



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EDUARDO SANTOS CAVALCANTE**

**IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM ÁGUAS SALOBRAS COMO ESTRATÉGIA  
PARA INCREMENTAR A PRODUTIVIDADE DO MILHO NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO**

**FORTALEZA**

**2020**

EDUARDO SANTOS CAVALCANTE

IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM ÁGUAS SALOBRAS COMO ESTRATÉGIA PARA  
INCREMENTAR A PRODUTIVIDADE DO MILHO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C364 Cavalcante, Eduardo Santos.  
Irrigação suplementar com águas salobras como estratégia para incrementar a produtividade do milho no Semiárido brasileiro / Eduardo Santos Cavalcante. – 2020.  
111 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda.
1. Semiárido tropical. 2. Irrigação suplementar. 3. Agricultura bioassalada. 4. Fotossíntese. 5. Sensoriamento remoto. I. Título.

CDD 630

---

EDUARDO SANTOS CAVALCANTE

IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM ÁGUAS SALOBRAS COMO ESTRATÉGIA PARA  
INCREMENTAR A PRODUTIVIDADE DO MILHO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Hans Raj Gheyi  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

---

Dr. Francisco Bergson Parente Fernandes  
Ematerce

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Antônia Leila Rocha Neves  
Secretaria do Desenvolvimento Econômico e Trabalho (Sedet)/  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha esposa, Ana Ruth.

Aos meus pais, Francisca Xavier e  
José Willame.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e à Mãe, Rainha e Vencedora Três Vezes Admirável de Schoenstatt, por guiar-me em todos os caminhos e pela saúde, fé, proteção e amor que a mim foi concedido.

A minha esposa, Ana Ruth Rocha Almeida, por seu companheirismo, amor, dedicação e respeito, estando comigo em todos os momentos que precisei.

Aos meus pais, Francisca Xavier dos Santos e José Willame Menezes Cavalcante, e minha irmã, Lara Santos Cavalcante, por todo o amor, carinho, incentivo e apoio que a mim foi dado em todas as fases de minha vida, nunca medindo esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola, por toda estrutura, servidores terceirizados, corpo técnico e corpo docente.

Ao professor, Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda, pela paciência, confiança, respeito e humildade, como orientador e como pessoa. Exemplo de profissional a ser seguido. Agradeço pela oportunidade de trabalhar ao seu lado. Deixo aqui a minha eterna gratidão.

Aos professores Dr. Raimundo Nonato Távora Costa e Adunias dos Santos Teixeira, pelo apoio, orientações, contribuições durante a realização deste trabalho e participação da banca examinadora.

Ao professor Dr. Hans Raj Gheyi, pela participação da banca de qualificação, orientações, contribuições para a realização deste trabalho e participação da banca examinadora.

À Dra. Antônia Leila Rocha Neves, pelas contribuições durante a condução deste trabalho e participação da banca examinadora.

Ao Dr. Francisco Bergson Parente Fernandes, pela participação da banca examinadora e pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todos os colegas do Laboratório de Relação Solo-Água-Planta, em especial, ao Mardones, Juvenaldo, Adriana e Luciana, pela colaboração direta na condução desta pesquisa.

À minha amiga Aline Castro Praciano, por sua amizade e toda a contribuição durante o curso de doutorado.

Ao meu amigo Márcio Regys, por sua amizade e contribuição para realização deste trabalho.

E a todos aqueles que não foram mencionados, mas contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A irrigação suplementar durante períodos de seca pode reduzir as perdas na produção de milho nas regiões semiáridas tropicais, principalmente em pequenas propriedades. No entanto, as reservas de água de boa qualidade não são suficientes para atender às demandas das comunidades agrícolas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade e a rentabilidade do milho, bem como as respostas fisiológicas e espectrais de folhas maduras, em diferentes cenários hídricos simulados, com e sem irrigação suplementar com água salobra. Os experimentos de campo foram realizados durante as safras de 2018 e 2019 no Argissolo Vermelho-amarelo. O experimento seguiu o delineamento de blocos casualizados, no esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram formadas simulando o abastecimento de água no solo correspondente a quatro cenários hídricos (chuvoso, normal, seca e seca severa), e as subparcelas com ou sem irrigação suplementar com água salobra (condutividade elétrica de 4,5 dS m<sup>-1</sup>). Os veranicos reduzem a capacidade fotossintética de folhas de milho, mesmo no cenário hídrico normal, porém os efeitos se tornam drásticos nos anos de seca e seca severa em decorrência de efeitos estomáticos e não estomáticos. A irrigação suplementar com águas salobras reduz o estresse hídrico do milho durante os veranicos e melhora as trocas gasosas foliares, com reflexo direto na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e na produção de biomassa da parte aérea. Os rendimentos médios de espigas de milho verde foram 13.083, 11.532, 10.358 e 9.609 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para os cenários chuvoso, normal, seca e seca severa, complementados com água salobra. Para os mesmos tratamentos sem irrigação suplementar, os valores foram 11.394, 7.896, 3.913 e 1.374 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os dados da renda do agricultor mostraram que, sob os cenários normal, seca e seca severa, a suplementação com água salobra torna-se economicamente vantajosa a partir de 0,9, 1,0 e 2,4 ha, respectivamente, enquanto o cultivo de milho sem irrigação suplementar não é vantajoso para os cenários de seca e seca severa. Para condições de seca severa, no entanto, a irrigação suplementar usando água salobra reduziu o rendimento comercial em 27%, com efeitos negativos na lucratividade do agricultor. Para este caso, é necessário usar água de baixa salinidade ou selecionar culturas mais tolerantes ao sal. Os dados espectrais demonstraram que estresse hídrico causado pelos veranicos é mais pronunciado que o estresse salino associado à irrigação suplementar com água salobra. As concentrações de prolina foram fracamente correlacionadas aos comprimentos de onda estudados, sendo as maiores na faixa do visível.

**Palavras-chave:** Semiárido tropical. Salinidade. Irrigação suplementar. Fotossíntese. Agricultura Biossalina.



## ABSTRACT

Supplemental irrigation during dry spells could reduce maize yield losses in tropical semi-arid regions, notably on small farms. However, good quality water reserves are not sufficient to meet the demands of farming communities. So, our objective was to evaluate the productivity and profitability of maize, as well as physiological and spectral responses of mature leaves, under different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation with brackish water. The field experiments were carried out during the cropping seasons of 2018 and 2019 on Ultisol. The experiment followed a randomized block design in the split-plot scheme with four replicates. The plots were formed by simulating the water supply in the soil corresponding to four water scenarios (rainy, normal, drought and severe drought), and the sub-plots with or without supplemental irrigation with brackish water (electrical conductivity of 4.5 dS m<sup>-1</sup>). The dry spell reduce the photosynthetic capacity of maize leaves, even in the normal water scenario, but the effects become drastic in the years of drought and severe drought due to stomatal and non-stomatal limitations. Supplementary irrigation with brackish water reduces the water stress of maize during dry spells and improves leaf gas exchange, with a direct reflection on the CO<sub>2</sub> assimilation rate and on shoot biomass production. Mean yields of green maize ears were 13,083, 11,532, 10,358 and 9,609 kg ha<sup>-1</sup>, respectively, for rainy, normal, drought and severe drought scenarios, as supplemented with brackish water. For the same treatments without supplemental irrigation the values were 11,394, 7,896, 3,913 and 1,374 kg ha<sup>-1</sup>, respectively. Data of farmer's income showed that under normal, drought and severe drought, supplementation with brackish water becomes economically advantageous from 0.9, 1.0 and 2.4 ha, respectively, while maize cultivation without supplemental irrigation is not advantageous for drought and severe drought scenarios. For severe drought conditions, however, supplemental irrigation using brackish water reduced commercial yield by 27%, with negative effects on the farmer's profitability. For this case, it is necessary to use water of either lower salinity or select crop of higher salt tolerance. Supplemental irrigation with brackish water reduces the water stress of corn during summer and improves leaf gas exchange, with a direct reflection on the rate of CO<sub>2</sub> assimilation and on the biomass production of the aerial part. Spectral data showed that water stress caused by dry spells is more pronounced than the salt stress associated with supplementary irrigation with brackish water the proline concentrations were weakly correlated to the studied wavelengths, being the highest in the visible range.

**Keywords:** Tropical Semi-arid. Salinity. Supplementary irrigation. Photosynthesis. Biosaline agriculture.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Thirty-year rainfall historical series (1987 to 2016) for the Curu Valley region, Ceará, Brazil, during the months of the wet season (Feb to May). Data were provided by Foundation for Meteorology and Water Resources of Ceará (Funceme) ..... 34
- Figura 2 – Water depths applied at three days interval throughout maize crop cycle for different simulated water scenarios (without supplemental irrigation). The data are mean of the two crop cycles which were very similar. The values of rainfall recorded in 2018 (13.7 mm) and 2019 (36.8 mm) were included as part of the total for each scenario. Total water depths of supplemental irrigation with brackish water applied during the dry spells were 51, 102, 172 and 260 mm, respectively for the rainy, normal, drought and severe drought scenarios ..... 34
- Figura 3 – Added value in the different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water, as a function of the area cultivated with BRS 2022 hybrid maize ..... 42
- Figura 4 – Farmer's income in the different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water, as a function of the area cultivated with BRS 2022 hybrid maize. LSR = level of social reproduction ..... 43
- Figura 5 – Estimate of the farmer's income for the period 2010 to 2019, considering the water scenario of each year with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water in the cultivation of BRS 2022 hybrid maize. Rainy (2011), Normal (2017 and 2019), Drought (2015, 2016 and 2018) and Severe Drought (2010, 2012, 2013 and 2014) ..... 45
- Figura 6 – Croqui experimental ..... 50
- Figura 7 – Lâminas de água aplicadas em intervalos de três dias ao longo do ciclo da cultura do milho para diferentes cenários hídricos simulados (sem irrigação suplementar) ..... 52

Figura 8 – Umidade do solo (camada de 0 a 20 cm) cultivado com milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras .....	54
Figura 9 – Condutividade elétrica do solo (extrato 1:1 solo água) cultivado com milho sob diferentes cenários hídricos e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras .....	56
Figura 10 – Taxas de fotossíntese líquida em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras .....	58
Figura 11 – Condutância estomática em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras .....	59
Figura 12 – Concentração interna de CO <sub>2</sub> em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras .....	59
Figura 13 – Taxa de transpiração em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.....	60
Figura 14 – Eficiência momentânea uso da água (EUA <sub>m</sub> ) em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras .....	61
Figura 15 – Vista superior da área experimental .....	63
Figura 16 – Análise de correlação entre a umidade do solo e a taxa de fotossíntese (A) e entre a umidade do solo e a produção de biomassa total por planta (B) ..	65
Figura 17 – Análise de correlação entre a salinidade do solo e a taxa de fotossíntese (A) e entre a salinidade do solo e a produção de biomassa total por planta (B) .....	65
Figura 18 – Teores de Na (A) e K (B) em folhas maduras de milho em função dos cenários hídricos e da suplementação ao não com águas salobras .....	66

Figura 19 – Teores de prolina em folhas maduras de milho em função dos cenários hídricos e da suplementação ao não com águas salobras .....	67
Figura 20 – Esquematização da leitura do fator de reflectância .....	75
Figura 21 – Fatores de reflectância máximos, medianos e mínimos para cada comprimento de onda estudado .....	77
Figura 22 – Correlograma das concentrações de prolina e comprimentos de onda hiperespectrais .....	78
Figura 23 – Caracterização espectral suavizado média das folhas avaliadas, segundo as concentrações de prolina (N=24) .....	80
Figura 24 – Comportamento espectral suavizado médio por tratamentos nas folhas de milho .....	82
Figura 25 – Análise derivativa de primeira ordem por tratamento em folhas de milho..	83
Figura 26 – Detalhe da análise derivativa de primeira ordem por tratamentos. A – Visível; B – VNIR; C - SWIR .....	84
Figura 27 – Análise de Componentes Principais para os tratamentos em milho (N=24) .....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação da água para fins de irrigação dos reservatórios do estado do Ceará nos períodos secos e chuvosos através da metodologia de Richards (1954) .....	21
Tabela 2	– Salinidade da água de poços distribuídos pelo Ceará .....	22
Tabela 3	– Fixed costs relative to 1.0 ha for the cultivation of maize in each cycle .....	36
Tabela 4	– Variable costs relative to 1.0 ha for cultivation of maize in each cycle, excluding labor .....	37
Tabela 5	– Results of F test for total biomass of ears and mean values of total biomass of green maize ears, percentage of commercial yield and percentage of stand reduction, as a function of simulated water scenarios (WS) and supplemental irrigation (SI) with brackish water .....	39
Tabela 6	– Análise de variância para os dados de trocas gasosas foliares em função dos cenários hídricos, irrigação suplementar e épocas de medição .....	57
Tabela 7	– Valores médios de biomassa fresca da parte aérea (vegetativa, reprodutiva e total), relação biomassa reprodutiva/biomassa total, eficiência do uso da água (EUA) e eficiência da água aplicada na irrigação suplementar ( $EUA_{is}$ ) na cultura do milho, em função dos cenários hídricos e da suplementação com água salobra ( $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) .....	62
Tabela 8	– Discriminação dos comprimentos de onda em cada componente .....	86
Tabela 9	– Planilha de irrigação (ciclos de 2018 e 2019) .....	108

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Semiárido brasileiro</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Impactos dos veranicos na produtividade das culturas</b> .....	17
<b>2.3</b>	<b>Irrigação suplementar como estratégia para minimizar perdas na produção agrícola</b> .....	18
<b>2.4</b>	<b>Caracterização geral das fontes de água do estado Ceará</b> .....	20
<b>2.5</b>	<b>O aporte de sais no solo em função da aplicação de água salina</b> .....	23
<b>2.6</b>	<b>Respostas das plantas aos estresses hídrico e salino</b> .....	25
<b>2.7</b>	<b>Sensoriamento remoto aplicado à salinidade agrícola</b> .....	27
<b>2.8</b>	<b>Breve caracterização da cultura do milho, com ênfase no ambiente semiárido</b> .....	28
<b>3</b>	<b>CHAPTER 1: SUPPLEMENTAL IRRIGATION USING BRACKISH WATER ON MAIZE IN TROPICAL SEMI-ARID REGIONS OF BRAZIL: YIELD AND ECONOMIC ANALYSIS</b> .....	31
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b> .....	32
<b>3.2</b>	<b>Materials and Methods</b> .....	33
<b>3.3</b>	<b>Results And Discussion</b> .....	39
<b>3.4</b>	<b>Conclusions</b> .....	46
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 2: A IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM ÁGUA SALOBRA NO CULTIVO DO MILHO SOB CLIMA TROPICAL SEMIÁRIDO: IMPACTOS NAS TROCAS GASOSAS FOLIARES E NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA</b> .....	47
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b> .....	48
<b>4.2</b>	<b>Material e Métodos</b> .....	49
<b>4.3</b>	<b>Resultados e Discussão</b> .....	54
<b>4.4</b>	<b>Conclusões</b> .....	68
<b>5</b>	<b>CAPITULO 3: USO DA ESPECTROMETRIA DE REFLECTANCIA E NÍVEIS FOLIARES DE PROLINA PARA IDENTIFICAR NÍVEIS DE ESTRESSE HÍDRICO E SALINO NA CULTURA DO MILHO</b> .....	69
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b> .....	70

<b>5.2</b>	<b>Material e Métodos .....</b>	<b>71</b>
<b>5.3</b>	<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>76</b>
<b>5.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE A – PLANILHA DE IRRIGAÇÃO .....</b>	<b>105</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O clima exerce papel fundamental no desenvolvimento do setor agropecuário, sendo a disponibilidade hídrica o fator que mais impacta a produção vegetal e animal em todo o mundo (ANA, 2013; FAO, 2017). No Estado do Ceará, mais de 80% dos municípios se encontram sob clima semiárido quente, o qual tem como principais características as secas recorrentes e a variabilidade pluviométrica intra-anual, que determinam muitas vezes o insucesso dos empreendimentos agrícolas. Na última década, principalmente entre os anos de 2012 e 2016 (IPECE, 2017), o tamanho dos rebanhos e os valores da produção de grãos, da fruticultura e da pesca/aquicultura foram sensivelmente reduzidos pelos baixos índices pluviométricos.

O fenômeno das secas faz parte da variabilidade natural do clima regional e, de acordo com as projeções de mudanças climáticas, é provável que continue e se intensifique no futuro (MARENGO *et al.*, 2017). Por outro lado, existe baixa variabilidade nos demais elementos meteorológicos, os quais se expressam na baixa amplitude térmica anual, não havendo as limitações do frio para o cultivo de plantas, como se verificam em regiões subtropicais e temperadas. Isso permite o desenvolvimento de cultivos agrícolas o ano inteiro, sendo requerido, no entanto, solos compatíveis com as atividades agrícolas e melhoria nos níveis tecnológicos de produção e na eficiência do uso dos recursos naturais.

