity analysis of the onion (*Allium cepa* L.). A review. **Biotechnologie Agronomie Societe Et Environnement**, 19, n. 2, p. 184-196, 2015. Article.

AGUIAR NETO, P.; GRANGEIRO, L. C.; MENDES, A. M. S.; COSTA, N. D. *et al.* Crescimento e acúmulo de macronutrientes na cultura da cebola em Baraúna (RN) e Petrolina (PE). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18, n. 4, p. 370-380, 2014.

AHMAD, P.; AHANGER, M. A.; ALYEMENI, M. N.; WIJAYA, L. *et al.* Mitigation of sodium chloride toxicity in *Solanum lycopersicum* L. by supplementation of jasmonic acid and nitric oxide. **Journal of Plant Interactions**, 13, n. 1, p. 64-72, 2018.

AKRAM, N. A.; SHAFIQ, F.; ASHRAF, M. Ascorbic acid - A potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. **Frontiers in plant science**, 8, n. 613, 2017. Review.

AL-HUQAIL, A. A.; ALQARAWI, A. A.; HASHEM, A.; AHMAD MALIK, J. *et al.* Silicon supplementation modulates antioxidant system and osmolyte accumulation to balance salt stress in *Acacia gerrardii* Benth. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 2017/11/24/ 2017.

ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. Regulatory Role of Silicon in Mediating Differential Stress Tolerance Responses in Two Contrasting Tomato Genotypes Under Osmotic Stress. **Frontiers in plant science**, 9, n. 1475, 2018-October-08 2018. Original Research.

AMAL, A.; ALY, A. Alteration of some secondary metabolites and enzymes activity by using exogenous antioxidant compound in onion plants growth under seawater salt stress. **American Eurasian Journal of Science Research**, 3, p. 139-146, 2008.

ANJUM, A.; BARMON, B. K. Profitability and Comparative Advantage of Onion (*Allium cepa*) Production in Bangladesh: An Economic Study in Some Selected Areas. **The Agriculturists**, 15, n. 2, p. 66-78, 2017.

BEHAIRY, A. G.; MAHMOUD, A. R.; SHAFEEK, M.; ALI, A. H. *et al.* Growth, yield and bulb quality of onion plants (*Allium cepa* L.) as affected by foliar and soil application of potassium. **Middle East Journal of Agriculture Research**, 4, n. 1, p. 60-66, 2015.

BENKEBLIA, N.; SHIOMI, N. Chilling effect on soluble sugars, respiration rate, total phenolics, peroxidase activity and dormancy of onion bulbs. **Scientia Agricola**, 61, n. 3, p. 281-285, 2004-06 2004.

BYBORDI, A.; SAADAT, S.; ZARGARIPOUR, P. The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 64, n. 4, p. 520-530, 2018.

CAO, S.; DU, X. H.; LI, L. H.; LIU, Y. D. *et al.* Overexpression of *Populus tomentosa* cytosolic ascorbate peroxidase enhances abiotic stress tolerance in tobacco plants. **Russian Journal of Plant Physiology**, 64, n. 2, p. 224-234, 2017.

CARMO FILHO, F.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. **Dados climatológicos de Mossoró: um município semi-árido nordestino**. Mossoró: ESAM, 1991. 121p p.

CHANG, H.-Y.; LIN, S.-T.; KO, T.-P.; WU, S.-M. *et al.* Enzymatic characterization and crystal structure analysis of *Chlamydomonas reinhardtii* dehydroascorbate reductase and their implications for oxidative stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, 120, p. 144-155, 2017.

CHANG, P.-T.; RANDLE, W. M. Sodium Chloride Timing and Length of Exposure Affect Onion Growth and Flavor. **Journal of Plant Nutrition**, 28, n. 10, p. 1755-1766, 2005/10/01 2005.

CHAUHAN, C. P. S.; SHISODIA, P. K.; MINHAS, P. S.; CHAUHAN, R. S. Response of onion (*Allium cepa*) and garlic (*Allium sativum*) to irrigation with different salinity waters with or without mitigating salinity stress at seedling establishment stage. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, 77, n. 8, p. 483-485, Aug 2007. Article.

CHEN, S.; WU, F.; LI, Y.; QIAN, Y. *et al.* NtMYB4 and NtCHS1 are critical factors in the regulation of flavonoid biosynthesis and are involved in salinity responsiveness. **Frontiers in plant science**, 10, n. 178, 2019. Original Research.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2.ed revisada e ampliada ed. Lavras: UFLA, 2005. 785 p. 85-87692-27-5.

CHOPE, G. A.; TERRY, L. A.; WHITE, P. J. Effect of controlled atmosphere storage on abscisic acid concentration and other biochemical attributes of onion bulbs. **Postharvest Biology and Technology**, 39, n. 3, p. 233-242, 2006/03/01/ 2006.

COCA, C. A.; CARRANZA, C. E.; MIRANDA, D.; RODRÍGUEZ, M. H. Efecto del NaCl sobre los parámetros de crecimiento, rendimiento y calidad de la cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) bajo condiciones controladas. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, 6, n. 2, p. 196-212, 2012.

COOLONG, T. W.; RANDLE, W. M.; WICKER, L. Structural and chemical differences in the cell wall regions in relation to scale firmness of three onion (*Allium cepa* L.) selections at harvest and during storage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 88, n. 7, p. 1277-1286, 2008/05/01 2008. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3219>.

DÍAZ-PÉREZ, J. C. Chapter 8 - Transpiration. *In*: YAHIA, E. M. (Ed.). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**: Woodhead Publishing, 2019. p. 157-173.

DO, H.; KIM, I.-S.; JEON, B. W.; LEE, C. W. *et al.* Structural understanding of the recycling of oxidized ascorbate by dehydroascorbate reductase (OsDHAR) from *Oryza sativa* L. *japonica*. **Scientific Reports**, 6, n. 1, p. 19498, 2016.

DOWNES, K.; CHOPE, G. A.; TERRY, L. A. Effect of curing at different temperatures on biochemical composition of onion (*Allium cepa* L.) skin from three freshly cured and cold stored UK-grown onion cultivars. **Postharvest Biology and Technology**, 54, n. 2, p. 80-86, 2009/11/01/ 2009.

EL-BAKY, A.; HANAA, H.; AMAL, A.; HUSSEIN, M. Influence of salinity on lipid peroxidation, antioxidant enzymes and electrophoretic patterns of protein and isoenzymes in leaves of some onion cultivars. **Asian J. Plant Sci**, 2, n. 17-24, p. 1220-1227, 2003.

ESHEL, D.; TEPER-BAMNOLKER, P.; VINOKUR, Y.; SAAD, I. *et al.* Fast curing: A method to improve postharvest quality of onions in hot climate harvest. **Postharvest Biology and Technology**, 88, p. 34-39, 2014/02/01/ 2014.

ESKLING, M.; ARVIDSSON, P.-O.; ÅKERLUND, H.-E. The xanthophyll cycle, its regulation and components. **Physiologia Plantarum**, 100, n. 4, p. 806-816, 1997.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, 147, p. 881-896, 2018.

FAROOQ, A.; BUKHARI, S. A.; AKRAM, N. A.; ASHRAF, M. *et al.* Exogenously Applied Ascorbic Acid-Mediated Changes in Osmoprotection and Oxidative Defense System Enhanced Water Stress Tolerance in Different Cultivars of Safflower (*Carthamus tinctorious* L.). **Plants**, 9, n. 1, 2020.

FERRÓN-CARRILLO, F.; URRESTARAZU, M. Effects of Si in nutrient solution on leaf cuticles. **Scientia horticulturae**, 278, p. 109863, 2021/02/27/ 2021.

FLECK, A. T.; SCHULZE, S.; HINRICHS, M.; SPECHT, A. *et al.* Silicon Promotes Exodermal Casparian Band Formation in Si-Accumulating and Si-Excluding Species by Forming Phenol Complexes. **PLOS ONE**, 10, n. 9, p. e0138555, 2015.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005.

FOYER, C. H.; RUBAN, A. V.; NOCTOR, G. Viewing oxidative stress through the lens of oxidative signalling rather than damage. **Biochemical Journal**, 474, n. 6, p. 877-883, 2017.