Uma forma de se aumentar a produção vegetal com aumento significativo na eficiência do uso da irrigação é desenvolver ações para melhor aproveitamento da estação das chuvas, principalmente em anos com baixos índices pluviométricos, visto que as frequentes secas que ocorrem no semiárido brasileiro fazem com que os rendimentos das culturas sejam reduzidos drasticamente. Nesse contexto, a irrigação suplementar, associada às melhorias na qualidade do solo, poderia ser uma estratégia para incrementar a produção sustentável de alimentos durante a estação das chuvas, eliminando, pelo menos parcialmente, as perdas associadas aos veranicos, especialmente, mas não exclusivamente, nos anos de seca. Embora não seja um conceito novo, a irrigação suplementar é uma estratégia contemporânea e fundamental para a produção agrícola no presente e no futuro. De acordo com um documento do Serviço de Pesquisa do Parlamento da União Europeia, publicado em 2019 (EPRS, 2019), a irrigação suplementar é uma ferramenta decisiva para lidar com as limitações na disponibilidade de recursos hídricos, tanto nos países de clima úmido como nos de clima semiárido, considerando-se os riscos atuais e futuros associados às mudanças climáticas globais. Outro documento recente publicado no site da FAO (Food and Agriculture

Organization of the United Nations) define a irrigação suplementar como uma prática climática inteligente e promissora para a agricultura em regiões semiáridas (NANGIA *et al.*, 2018).

Dentre os aspectos positivos da irrigação suplementar destacam-se: redução das perdas econômicas do setor agrícola em anos de seca; aumento da oferta de grãos e forragem com menos água, ou seja, com alta eficiência do uso da água de irrigação; é uma estratégia adicional e nem sempre necessária; permite o aproveitamento de fontes alternativas de água; contribui para a sustentabilidade de algumas cadeias produtivas, favorecendo a estabilidade de produção agrícola interanual e a geração de empregos e renda durante a quadra chuvosa; não compete por terra nem pelo sistema de irrigação com os cultivos anuais da estação seca; aumenta o rendimento de culturas permanentes; permite a utilização de águas armazenadas em áreas da propriedade durante a própria estação chuvosa, favorecendo a evapotranspiração ao invés da evaporação; possibilita o uso de outras tecnologias, inclusive da adubação, pois os riscos de perdas de produção são baixos; permite antecipar ou retardar o plantio dentro da quadra chuvosa, conforme as características da cultura e o interesse do produtor.

Apesar das grandes vantagens, o uso da irrigação suplementar esbarra na escassez de reservas hídricas, as quais têm se mostrado insuficientes para atender as diferentes demandas das comunidades de pequenos agricultores, bem como das áreas irrigadas. Nesse contexto, as águas de qualidade marginal, como as águas residuárias e salobras, e as águas de poços rasos, como os de áreas em aluvião, são fontes alternativas e relevantes para uso na suplementação. No semiárido brasileiro é comum também a ocorrência de fontes hídricas salobras, com condutividade elétrica entre 1,5 e 6,0 dS m<sup>-1</sup>, baixas concentrações de sulfato e altas concentrações de cloreto e sódio. O uso contínuo dessas águas na irrigação reduz a produtividade das culturas e pode provocar a degradação do solo. Entretanto, pesquisas realizadas com culturas anuais demonstraram que a irrigação com águas salinas por curtos períodos não acarreta prejuízos significativos para a produtividade e os impactos sobre o solo são mínimos.

Nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar os impactos e a viabilidade da irrigação suplementar do milho utilizando-se águas salobras, para as condições do semiárido brasileiro. A hipótese do trabalho é que o estresse salino associado ao uso de águas salobras na irrigação suplementar é muito menos deletério que o estresse hídrico associado aos veranicos, especialmente em anos de seca, sendo possível manter uma boa produtividade com a utilização dessas fontes hídricas, notadamente em áreas de pequenos agricultores.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Semiárido brasileiro

As áreas áridas e semiáridas cobrem aproximadamente 41% da superfície seca do planeta terra. Nessas áreas, a degradação do solo é um problema ambiental extremamente desafiador, resultando na queda da produtividade das culturas e intensificando o processo de desertificação (REYNOLDS *et al.*, 2007; DELGADO-BAQUERIZO *et al.*, 2013).

No Brasil, o espaço geográfico do semiárido estende-se por oito Estados da região Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte) e Sergipe, e o Norte de Minas Gerais, totalizando uma extensão territorial de 980.133,079 km<sup>2</sup>. O Nordeste apresenta 56,46% de seu território na porção Semiárida e o estado do Ceará possui 86,7% de seu território contido dentro do semiárido (INSA, 2012).

Para fazer parte da região semiárida, os territórios devem atender pelo menos a um dos seguintes critérios: precipitação média anual inferior a 800 milímetros, índice de aridez de até 0,5 e risco de seca maior que 60%. O Semiárido brasileiro, caracteristicamente, apresenta forte insolação, temperaturas relativamente altas e regime de chuvas marcado pela escassez, irregularidade e concentração das precipitações em um curto período, em média, de três a quatro meses, apresentando volumes de água insuficientes em seus mananciais para atendimento das necessidades da população (SILVA *et al.*, 2010; INSA, 2012; MARENGO *et al.*, 2017).

O clima é uma das características mais importantes da região Semiárida, principalmente devido à ocorrência das secas estacionais e periódicas, determinantes do sucesso (ou não) das atividades agrícolas e pecuárias e, conseqüentemente, da sobrevivência das famílias, com grande influência sobre os condicionamentos de ordens ecológica, botânica e fitogeográfica, dentre outros (MENDES, 1997; SILVA *et al.*, 2010).

Os eventos de seca no passado, nos estados do semiárido brasileiro, geraram perdas massivas na produção agrícola e pecuária, perda de vidas humanas devido à fome, desnutrição e doenças, migração de pessoas, bem como impactos sobre a economia regional (MARENGO *et al.*, 2013; MARENGO *et al.*, 2017). A última grande seca, ocorrida em 2012 (que se estendeu até 2016) foi considerada a mais grave das últimas décadas e teve forte impacto sobre muitas cidades das regiões semiáridas do Brasil, afetando quase 9 milhões de pessoas (MARENGO *et al.*, 2017).

A perspectiva do aumento na frequência e duração do período de seca no nordeste

brasileiro gera grande preocupação entre gestores, agricultores e pesquisadores. Os pesquisadores buscam entender até que ponto essas mudanças irão impactar nos recursos, produção de alimentos, rendimentos e meios de subsistência. A provável intensificação de secas extremas tem demandado medidas proativas para aumentar a resiliência da população aos impactos esperados das secas (MARENGO *et al.*, 2017).

Grande parte da população que vive na região semiárida está diretamente vinculada às atividades agropecuárias e busca seu sustento nos recursos naturais existentes em suas propriedades ou no entorno destas. Tais atividades são altamente dependentes da chuva e, em razão das adversidades climáticas, com ciclos de secas acentuados, resultam em forte degradação ambiental (SILVA *et al.*, 2010).

## **2.2 Impactos dos veranicos na produtividade das culturas**

A precipitação é um dos principais elementos climáticos que afetam a subsistência do agricultor e desempenha um papel importante no meio ambiente e nas condições socioeconômicas em diferentes países do mundo. Diversos estudos têm mostrado uma enorme variabilidade na precipitação em diferentes partes do mundo (JAIN e KUMAR, 2012; VENGATESWARI *et al.*, 2019).

A irregularidade no regime pluviométrico, acompanhada pelo intenso calor, resulta em elevadas taxas de evapotranspiração potencial e real, as quais reduzem a umidade do solo e a quantidade de água armazenada nos reservatórios. Em outras palavras, a precipitação reduzida e irregular e as altas taxas evapotranspirativas durante o ano resultam em um balanço hídrico negativo (SILVA *et al.*, 2010).

Além dos eventuais anos secos e da curta duração da estação chuvosa, as regiões semiáridas ainda têm outra adversidade climática no tocante à exploração agrícola, os veranicos. Os veranicos podem ser caracterizados como ocorrência de períodos com pouquíssima ou nenhuma chuva durante a estação chuvosa (SILVA e RAO, 2002; ŞEN, 2015).

Os veranicos se constituem em um sério problema, pois quando se estendem por longo período de tempo, atingindo a emergência das plantas ou os estádios fenológicos de floração e de formação da produção, causam frustração parcial ou total da safra (SILVA e RAO, 2002).

Uma particularidade no semiárido do Nordeste brasileiro, em especial, no Ceará, é a constante a ocorrência de veranicos durante a estação chuvosa. A influência do veranico sobre a produtividade das culturas pode ser acentuada, principalmente quando coincide com

a fase na qual a planta está mais sensível à deficiência hídrica (CARVALHO *et al.*, 2000). Os veranicos de duas semanas podem reduzir os rendimentos em 75% quando ocorrem durante os estágios de floração ou enchimento de grãos (BARRON *et al.*, 2003; SELESHI e ZANKE, 2004).

Pesquisas realizadas avaliando o impacto da duração dos veranicos sobre diferentes culturas, demonstraram que a produção de milho e feijão é bastante dependente da duração dos veranicos, necessitando de técnicas adaptadas para o cultivo dos mesmos sob condições de sequeiro (CARVALHO *et al.*, 2000; MENEZES *et al.*, 2010).

Deste modo, surge a necessidade de medidas que facilitem a convivência com o semiárido, de técnicas direcionadas à realidade das regiões, de práticas que facilitem o desenvolvimento de atividades agropastoris e que gerem o menor impacto possível para o meio ambiente. Uma alternativa para a redução dos efeitos dos veranicos na produção agrícola é a utilização da irrigação suplementar. Tal irrigação tem como objetivo anular o efeito do veranico, visto que, a irrigação seria realizada dentro do período de estresse hídrico da cultura.

### **2.3 Irrigação suplementar como estratégia para minimizar perdas na produção agrícola**

A produção vegetal é uma atividade de grande importância para o setor agropecuário, tendo influência direta na produção animal e na geração de renda e empregos no meio rural. No Estado do Ceará se destacam a fruticultura, a produção de grãos, a forragem, os produtos hortícolas, dentre outros. Para a manutenção de altos rendimentos nos cultivos agrícolas, há necessidade de solos bem desenvolvidos e manejados adequadamente, realização de adubações de acordo com as recomendações técnicas, culturas adaptadas ao clima semiárido tropical e, sobretudo, disponibilidade de água. Sem descartar a importância dos demais, este último aspecto se sobressai, particularmente em regiões semiáridas tropicais, face às elevadas taxas de evapotranspiração dos cultivos.

Para as condições semiáridas, a irrigação é um fator decisivo para o sucesso de empreendimentos com produção vegetal (COSTA *et al.*, 2011; FAO *et al.*, 2017; SEDET, 2019), sendo requeridos métodos e sistemas de irrigação mais eficientes e cultivos mais responsivos à água e mais rentáveis, algo que já vem sendo praticado com sucesso em muitas áreas. Ou seja, o que se busca é a alta produtividade e maiores lucros com menos água. Não há como se ter agricultura sustentável com desperdício de água.

Uma forma de se aumentar a produção vegetal com menos água de irrigação é desenvolver ações para melhor aproveitamento da estação das chuvas, principalmente em anos

com baixos índices pluviométricos, visto que as frequentes secas que ocorrem no semiárido brasileiro fazem com que os rendimentos das culturas sejam reduzidos drasticamente (MELO JUNIOR *et al.*, 2006; MARENCO *et al.*, 2017; ZANINELLI *et al.*, 2019).

A variabilidade espaço-temporal, juntamente com a baixa precipitação durante as estações de cultivo, sugere que a agricultura de sequeiro necessite de uma irrigação suplementar que possa reduzir o estresse hídrico sofrido durante os estágios de crescimento das culturas e aumentar e estabilizar a produtividade agrícola (ALI *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a irrigação suplementar, associada às melhorias na qualidade do solo, poderia ser outra estratégia para incrementar a produção sustentável de alimentos durante a estação das chuvas, eliminando, pelo menos parcialmente, as perdas associadas aos veranicos, especialmente, mas não exclusivamente, nos anos de seca (PERRIER e SALKINI, 1991; OSTER e GRATTAN, 2002; CHAUHAN *et al.*, 2008).

A utilização de águas de qualidade marginal, incluindo as águas residuárias e salobras, como alternativa para a irrigação ainda é um desafio para a agricultura, mas se utilizada de forma correta, pode ser uma alternativa para algumas atividades produtivas das regiões semiáridas, incluindo diversos ramos da indústria e do setor agropecuário (MEDEIROS *et al.*, 2005; CIRILO, 2008; COSTA *et al.*, 2011; NEIVA, 2015).

A irrigação suplementar de culturas anuais (grãos e forrageiras, por exemplo) é, portanto, uma estratégia adicional para aumentar de forma substancial a produção agrícola, garantindo água para as plantas em épocas de veranicos e aumentando substancialmente a produtividade da água de irrigação. No entanto, não há tradição do emprego de irrigação suplementar no Estado do Ceará e nem no semiárido brasileiro como um todo, exceto por um pequeno número de agricultores que a denominam de irrigação de salvação. Não há ampla adesão a esta técnica mesmo para culturas permanentes, para as quais a suplementação hídrica é normalmente requerida nos longos veranicos.

Os dados de perda de produção em anos de seca (IPECE, 2017) mostram claramente que a irrigação suplementar não é considerada uma estratégia de desenvolvimento. Esse quadro pode ser explicado pela própria falta de recursos hídricos, falta de apropriação da técnica pelos agricultores, aspectos socioeconômicos, falta de interesse e praticamente inexistência de pesquisas para condições do Estado do Ceará. Entretanto, os cenários de mudanças climáticas (IPCC, 2013) demonstram a necessidade de se avançar para alternativas aos modelos de produção vigentes, sendo a irrigação suplementar uma prática reconhecidamente promissora (NANGIA *et al.*, 2018; EPRS, 2019).

A possibilidade de utilização de água salobra no cultivo agrícola pode ser

extremamente benéfica para o semiárido brasileiro e, em especial, ao semiárido cearense, visto que, o mesmo possui uma grande quantidade de poços com água salobra. A irrigação suplementar com água salobra poderia estender as possibilidades para o cultivo no semiárido cearense.

## 2.4 Caracterização geral das fontes de água do estado Ceará

O Estado do Ceará localiza-se no nordeste do Brasil, tendo a quase totalidade dos seus 148.826 km<sup>2</sup> (Resolução N° 5/2002 do IBGE) de área territorial inseridos no semiárido, possuindo características físicas e socioeconômicas que o tornam uma região única quanto ao estabelecimento de uma política de recursos hídricos (TEIXEIRA *et al.*, 2015).

O Ceará é um estado com baixa disponibilidade hídrica, devido à combinação de uma série de fatores, sobretudo: baixos índices de precipitação (inferiores a 900 mm); altas taxas de evaporação (superiores a 2.000 mm); irregularidade do regime de precipitação (secas frequentes e por vezes plurianuais); e um contexto hidrogeológico desfavorável, com cerca de 80% do território sobre rocha cristalina, com camada de solo raso e poucos recursos hídricos subterrâneos. Por isso, a maior parte dos rios são naturalmente intermitentes, ou seja, são corpos d'água que secam durante a estação seca (SOUZA FILHO, 2018).

O domínio das rochas cristalinas, na maioria das vezes, apresenta vazões baixas e águas salobras. Já o domínio das rochas sedimentares geralmente armazena água em maior quantidade e de melhor qualidade (CPRM, 1988).

Atualmente, o estado do Ceará administra uma rede de 155 reservatórios, com capacidade total de acumulação de 18.618 hm<sup>3</sup> de água. O Ceará conta com 12 regiões hidrográficas: Bacia metropolitana, Acaraú, Alto Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú, Coreaú, Curu, Litoral, Médio Jaguaribe, Salgado, Serra da Ibiapaba e Sertões de Crateús (FUNCEME, 2020).

A infraestrutura hídrica compreende 408 km de canais, 1.784 km de adutoras e redes de distribuição e 32 estações de bombeamento. No total, são 2.582 km de rios perenizados, envolvendo 81 corpos d'água (SOUZA FILHO, 2018). A disponibilidade hídrica para atender uma população de cerca de 9 milhões de habitantes está basicamente dependente dos estoques de água acumulados em reservatórios superficiais (CAMPOS *et al.*, 2003).