GALINDO, F. G.; HERPPICH, W.; GEKAS, V.; SJÖHOLM, I. Factors Affecting Quality and Postharvest Properties of Vegetables: Integration of Water Relations and Metabolism. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 44, n. 3, p. 139-154, 2004/05/01 2004.

GARCÍA-CAPARRÓS, P.; HASANUZZAMAN, M.; LAO, M. T. Oxidative Stress and Antioxidant Defense in Plants Under Salinity. *In*: HASANUZZAMAN, M.; FOTOPOULOS, V., *et al* (Ed.). **Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2019. cap. 12, p. 291-309.

GIORGIA, S.; GIORGETTI, A.; FUFUZAN, C.; GIACOMETTI, G. M. *et al*. Mutation analysis of violaxanthin de-epoxidase identifies substrate-binding sites and residues involved in catalysis. **Journal of Biological Chemistry**, 285, n. 31, p. 23763-23770, 2010.

HANCI, F.; CEBECI, E.; UYSAL, E.; DASGAN, H. Effects of salt stress on some physiological parameters and mineral element contents of onion (*Allium cepa* L.) plants. **Acta horticulturae**, n. 1143, p. 179-186, 2016.

HASEGAWA, P. M. Sodium (Na<sup>+</sup>) homeostasis and salt tolerance of plants. **Environmental and Experimental Botany**, 92, p. 19-31, 2013.

HONG, P. N.; LEE, C. Roles of Pectin Methylsterases and Pectin Methylsterase Inhibitors in Plant Physiology. **Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences**, 29, n. 1, p. 1-17, 2017.

HU, M.; SHI, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y. *et al*. Effects of exogenous glucose on seed germination and antioxidant capacity in wheat seedlings under salt stress. **Plant Growth Regulation**, 68, n. 2, p. 177-188, 2012.

IGAMBERDIEV, A. U.; BYKOVA, N. V. Role of organic acids in the integration of cellular redox metabolism and mediation of redox signalling in photosynthetic tissues of higher plants. **Free Radical Biology and Medicine**, 122, p. 74-85, 2018/07/01/ 2018.

IGAMBERDIEV, A. U.; EPRINTSEV, A. T. Organic Acids: The Pools of Fixed Carbon Involved in Redox Regulation and Energy Balance in Higher Plants. **Frontiers in plant science**, 7, n. 1042, 2016-July-15 2016. Review.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p. Disponível em: <http://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodos-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos>. Acesso em: 16/10/2020.

ISHIKAWA, T.; MARUTA, T.; YOSHIMURA, K.; SMIRNOFF, N. Biosynthesis and regulation of ascorbic acid in plants. *In*: GUPTA, D. K.; PALMA, J. M., *et al* (Ed.). **Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 163-179.

KHAN, N. A.; KHAN, M. I. R.; ASGHER, M.; FATMA, M. *et al*. Salinity tolerance in plants: revisiting the role of sulfur metabolites. **J Plant Biochem Physiol**, 2, n. 120, p. 2-8, 2014.

KHANNA-CHOPRA, R.; SEMWAL, V. K.; LAKRA, N.; PAREEK, A. 5 proline – a key regulator conferring plant tolerance to salinity and drought. *In*: HASANUZZAMAN, M.; FUJITA, M., *et al* (Ed.). **Plant tolerance to environmental stress: role of phytoprotectants**. Boca Raton, FL: CRC Press: Taylor & Francis Group, 2019. p. 59-80.

KO, E. Y.; NILE, S. H.; SHARMA, K.; LI, G. H. *et al.* Effect of different exposed lights on quercetin and quercetin glucoside content in onion (*Allium cepa* L.). **Saudi Journal of Biological Sciences**, 22, n. 4, p. 398-403, 2015/07/01/ 2015.

KUMAR, S.; SOUKUP, M.; ELBAUM, R. Silicification in grasses: variation between different cell types. **Frontiers in plant science**, 8, n. 438, 2017. Mini Review.

KUREPIN, L. V.; IVANOV, A. G.; ZAMAN, M.; PHARIS, R. P. *et al.* Interaction of glycine betaine and plant hormones: protection of the photosynthetic apparatus during abiotic stress. *In*: HOU, H. J. M.; NAJAFPOUR, M. M., *et al.* (Ed.). **Photosynthesis: structures, mechanisms, and applications**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 185-202.

MADANI, B.; MIRSHEKARI, A.; IMAHORI, Y. Chapter 19 - Physiological Responses to Stress. *In*: YAHIA, E. M. (Ed.). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**: Woodhead Publishing, 2019. p. 405-423.

MAILLARD, A.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F. *et al.* Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, 155, p. 394-410, 2018/11/01/ 2018.

MARROCOS, S. D. E. T.; GRANGEIRO, L. C.; SOUSA, V. D. E. F. L. D. E.; RIBEIRO, R. M. P. *et al.* Potassium fertilization for optimization of onion production. **Revista Caatinga**, 31, n. 2, p. 379-384, 2018.

MAW, B. W.; MULLINIX, B. G. Moisture loss of sweet onions during curing. **Postharvest Biology and Technology**, 35, n. 2, p. 223-227, 2005/02/01/ 2005.

MELONI, D. A.; OLIVA, M. A.; MARTINEZ, C. A.; CAMBRAIA, J. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, 49, n. 1, p. 69-76, 2003.

MEYER, A. J.; HELL, R. Glutathione homeostasis and redox-regulation by sulfhydryl groups. **Photosynthesis Research**, 86, n. 3, p. 435-457, 2005.

MICHELI, F. Pectin methylesterases: cell wall enzymes with important roles in plant physiology. **Trends in Plant Science**, 6, n. 9, p. 414-419, 2001/09/01/ 2001.

NG, A.; PARKER, M. L.; PARR, A. J.; SAUNDERS, P. K. *et al.* Physicochemical Characteristics of Onion (*Allium cepa* L.) Tissues. **Journal of agricultural and food chemistry**, 48, n. 11, p. 5612-5617, 2000/11/01 2000.

OBATA, T.; GEIGENBERGER, P.; FERNIE, A. R. Redox control of plant energy metabolism: The complex intertwined regulation of redox and metabolism in plant cells. **The Biochemist**, 37, n. 1, p. 14-18, 2015.

OHANENYE, I. C.; ALAMAR, M. C.; THOMPSON, A. J.; TERRY, L. A. Fructans redistribution prior to sprouting in stored onion bulbs is a potential marker for dormancy break. **Postharvest Biology and Technology**, 149, p. 221-234, 2019/03/01/ 2019.

PATHAK, C. S. Hybrid Seed Production in Onion. **Journal of New Seeds**, 1, n. 3-4, p. 89-108, 2000/04/30 2000.

PEI, Z. F.; MING, D. F.; LIU, D.; WAN, G. L. *et al.* Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, 29, n. 1, p. 106-115, 2010/03/01 2010.

PETROPOULOS, S. A.; FERNANDES, Â.; BARROS, L.; FERREIRA, I. C. F. R. *et al.* Morphological, nutritional and chemical description of “Vatikiotiko”, an onion local landrace from Greece. **Food Chemistry**, 182, p. 156-163, 2015/09/01/ 2015.

RADY, M. O. A.; SEMIDA, W. M.; ABD EL-MAGEED, T. A.; HEMIDA, K. A. *et al.* Up-regulation of antioxidative defense systems by glycine betaine foliar application in onion plants confer tolerance to salinity stress. **Scientia horticulturae**, 240, p. 614-622, 2018/10/20/ 2018.

RÉTHORÉ, E.; ALI, N.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. Silicon Regulates Source to Sink Metabolic Homeostasis and Promotes Growth of Rice Plants under Sulfur Deficiency. **International Journal of Molecular Sciences**, 21, n. 10, 2020.

RICCIARDI, L.; MAZZEO, R.; MARCOTRIGIANO, A. R.; RAINALDI, G. *et al.* Assessment of Genetic Diversity of the “Acquaviva Red Onion” (*Allium cepa* L.) Apulian Landrace. **Plants**, 9, n. 2, 2020.