Nas condições do nordeste, a salinidade média nos açudes tende a ser menor do que a dos rios, cacimbões e poços rasos, de forma que o tipo de solo apresenta-se como o indicador do nível de salinidade das águas superficiais (SANTOS, 2000). Desta forma, serão

abordadas duas fontes de água para fins de irrigação no estado do Ceará: água proveniente das bacias hidrográficas ou reservatórios (águas superficiais) e água de poços subterrâneos (águas subterrâneas).

Realizando um estudo sobre a qualidade da água superficial em reservatórios distribuídos por todo o estado do Ceará, Chaves *et al.* (2010) classificaram a água para fins de irrigação nos períodos seco (julho a dezembro) e chuvoso (janeiro a junho), utilizando a classificação proposta pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL), que leva em consideração a CE e a RAS, para os riscos de salinização e/ou sodificação da água (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação da água para fins de irrigação dos reservatórios do estado do Ceará nos períodos secos e chuvosos através da metodologia de Richards (1954).

Classificação de Richards (1954)	Reservatórios (%)	
	Período seco	Período chuvoso
C <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	19	25
C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	75	67
C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	4	6
C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	2	-
C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	-	2

Fonte: Chaves *et al.*, (2010).

Para o período seco, foi observado que as águas do estado foram classificadas em quatro classes: C<sub>1</sub>S<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>S<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> e C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, demonstrando que, de acordo com a classificação proposta por Richards (1954), as águas analisadas apresentam de baixo a alto perigo de salinização, e quanto a sodificação, o risco varia de baixo a médio. Já para o período chuvoso foi verificado as seguintes classes: C<sub>1</sub>S<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>S<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> e C<sub>4</sub>S<sub>2</sub>. Observa-se que neste período a salinidade variou de baixo risco (C1) a risco muito alto de salinização (C4) e o risco a sodificação varia de baixo (S<sub>1</sub>) a médio (S<sub>2</sub>) (Chaves *et al.*, 2010).

Percebe-se que cerca de 94% dos reservatórios no período seco e 92% dos reservatórios no período chuvoso apresentaram água de baixa salinidade e sodicidade, mostrando que pode ser usada para irrigação na maior parte dos cultivos em quase todos os tipos de solo, com pouca probabilidade de desenvolver problemas de salinidade e sodicidade. Também é possível observar que 6% dos reservatórios no período seco e 8% no período chuvoso, apresentaram uma água de salinidade elevada. Isso demonstra que a utilização destas águas de forma indiscriminada poderá trazer sérios problemas para a agricultura, podendo limitar a produção agrícola (DIAS *et al.*, 2016).



Milhares de reservatórios foram construídos nessas regiões, com a finalidade principal de armazenar água para múltiplos usos, principalmente, durante os períodos de estiagem (PALÁCIO *et al.*, 2011). Embora os açudes contribuam significativamente para o abastecimento hídrico, essas regiões se deparam com um novo impasse: a qualidade das águas em muitos reservatórios não é adequada para os múltiplos usos. Essas águas, sujeitas às elevadas taxas de evaporação, tornaram-se salinas atingindo, em alguns casos, concentrações de sais que impedem seu uso para consumo humano e agricultura (MEIRELES *et al.*, 2007).

É possível observar que as regiões que apresentam valores elevados de salinidade estão situadas dentro da região semiárida, ou seja, são regiões que apresentam baixa pluviosidade e a água disponível para a irrigação é geralmente de baixa qualidade, havendo a necessidade de que sejam adotadas estratégias de manejo da irrigação pelo produtor.

Ao se tratar de águas subterrâneas, no ano de 2003 havia cerca de 23.000 poços perfurados no Ceará, estando alguns em funcionamento desde 1903. Cerca de 63% destes estavam no embasamento cristalino, 29% em litologia sedimentar e o restante em aluviões e formações cársticas (Silva *et al.*, 2007). Atualmente, no último censo agropecuário realizado pelo IBGE (2017), o estado do Ceará possuía cerca de 85.684 poços subterrâneos.

Em um estudo realizado por Silva *et al.* (2007) com amostras de água de 254 poços localizados em 53 municípios distribuídos por todo o Ceará, foi observado que a maioria dos poços estudados possuem água com salinidade maior de 2,26 dS m<sup>-1</sup>, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Salinidade da água de poços distribuídos pelo Ceará.

Salinidade da água (dS m <sup>-1</sup> )	Poços cearenses (%)
Menor que 0,3	2,8
De 0,31 a 0,75	8,3
De 0,76 a 2,25	28,1
De 2,26 a 4,50	22,9
Maior que 4,50	37,9

Fonte: Silva *et al.*, (2007).

Observa-se que há um alto grau de salinidade da água dos poços analisados, pois 60,8% das amostras apresentaram salinidade maior que 2,25 dS m<sup>-1</sup>. Trabalhar com águas que possuem um alto valor de salinidade requer técnicas específicas para que o solo não seja salinizado e a produtividade das culturas não seja afetada. Ainda, ao analisar a salinidade de poços instalados nos 184 municípios do estado do Ceará, foi observado que 52 municípios possuíam poços com salinidade superior a 2 dS m<sup>-1</sup>, mostrando mais uma vez que cerca de um terço de todos os poços possuem alta salinidade (SILVA *et al.*, 2007).

Observa-se que as águas provenientes das bacias hidrográficas possuem uma salinidade inferior às águas dos poços. Lacerda *et al.* (2016) explicam isso afirmando que os reservatórios de água de maior capacidade de armazenamento contêm água de boa qualidade, com pequena variação na composição ao longo do ano. Por outro lado, em pequenos açudes ou poços, a variação ao longo do ano é maior e encontram-se valores mais elevados de salinidade.

Constata-se que boa parte do Ceará possui poços com valores altos de salinidade. Percebe-se que é um elevado número de poços e que esta fonte hídrica, que na maioria dos casos é a única fonte disponível para o agricultor, não deveria ser inviabilizada para o uso agrícola, entretanto, é necessário que sejam aplicadas estratégias para seu uso.

Deste modo, uma pequena parte dos açudes e 2/3 dos poços analisados encontram-se no semiárido cearense e apresentaram águas com restrições para a irrigação, com elevado valor de salinidade. Isso, no entanto, não inviabiliza a utilização destas águas para a irrigação, pois ainda existem outros aspectos a se considerar, como o solo, a planta e as estratégias de manejo a serem definidas pelo profissional do campo (LACERDA *et al.*, 2016; LACERDA *et al.*, 2020).

A utilização da água salina de maneira complementar a água da chuva pode ser uma boa alternativa para utilização destas águas, podendo melhorar a produtividade nos anos mais secos e, conseqüentemente, potencializar o lucro para o pequeno agricultor que dispõe somente desta fonte hídrica (KANG *et al.*, 2010; PORTO FILHO *et al.*, 2011; BARBOSA *et al.*, 2012; TERCEIRO NETO *et al.*, 2013; NEVES *et al.*, 2015).

## **2.5 O aporte de sais no solo em função da aplicação de água salina**

Os solos afetados por sais ou também chamados de solos halomórficos e sódicos, são solos desenvolvidos em condições de drenagem deficiente, que se caracterizam pela presença de sais solúveis, sódio trocável ou ambos, em horizontes ou camadas próximas à superfície (RIBEIRO *et al.*, 2016). A salinização é um fenômeno que consiste na acumulação de sais solúveis em água no solo, tais como, magnésio ( $Mg^{2+}$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), cloreto ( $Cl^-$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) (FLORES, 2015). Já a sodificação do solo está associada a excessos dos ânions  $OH^-$ ,  $HCO_3^-$  e  $CO_3^{2-}$ , conferindo-o forte caráter de alcalinidade (SANTOS *et al.*, 2016).

As causas naturais da salinização podem ser oriundas das águas subterrâneas ricas em sais, alta evapotranspiração e baixa precipitação. Normalmente, essas condições são

encontradas em regiões áridas ou semiáridas (WALTER *et al.*, 2018). Além dos fatores citados acima, a drenagem deficiente, o manejo do solo, o material de origem, a elevação do lençol freático e o uso excessivo de fertilizantes minerais também contribuem para a salinização do solo (BRAZ, 2018).

O processo de salinização pode ocorrer pela salinização natural, também conhecida como salinização primária, ou pode ser ocasionado pela salinização induzida ou antrópica. De forma geral, a salinização natural pode ocorrer pelas seguintes causas: - Invasão de água salgada que deposita seus sais no terreno atingido; - Acumulação de sais provenientes de áreas circunvizinhas, por escoamento superficial e drenagem lateral; - Ascensão dos sais por capilaridade. Já a salinização induzida, pode ocorrer em consequência da deposição dos sais pela água de irrigação contendo sais em solução ou por meio da elevação dos sais a superfície por ascensão do lençol freático, em virtude do manejo inadequado da irrigação (ausência de drenagem e/ou irrigação em excesso). Em ambos os casos, naturais ou induzidos, o processo de salinização envolve o excesso de água e, geralmente, evapotranspiração elevada (HANIN *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2016).

Níveis elevados de sais na água de irrigação causam menor diferença de potencial hídrico entre o solo e a planta e, portanto, aumenta a dificuldade de absorção de água pelas raízes. Quanto mais salina for a água, menor será o seu potencial osmótico e mais difícil a absorção pelas plantas, podendo chegar a uma condição de perda de água da célula para o meio. Já a presença de íons na água de irrigação pode causar problemas de fitotoxicidade (toxicidade direta para vários processos fisiológicos da planta ou desequilíbrios nutricionais) com diferentes níveis de tolerância entre as espécies de plantas (DIAS *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2016).

A irrigação com água salina, na maioria das vezes, resulta em efeito adverso nas relações solo-água-planta, ocasionando restrição severa nas atividades fisiológicas e no potencial produtivo das plantas cultivadas. Em condições de altos níveis de sais solúveis na solução do solo, o crescimento, a expansão da superfície foliar e o metabolismo do carbono primário de muitas culturas são afetados negativamente devido a diferentes fatores (DIAS *et al.*, 2016; PESSOA *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020).

Nas regiões semiáridas, devido ao baixo conteúdo de água nos solos, os minerais primários e secundários sofrem um incipiente processo de degradação química, onde as reações de hidrólise, hidratação, carbonatação e oxirredução restringem-se a um curto período de tempo, com pequena liberação de eletrólitos para a solução do solo; no entanto, ao longo do tempo há acumulações de cátions e ânions que, por estarem localizados em ambiente com

elevada evapotranspiração, tendem a precipitar-se na forma de sais (SANTOS *et al.*, 2016).

No processo de aporte de sais no solo, uma série de fatores estão diretamente relacionados e que, trabalhando em conjunto, afeta o desenvolvimento das plantas, principalmente devido aos efeitos osmóticos, tóxicos e ao desequilíbrio nutricional.

## 2.6 Respostas das plantas aos estresses hídrico e salino

No cultivo em campo, as culturas estão continuamente expostas a múltiplos estresses (bióticos e abióticos) que resultam em alterações fisiológicas e bioquímicas e, como consequência, provocam grandes perdas na produção e colheitas em todo o mundo. Diante disso, muitos estudos têm sido desenvolvidos para compreender os mecanismos de resposta das plantas a esses diferentes estresses e como minimizar os seus efeitos.

Um grande estresse que assola a comunidade agrícola é o estresse hídrico. Este estresse afeta diretamente as respostas fisiológicas das plantas, em especial, a capacidade fotossintética. Se o estresse for prolongado, o crescimento da planta e a produtividade são severamente reduzidos (OSAKABE *et al.*, 2014). O estresse hídrico promove o fechamento estomático e a redução da fixação de CO<sub>2</sub>, o que pode causar redução excessiva da atividade da cadeia de elétrons fotossintéticos (PENELLA *et al.*, 2017). O estresse hídrico afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois limita o acesso aos recursos necessários para a fotossíntese devido ao fechamento estomático e à redução do transporte interno de água (BREDA *et al.*, 2006; MCDOWELL *et al.*, 2011;).

Este tipo de estresse traz danos para culturas de alto impacto na economia, como o milho (HUANG *et al.*, 2017), o trigo (BUDAK *et al.*, 2013), a soja (BELLALLOUI *et al.*, 2013), árvores frutíferas (PENELLA *et al.*, 2017), plantas ornamentais (NORDSTEDT e JONES, 2020), dentre outras culturas. Devido ao alto impacto na agricultura, muitas pesquisas vem sendo desenvolvidas com o intuito de produzir genótipos mais tolerantes ao estresse hídrico, pesquisas relacionadas ao melhoramento genético.

Outro importante estresse que assola grande parte da comunidade agrícola é o estresse salino. Os sais contidos na água de irrigação e no solo podem inibir o crescimento das plantas por diferentes razões: pelo efeito osmótico, pelos efeitos de íons específicos, dificuldade de absorção de nutrientes, dentro outros (PARIHAR *et al.*, 2015; ISAYENKOV e MAATHUIS, 2019).

Em solos salinos, os sais solúveis na solução do solo aumentam as forças de

retenção de água devido ao efeito osmótico, ocorrendo assim redução na absorção de água pela planta. O aumento da pressão osmótica, causado pelo excesso de sais solúveis, poderá atingir um nível em que as plantas não terão forças de sucção suficiente para superar essa pressão osmótica e, em consequência, a planta não irá absorver água, mesmo em solo úmido (DIAS *et al.*, 2016).

Santos *et al.* (2016) afirmam que sob condições salinas, verifica-se uma redução do potencial osmótico das células, sem redução de volume, o que é denominado de ajustamento osmótico, ficando a plasmólise restrita a condições de severa salinidade ou quando a raiz é submetida a um choque osmótico. Vale ressaltar que mesmo nas plantas ajustadas osmoticamente o fluxo de água no sistema solo-planta é reduzido, pois a salinidade afeta a condutividade hidráulica nas raízes e as plantas tendem a reduzir a abertura estomática e o fluxo transpiratório sob condição de estresse osmótico.

Outro problema ocasionado pela salinidade nas plantas refere-se ao acúmulo de sais em altos níveis nas células, tornando os íons tóxicos e, conseqüentemente, diminuindo os processos metabólicos nas plantas, podendo causar senescência prematura e/ou, morte celular (MUNNS e TESTER, 2008; ROY *et al.*, 2014; ISAYENKOV e MAATHUIS, 2019).

Também é observado que a elevada concentração de sais solúveis e de sódio trocável nos solos é um fator que afeta negativamente a fertilidade do solo. A salinidade e a sodicidade adicionam um alto nível de complexidade para a nutrição mineral das culturas, afetando a atividade dos íons em solução e os processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição. Essa complexidade é explicada pelas diferenças na concentração e na composição iônica dos meios salinos aos quais as plantas são submetidas, pelos nutrientes essenciais envolvidos e pelas diferentes respostas das plantas tanto em relação à salinidade como para à eficiência na aquisição de nutrientes do solo (SANTOS *et al.*, 2016).

Tanto o estresse hídrico, quanto o salino conduzem as plantas a uma série de mudanças morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, reduzindo o seu potencial de desenvolvimento e limitando a sua produtividade. Tais estresses são ameaças globais para agricultura e é necessário que sejam desenvolvidas alternativas que minimizem os seus efeitos.

Uma importante técnica utilizada para avaliar os efeitos da salinidade e auxiliar nas tomadas de decisões é o sensoriamento remoto. Nas últimas décadas, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto na agricultura tem crescido substancialmente e a combinação desta técnica com problemas relacionados à salinidade tem sido bastante difundida pela comunidade científica.

## 2.7 Sensoriamento remoto aplicado à salinidade agrícola

A aplicação da tecnologia de sensoriamento remoto na gestão de agricultura de precisão tem se tornado cada vez mais comum entre os agricultores devido à sua capacidade de otimizar o status da cultura, facilitando o seu monitoramento efetivo (PEI *et al.*, 2014).

O sensoriamento remoto pode gerar dados de refletância espectral úteis que fornecem meios rápidos para monitorar o status do crescimento de plantas por meio de vários parâmetros biofísicos, fisiológicos ou bioquímicos da cultura. Para o monitoramento da cultura, a observação das propriedades biofísicas das plantas e “status” fisiológicos, como a área foliar, eficiência do uso da luz, clorofila e teores de nitrogênio, tornou-se extremamente importante para melhorar a nutrição e o rendimento das culturas (ZHAO *et al.*, 2013).

O sensoriamento remoto hiperespectral também possui um potencial significativo para a avaliação rápida e não invasiva de doenças de cultivo em diferentes escalas, desde pequenas folhas até o dossel (ANDEREGG *et al.*, 2019).