RIZWAN, M.; ALI, S.; IBRAHIM, M.; FARID, M. *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 22, n. 20, p. 15416-15431, 2015.

ROSE, J. K. C.; CATALÁ, C.; GONZALEZ-CARRANZA, Z. H.; ROBERTS, J. A. Cell Wall Disassembly. *In: Annual Plant Reviews online: The Plant Cell Wall*: Wiley Online, 2018. v. 8, p. 264-324. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119312994.apr0075>.

RUIZ-SOLA, M. Á.; ARBONA, V.; GÓMEZ-CADENAS, A.; RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, M. *et al.* A root specific Induction of carotenoid biosynthesis contributes to ABA production upon salt stress in Arabidopsis. **PLOS ONE**, 9, n. 3, p. e90765, 2014.

SAFAR, A.; WYATT, H. L.; MIHAI, L. A. Debonding of cellular structures under shear deformation. *In: 25th Conference of the UK Association for Computational Mechanics, 2017*, University of Birmingham, Birmingham, UK. 11-13 April 2017. Disponível em: <http://orca.cf.ac.uk/98636/>. Acesso em: 21/01/2021.

SALTVEIT, M. E. Chapter 4 - Respiratory Metabolism. *In: YAHIA, E. M. (Ed.). Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*: Woodhead Publishing, 2019. p. 73-91.

SAMI, F.; YUSUF, M.; FAIZAN, M.; FARAZ, A. *et al.* Role of sugars under abiotic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, 109, p. 54-61, 2016.

SAQIB, M.; ZÖRB, C.; SCHUBERT, S. Silicon-mediated improvement in the salt resistance of wheat (*Triticum aestivum*) results from increased sodium exclusion and resistance to oxidative stress. **Functional Plant Biology**, 35, n. 7, p. 633-639, 2008.

SCHWIMMER, S.; WESTON, W. J. Onion Flavor and Odor, Enzymatic Development of Pyruvic Acid in Onion as a Measure of Pungency. **Journal of agricultural and food chemistry**, 9, n. 4, p. 301-304, 1961/07/01 1961.

SEMIDA, W. M.; ABDELKHALIK, A.; RADY, M. O. A.; MAREY, R. A. *et al.* Exogenously applied proline enhances growth and productivity of drought stressed onion by improving photosynthetic efficiency, water use efficiency and up-regulating osmoprotectants. **Scientia horticulturae**, 272, p. 109580, 2020/10/15/ 2020.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, 2012, p. 217037, 2012.

SHARMA, P.; SHARMA, S. R.; DHALL, R. K.; MITTAL, T. C. Effect of  $\gamma$ -radiation on post-harvest storage life and quality of onion bulb under ambient condition. **Journal of food science and technology**, 57, n. 7, p. 2534-2544, 2020/07/01 2020.

SHARMA, S.; KIRAN, U.; SOPORY, S. K. Developing stress-tolerant plants by manipulating components involved in oxidative stress. *In*: ABDIN, M. Z.; KIRAN, U., *et al* (Ed.). **Plant Biotechnology: Principles and Applications**. Singapore: Springer Singapore, 2017. p. 233-248.

SHARMA, S.; SEHRAWAT, A.; DESWAL, R. Asada-Halliwell pathway maintains redox status in *Dioscorea alata* tuber which helps in germination. **Plant Science**, 250, p. 20-29, 2016.

SINGH, M.; KUMAR, J.; SINGH, S.; SINGH, V. P. *et al.* Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 14, n. 3, p. 407-426, 2015. journal article.

SMIRNOFF, N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. **Free Radical Biology and Medicine**, 122, p. 116-129, 2018.

SOHANY, M.; SARKER, M. K. U.; MAHOMUD, M. S. Physiological changes in red onion bulbs at different storage temperature. **World Journal of Engineering and Technology**, 4, n. 2, p. 261-266, 2016.

STROHECKER, R.; ZARAGOZA, F. M.; HENNING, H. M. **Analisis de vitaminas: métodos comprobados**. Madrid: Editorial Paz Montalvo, 1967. 428 p.

SZYMAŃSKA, P. K.; POLKOWSKA-KOWALCZYK, L.; LICHOCKA, M.; MASZKOWSKA, J. *et al.* SNF1-related protein kinases SnRK2.4 and SnRK2.10 modulate ROS homeostasis in plant response to salt stress. **International Journal of Molecular Sciences**, 20, n. 1, 2019.

TAKAHAMA, U. Oxidation of vacuolar and apoplastic phenolic substrates by peroxidase: Physiological significance of the oxidation reactions. **Phytochemistry Reviews**, 3, n. 1, p. 207-219, 2004/01/01 2004.

TAKAHASHI, Y.; TAHARA, M.; YAMADA, Y.; MITSUDOMI, Y. *et al.* Characterization of the polyamine biosynthetic pathways and salt stress response in *Brachypodium distachyon*. **Journal of Plant Growth Regulation**, 37, n. 2, p. 625-634, 2018.

VALLARINO, J. G.; OSORIO, S. Chapter 10 - Organic Acids. *In*: YAHIA, E. M. (Ed.). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**: Woodhead Publishing, 2019. p. 207-224.

VALVERDE-MIRANDA, D.; DÍAZ-PÉREZ, M.; GÓMEZ-GALÁN, M.; CALLEJÓN-FERRE, Á.-J. Total soluble solids and dry matter of cucumber as indicators of shelf life. **Postharvest Biology and Technology**, 180, p. 111603, 2021/10/01/ 2021.

WANG, A.; CASADEI, F.; JOHANSEN, A.; BUKMAN, H. *et al.*, 2016, **Emission of volatile organic compounds from healthy and diseased onions**. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. 333-340. Disponible em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1144.49>.

WANG, Y.; ZHAO, H.; QIN, H.; LI, Z. *et al.* The synthesis of ascorbic acid in rice roots plays an important role in the salt tolerance of rice by scavenging ROS. **International Journal of Molecular Sciences**, 19, n. 11, p. 3347, 2018.

WANG, Y.; ZHAO, H.; QIN, H.; LI, Z. *et al.* The synthesis of ascorbic acid in rice roots plays an important role in the salt tolerance of rice by scavenging ROS. **International Journal of Molecular Sciences**, 19, n. 11, p. 3347, 2018b.

WEI, J.; MA, F.; SHI, S.; QI, X. *et al.* Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. **Postharvest Biology and Technology**, 56, n. 2, p. 147-154, 2010/05/01/ 2010.

YAHIA, E. M.; CARRILLO-LÓPEZ, A.; BELLO-PEREZ, L. A. Chapter 9 - Carbohydrates. *In*: YAHIA, E. M. (Ed.). **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**: Woodhead Publishing, 2019. p. 175-205.

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **The Biochemical journal**, 57, n. 3, p. 508-514, 1954.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K. *et al.* Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta physiologiae plantarum**, 35, n. 11, p. 3099-3107, 2013/11/01 2013.

YOSHIMURA, K.; ISHIKAWA, T. Chemistry and metabolism of ascorbic acid in plants. *In*: HOSSAIN, M. A.; MUNNÉ-BOSCH, S., *et al.* (Ed.). **Ascorbic acid in plant growth, development and stress tolerance**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1-23.

ZHU, Y.-X.; GONG, H.-J.; YIN, J.-L. Role of Silicon in Mediating Salt Tolerance in Plants: A Review. **Plants**, 8, n. 6, 2019.

ZHU, Y.-X.; XU, X.-B.; HU, Y.-H.; HAN, W.-H. *et al.* Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant Cell Reports**, 34, n. 9, p. 1629-1646, 2015/09/01 2015.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, 34, n. 2, p. 455-472, 2014.

**APÊNDICES**

**Apêndice A. Análises de variâncias geral e desdobramentos dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para as variáveis dos componentes da produção. Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

F.V. <sup>1</sup>	GL	PROD	PROD <sub>C1</sub>	PROD <sub>C2</sub>	PROD <sub>C3</sub>	PROD <sub>C4</sub>	MFB	EUA
----- Pr>Fc <sup>3</sup> -----								
Bloco	3	0,0207	0,5119	0,1245	0,0307	0,0190	0,0207	0,0219
CE	3	0,0000	0,0075	0,0038	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
Resíduo a	9	-	-	-	-	-	-	-
DS	4	0,0379	0,5740	0,2151	0,0730	0,0045	0,0378	0,0361
CE × DS	12	0,0043	0,4188	0,0262	0,2817	0,0002	0,0043	0,0040
Resíduo b	48	-	-	-	-	-	-	-
Total	79	-	-	-	-	-	-	-
----- Análise do desdobramento de CE dentro de cada nível de DS -----								
CE/Si1	3	0,0000	0,3882	0,0533	0,0119	0,0000	0,0000	0,0000
CE/Si2	3	0,0000	0,2282	0,0008	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000
CE/Si3	3	0,0239	0,0070	0,0674	0,0155	0,6443	0,0239	0,0241
CE/Si4	3	0,0000	0,1770	0,0069	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000
CE/Si5	3	0,0000	0,2316	0,0230	0,0004	0,0029	0,0000	0,0000
Resíduo	56	-	-	-	-	-	-	-
----- Análise do desdobramento de DS dentro de cada nível de CE -----								
Si/CE1	4	0,0009	0,1808	0,0617	0,2514	0,0000	0,0009	0,0092
Si/CE2	4	0,0024	0,7575	0,0495	0,1372	0,0036	0,0024	0,0191
Si/CE3	4	0,4909	0,6597	0,1354	0,2053	0,4754	0,4907	0,6809
Si/CE4	4	0,9237	0,3283	0,2770	0,9110	0,7861	0,9236	0,9540
Resíduo	48	-	-	-	-	-	-	-
QMRa <sup>2</sup>	-	8,38E+7	8,66E+5	1,11E+7	2,28E+9	2,60E+7	83,83	2,87
QMRb	-	8,21E+7	1,26E+6	9,04E+6	9,10E+7	3,11E+7	82,13	2,74
QMR <sub>CE/DS</sub>	-	8,25E+7	1,18E+6	9,45E+6	9,30E+7	3,01E+7	82,47	2,74
QMR <sub>DS/CE</sub>	-	8,21E+7	1,26E+6	9,04E+6	9,10E+7	3,11E+7	82,13	4,14
CV1 (%)	-	11,24	44,81	28,59	17,95	43,25	11,24	11,35
CV2 (%)	-	11,12	54,16	25,79	17,05	47,21	11,12	11,08
Média Geral	-	81.489	2.076	11.656	55.963	11.795	81,49	14,94
Observações	-	80	80	80	80	80	80	80

<sup>1</sup>FV: fonte da variação; GL: número de graus de liberdade; PROD: produtividade (kg ha<sup>-1</sup>); PROD<sub>C1</sub>: produção de bulbos com qualidade não-comercial ou com diâmetro < 35 mm (kg ha<sup>-1</sup>); PROD<sub>C2</sub>: produção de bulbos comerciais com diâmetros entre 35-50 mm (kg ha<sup>-1</sup>); PROD<sub>C3</sub>: produção de bulbos comerciais com diâmetros entre 50-70 mm (kg ha<sup>-1</sup>); PROD<sub>C4</sub>: produção de bulbos comerciais com diâmetros entre 70-90 mm (kg ha<sup>-1</sup>); MFB: massa da matéria fresca dos bulbos de cebola (g planta<sup>-1</sup>); EUA: eficiência de uso da água (kg m<sup>-3</sup> de água). <sup>2</sup>QMR: quadrado médio do resíduo; CV: coeficiente de variação. <sup>3</sup>Pr: probabilidade; Fc: estatística F calculada.

**Apêndice B. Análises de variâncias geral e desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para as variáveis dos componentes fisiológicos da planta. Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

F.V. <sup>1</sup>	GL	CRA	DM	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>a + b</i>	Car
----- Pr>Fc <sup>3</sup> -----							
-----							
Bloco	3	0,3102	0,5233	0,4893	0,5822	0,5159	0,2622
CE	3	0,0758	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000
Resíduo a	9	-	-	-	-	-	-
DS	4	0,4753	0,1322	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CE × DS	12	0,0052	0,0125	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Resíduo b	48	-	-	-	-	-	-
Total	79	-	-	-	-	-	-
QMRa <sup>2</sup>	-	14,57	26,47	1,56E+4	2,80E+3	3,14E+4	1,30E+3
QMRb	-	8,61	24,83	1,80E+4	3,10E+3	3,59E+4	1,53E+3
CV1 (%)	-	4,80	9,27	21,71	24,31	22,33	20,35
CV2 (%)	-	3,69	8,98	23,34	25,60	23,85	22,05
Média Geral	-	79,47	55,49	575,38	217,66	793,04	177,35
Observações	-	80	80	80	80	80	80

<sup>1</sup>FV: fonte da variação; GL: número de graus de liberdade; CRA: conteúdo relativo de água (%); DM: dano ou instabilidade relativa da membrana (%); Chl *a*: teor de clorofila *a* (mg kg<sup>-1</sup> MF); Chl *b*: teor de clorofila *b* (mg kg<sup>-1</sup> MF); Chl *a+b*: teor de clorofila total (*a+b*) (mg kg<sup>-1</sup> MF); Car: teor de carotenoides total (mg kg<sup>-1</sup> MF). <sup>2</sup>QMR: quadrado médio do resíduo; CV: coeficiente de variação. <sup>3</sup>Pr: probabilidade; Fc: estatística F calculada.

**Apêndice C. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente fisiológico da planta: conteúdo relativo de água (CRA, %). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		quarta-feira, março 10, 2021, 08:53:19			
Data Source: Data 1 in Notebook1					
Equation: 3D; Plane					
f=y0+a*x+b*y					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,3548	0,1259	0,1032	3,4826		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	82,0351	0,9823	83,5161	<0,0001	
a	-0,0024	0,0066	-0,3645	0,7165	
b	-1,0334	0,3122	-3,31	0,0014	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	3	505379,82	168459,94		
Residual	77	933,9135	12,1287		
Total	80	506313,73	6328,9216		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	2	134,4915	67,2458	5,5443	0,0056
Residual	77	933,9135	12,1287		
Total	79	1068,405	13,5241		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = 0,0469)	
W Statistic= 0,9687	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = 0,6390)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = CRA (%)					

**Apêndice D. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente fisiológico da planta: dano ou instabilidade relativa da membrana (DM, %). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		quarta-feira, março 10, 2021, 09:12:02			
Data Source: Data 1 in CRA_DM_60DAP					
Equation: 3D; Plane					
f=y0+a*x+b*y					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,607	0,3685	0,3521	5,9575		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	47,1205	1,6803	28,0428	<0,0001	
a	0,0022	0,0113	0,1913	0,8488	
b	3,5784	0,5341	6,7004	<0,0001	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	3	247893,2	82631,068		
Residual	77	2732,9124	35,4924		
Total	80	250626,12	3132,8265		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	2	1594,7484	797,3742	22,4661	<0,0001
Residual	77	2732,9124	35,4924		
Total	79	4327,6608	54,7805		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = 0,4361)	
W Statistic= 0,9843	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = 0,3101)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = DM (%)					

**Apêndice E. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente fisiológico da planta: teor de clorofila *a* (Chl *a*, mg kg<sup>-1</sup> MF). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		segunda-feira, março 08, 2021, 15:23:19			
Data Source: Data 1 in Notebook1					
Equation: 3D; Paraboloid					
f=y0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,4417	0,1951	0,1521	276,2848		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	161,0565	129,0325	1,2482	0,2158	
a	1,5726	1,851	0,8496	0,3983	
b	391,6876	117,9265	3,3215	0,0014	
c	-0,0134	0,0107	-1,2517	0,2146	
d	-69,8084	24,7124	-2,8248	0,0061	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	5	27872564	5574512,8		
Residual	75	5724998,1	76333,309		
Total	80	33597562	419969,53		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	1387321,8	346830,46	4,5436	0,0024
Residual	75	5724998,1	76333,309		
Total	79	7112320	90029,367		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = <0,0001)	
W Statistic= 0,6142	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = <0,0001)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = Chl <i>a</i> (mg kg <sup>-1</sup> MF)					