As análises de salinidade do solo por meio do sensoriamento remoto tem crescido de forma rápida nos últimos anos. De acordo com o Web of Science da Thompson Reuters, o número de publicações com foco na avaliação da salinidade do solo com sensoriamento remoto triplicou, em que o número médio anual de publicações científicas com os tópicos combinados de “sensoriamento remoto” e “salinidade do solo” aumentou de 9,7 em 1996 – 2005 para 33,9 em 2006 – 2015 (SCUDIERO *et al.*, 2016).

Os sistemas de sensoriamento remoto, dependendo de medições de refletância espectral e análise de imagens, podem adquirir informações oportunas para tomar decisões de gerenciamento em tempo real em comparação com medições destrutivas laboriosas (ELSAYED *et al.*, 2018).

A medição da reflectância espectral é uma técnica não destrutiva que já é muito utilizada como um indicador de estresse em plantas. Existem vários índices de reflectância espectral com base na reflectância em regiões específicas que podem ser usados para prever o conteúdo relativo de pigmentos da folha. As reduções de pigmentos e o aumento da reflectância espectral são respostas típicas ao estresse das plantas (CARTER e KNAPP, 2001; SIMS e GAMON, 2002).

As técnicas de espectrometria de reflectância já são amplamente utilizadas por empresas agrícolas, não apenas para observações espaciais, mas para agir imediatamente na complementação de elementos que apresentam sinais de doses insuficientes (OLIVEIRA, *et al.*, 2020)

Os principais benefícios do uso desta técnica são: após a calibração para o elemento de interesse, é possível obter uma estimativa quantitativa precisa para um determinado nutriente em cerca de um minuto, sem o uso de reagentes químicos e, portanto, sem produzir poluentes. Além disso, esta técnica é menos dispendiosa do que as técnicas tradicionais baseadas em produtos químicos e não requer uma preparação complexa de amostras antes da análise (GALVEZ-SOLA *et al.*, 2015).

Percebe-se que a espectrometria de reflectância é ferramenta de grande valor e se usada de maneira correta, pode auxiliar o agricultor na tomada de decisões, acelerando a obtenção dos resultados, sem que haja falha na confiabilidade dos dados. Atualmente, as análises que envolvem problemas com salinidade levam muito tempo para serem coletadas e analisadas em laboratório, a espectrometria de reflectância surge como uma ferramenta que irá otimizar todo o processo.

## **2.8 Breve caracterização da cultura do milho, com ênfase no ambiente semiárido**

Os primeiros registros do cultivo de milho (*Zea mays L.*) datam de cerca de 7.300 anos e foram feitos em pequenas ilhas próximas ao litoral mexicano. O milho (*Zea mays L.*) é uma espécie diplóide e alógama, pertencente à família Poacea (Graminea) que se originou aproximadamente de sete a dez mil anos atrás no México e na América Central (PATERNIANI e CAMPOS, 1999).

O período de crescimento e desenvolvimento do milho é limitado pela água, pela temperatura e pela radiação solar. A cultura do milho necessita que a temperatura, a precipitação e o fotoperíodo atinjam níveis ótimos, para que o seu potencial genético de produção se expresse ao máximo (EMBRAPA, 2012). O milho é uma cultura moderadamente tolerante à salinidade, apresentando redução na sua produção quando a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo é superior a  $2,7 \text{ dS m}^{-1}$  (McWILLIAMS, 2003).

O milho é uma das culturas mais importantes mundialmente, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista social. Destaca-se por ser o grão mais produzido no mundo, sendo a única a ter ultrapassado a marca de 1 bilhão de toneladas, deixando para trás antigos concorrentes, como o arroz e o trigo. Da safra de 2000/01 para a de 2017/18, a produção mundial de milho obteve um aumento de 82%, principalmente pelo uso como ração animal para a produção de frangos e suínos (CONTINI *et al.*, 2019; CONAB, 2020).

O milho produzido no Brasil também tem ganhado importância no cenário do comércio mundial: o país se destaca por ser o segundo maior exportador do grão

(SOLOGUREN, 2015). No país, o milho é cultivado em todas as regiões. Sua produção ocorre em diferentes épocas, face às condições climáticas das regiões. Na região nordeste, em especial, a época de maior concentração de chuvas é a partir do mês de janeiro e o cultivo do milho se dá neste período.

O destino do milho é, principalmente, a produção de rações para uso animal. Estima-se que, dentre as quase 85 milhões de toneladas produzidas, 56 milhões de toneladas são destinadas para uso na alimentação animal (SOLOGUREN, 2015; MIRANDA, 2018). A produção de milho no Brasil é voltada essencialmente para o mercado interno (67,2%), sendo utilizado essencialmente para suprir a alimentação de animais. A avicultura e a suinocultura responderam por 25,8% e 13,6% do consumo nacional do grão em 2018, respectivamente. Apenas 2,0% da produção de milho é direcionada para o consumo in natura pela população brasileira. Mesmo com essa pequena participação, em algumas regiões o milho é ingrediente básico da culinária, como é o caso do Nordeste brasileiro, onde o cereal é relevante para a população de baixa renda. Vale ressaltar que cerca de um terço da safra de milho brasileira é exportada (BNB, 2018).

As alternativas de uso do milho vão se ampliando para além de ração animal. A indústria vem incrementando o emprego do milho como insumo na fabricação de produtos como lisina, itens biodegradáveis, isoglucose, etanol etc. Constata-se, portanto, que a cultura do milho se acha inserida na estrutura de uma cadeia produtiva que se alonga e se integra horizontalmente (BARROS e ALVES, 2015).

O milho é uma cultura bem adaptada às regiões tropicais e subtropicais com alta disponibilidade de água, nutrientes e radiação solar, onde produzem grande quantidade de biomassa. Contudo, no Nordeste brasileiro essa cultura é cultivada principalmente em regime de sequeiro. Assim, estão sujeitas a períodos de deficiência hídrica, devido à irregularidade da precipitação pluvial e ao manejo inadequado, que geralmente resultam em reduções expressivas da produção de biomassa e em baixas produtividades (SOUZA *et al.*, 2017).

A Região Nordeste apresenta a maior área cultivada com milho primeira safra do país. O Nordeste foi responsável por uma produtividade de 4.736 kg ha<sup>-1</sup> no ano de 2019 e 4.477 kg ha<sup>-1</sup> no ano de 2020 para o milho primeira safra, demonstrando uma pequena redução de 5,5% (CONAB, 2020).

Um agravante no cultivo do milho na região nordestina, em especial, no semiárido Nordestino, é o fato do cultivo ser predominantemente realizado na forma de sequeiro. No Estado do Ceará, por exemplo, com território de clima semiárido tropical, a área destinada ao cultivo de sequeiro representa 95% do total, mas responde por apenas 41% do valor bruto da



produção (SEDET, 2019).

A baixa pluviosidade e as altas taxas de evapotranspiração são características marcantes do semiárido e fazem com que o cultivo do milho de sequeiro atinja baixos níveis de produtividade, podendo levar a atividade agrícola ao insucesso. Alternativas devem ser criadas para que se possa aumentar as chances de alta produtividade, tornando o cultivo do milho de sequeiro vantajoso para o pequeno agricultor.

### **3. CHAPTER 1: SUPPLEMENTAL IRRIGATION USING BRACKISH WATER ON MAIZE IN TROPICAL SEMI-ARID REGIONS OF BRAZIL: YIELD AND ECONOMIC ANALYSIS.**

**ABSTRACT:** Supplemental irrigation during dry spells could reduce maize yield losses in tropical semi-arid regions, notably in small farms. However, good quality water reserves are not sufficient to meet the demands of farming communities. So, our objective was to evaluate the productivity and profitability of maize under different simulated rainfall scenarios, with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water. The field experiments were carried out during the cropping seasons of 2018 and 2019 at Ultisol. The experiment followed a randomized block design in the split-plot scheme with four replicates. The plots were formed by simulating the water supply in the soil corresponding to four water scenarios (rainy, normal, drought and severe drought), and the sub-plots with or without SI with brackish water (electrical conductivity of 4.5 dS m<sup>-1</sup>). Mean yields of green maize ears were 13,083, 11,532, 10,358 and 9,609 kg ha<sup>-1</sup> for rainy, normal, drought and severe drought scenarios, as supplemented with brackish water. For the same treatments without SI the values were 11,394, 7,896, 3,913 and 1,374 kg ha<sup>-1</sup>, respectively. Data of farmer's income showed that under normal, drought and severe drought, supplementation with brackish water becomes economically advantageous from 0.9, 1.0 and 2.4 ha, respectively, while maize cultivation without SI is not advantageous for the last two scenarios. For severe drought conditions, however, SI using brackish water reduced commercial yield by 27 %, with negative effects on the farmer's profitability. For this case, it is necessary to use water of either lower salinity or select crop of higher tolerance.

**Keywords:** Rainfed farming, salinity, supplementary irrigation, biosaline agriculture

### 3.1 Introduction

Rainfed farming predominates in most of the world, representing about 80 % of the entire cultivated area (FAO, 2017). In Brazil, rainfed farming occupies 69.9 million hectares, about 92 % of the total cultivated area, and account for 60 % of the gross value of production in the country. In the Brazilian semi-arid region there is also a predominance of rainfed agriculture, but the contribution to the gross value of production is much lower. In this region, the frequent droughts and the irregular distribution of rainfall during the rainy season cause the enterprises to be unfeasible due to drastic crop yield reduction under rainfed condition (MENEZES *et al.*, 2010; MARENGO *et al.*, 2017; ZANINELLI *et al.*, 2019).

Drought is a major threat worldwide for crop production. It is part of the natural climate variability in the Northeastern Brazilian region, and according to climate change projections, is likely to continue and intensify in the future (Marengo *et al.*, 2017). However, some studies show that supplemental irrigation could reduce crop yield losses in dryland areas, particularly in semi-arid regions (CHAUHAN *et al.*, 2008; OSTER & GRATTAN, 2002). However, this is hampered by the scarcity of low-salinity water reserves, which have been insufficient to meet the demands of farmer communities. In this context, the use of marginal-quality waters, including brackish and wastewater, may be an alternative for some production activities of biosaline agriculture in semi-arid regions (HAMDY *et al.*, 2005; TERCEIRO NETO *et al.*, 2013).

The occurrence of brackish water sources is common in the Brazilian semi-arid region, predominantly with electrical conductivity between 1.5 and 6.0 dS m<sup>-1</sup>, with low sulfate concentrations and high concentrations of chloride and sodium (SILVA JÚNIOR *et al.*, 1999). Continuous use of brackish waters in irrigation causes accumulation of salts in the soil (BELTRÁN, 1999; PESSOA *et al.*, 2019), resulting in the inhibition of physiological processes and reduction in maize yield (BARBOSA *et al.*, 2012; MUUNS & TESTER, 2008). However, studies conducted with some annual crops have shown that irrigation with saline water for short periods does not cause significant damage to yield and the negative impacts on soil are minimal (BARBOSA *et al.*, 2012; KANG *et al.*, 2010; MURTAZA *et al.*, 2006; NEVES *et al.*, 2015; TERCEIRO NETO *et al.*, 2013).

There is a need for more detailed studies on the reality of the Brazilian semi-arid region, relating the different problems that permeate this climate and seeking ways that promote better coexistence with water scarcity conditions. Thus, the hypothesis of our work

is that the use of brackish water in supplemental irrigation can reduce the negative impacts of the water shortage on the productivity and enhance economic profitability of maize cultivation in the conditions of the Brazilian semiarid region. Therefore, the objective of this study was to evaluate the yield and profitability of maize cultivation, under different water scenarios and dry spell intensities, simulating the water application in the soil based on a historical series of precipitation data for the rainfed farming period in the Brazilian semi-arid region, with and without supplemental irrigation with brackish water.

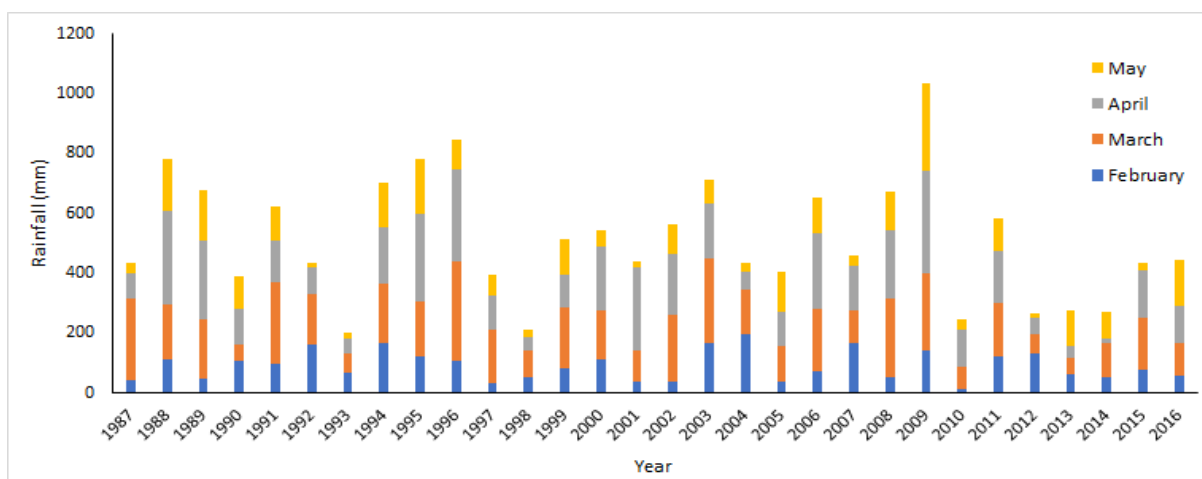
### **3.2 Materials and Methods**

The experiment was conducted during the dry season in 2018 and 2019, between Aug and Dec in Fortaleza (3°74' S, 38°58' W, altitude of 19 m), Ceará, Brazil. During the experimental period, the mean, minimum and maximum temperatures were respectively 27.6, 22.7 and 30.6 °C for 2018 and 27.2, 25.3 and 30.1 °C for 2019. The soil of the area is classified as Ultisol, with sandy loam texture in the A horizon (82.9 % sand, 6.4 % silt, and 10.7 % clay).

The experiment followed a randomized block design in the split-plot scheme with four replicates. The plots were formed by the simulation of soil water application corresponding to four water scenarios – rainy, normal, drought and severe drought (simulations based on historical series of precipitation data for the rainfed farming period in the Brazilian semi-arid region), and the subplots with or without supplemental irrigation with brackish water (electrical conductivity  $EC_w = 4.5 \text{ dS m}^{-1}$ ). Each plot was formed by six planting rows, and each subplot had three 10-m-long planting rows, using a spacing of  $0.80 \times 0.20 \text{ m}$ .

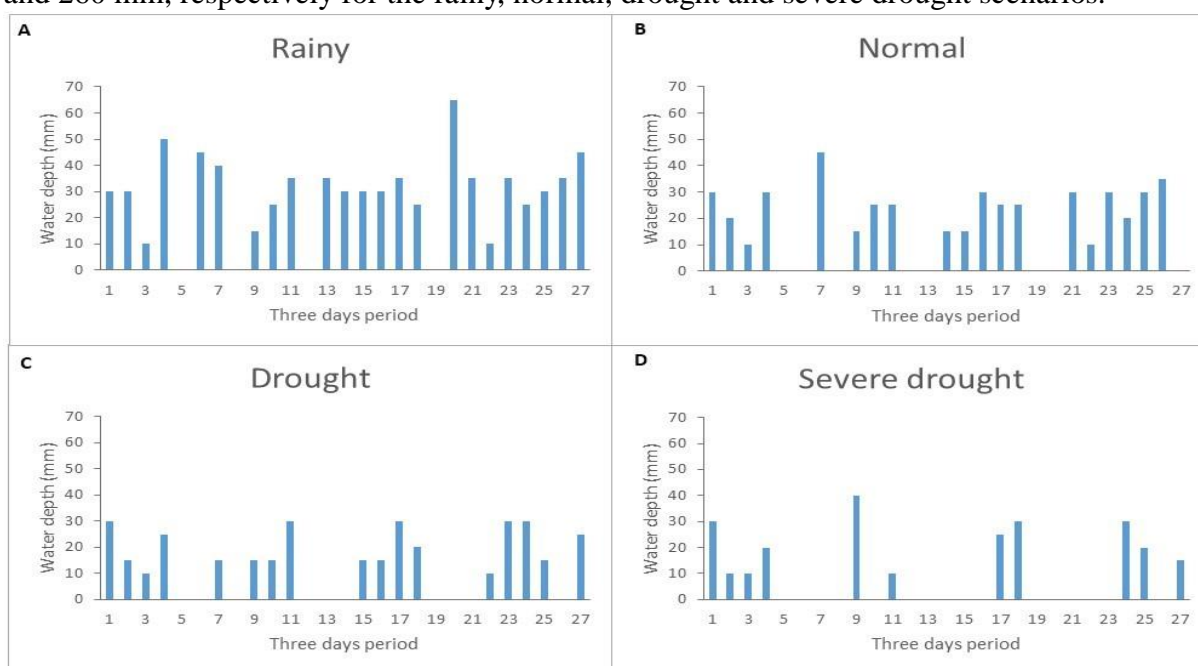
The water scenarios were defined using precipitation and dry spell patterns, based on a 30-year historical series (Figure 1) provided by the Foundation for Meteorology and Water Resources of Ceará (Funceme) for the Curu Valley region, Ceará (semi-arid), for the rainfed farming period in the region (Feb to May). According to these data, the following total rainfalls for these four months were 900, 530, 395 and 260 mm, respectively, for the rainy, normal, drought and severe drought scenarios (Figure 1).