**Apêndice F. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente fisiológico da planta: teor de clorofila *b* (Chl *b*, mg kg<sup>-1</sup> MF). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		segunda-feira, março 08, 2021, 16:03:29			
Data Source: Data 1 in clorofila e carotenoides					
Equation: 3D; Paraboloid					
f=y0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,4432	0,1964	0,1536	102,534		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	59,4035	47,8861	1,2405	0,2187	
a	0,6945	0,6869	1,011	0,3153	
b	145,0228	43,7645	3,3137	0,0014	
c	-0,0055	0,004	-1,3768	0,1727	
d	-25,7327	9,1712	-2,8058	0,0064	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	5	3982653,6	796530,71		
Residual	75	788490,82	10513,211		
Total	80	4771144,4	59639,305		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	192755,75	48188,938	4,5837	0,0023
Residual	75	788490,82	10513,211		
Total	79	981246,57	12420,843		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = <0,0001)	
W Statistic= 0,6150	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = <0,0001)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = Chl <i>b</i> (mg kg <sup>-1</sup> MF)					

**Apêndice G. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente fisiológico da planta: teor de clorofila total (Chl  $a+b$ , mg kg<sup>-1</sup> MF). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		segunda-feira, março 08, 2021, 16:27:36			
Data Source: Data 1 in clorofila e carotenoides					
Equation: 3D; Paraboloid					
f=y0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,4426	0,1959	0,153	378,2079		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	220,4601	176,6333	1,2481	0,2159	
a	2,2671	2,5339	0,8947	0,3738	
b	536,7103	161,4303	3,3247	0,0014	
c	-0,0188	0,0146	-1,2876	0,2018	
d	-95,5411	33,829	-2,8242	0,0061	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	5	52925938	10585188		
Residual	75	10728094	143041,25		
Total	80	63654032	795675,4		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	2613197,3	653299,32	4,5672	0,0024
Residual	75	10728094	143041,25		
Total	79	13341291	168877,1		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = <0,0001)	
W Statistic= 0,6125	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = <0,0001)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = Chl $a+b$ (mg kg <sup>-1</sup> MF)					

**Apêndice H. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente fisiológico da planta: teor de carotenoides total (Car, mg kg<sup>-1</sup> MF). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		segunda-feira, março 08, 2021, 16:45:12			
Data Source: Data 1 in clorofila e carotenoides					
Equation: 3D; Paraboloid					
f=y0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,4449	0,1979	0,1551	79,6856		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	57,4235	37,2153	1,543	0,127	
a	0,5001	0,5339	0,9368	0,3519	
b	114,421	34,0122	3,3641	0,0012	
c	-0,0042	0,0031	-1,3646	0,1765	
d	-20,5988	7,1275	-2,89	0,005	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	5	2633814	526762,79		
Residual	75	476234,9	6349,7987		
Total	80	3110048,9	38875,611		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	117516,2	29379,049	4,6268	0,0022
Residual	75	476234,9	6349,7987		
Total	79	593751,1	7515,8367		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = <0,0001)	
W Statistic= 0,6077	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = <0,0001)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = Car (mg kg <sup>-1</sup> MF)					

**Apêndice I. Análises de variâncias geral e desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para as variáveis morfofisiológicas dos bulbos. Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

F.V. <sup>1</sup>	GL	FB	AS	pH	SS	AT	SS/AT	ACP	AsA
----- Pr>Fc <sup>3</sup> -----									
--									
Bloco	3	0,1512	0,0536	0,0701	0,0119	0,0017	0,1059	0,9123	0,0092
CE	3	0,0206	0,0670	0,0236	0,2163	0,0000	0,0001	0,0005	0,0493
Resíduo a	9	-	-	-	-	-	-	-	-
DS	4	0,3166	0,0457	0,4301	0,0055	0,1418	0,1155	0,0102	0,0054
CE × DS	12	0,0012	0,1399	0,2054	0,0133	0,0820	0,0007	0,0018	0,0026
Resíduo b	48	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	79	-	-	-	-	-	-	-	-
----- Análise do desdobramento de CE dentro de cada nível de DS -----									
-----									
CE/Si1	3	-	-	-	0,4185	-	0,0000	-	-
CE/Si2	3	-	-	-	0,5929	-	0,0005	-	-
CE/Si3	3	-	-	-	0,0029	-	0,0000	-	-
CE/Si4	3	-	-	-	0,0428	-	0,0000	-	-
CE/Si5	3	-	-	-	0,1323	-	0,0046	-	-
----- Análise do desdobramento de DS dentro de cada nível de CE -----									
-----									
Si/CE1	4	-	-	-	0,3427	-	0,0019	-	-
Si/CE2	4	-	-	-	0,0001	-	0,0005	-	-
Si/CE3	4	-	-	-	0,0311	-	0,2021	-	-
Si/CE4	4	-	-	-	0,7531	-	0,9563	-	-
QMRa <sup>2</sup>	-	20,38	1,7502	0,0073	0,3902	0,0564	0,0552	0,5469	10,6232
QMRb	-	23,56	4,3261	0,0141	0,3645	0,0909	0,0232	0,3581	11,4911
QMR <sub>CE/DS</sub>	-	-	-	-	-	-	0,0296	-	-
QMR <sub>DS/CE</sub>	-	-	-	-	-	-	0,0232	-	-
CV1 (%)	-	9,65	10,66	1,69	8,92	7,30	10,77	13,52	9,80
CV2 (%)	-	10,38	16,76	2,35	8,62	9,27	6,99	10,94	10,19
Média Geral	-	46,77	12,41	5,06	7,00	3,25	2,18	5,47	33,26
Observações	-	80	80	80	80	80	80	80	80

<sup>1</sup>FV: fonte da variação; GL: número de graus de liberdade; FB: firmeza dos bulbos (N); AS: teor de açúcar solúvel total nos bulbos (%); pH: potencial hidrogeniônico dos bulbos; SS: teor de sólidos solúveis totais nos bulbos (°Brix); AT: acidez titulável total nos bulbos (%); SS/AT: relação aritmética entre os teores de sólidos solúveis totais e ácidos tituláveis totais dos bulbos; ACP: concentração de ácido pirúvico nos bulbos (mM g<sup>-1</sup> MF); AsA: concentração de ácido ascórbico nos bulbos (mg 100g<sup>-1</sup> MF). <sup>2</sup>QMR: quadrado médio do resíduo; CV: coeficiente de variação. <sup>3</sup>Pr: probabilidade; Fc: estatística F calculada.

**Apêndice J. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para a variável do componente bioquímico dos bulbos: concentração de ácido pirúvico (ACP, mM g<sup>-1</sup> MF). Experimento 1: “Produção e morfofisiologia de cebola cultivada sob salinidade e adubação com silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		quarta-feira, novembro 04, 2020, 18:32:59			
Data Source: Data 1 in Notebook1					
Equation: 3D; Paraboloid					
f=y0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,6253	0,3911	0,3586	0,7512		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	3,3014	0,3508	9,4106	<0,0001	
a	0,0108	0,005	2,1544	0,0344	
b	1,6819	0,3206	5,2456	<0,0001	
c	-6,03E-05	2,90E-05	-2,0799	0,0409	
d	-0,2881	0,0672	-4,2884	<0,0001	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	5	2419,5517	483,9103		
Residual	75	42,3202	0,5643		
Total	80	2461,8719	30,7734		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	27,1772	6,7943	12,0409	<0,0001
Residual	75	42,3202	0,5643		
Total	79	69,4974	0,8797		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = 0,2937)	
W Statistic= 0,9813	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = 0,6237)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = DS					
y = CE					
z = ACP (mM g <sup>-1</sup> MF)					

**Apêndice K. Análises de variâncias geral e desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e dose de Si (DS), para as variáveis dos componentes morfológicos dos bulbos. Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