Figure 1 – Thirty-year rainfall historical series (1987 to 2016) for the Curu Valley region, Ceará, Brazil, during the months of the wet season (Feb to May). Data were provided by Foundation for Meteorology and Water Resources of Ceará (Funceme).



Source: prepared by the author (2020)

Figure 2 – Water depths applied at three days interval throughout maize crop cycle for different simulated water scenarios (without supplemental irrigation). The data are mean of the two crop cycles which were very similar. The values of rainfall recorded in 2018 (13.7 mm) and 2019 (36.8 mm) were included as part of the total for each scenario. Total water depths of supplemental irrigation with brackish water applied during the dry spells were 51, 102, 172 and 260 mm, respectively for the rainy, normal, drought and severe drought scenarios.



Source: prepared by the author (2020)

The occurrence of dry spells was represented by at least five consecutive days

without rainfall, and the duration and quantity were defined by the distribution of rainfall from the historical series. In Figure 2 it is possible to observe the water depths applied for the different water scenarios from planting to harvest (80-82 days), and, in addition, it is possible to observe the occurrence of the dry spells along the time. Total water depths applied throughout maize crop cycle in the different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation with brackish water were, respectively: 745 and 796 mm (rainy), 465 and 567 mm (normal), 345 and 517 mm (drought), 240 and 500 mm (severe drought). The data are mean of the two crop cycles which were very similar.

The cultivation of maize (*Zea mays* L.) BRS 2022 hybrid was carried out in two years: 31 Aug to 21 Nov 2018, and 28 Sept to 18 Dec, 2019. Sowing in each year was performed after applying a 30 mm water depth, simulating a soil moisture condition normally used by farmers in the Northeast region of Brazil, at the time of planting. Ninety days before the sowing in 2018, plowing and harrowing operations were carried out in the experimental area, and limestone was incorporated into the soil at a dose of 2.0 Mg ha<sup>-1</sup> to correct its acidity (initial pH = 5.0). Prior to the sowing in 2019, plowing and harrowing were performed and gypsum was applied at a dose of 1.0 Mg ha<sup>-1</sup>, in order to prevent possible problems of soil sodicity (exchangeable sodium percentage).

Irrigation was carried out with a drip system, using drip tapes consisting of a flexible polyethylene material, with pressure-compensating emitters, with flow rate of 2.7 L h<sup>-1</sup> and spacing between emitters of 0.4 m. In periods without dry spells, irrigations were carried out with low-salinity water (EC<sub>w</sub> = 0.8 dS m<sup>-1</sup>), seeking to apply water volumes according to the historical series of precipitation data. In the first and second cycles, the totals of rainfall recorded in a rain gauge were 13.7 and 36.8 mm, respectively, and these values were considered as part of the total for each treatment. Supplementation with brackish water (EC<sub>w</sub> = 4.5 dS m<sup>-1</sup>) was performed based on the values of crop evapotranspiration (ALLEN *et al.*, 1998), estimated during the dry spells, adding a leaching fraction of 20 % in each irrigation event. The total depths of brackish water applied in the supplementation were 51, 102, 172 and 260 mm, respectively for the rainy, normal, drought and severe drought scenarios. Brackish water was prepared with the salts NaCl, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O and MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, in the equivalent ratio of 7:2:1, respectively, simulating a water source similar to the brackish waters found in the Northeast region of Brazil, and the electrical conductivity of 4.5 dS m<sup>-1</sup> is commonly found in well waters of the Brazilian semi-arid region (SILVA JÚNIOR *et al.*, 1999; BARBOSA *et al.*, 2012).

Fertilizations with nitrogen (70 kg ha<sup>-1</sup>), phosphorus (40 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and

potassium (20 kg ha<sup>-1</sup> of K<sub>2</sub>O) were performed according to the fertilizer recommendations for maize under rainfed farming in the State of Ceará, using the fertilizers urea, single superphosphate and potassium chloride. The phosphorus dose was added as basal application, the potassium dose was split into two equal portions (one at sowing and other as top-dressing), and the nitrogen dose was split into three equal parts (one at sowing and two as top-dressing). The fertilizers were applied manually and the rates were the same for all treatments.

Harvest was performed at 82 and 80 days after sowing, for the first and second cycles, respectively, by randomly collecting 15 plants from the central row of each subplot. Green maize ears were weighed and the yield was estimated considering the fresh biomass of the ears with straw, planting density and final stand. The percentage of stand reduction was estimated by relating the total number of plants at the end and at the beginning of each cultivation cycle. The results of total yield of green ears were subjected to analysis of variance and the means were compared by Tukey test at 0.05 probability level, using the statistical software SISVAR version 5.6.

Economic analysis was performed using current values (Apr-May 2020) to estimate gross revenue and costs (fixed, variable and equipment depreciation), expressed as United States Dollars (USD). The current exchange rate of 5.28 Reals = 1.0 USD was used to convert Brazilian currency (Reals) to USD. Yield data were used to estimate the gross revenue, using the price of green maize paid to the farmer by the State Supply Center (Ceasa-CE), equal to 0.23 USD per kilogram, referring to the current mean price during the rainy season. Gross revenue was determined using only the commercial yield of green ears, i.e., ears with weight equal to or greater than 250 g, in accordance with the minimum values of ears commercialized at Ceasa-CE. The fixed costs relative to 1.0 ha for all water scenarios with or without supplementation are shown in Table 3. The total value of the fixed cost was divided into 10 years, because the farmer has the option to finance the materials during this period.

Table 3 – Fixed costs relative to 1.0 ha for the cultivation of maize in each cycle.

Types of costs	With supplemental irrigation (USD)	Without supplemental irrigation (USD)
Well (15 m deep)	890.15	0.0
Drip irrigation system	1,893.94	0.0
Total	2,784.09	0.0
Financing share <sup>1</sup> (fixed cost)	278.41	0.0

<sup>1</sup>Considering financing period of 10 years. Source: prepared by the author (2020)

Regarding variable costs (Table 4), the electricity charges varied according to the water depth applied in the treatments with supplementation and was equal to zero in treatments without supplemental irrigation. Equipment depreciation value was calculated by dividing the need for investment (well and irrigation system) by the useful life, which was estimated for 10 years. The depreciation value obtained was 27.84 USD for water scenarios with supplementation, and there were no depreciation costs for the water scenarios without supplementation.

Table 4 – Variable costs relative to 1.0 ha for cultivation of maize in each cycle, excluding labor.

Treatments	Seeds (USD)	Fertilizers and Insecticides (USD)	Electricity (USD)	Total (USD)	Financing share (USD)
Rainy + SI	22.73	454.55	47.73	525.01	52
Rainy	22.73	454.55	0	477.27	47
Normal + SI	22.73	454.55	95.45	572.73	57
Normal	22.73	454.55	0	477.27	47
Drought + SI	22.73	454.55	207.01	684.28	68
Drought	22.73	454.55	0	477.27	47
Severe drought + SI	22.73	454.55	270.83	748.11	74
Severe drought	22.73	454.55	0	477.27	47

SI = supplemental irrigation

Source: prepared by the author (2020)

Seeking to get as close as possible to the reality of the farmer, this study considered that the costs were financed by *Banco do Nordeste do Brasil*, using the investment credit line called “*Pronaf Mais Alimentos*”, simulating a 10 years contract, with an interest rate of 3 % per year without grace period. The amount of bank interest for financing the crop with supplementation ranged from 123.14 to 129.83 USD and was equal to 38.18 USD ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for the cultivation without supplemental irrigation.

With the data of costs and gross revenue, the added value was calculated according to the method described by Silva Neto *et al.* (2009). The added value of the production systems was obtained, for 1.0 hectares of production, by Eq 1:

$$AV = GVP - (FC + VC + D) \quad (1)$$

where:

AV: Added value, USD; GVP: Gross value of production, USD; FC: fixed costs associated with the production system, USD; VC: variable costs associated with the production system,



excluding labor, USD; D: depreciation of equipment and facilities, USD.

A linear relationship ( $AV = ax + b$ ) was used to estimate the added value of 2.0 to 5.0 hectares, with added value on the ordinate axis and agricultural area on the abscissas axis. In the linear model, the marginal contribution per unit of equivalent area is represented by “a” and the fixed capital required to implementation of the production system is represented by “b”.

The added value obtained for each water scenario was used to estimate the income of farmers, which makes it possible to evaluate the economic viability at the production unit level, according to Eq 2:

$$FI = AV - (I + S + T) \quad (2)$$

where:

FI: farmer’s income, USD; AV: added value, USD; I: interest paid to the bank or other financial agent, USD; S: salaries paid to the labor force, USD; T: taxes and tariffs paid to the State, USD.

The value of labor related to soil tillage, sowing, application of pesticides, fertilization and harvesting was estimated as 795.45 USD ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for both cycles. On the other hand, the land tax was considered as 1.89 USD ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for both cycles.

From Equation 2 it was possible to obtain the farmer’s income for 1.0 hectares of production. Then, the farmer’s income for 2.0 to 5.0 hectares was calculated by constructing a linear models ( $FI = ax + b$ ) that describe the variation of income under the different water scenarios and schemes of supplemental irrigation in relation to agricultural area per unit of work. In this model, the farmer’s income is represented by FI, the marginal contribution of income in relation to the area is represented by “a”, and the fixed costs to implementation of the production system is represented by “b”.

An analysis of the level of social reproduction (LSR) of each production unit for agricultural area was performed. LSR is related to the income necessary for social reproduction based on the minimum wage, which was adjusted to 197.92 USD through the Provisional Measure of the Federal Government 919/2020, of 01 Feb 2020. In this case, the LSR value represented in the graph refers to the six-month minimum wage of 1,187.52 USD, considering that in the second half of the year the farmer will perform other activities to obtain his income. An estimate of the farmer’s income was also made for the years 2010 to 2019, a decade marked by enormous losses in the agricultural sector in the Brazilian semi-arid region, due to the consecutive years of drought and severe drought.

### 3.3 Results and Discussion

#### Maize yield

In general, the water scenarios with supplemental irrigation with brackish water did not differ statistically in terms of total yield of green ears (Table 5). The only exception was the rainy water scenario, in which the highest mean yield was obtained in the first cycle, differing from the other treatments. On the other hand, the supplemental irrigation in the first year did not cause yield losses in the second year of cultivation, indicating that the salts accumulated in the soil were leached by seasonal rains, a result that is consistent with those obtained in other studies, in sub-humid and semi-arid regions (AYERS & WESTCOT, 1999; BELTRÁN, 1999; BARBOSA *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2015; TERCEIRO NETO *et al.*, 2013).

Table 5 – Results of F test for total biomass of ears and mean values of total biomass of green maize ears, percentage of commercial yield and percentage of stand reduction, as a function of simulated water scenarios (WS) and supplemental irrigation (SI) with brackish water.

Year	F values (Total biomass of ears)			
	WS	SI	WS × SI	
2018	20.0**	61.7**	2.7 <sup>ns</sup>	
2019	16.0**	152.3**	24.6**	
Brackish water (4.5 dS m <sup>-1</sup> )	Simulated water scenarios			
	Rainy	Normal	Drought	Severe drought
	2018 (kg ha <sup>-1</sup> )			
With SI	14.430.71 Aa <sup>1</sup> (100) <sup>2</sup>	11.413.64 Ba (93.0)	10.095.70 Ba (93.0)	9.780.54 Ba (71.2)
Without SI	11.697.57 Aa (91.3)	6.467.50 Bb (85.9)	3.520.88 Cb (34.0)	1.560.20 Db (5.0)
	2019 (kg ha <sup>-1</sup> )			
With SI	11.735.26 Aa (100) <sup>2</sup>	11.650.14 Aa (93.0)	10.621.05 Aa (96.1)	9.437.52 Aa (75.0)
Without SI	11.090.09 Aa (94.3)	9.324.14 Ab (88.5)	4.304.93 Bb (38.0)	1.188.00 Cb (9.0)
	Mean reduction of final stand (%)			
With SI	11.5 ± 3.4 <sup>3</sup>	12.0 ± 4.2	13.8 ± 6.0	14.6 ± 3.6
Without SI	11.4 ± 3.0	26.1 ± 5.8	37.5 ± 1.4	67.7 ± 4.4

\*\*<sup>ns</sup>Significant at  $p \leq 0.01$  and not significant by F test, respectively; <sup>1</sup>Means followed by the same uppercase letter in the row, for water scenarios, and by the same lowercase letter in the column, for supplementation, do not differ by the Tukey test ( $p > 0.05$ ). <sup>2</sup>Values in parentheses represent the percentages of commercial productivity in relation to total biomass of ears; <sup>3</sup>Reduction of final stand (%) is expressed by the mean ± standard error.

Source: prepared by the author (2020)

For treatments without supplementation there was a decrease in yield for normal treatments in the first cycle and for drought and severe drought treatments in both cycles, as compared to rainy scenario (Table 5). The availability of water in the soil in these treatments was not enough to meet the water requirement of the crop, causing low yield. This fact is explained by Taylor *et al.* (1983), who states that the low water availability to the plant directly interferes in yield, limiting the production of photoassimilates and plant development.

Supplemental irrigation with brackish water increased total yield in normal, drought and severe drought scenarios, as compared to treatments without supplementation (Table 5). Normally excess of salts in the soil or in irrigation water hamper plant growth due to the osmotic and ionic effects of salt stress (MUNNS & TESTER, 2008; TYAGI, 2003). But in this our study brackish water was applied only in dry spells, and low-salinity water used to simulate seasonal rainfall promotes the leaching of salts in the soil profile, reducing the salt concentration in the root zone (BARBOSA *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2015). According to Kang *et al.*, (2010), the use of saline water associated with good quality water (rainwater or water of low electrical conductivity) is beneficial for cultivation, because low salinity reduces the accumulation of salts in the root zone, temporarily alleviating the effect of salt stress on plants.

Using brackish water and reusing agricultural drainage water are effective options to reduce the consumption of low-salinity water in irrigation, considering that agriculture is a high water demand sector in Brazil and other countries around the world (KULKARNI, 2011; MURTAZA *et al.*, 2006). Some studies also show that the cyclic use of brackish water is beneficial to the crops, especially when low-salinity water is used in the germination and seedling establishment stages (BARBOSA *et al.*, 2012; KAUR *et al.*, 2007; KIANI & MOSAVATA, 2016; NARESH *et al.*, 1993; SHARMA *et al.*, 1994; YADAV *et al.*, 2004). It is important to point out that the proposal of using supplemental irrigation with brackish water for rainfed farming in the Brazilian semi-arid region presupposes the planting after a rain of medium intensity, in order to ensure a good plant stand.