F.V. <sup>1</sup>	GL	FB	PM	CIE L*	CIE a*	CIE b*	CIE C*	CIE °H
	----- Pr>Fc <sup>3</sup> -----							
Bloco	3	0,0372	0,0040	0,0827	0,3899	0,7065	0,8875	0,2932
CE	3	0,0001	0,0000	0,1288	0,0023	0,0033	0,0025	0,0165
Resíduo a	9	-	-	-	-	-	-	-
DS	4	0,3257	0,0809	0,5584	0,6377	0,9500	0,8645	0,5838
CE×DS	12	0,2454	0,1489	0,8561	0,4599	0,9330	0,7209	0,7360
Resíduo b	48	-	-	-	-	-	-	-
TP	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
TP×CE	9	0,0000	0,0000	0,1400	0,1754	0,2692	0,3416	0,2939
TP×DS	12	0,2169	0,1714	0,4099	0,3480	0,5256	0,4231	0,5185
TP×CE×DS	36	0,0077	0,6594	0,0654	0,2967	0,8940	0,7194	0,3714
Resíduo c	180	-	-	-	-	-	-	-
Total	319	-	-	-	-	-	-	-
QMRa <sup>2</sup>	-	35,5658	0,6953	33,9113	4,2641	9,5694	12,5101	6,8438
QMRb	-	31,8438	1,2634	29,3544	5,2083	8,1893	9,3123	12,1366
QMRc	-	20,2210	0,9432	13,0876	4,3187	5,3131	6,7545	8,2613
CV1 (%)	-	14,15	18,68	8,26	21,27	9,65	10,47	3,59
CV2 (%)	-	13,39	25,19	7,68	23,50	8,93	9,03	4,78
CV3 (%)	-	10,67	21,76	5,13	21,40	7,19	7,69	3,94
Média Geral	-	42,15	4,46	70,50	9,71	32,05	33,78	72,96
Observações	-	320	320	320	320	320	320	320

<sup>1</sup>FV: fonte da variação; GL: número de graus de liberdade; FB: firmeza dos bulbos (N); PM: perda de massa de matéria fresca dos bulbos (%); CIE L\*: parâmetro de cor L\* (luminosidade); CIE a\*: parâmetro de cor a\* (variação entre verde e vermelho); CIE b\*: parâmetro de cor b\* (variação entre azul e amarelo); CIE C\*: parâmetro croa (saturação); CIE °H: parâmetro Hue (ângulo de tonalidade ou matiz). <sup>2</sup>QMR: quadrado médio do resíduo; CV: coeficiente de variação. <sup>3</sup>Pr: probabilidade; Fc: estatística F calculada.

**Apêndice L. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e tempo de prateleira (TP), para a variável morfológica: firmeza dos bulbos (FB, N). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

**Nonlinear Regression** sexta-feira, junho 04, 2021, 15:24:33

**Data Source: Data 1 in Notebook1**

**Equation: 3D; Paraboloid**

$$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$$

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>	
0,9598	0,9211	0,8924	2,5043	
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	52,4815	2,5677	20,4388	<0,0001
a	-0,8975	0,098	-9,1588	<0,0001
b	-2,4363	2,3902	-1,0193	0,33
c	0,0158	0,0016	10,1017	<0,0001
d	0,0052	0,5009	0,0104	0,9919

**Analysis of Variance:**

Analysis of Variance:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>
Regression	5	29236,663	5847,3327
Residual	11	68,9874	6,2716
Total	16	29305,651	1831,6032

Corrected for the mean of the observations:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	805,6873	201,4218	32,1166	<0,0001
Residual	11	68,9874	6,2716		
Total	15	874,6747	58,3116		

**Statistical Tests:**

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Passed (P = 0,0628)

W Statistic= 0,8933 Significance Level = <0,0001

**Constant Variance Test** Passed (P = 0,9607)

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = TP (dias)

y = CE (dS m<sup>-1</sup>)

z = FB (N)

**Apêndice M. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com doses de silício (DS) e tempo de prateleira (TP), para a variável morfológica: firmeza dos bulbos (FB, N). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

**Nonlinear Regression** sexta-feira, junho 04, 2021, 16:21:28

**Data Source: Data 1 in FB\_EPOCA**

**Equation: 3D; Paraboloid**

$$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$$

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>	
0,9848	0,9698	0,9617	1,3152	
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	47,812	0,7907	60,4693	<0,0001
a	-0,8975	0,046	-19,498	<0,0001
b	-0,0131	0,0176	-0,7422	0,4694
c	0,0158	0,0007	21,5054	<0,0001
d	2,12E-05	0,0001	0,2088	0,8374

**Analysis of Variance:**

Analysis of Variance:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>
Regression	5	36371,244	7274,2488
Residual	15	25,9461	1,7297
Total	20	36397,19	1819,8595

Corrected for the mean of the observations:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	832,5237	208,1309	120,3249	<0,0001
Residual	15	25,9461	1,7297		
Total	19	858,4698	45,1826		

**Statistical Tests:**

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Passed (P = 0,1144)

W Statistic= 0,9232 Significance Level = <0,0001

**Constant Variance Test** Passed (P = 0,9013)

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = TP (dias)

y = DS (kg ha<sup>-1</sup>)

z = FB (N)

**Apêndice N. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e tempo de prateleira (TP), para a variável morfológica: perda de massa dos bulbos (PM, %). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

**Nonlinear Regression** terça-feira, junho 08, 2021, 14:58:40

**Data Source: Data 1 in Notebook3**

**Equation: 3D; Plane**

$f=y_0+a*x+b*y$

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>	
0,977	0,9546	0,9476	0,7292	
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	-0,5641	0,4526	-1,2464	0,2346
a	0,1323	0,0082	16,2247	<0,0001
b	0,4628	0,1462	3,166	0,0074

**Analysis of Variance:**

Analysis of Variance:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>
Regression	3	463,9961	154,6654
Residual	13	6,9131	0,5318
Total	16	470,9092	29,4318

Corrected for the mean of the observations:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	2	145,3156	72,6578	136,633	<0,0001
Residual	13	6,9131	0,5318		
Total	15	152,2287	10,1486		

**Statistical Tests:**

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Passed (P = 0,1346)

W Statistic= 0,9139      Significance Level = <0,0001

**Constant Variance Test** Passed (P = 0,3539)

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = TP (dias)

y = CE (dS m<sup>-1</sup>)

z = PM (%)

**Apêndice O. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com doses de Si (DS) e tempo de prateleira (TP), para a variável morfológica: perda de massa dos bulbos (PM, %). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		terça-feira, junho 08, 2021, 15:01:00			
Data Source: Data 2 in PM_EPOCA					
Equation: 3D; Plane					
f=y0+a*x+b*y					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,9842	0,9687	0,965	0,5769		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	0,3298	0,2826	1,167	0,2593	
a	0,1323	0,0058	22,9285	<0,0001	
b	0,002	0,0022	0,9025	0,3794	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	3	573,6034	191,2011		
Residual	17	5,6583	0,3328		
Total	20	579,2617	28,9631		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	2	175,2528	87,6264	263,2663	<0,0001
Residual	17	5,6583	0,3328		
Total	19	180,9111	9,5216		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = 0,0187)	
W Statistic= 0,8813	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = 0,3813)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = TP (dias)					
y = DS (kg ha <sup>-1</sup> )					
z = PM (%)					



**Apêndice Q. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e tempo de prateleira (TP), para a variável bioquímica: potencial hidrogeniônico dos bulbos (pH). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression		quinta-feira, junho 10, 2021, 16:41:35			
Data Source: Data 3 in pH_EPOCA					
Equation: 3D; Plane					
f=y0+a*x+b*y					
<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>		
0,8179	0,6689	0,618	0,0393		
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	
y0	5,0947	0,0244	209,0292	<0,0001	
a	0,0021	0,0004	4,8957	0,0003	
b	-0,0119	0,0079	-1,5167	0,1533	
Analysis of Variance:					
Analysis of Variance:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>		
Regression	3	421,4239	140,4746		
Residual	13	0,02	0,0015		
Total	16	421,4439	26,3402		
Corrected for the mean of the observations:					
	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	2	0,0405	0,0203	13,1342	0,0008
Residual	13	0,02	0,0015		
Total	15	0,0606	0,004		
Statistical Tests:					
<b>Normality Test (Shapiro-Wilk)</b>			Passed	(P = 0,0101)	
W Statistic= 0,8410	Significance Level = <0,0001				
<b>Constant Variance Test</b>			Passed	(P = 0,8910)	
Fit Equation Description:					
[Variables]					
x = TP (dias)					
y = CE (dS m <sup>-1</sup> )					
z = pH					