The data in Table 5 show reduction in plant stand among the water scenarios evaluated, especially in the treatments without supplemental irrigation. In terms of commercial yield (data used in the economic analysis), there were also higher mean reductions in treatments without supplemental irrigation reaching up to 64 and 93 % (mean percentage referring to the two years of experiment) in treatments with drought and severe drought, respectively. On the other hand, under supplemental irrigation with brackish water, there was

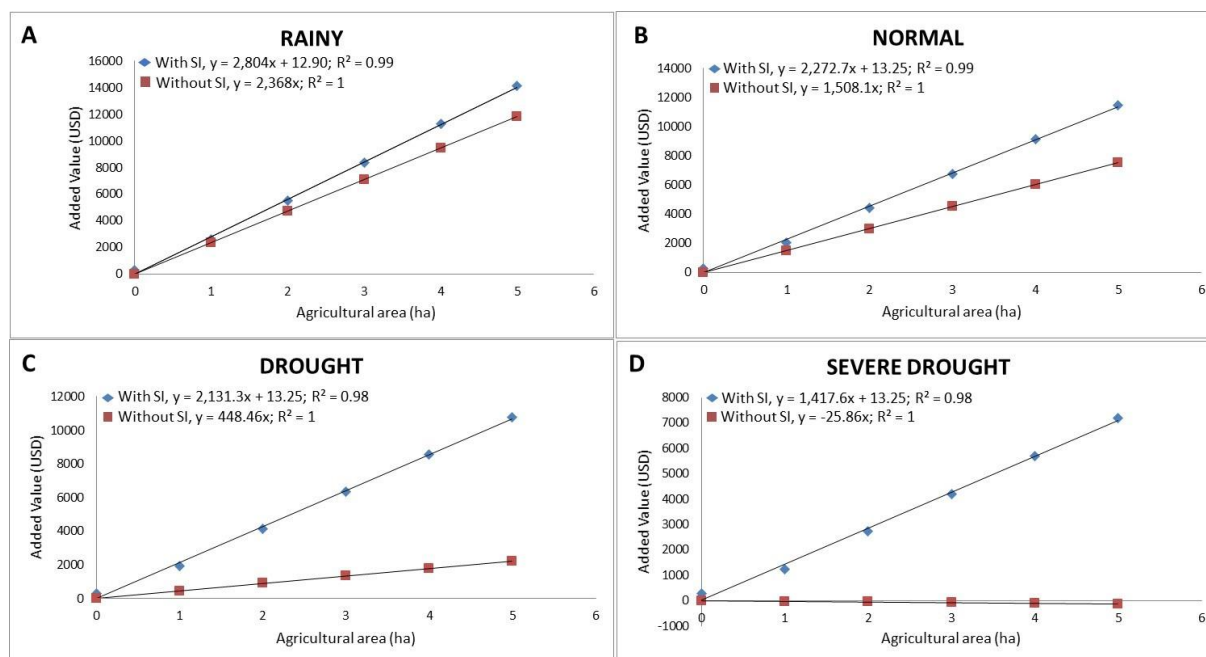
a moderate reduction in commercial yield only in the treatment under severe drought (about 27 %), indicating the occurrence of moderate salt stress only in this treatment.

The data presented in Table 5 clearly indicate that maize plants were subjected to two types of abiotic constraints: water deficit and salt stress. In treatments without supplemental irrigation, especially under drought and severe drought scenarios, plants were hampered by severe water shortage, which limits stomatal opening, photosynthetic activity, plant growth and yield. On the other hand, salt stress was observed on plants that received supplementation with brackish water for a longer period (supplemental irrigation for plants under severe drought scenarios). In this case, transient salt accumulation in the soil impacts negatively plant physiology and crop yield due to osmotic and ionic effects (MUNNS & TESTER, 2008). Although salt stress is extremely harmful to crops, it was mild compared to water stress, and the use of brackish water as a complement to rainwater should be beneficial to rainfed cultivation in Brazilian semi-arid region. Similar results have been observed in other regions around the world (Italy - HAMDY *et al.*, 2005; India - CHAUHAN *et al.*, 2008; Iran - HASSANLI & EBRAHIMIAN, 2016). However, under severe drought conditions, it is necessary to apply other management strategies of the soil-plant system, in order to reduce the losses in the plant stand and in the marketable yield with brackish water application.

### **Economic analysis**

Figure 3 shows the variation of added value as a function of the agricultural area, making it possible to identify the marginal contribution of the different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation.

Figure 3 – Added value in the different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water, as a function of the area cultivated with BRS 2022 hybrid maize.



Source: prepared by the author (2020).

It is possible to observe that water scenarios which received supplementation with brackish water had higher value of marginal contribution and, consequently, higher added values for each hectare in production. The angle between the lines with and without supplemental irrigation increases considerably from the rainy to the severe drought water scenarios (Figure 3), demonstrating a better result for the water scenarios with supplementation. Soothar *et al.* (2019) observed a similar result, in which irrigation with saline water supplementing rainwater in the vegetative stage of winter wheat proved to be an important alternative to obtain acceptable yields in areas with scarcity of low-salinity water in Hengshui, China.

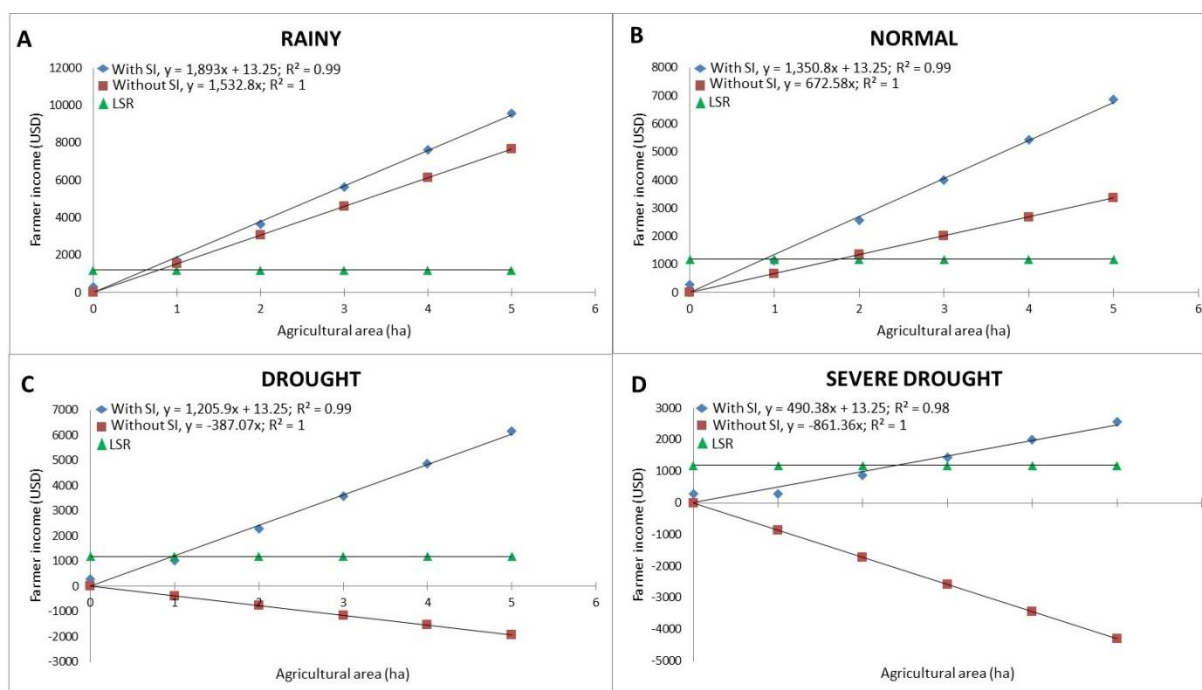
The water scenarios without supplemental irrigation did not have fixed costs for implementation and, theoretically, could express better results in economic terms. However, the opposite result was observed, because the commercial yields of these treatments were much lower than those observed for plots that received supplemental irrigation (Table 5), resulting in a lower added value for each hectare in production. Hamdy *et al.* (2005) observed in a study conducted in Italy that the supplemental application of brackish water in wheat and barley cultivation ensures high crop yields, with small reductions as compared to the cultivations with low-salinity water.

Supplemental irrigation with brackish water, as well as investment in the irrigation system and other strategies, may increase the productivity of maize under rainfed agriculture and, consequently, the added value will be increased regardless of the water scenario (Figure 3). However, these results may be beneficial mainly for small areas, due to availability or low discharge rates of brackish water sources. Therefore, this proposal may be more applicable to family farming, since this type of enterprise works with small areas and responds more easily to investments with an increase in yield levels.

The added value identifies the wealth obtained from the agricultural production unit, as well as the interactions of technical and economic efficiencies by different means, which contemplate the production process. From the added value it is possible to measure the income generation capacity of the farm, being an important indicator for comparison of economic results (SILVA NETO *et al.*, 2009). However, the high added value, despite being a strong attraction, does not reveal the risk associated with indebtedness.

The farmer's income according to the marginal contribution of each water scenario for an agricultural area up to 5.0 hectares is shown in Figure 4.

Figure 4 – Farmer's income in the different simulated water scenarios, with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water, as a function of the area cultivated with BRS 2022 hybrid maize. LSR = level of social reproduction.



Source: prepared by the author (2020).

For the rainy water scenario approximately 0.8 ha meets the level of social reproduction, that is, from 0.8 ha the cultivation with and without supplementation with brackish water is advantageous for the farmer. The normal water scenario shows that the cultivation of green maize can be advantageous if supplemental irrigation with brackish water is used from 0.9 ha and, if supplementation with brackish water is not adopted, the cultivation should be carried out using 1.8 ha to reach the level of social reproduction, representing a 100 % increase of the area compared to the cultivation with supplemental irrigation.

Under drought scenario, supplementation with brackish water becomes advantageous from 1.0 ha (Figure 4), while maize cultivation without supplementation is not advantageous, because all the values are negative and increase as a function of the area used, that is, larger the cultivated area, greater the losses for the farmer. The worst scenario was verified in the severe drought water scenario, where supplemental irrigation with brackish water was advantageous from 2.4 ha, meeting the level of social reproduction, whereas in plots that did not receive supplementation, maize cultivation is not advantageous, because all the estimated values are negative. These results confirm the economic viability of supplemental irrigation with brackish water, in line with results obtained in other regions of the world (India - CHAUHAN *et al.*, 2008; Iran - KIANI & MIRLATIFI, 2012, Brazil - TERCEIRO NETO *et al.*, 2013). It is worth pointing out that losses may be lower in cultivation without supplementation, since the plantations are abandoned by farmers after extensive dry spells, partially reducing variable costs, especially with labor. However, farmers' income remains zero or negative, resulting in large socioeconomic losses in drought years (MARENGO *et al.*, 2017).

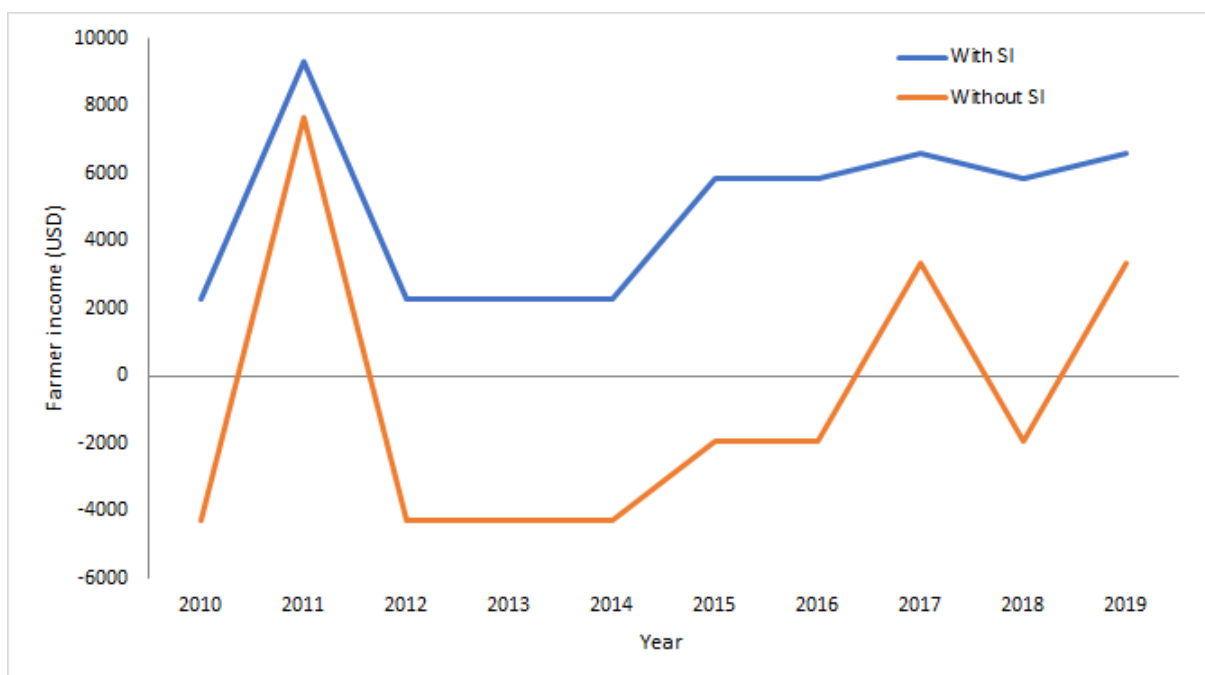
There is profitability of at least 1.0 minimum wage for the farmer in the rainy, normal and drought water scenarios under supplemental irrigation with brackish water for cultivation from 1.0 ha (Figure 4). For treatments without supplementation, it has been demonstrated, in general, that it is necessary to cultivate large areas or it is unfeasible in the years of drought and severe drought. In this context, if the farmer does not have this minimum area for the cultivation of green maize, he will not have sufficient income to live throughout the year and this will directly affect the quality of life of his whole family, even with the use of supplemental irrigation. One option would be to diversify the production systems and undertake other non-agricultural activities that can increase the family's income.

Considering the last decade, 2010-2019, it is possible to observe that in most of the Brazilian semi-arid region there were three years of drought and four years of severe drought, which resulted in enormous socioeconomic losses (CUNHA *et al.*, 2019;

MARENGO *et al.*, 2017). In this decade the total expenditures with the Program ‘*Garantia Safra*’ of the Federal Government reached approximately 0.9 billion USD, due to the successive years of drought. This crop insurance consists of a public policy aimed at family farmers of the Brazilian semi-arid region who have losses equal to or greater than 50 % in the production of various crops, such as cotton, rice, beans, cassava, and maize, or in other agricultural activities of coexistence with the semi-arid region, caused by drought or excess rainfall.

By applying the data obtained in the present study for the decade 2010-2019 and estimating the farmer’s income for each year, it can be verified that part of the losses of farmers and the government expenses with the ‘*Garantia Safra*’ program could have been reduced by the use of supplemental irrigation with brackish water (Figure 5). The data in Figure 5 reveal the enormous losses for farmers who invested in rainfed cultivation in the last decade, with at least seven years of negative income. On the other hand, supplementation with brackish water would have been advantageous for all 10 years evaluated, resulting in higher yields and higher net income for farmers.

Figure 5 – Estimate of the farmer’s income for the period 2010 to 2019, considering the water scenario of each year with and without supplemental irrigation (SI) with brackish water in the cultivation of BRS 2022 hybrid maize. Rainy (2011), Normal (2017 and 2019), Drought (2015, 2016 and 2018) and Severe Drought (2010, 2012, 2013 and 2014).



Source: prepared by the author (2020).



This simulation presented in Figure 5 is an indication that in similar situations in the future, supplemental irrigation with brackish water or other sources of marginal water may be an alternative to partially mitigate the negative effects of drought in areas of small farmers of the Brazilian semi-arid region, increasing crop yields and reducing socioeconomic losses, as observed in other parts of the world (KIANI & MIRLATIFI, 2012). However, the data of commercial yield and economic analysis demonstrate the need to use adequate soil and water management strategies, such as using appropriate leaching fraction or blended water, as well as selecting more tolerant crops, notably when supplemental irrigation with brackish waters is used in years of severe drought. The use of water of lower salinity (between 2.0 and 3.0 dS m<sup>-1</sup>), very common in the Brazilian semi-arid region (SILVA JÚNIOR *et al.*, 1999), or which are compatible with the salt tolerance level of the crop, will reduce the negative impacts of salinity on the commercial yield observed in the present study (Table 5). In addition, there is also the need for studies that enable low-cost irrigation systems, which make it possible to reduce fixed costs with equipment and expenses related to electricity, ensuring greater profitability for farmers.

### 3.4 Conclusions

Mean yields of green maize ears were 13,083, 11,532, 10,358 and 9,609 kg ha<sup>-1</sup> for rainy, normal, drought and severe drought scenarios, as supplemented with brackish water. For the same treatments without supplemental irrigation the yields were 11,394, 7,896, 3,913 and 1,374 kg ha<sup>-1</sup>, respectively. Data of added value and farmer's income also showed economical advantage of this practice of biosaline agriculture, demonstrating that supplemental irrigation is a good strategy to be implemented by small farm holders under rainfed agriculture in the tropical semi-arid region. Under normal, drought and severe drought scenarios, supplementation with brackish water becomes economically advantageous from 0.9, 1.0 and 2.4 ha, respectively, while maize cultivation without supplementation is not advantageous for the last two scenarios. For severe drought conditions, however, supplemental irrigation using brackish water of EC<sub>w</sub> = 4.5 dS m<sup>-1</sup> reduced commercial yield of green maize ears by about 27 %, with negative effects on the farmer's profitability. For this case, it is necessary either to use water of lower salinity or select crops of salt tolerance compatible with electrical conductivity of water. Other management strategies of the soil-plant system should also be recommended in order to reduce the losses caused by water salinity in the plant stand and in the marketable yield, as well as in soil quality.

#### **4. CAPÍTULO 2: A IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR COM ÁGUA SALOBRA NO CULTIVO DO MILHO SOB CLIMA TROPICAL SEMIÁRIDO: IMPACTOS NAS TROCAS GASOSAS FOLIARES E NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA**

**RESUMO:** A irrigação suplementar durante períodos de estiagem pode reduzir os efeitos do estresse hídrico sobre a fisiologia e o crescimento de plantas de milho nas regiões semiáridas tropicais. Neste trabalho avaliaram-se as trocas gasosas foliares, a produção de biomassa, os teores foliares de sódio, potássio e prolina de plantas de milho, além da umidade e salinidade do solo em diferentes cenários simulados de chuva, com e sem irrigação suplementar com água salobra. O experimento seguiu um delineamento de blocos casualizados no esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas foram formadas simulando o abastecimento de água no solo correspondente a quatro cenários hídricos (chuvoso, normal, seca e seca severa), e as subparcelas com ou sem irrigação suplementar com água salobra (condutividade elétrica de  $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ). Para as avaliações das trocas gasosas foliares, as datas de leituras (27, 47, 49, 56, 60 e 67 dias após o plantio) foram incluídas nas subsubparcelas. Os veranicos reduzem a capacidade fotossintética de folhas de milho, mesmo no cenário hídrico normal, porém os efeitos se tornam drásticos nos anos de seca e seca severa em decorrência de efeitos estomáticos e não estomáticos. A irrigação suplementar com águas salobras reduz o estresse hídrico do milho durante os veranicos e melhora as trocas gasosas foliares, com reflexo direto na taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  e na produção de biomassa da parte aérea. Os resultados também demonstram que o estresse salino associado ao uso da irrigação suplementar tem impacto bem menor do que o estresse hídrico, visto que as chuvas auxiliam na lixiviação parcial dos sais ao longo do ciclo da cultura.

**Palavras-chave:** Semiárido. Estresse hídrico. Estresse salino. Fotossíntese.

## 4.1 Introdução

O clima semiárido envolve um grupo de características do ecossistema da região Nordeste, sendo elas: valores de baixa pluviosidade (se restringe a três ou quatro meses durante o ano), alto índice de insolação (tendo sol quase todos os dias do ano), médias de temperaturas altas, solo rochoso, arenoso e raso. Tais características fazem com que os solos das regiões semiáridas estejam propícios à desertificação (TEIXEIRA, 2016).

Uma atividade ainda explorada nas regiões semiáridas brasileiras é a agricultura de sequeiro. Tal atividade é caracterizada pelo cultivo no período chuvoso. No Nordeste, em especial, a agricultura de sequeiro é realizada nos meses de fevereiro, março, abril e maio e por conta da má distribuição das chuvas no espaço e no tempo, o agricultor do semiárido nordestino possui grandes dificuldades para sobreviver do campo.

A variabilidade espaço-temporal, juntamente com a baixa precipitação durante as estações de cultivo, sugere que a agricultura de sequeiro necessite de uma irrigação suplementar que possa reduzir o estresse hídrico sofrido durante os estágios de crescimento das culturas e aumentar e estabilizar a produtividade agrícola (ALI *et al.*, 2015).

A agricultura de sequeiro necessita de tecnologias que aumente a eficiência do uso da água e que não degrade o solo. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas visando a utilização de águas salobras associadas à água da chuva, aplicada de forma misturada ou de forma cíclica (WICHELNS *et al.*, 2002; HAMILTON *et al.*, 2007; DUDLEY *et al.*, 2008; KULKARNI, 2011).

Acredita-se que a utilização de água salobra no cultivo agrícola pode ser benéfica para o semiárido brasileiro e, em especial, ao semiárido cearense, visto que o mesmo possui uma grande quantidade de poços com água salobra. Para estas condições, a irrigação suplementar com água salobra poderá aumentar as possibilidades para o cultivo no semiárido cearense, especialmente em pequenas áreas.

Do ponto de vista da fisiologia das plantas, sabe-se que as trocas gasosas foliares, isto é, a perda de vapor d'água no processo de transpiração e a captação de CO<sub>2</sub> do ar no processo fotossintético, desempenham papel fundamental para o desenvolvimento das culturas. A redução desses dois processos sob condições de estresse hídrico limita o crescimento vegetal, contribuindo para as baixas produtividades do milho sob condições de sequeiro no semiárido tropical. Sob condições de sequeiro, as taxas de fotossíntese decrescem em intensidades variadas, conforme a duração dos veranicos, sendo os efeitos mais intensos em anos de seca e seca severa (FERNANDES *et al.*, 2015).

A irrigação suplementar pode reduzir os efeitos negativos dos veranicos sobre as trocas gasosas foliares. Entretanto, o uso de águas salobras na irrigação suplementar pode também impactar as taxas de fotossíntese, face aos efeitos osmóticos dos sais acumulados no solo (MUNNS & TESTER, 2008). Porém, esses efeitos podem ser minimizados na irrigação suplementar, visto que os sais aplicados durante os veranicos tendem a ser lixiviados durante a ocorrência de chuvas, principalmente em solos com boa drenagem natural. Nesse contexto, a hipótese do trabalho é que o estresse hídrico associado com os veranicos é bem mais deletério para a fisiologia e crescimento do milho do que o estresse salino associado com uso de águas salobras na irrigação suplementar. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar as trocas gasosas foliares, a produção de biomassa, os teores foliares de sódio, potássio e prolina de plantas de milho, além da umidade e salinidade do solo em diferentes cenários hídricos e intensidades de veranicos, com a adição ou não de água salobra na irrigação suplementar.

#### **4.2 Material e Métodos**

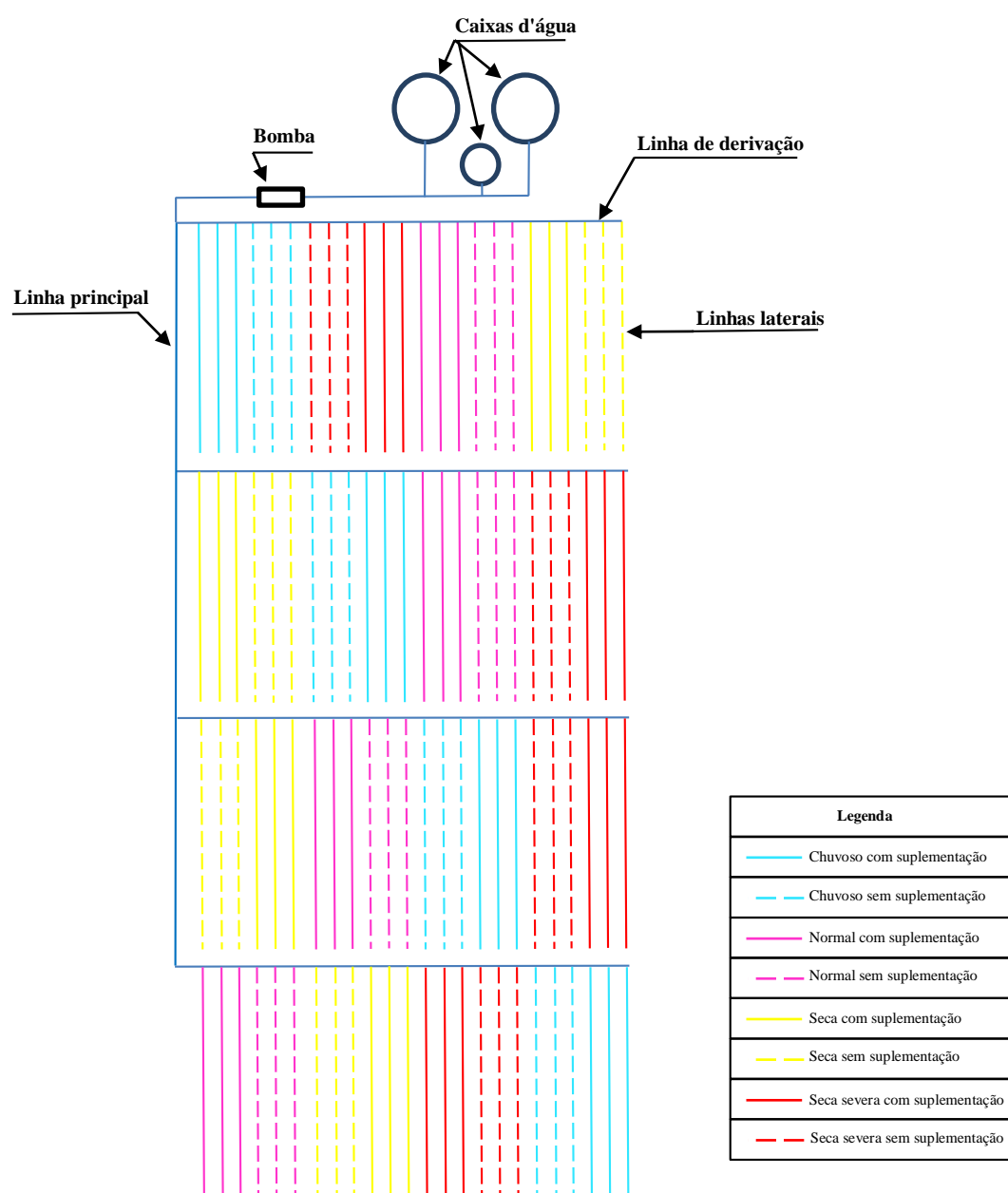
O experimento foi conduzido durante a estação seca do ano de 2019, entre os meses de setembro e dezembro, na área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (3°74' S, 38°58' W e altitude de 19 m), Ceará, Brasil. Durante o período experimental as temperaturas média, mínima e máxima foram de 27,2, 25,3 e 30,1°C, respectivamente. O solo da área é classificado como Argissolo Vermelho-amarelo (EMBRAPA, 2006), apresentando textura franco-arenosa no horizonte A.

O experimento obedeceu a um delineamento em blocos casualizados no arranjo de parcelas subdivididas com quatro repetições (Figura 6). As parcelas foram formadas pela simulação do suprimento de água no solo correspondente a quatro cenários hídricos – chuvoso, normal, seca e seca severa - (simulações com base em série histórica de dados de precipitação para a época de cultivo em sequeiro no semiárido brasileiro), e as subparcelas pela realização ou não de irrigação suplementar com água salobra (condutividade elétrica de água - CEa = 4,5 dS m<sup>-1</sup>). Para as avaliações das trocas gasosas foliares, as datas de leituras (27, 47, 49, 56, 60 e 67 dias após o plantio) foram incluídas nas subsubparcelas. Cada parcela foi formada por seis linhas de plantio, com 10 m de comprimento, e cada subparcela possuía três linhas de plantio e 10 m de comprimento, utilizando-se o espaçamento de 0,80 x 0,20 m.

Para definição dos cenários hídricos foram utilizados padrões de precipitação e veranicos, com base em série histórica de 30 anos dos dados fornecida pela Fundação

Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) para a região do Vale do Curu-CE (semiárido), para o período de cultivo de sequeiro da região (fevereiro a maio). De acordo com essas informações foram definidos os totais de lâminas de água a serem aplicadas: 900, 530, 395 e 260 mm, respectivamente, para os cenários chuvoso, normal, seca e seca severa. A ocorrência de veranico foi representada por pelo menos cinco dias sem chuvas, sendo que a duração e quantidade foram definidas pela distribuição das precipitações a partir da série histórica mencionada acima.

Figura 6 – Croqui experimental



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2020)

As sementes de milho utilizadas foram do Híbrido BRS 2022 e o cultivo foi

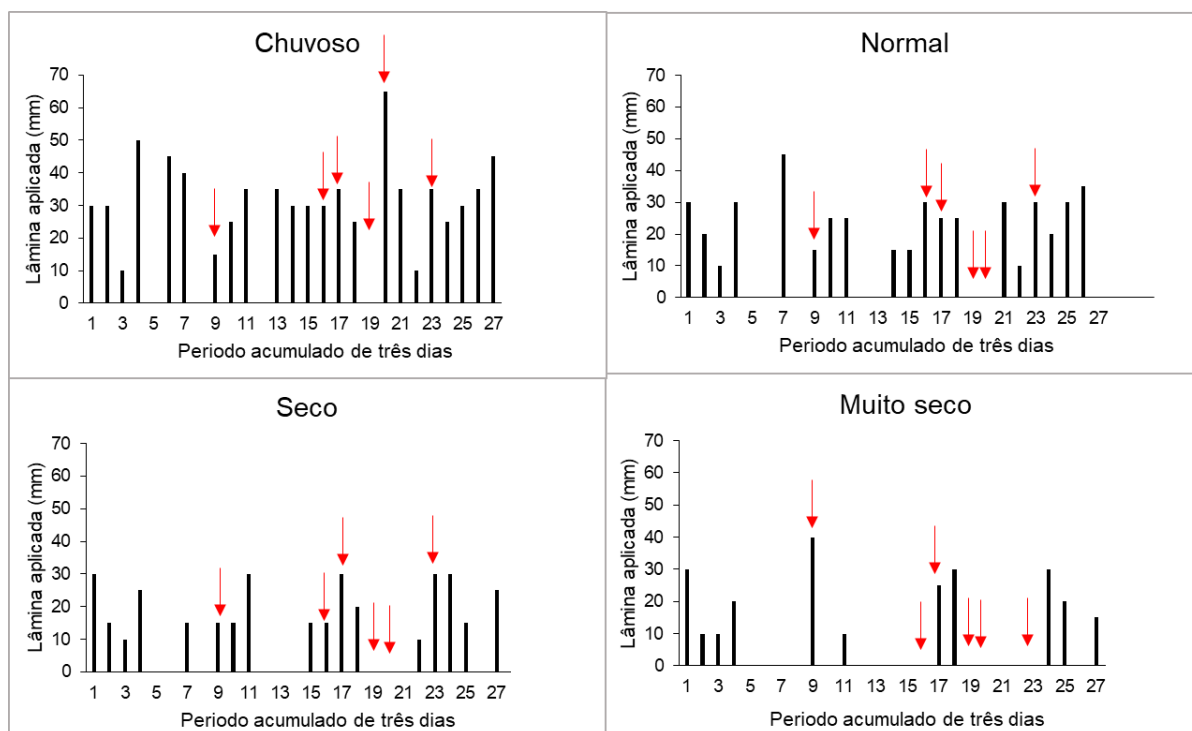
realizado no período de 28 de setembro a 18 de dezembro de 2019. A semeadura foi realizada após aplicação de uma lâmina de 30 mm, simulando uma condição de umidade do solo normalmente utilizada pela agricultura familiar da região Nordeste do Brasil, por ocasião do plantio.

Foram realizadas adubações com nitrogênio ( $70 \text{ kg ha}^{-1}$ ), fósforo ( $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e potássio ( $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ), de acordo com as recomendações de adubação para a cultura do milho em condição de sequeiro no Estado do Ceará (FERNANDES *et al.*, 1993), utilizando-se os fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. A dose de fósforo foi aplicada em fundação, a dose de potássio foi dividida em duas parcelas iguais (uma na semeadura e outra em cobertura, aos 6 e 25 dias após o plantio) e a dose de nitrogênio foi dividida em três parcelas (uma na semeadura e duas em cobertura, aos 6, 25 e 40 dias após o plantio).

A irrigação foi realizada por gotejamento, sendo utilizadas fitas gotejadoras constituídas de um material de polietileno flexível, com emissores autocompensantes, com vazão de  $2,7 \text{ L h}^{-1}$  por emissor e espaçamento entre emissores de 0,4 m. Nos períodos sem veranicos as irrigações foram realizadas com água de baixa salinidade ( $\text{CEa} = 0,9 \text{ dS m}^{-1}$ ), buscando-se aplicar volumes de água em consonância com a série histórica de dados de precipitações. O total de precipitação registrado em pluviômetro foi de 36,8 mm, sendo este valor contabilizado nos totais dos tratamentos.

Na Figura 7 é possível observar as lâminas de água aplicadas e os veranicos para os diferentes cenários hídricos, desde a semeadura até a colheita (cerca de 81 dias). As lâminas totais aplicadas para os diferentes cenários hídricos simulados, sem e com irrigação suplementar, foram, respectivamente: 745 e 796 mm (Chuvoso), 465 e 567 mm (Normal), 345 e 517 mm (Seca), 240 e 500 mm (Seca severa). As suplementações com água salobra ( $\text{CEa} = 4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) foram realizadas com base nos valores da evapotranspiração da cultura (ALLEN *et al.*, 1998), estimada durante os períodos de veranicos, acrescentando-se uma fração de lixiviação de 20% em cada evento de irrigação. As lâminas de irrigação suplementar com água salobra aplicada durante os períodos de veranicos foram de 51, 102, 172 e 260 mm, respectivamente para os cenários chuvoso, normal, seca e seca severa. A água salobra ( $\text{CEa} = 4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) foi preparada por meio da dissolução dos sais de  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , na proporção equivalente de 7:2:1, simulando uma fonte hídrica similar às águas salobras encontradas na região Nordeste do Brasil, sendo o valor de  $4,5 \text{ dS m}^{-1}$  comumente encontrado em águas de poços do semiárido brasileiro (MEDEIROS, 1992; BARBOSA *et al.*, 2012).