**Apêndice R. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com doses de Si (CE) e tempo de prateleira (TP), para a variável bioquímica: potencial hidrogeniônico dos bulbos (pH). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression quinta-feira, junho 10, 2021, 16:48:54

Data Source: Data 3 in pH\_EPOCA

Equation: 3D; Plane

$f=y_0+a*x+b*y$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate	
0,9263	0,858	0,8413	0,0212	
	Coefficient	Std. Error	t	P
y0	5,0692	0,0104	487,8157	<0,0001
a	0,0021	0,0002	10,1329	<0,0001
b	-2,18E-05	8,06E-05	-0,2702	0,7903

Analysis of Variance:

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS
Regression	3	526,7755	175,5918
Residual	17	0,0076	0,0004
Total	20	526,7831	26,3392

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0,0462	0,0231	51,3739	<0,0001
Residual	17	0,0076	0,0004		
Total	19	0,0539	0,0028		

Statistical Tests:

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0,8801)

W Statistic= 0,9764 Significance Level = <0,0001

Constant Variance Test Passed (P = 0,2202)

Fit Equation Description:

[Variables]

x = TP (dias)

y = DS (kg ha<sup>-1</sup>)

z = pH

**Apêndice S. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e tempo de prateleira (TP), para a variável bioquímica: acidez titulável total dos bulbos (AT, %). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression segunda-feira, junho 07, 2021, 11:13:55

Data Source: AT\_CE\_TP in AT\_EPOCA

Equation: 3D; Plane

$f=y_0+a*x+b*y$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate	
0,7685	0,5906	0,5276	0,1585	
	Coefficient	Std. Error	t	P
y0	3,005	0,0984	30,5374	<0,0001
a	-0,0048	0,0018	-2,7069	0,018
b	0,1074	0,0318	3,3804	0,0049

Analysis of Variance:

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS
Regression	3	154,9048	51,6349
Residual	13	0,3268	0,0251
Total	16	155,2316	9,702

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0,4714	0,2357	9,3775	0,003
Residual	13	0,3268	0,0251		
Total	15	0,7982	0,0532		

Statistical Tests:

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0,8262)

W Statistic= 0,9692      Significance Level = <0,0001

Constant Variance Test Passed (P = 0,7966)

Fit Equation Description:

[Variables]

x = TP (dias)

y = CE (dS m<sup>-1</sup>)

z = AT (%)

**Apêndice T. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D plana, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com doses de Si (DS) e tempo de prateleira (TP), para a variável bioquímica: acidez titulável total dos bulbos (AT, %). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

Nonlinear Regression segunda-feira, junho 07, 2021, 11:30:35

Data Source: AT\_DS\_TP in AT\_EPOCA

Equation: 3D; Plane

$f=y_0+a*x+b*y$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate	
0,6968	0,4856	0,425	0,1226	
	Coefficient	Std. Error	t	P
y0	3,2837	0,06	54,6833	<0,0001
a	-0,0048	0,0012	-3,9145	0,0011
b	-0,0004	0,0005	-0,8498	0,4073

Analysis of Variance:

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS
Regression	3	193,2829	64,4276
Residual	17	0,2554	0,015
Total	20	193,5383	9,6769

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0,2411	0,1205	8,0226	0,0035
Residual	17	0,2554	0,015		
Total	19	0,4965	0,0261		

Statistical Tests:

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0,4352)

W Statistic= 0,9542      Significance Level = <0,0001

Constant Variance Test Passed (P = 0,3501)

Fit Equation Description:

[Variables]

x = TP (dias)

y = DS (kg ha<sup>-1</sup>)

z = AT (%)

**Apêndice U. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com salinidade da água de irrigação (CE) e tempo de prateleira (TP), para a variável bioquímica: concentração de ácido pirúvico (ACP, mM g<sup>-1</sup> MF). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

**Nonlinear Regression** terça-feira, junho 08, 2021, 10:27:20

**Data Source:** ACP\_CE\_TP in ACP\_EPOCA

**Equation:** 3D; Paraboloid

$$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$$

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>	
0,9335	0,8714	0,8246	0,6591	
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	3,7093	0,6758	5,4886	0,0002
a	0,1103	0,0258	4,2757	0,0013
b	1,7424	0,6291	2,7697	0,0182
c	-0,0025	0,0004	-6,0299	<0,0001
d	-0,3105	0,1318	-2,3552	0,0381

**Analysis of Variance:**

Analysis of Variance:

Regression	5	502,0823	100,4165
Residual	11	4,7791	0,4345
Total	16	506,8614	31,6788

Corrected for the mean of the observations:

Regression	4	32,3743	8,0936	18,629	<0,0001
Residual	11	4,7791	0,4345		
Total	15	37,1533	2,4769		

**Statistical Tests:**

**Normality Test (Shapiro-Wilk)** Passed (P = 0,4937)

W Statistic= 0,9502      Significance Level = <0,0001

**Constant Variance Test** Passed (P = 0,6012)

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = TP (dias)

y = CE (dS m<sup>-1</sup>)

z = ACP (mM g<sup>-1</sup> MF)

**Apêndice V. Dados de saída do programa SigmaPlot for Windows Version 11.0 Build 11.0.0.77, para à análise de variância e teste estatístico da regressão não linear 3D parabólica, referente ao desdobramento dos efeitos dos fatores de tratamentos com doses de Si (DS) e tempo de prateleira (TP), para a variável bioquímica: concentração de ácido pirúvico (ACP, mM g<sup>-1</sup> MF). Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

**Nonlinear Regression** terça-feira, junho 08, 2021, 10:28:31

**Data Source: ACP\_DS\_TP in ACP\_EPOCA**

**Equation: 3D; Paraboloid**

$$f=y_0+a*x+b*y+c*x^2+d*y^2$$

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>	
0,9713	0,9434	0,9283	0,3737	
	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	5,5206	0,2247	24,5739	<0,0001
a	0,1103	0,0131	8,4321	<0,0001
b	0,0041	0,005	0,8127	0,4291
c	-0,0025	0,0002	-11,8914	<0,0001
d	-2,62E-05	2,89E-05	-0,9072	0,3786

**Analysis of Variance:**

Analysis of Variance:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>
Regression	5	622,0259	124,4052
Residual	15	2,0946	0,1396
Total	20	624,1205	31,206

Corrected for the mean of the observations:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	4	34,8908	8,7227	62,4658	<0,0001
Residual	15	2,0946	0,1396		
Total	19	36,9854	1,9466		

**Statistical Tests:**

**Normality Test (Shapiro-Wilk)**

Passed (P = 0,3088)

W Statistic= 0,9459      Significance Level = <0,0001

**Constant Variance Test**

Passed (P = 0,8562)

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = TP (dias)

y = DS (kg ha<sup>-1</sup>)

z = ACP (mM g<sup>-1</sup> MF)

**Apêndice W. Matriz de correlação entre as características bioquímicas e morfofisiológicas de bulbos de cebola ‘Rio das Antas’ cultivada sob condições de salinidade e adubação com Si, durante a vida de prateleira. Experimento 2: “Efeito da salinidade e de doses silício na qualidade e vida útil pós-colheita da cebola”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

<sup>1</sup> C.V.	CE	Si	TP	FB	AS	SS	AT	SS/AT	PH	ACP	ASA	CIE L*	CIE a*	CIE b*	CIE C*	°H	PM
CE	<sup>2</sup> 1,00**	0,00 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	-0,34**	-0,17**	-0,10 <sup>ns</sup>	0,36**	-0,46**	-0,16**	0,21**	0,29**	-0,01 <sup>ns</sup>	-0,24**	-0,17**	-0,22**	0,11 <sup>ns</sup>	0,18**
Si		1,00**	0,00 <sup>ns</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
TP			1,00**	0,13*	0,12*	-0,45**	-0,29**	-0,25**	0,51**	-0,51**	0,38**	-0,58**	0,55**	-0,62**	-0,52**	-0,81**	0,91**
FB				1,00**	0,20**	0,07 <sup>ns</sup>	-0,19**	0,28**	0,07 <sup>ns</sup>	-0,51**	-0,20**	-0,33**	0,08 <sup>ns</sup>	-0,41**	-0,38**	-0,32**	-0,04 <sup>ns</sup>
AS					1,00**	0,70**	0,38**	0,41**	0,02 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	-0,35**	-0,04 <sup>ns</sup>	0,20**	0,06 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>
SS						1,00**	0,58**	0,58**	-0,24**	0,23**	-0,48**	0,30**	-0,15**	0,39**	0,37**	0,37**	-0,49**
AT							1,00**	-0,33**	-0,34**	0,37**	-0,19**	0,34**	-0,17**	0,27**	0,24**	0,32**	-0,20**
SS/AT								1,00**	0,08 <sup>ns</sup>	-0,11*	-0,38**	0,02 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	0,19**	0,18**	0,11*	-0,39**
PH									1,00**	-0,27**	0,23**	-0,40**	0,33**	-0,34**	-0,29**	-0,47**	0,46**
ACP										1,00**	0,06 <sup>ns</sup>	0,50**	-0,25**	0,58**	0,52**	0,55**	-0,35**
ASA											1,00**	-0,18**	0,11 <sup>ns</sup>	-0,30**	-0,29**	-0,29**	0,48**
CIE_L												1,00**	-0,28**	0,77**	0,72**	0,68**	-0,50**
CIE_A													1,00**	-0,06 <sup>ns</sup>	0,13*	-0,79**	0,45**
CIE_B														1,00**	0,98**	0,61**	-0,56**
CIE_C															1,00**	0,47**	-0,49**
HUE																1,00**	-0,70**
PM																	1,00**

<sup>1</sup>FV: fonte da variação; CE: fator de tratamento salinidade da água de irrigação; Si: fator de tratamento adubação com Si; TP: fator de tratamento tempo de prateleira; FB: firmeza dos bulbos de cebola (N); AS: teor de açúcar solúvel total nos bulbos (%); SS: teor de sólidos solúveis totais nos bulbos (°Brix); AT: acidez titulável total nos bulbos (%); SS/AT: relação aritmética entre os teores de sólidos solúveis totais e ácidos tituláveis totais dos bulbos; pH: potencial hidrogeniônico no suco dos bulbos; ACP: concentração de ácido pirúvico nos bulbos (mM g<sup>-1</sup> MF); AsA: concentração de ácido ascórbico nos bulbos (mg 100g<sup>-1</sup> MF); CIE L\*: parâmetro de cor L\* (luminosidade); CIE a\*: parâmetro de cor a\* (variação entre verde e vermelho); CIE b\*: parâmetro de cor b\* (variação entre azul e amarelo); CIE C\*: parâmetro croa (saturação); CIE °H: parâmetro Hue (ângulo de tonalidade ou matiz); PM: perda de massa de matéria fresca dos bulbos (%). <sup>2</sup>ns, \*\* e \*: testes não-significativo e significativos aos níveis de 1 e 5 % de probabilidade, respectivamente, pelo método de correlação de Pearson.

**Apêndice X. Vista geral da área experimental da pesquisa: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**



**Apêndice Y. Vista das caixas d'água para diluição dos sais em diferentes concentrações, de acordo com os níveis do fator de tratamento salinidade da água de irrigação. Experimento: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**



**Apêndice Z. Preparação das subparcelas para a aplicação das diferentes doses de Si. Experimento: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**



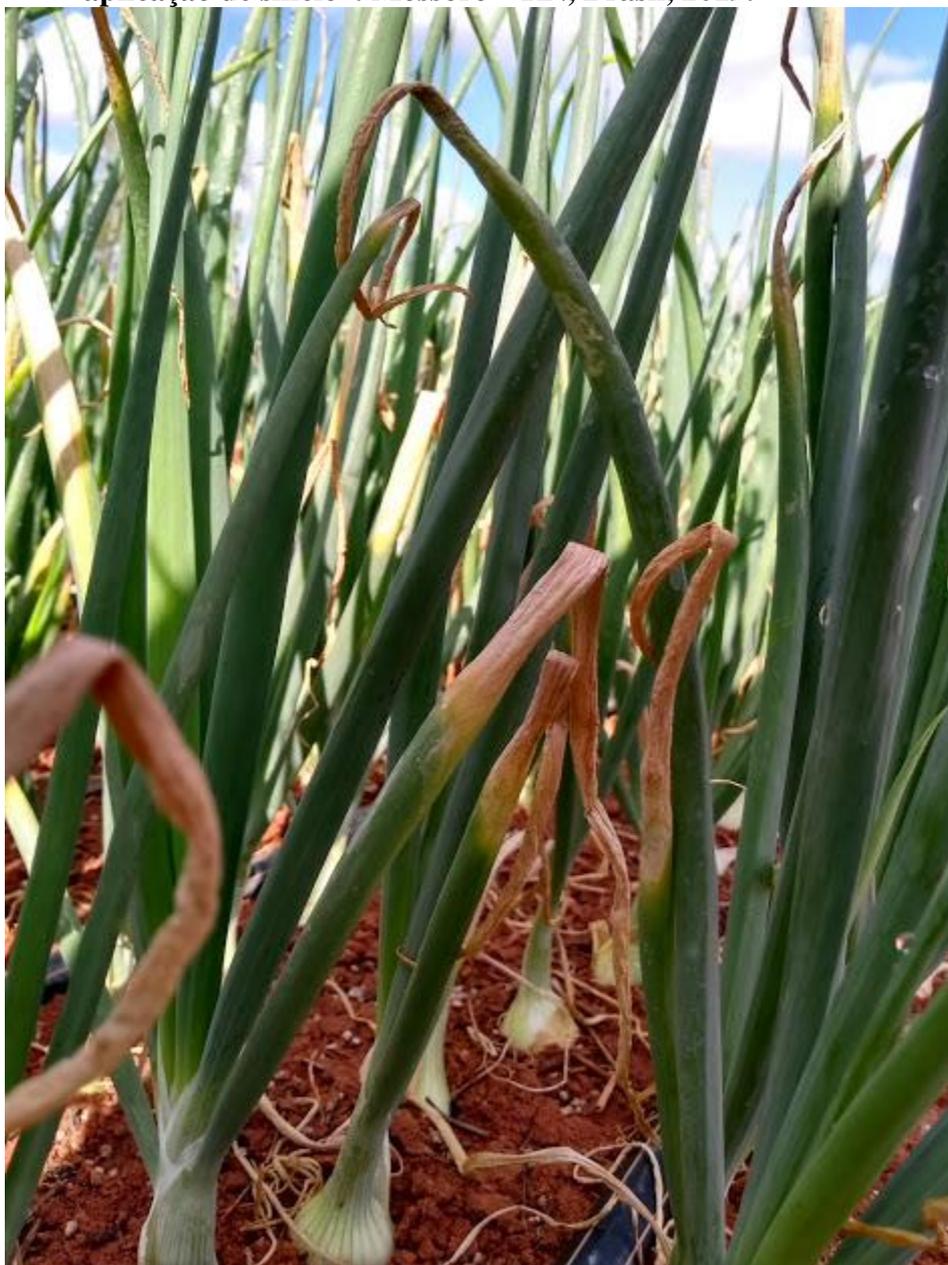
**Apêndice AA. Aplicação das diferentes doses de Si no solo, imediatamente à 5 cm ao lado e abaixo da planta, em sulco e incorporado. Experimento: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**



**Apêndice BB. Plântulas de cebola após a adubação com Si. Experimento: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**



**Apêndice CC. Plantas de cebola com sintomas de citotoxicidade iônica. Experimento: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**



**Apêndice DD. Bulbos de cebola armazenados para avaliação da vida útil pós-colheita. Experimento: “Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício”. Mossoró – RN, Brasil, 2019.**