Figura 7 - Lâminas de água aplicadas em intervalos de três dias ao longo do ciclo da cultura do milho para diferentes cenários hídricos simulados (sem irrigação suplementar).



<sup>1</sup>As setas vermelhas indicam os momentos das leituras das trocas gasosas foliares.

Fonte: Elaborado pelo autor(2020).

As medições das trocas gasosas foliares foram realizadas aos 27, 47, 49, 56, 60 e 67 dias após o plantio, as quais estão indicadas pelas setas vermelhas na Figura 7. As seguintes variáveis foram avaliadas na terceira folha completamente expandida, a partir do ápice da planta: taxa de fotossíntese líquida -  $A$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática -  $g_s$  ( $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), taxa de transpiração -  $E$  ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  -  $C_i$  ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ). O equipamento utilizado para a leitura das trocas gasosas foi um analisador de gases no infravermelho portátil (Li-6400XT, LICOR, USA), sob luz saturante de  $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e condições ambiente de temperatura e concentração de  $\text{CO}_2$ . Com os dados de taxa de fotossíntese e de transpiração foi estimada a eficiência momentânea no uso da água ( $A/E$ ).

Amostras de limbos de folhas maduras (as mesmas utilizadas nas medições das trocas gasosas) foram coletadas aos 47, 56 e 60 dias após o plantio, para determinação dos teores de sódio, potássio e prolina. Os materiais, após liofilizados e moídos, foram utilizados para obtenção do extrato, através da metodologia de Cataldo *et al.* (1975). Em seguida, foram determinados os teores de Na e K utilizando-se um fotômetro de chama. Os dados foram expressos em  $\text{g kg}^{-1}$ . Os teores de prolina livre foram determinados de acordo com o método descrito por Bates *et al.*, (1973).

Aos 82 dias após o plantio foram coletadas 15 plantas por subparcela, as quais foram divididas em partes vegetativas (colmos e folhas) e reprodutivas (espigas e pendões). Com os dados de produção de biomassa e o volume aplicado por planta foi estimada a eficiência do uso da água (EUA), pela relação entre a produção de biomassa total e o volume total de água aplicado (chuva simulada e suplementação), e a eficiência do uso da água aplicada na irrigação suplementar ( $EUA_{is}$ ), pela relação entre o incremento na produção de biomassa e o volume de água aplicado na suplementação.

A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997), sendo as coletas de solo realizadas aos 47, 56, 60 e 67 dias após o plantio. As amostras foram coletadas na camada de 0 – 20 cm e acondicionadas em latas previamente identificadas. Em seguida foram pesadas e os valores anotados. No laboratório, as amostras foram levadas para a estufa a 105°C por 24 horas. Por fim, foram retiradas e pesadas novamente para determinar a massa seca. Com posse destes dados, foi utilizada a Equação 1 sugerida pela Embrapa (1997) para determinar a umidade gravimétrica:

$$Umidade\ Gravimétrica = \frac{(a-b)}{b} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

a = peso da amostra úmida (g);

b = peso da amostra seca (g)

Para determinar a salinidade do solo no final do experimento, foram coletadas amostras de solo em cada subparcela em três pontos: início, meio e fim da linha. As amostras foram levadas para o laboratório, onde a condutividade elétrica foi estimada na suspensão solo:água (1:1 na base de volume) e expressa em  $dS\ m^{-1}$ .

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software Sisvar versão 5.6 (FERREIRA, 2011).

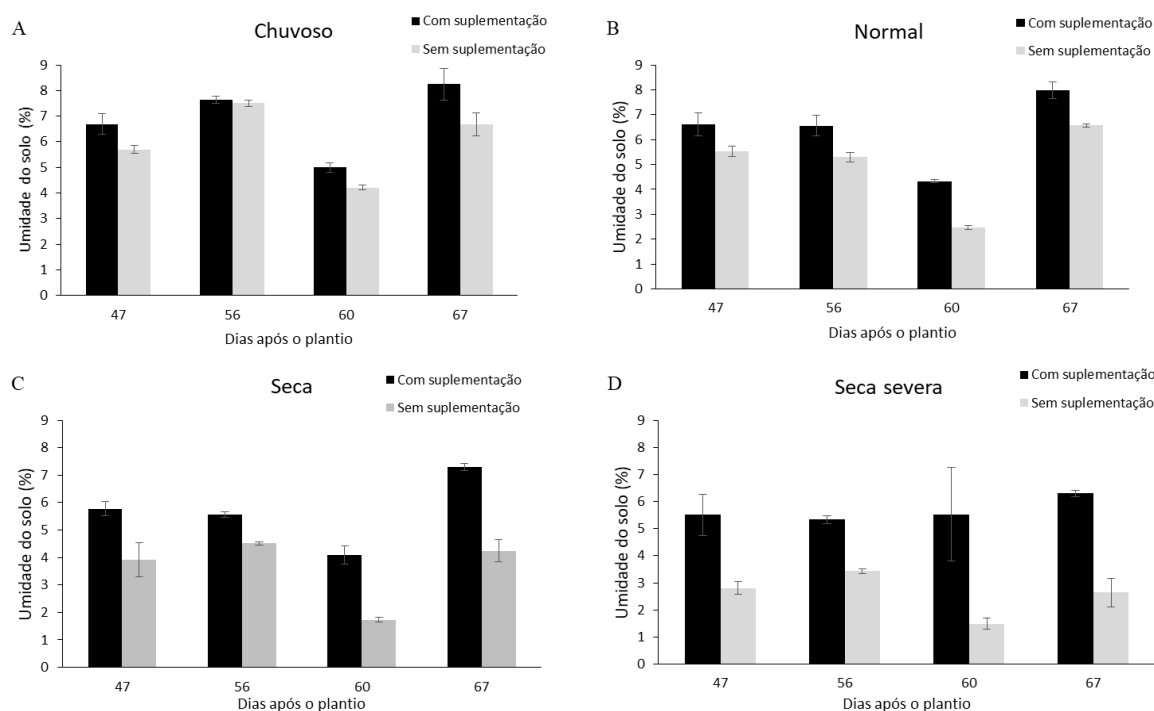


### 4.3 Resultados e Discussão

#### Umidade e salinidade do solo

A umidade do solo foi medida aos 47, 56, 60 e 67 dias após o plantio, estágio de grande demanda hídrica da cultura do milho (ALLEN *et al.*, 1998; ALBUQUERQUE e RESENDE, 2007). Os valores de umidade do solo foram sempre altos no cenário hídrico chuvoso, com pequenas diferenças entre os tratamentos com e sem irrigação suplementar (Figura 8A). Muito já tem se discutido sobre o excesso de água fornecido ao solo em cenários chuvosos, em que parte da água que foi suplementada para as plantas pode ter sido escoada ou percolada, restando somente a umidade retida nos poros do solo (HILLEL, 1980; GUERRA, 2000; NGOLO *et al.*, 2019). Isto pode explicar a similaridade dos valores de umidade para o tratamento chuvoso com e sem suplementação.

Figura 8 – Umidade do solo (camada de 0 a 20 cm) cultivado com milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição (dias após o plantio) e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.



<sup>1</sup>Médias  $\pm$  erro padrão da média (n=4)  
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para o cenário hídrico normal, se observa diferenças em todas as datas avaliadas,

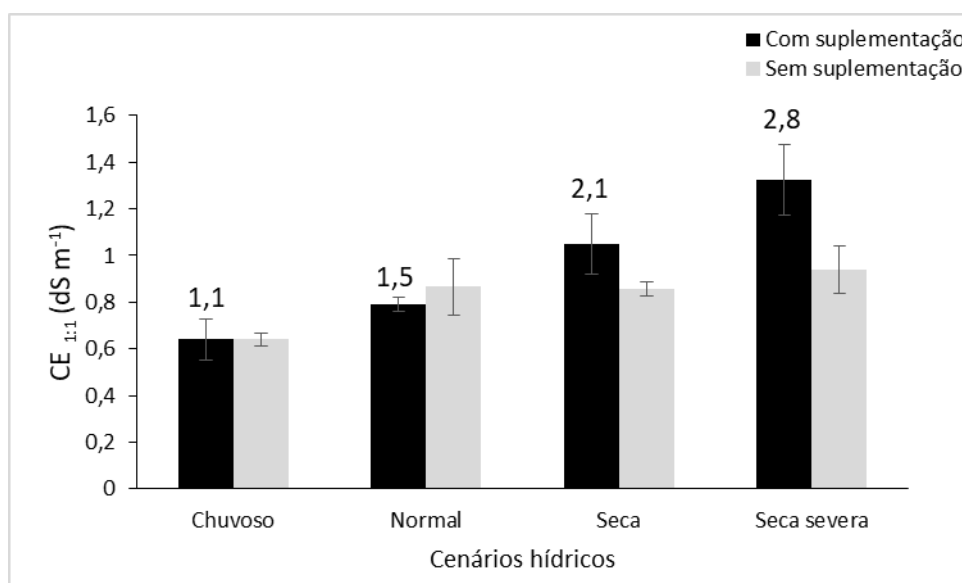
com valores maiores sempre no tratamento com suplementação (Figura 8B). Entretanto, essas diferenças se intensificam nos cenários hídricos de seca e seca severa. Para o tratamento de seca severa, os valores de umidade com irrigação suplementar foram sempre superiores a 5%, enquanto os valores no tratamento sem suplementação variaram de 1 a 3%. A suplementação com água salobra no cenário seca severa forneceu mais que o dobro de umidade aos 60 e 67 dias após o plantio, quando comparado ao tratamento sem suplementação. Essas diferenças refletem claramente a distribuição da aplicação de água no solo durante o ciclo do milho (Figura 7), indicando situações de estresse hídrico severo para os tratamentos. Abrol *et al.*, (1988) afirmam que a maioria das plantas requer um suprimento contínuo de umidade disponível para crescer normalmente e produzir rendimentos elevados.

Segundo Jacomine (1996), além da má distribuição espacial e temporal de chuva no semiárido brasileiro, a maioria dos solos possui baixa capacidade de retenção de água. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que a suplementação com água salobra incrementa a umidade do solo independente do cenário hídrico em que o agricultor se encontra. Isto pode ser muito vantajoso, pois ao adotar a suplementação com água salobra, o agricultor pode atender as exigências das culturas nos diferentes estádios de desenvolvimento, reduzindo a chance de prejuízos no cultivo. Abrol *et al.* (1988) complementam que após uma irrigação, a umidade do solo é máxima e a concentração de sal ou a pressão osmótica da solução do solo é mínima, característica favorável para o crescimento da cultura.

A salinidade do solo expressa pela condutividade elétrica medida na suspensão solo:água (1:1 na base de volume) e medida ao final do experimento está apresentada na Figura 9. Observa-se que ocorreu aumento do acúmulo de sais no solo apenas com a irrigação suplementar com água salobra para os cenários hídricos de seca e seca severa. Isso reflete a salinidade ponderada da água de irrigação, considerando-se que foram utilizadas duas fontes hídricas e que o volume de águas salobras foram maiores nestes dois cenários. Entretanto, os valores de condutividade elétrica observados no solo são relativamente baixos quando comparados com dados de estudos realizados com irrigação contínua, os quais obtiveram a  $CE_{1:1}$  (ASSIS JUNIOR *et al.*, 2007; BEZERRA *et al.*, 2010; LACERDA *et al.*, 2011; NEVES *et al.*, 2015). Essas diferenças ocorrem visto que na irrigação suplementar com águas salobras os sais são parcialmente lixiviados durante a aplicação de água de menor salinidade, simulando uma condição de distribuição de chuvas. Vale salientar que a água do poço utilizada neste estudo tinha uma condutividade elétrica de  $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ , muito superior à salinidade da água da chuva (inferior a  $0,1 \text{ dS m}^{-1}$ ). Isso indica que sob condições naturais os efeitos sobre acúmulo de sais no solo podem ser ainda menores do que os observados no presente estudo.

Deste modo, verifica-se que a suplementação com água salobra apresenta pequenos riscos de salinização do solo, notadamente em solos de boa drenagem natural. A adoção de práticas como as frações de lixiviação e aplicação de corretivos químicos podem atenuar os efeitos negativos da aplicação de água salobra no solo, evitando-se a degradação do solo (RHOADES e LOVEDAY, 1990; AYERS e WESTCOT, 1999; ASSIS JÚNIOR *et al.*, 2007; CAVALCANTE *et al.*, 2016).

Figura 9 – Condutividade elétrica do solo (extrato 1:1 solo água) cultivado com milho sob diferentes cenários hídricos, com ou sem irrigação suplementar com águas salobras.



<sup>1</sup>Médias  $\pm$  erro padrão da média (n=4); <sup>2</sup>Valores acima das barras escuras representam a salinidade ponderada da água de irrigação (dS m<sup>-1</sup>) para o tratamento com irrigação suplementar, em cada cenário hídrico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### Trocas gasosas foliares

A Tabela 6 apresenta o resumo da análise de variância para as variáveis de trocas gasosas foliares. Os resultados mostram efeitos significativos para a maioria das variáveis, tanto para os fatores isolados, como para as interações duplas e triplas. Essas diferenças estatísticas evidenciam os efeitos testados no presente estudo, os quais envolvem dois fatores de estresse abiótico: seca e salinidade. No presente estudo, esses dois fatores variam em função da qualidade e do padrão de aplicação de água durante o ciclo da cultura, o qual buscou simular uma série histórica de dados de precipitação do semiárido cearense. Diante das

respostas das interações duplas e triplas, optou-se por apresentar nas figuras seguintes os efeitos dos diferentes cenários sobre as trocas gasosas foliares, fazendo-se a comparação dos tratamentos com e sem irrigação suplementar em cada data de medição.

Tabela 6 - Análise de variância para os dados de trocas gasosas foliares em função dos cenários hídricos, irrigação suplementar e épocas de medição.

A – Fotossíntese; gs – Condutância estomática; Ci – Concentração interna de CO<sub>2</sub>; E – Transpiração; EUAm – Eficiência momentânea do uso da água. \*\* significativo em nível de 0,01 de probabilidade; \* significativo em

Fontes de Variação	Quadrado Médio				
	A	gs	Ci	E	EUAm
Bloco	44,75 <sup>ns</sup>	0,0002 <sup>ns</sup>	605,54 <sup>ns</sup>	3,63 <sup>ns</sup>	1,39 <sup>ns</sup>
Cenários Hídricos (c)	1400,97 <sup>**</sup>	0,1862 <sup>**</sup>	445,60 <sup>ns</sup>	40,50 <sup>**</sup>	0,51 <sup>ns</sup>
Resíduo 1	35,14	0,0119	913,22	1,29	0,49
Suplementação (s)	3900,52 <sup>**</sup>	0,4749 <sup>**</sup>	369,85 <sup>ns</sup>	102,24 <sup>**</sup>	4,11 <sup>**</sup>
Interação (cxs)	432,35 <sup>**</sup>	0,0439 <sup>*</sup>	104,74 <sup>ns</sup>	11,38 <sup>**</sup>	0,25 <sup>ns</sup>
Resíduo 2	34,39	0,0087	1009,34	1,23	0,13
Época (e)	856,21 <sup>**</sup>	0,0826 <sup>**</sup>	6025,67 <sup>**</sup>	31,45 <sup>**</sup>	18,54 <sup>**</sup>
Interação (cxe)	117,78 <sup>**</sup>	0,0278 <sup>**</sup>	1998,54 <sup>**</sup>	4,04 <sup>**</sup>	0,36 <sup>ns</sup>
Interação (sxe)	239,64 <sup>**</sup>	0,0987 <sup>**</sup>	3972,52 <sup>**</sup>	8,38 <sup>**</sup>	1,16 <sup>**</sup>
Interação (cxsxe)	71,53 <sup>**</sup>	0,0076 <sup>ns</sup>	1482,60 <sup>**</sup>	1,67 <sup>*</sup>	0,30 <sup>ns</sup>
Resíduo 3	28,45	0,0060	610,18	0,95	0,42
CV (%) c	17,71	40,33	31,73	15,06	12,19
CV (%) s	17,52	34,47	33,36	21,50	6,43
CV (%) e	15,94	28,64	25,94	18,95	11,31

nível de 0,05 de probabilidade; <sup>ns</sup> não significativo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

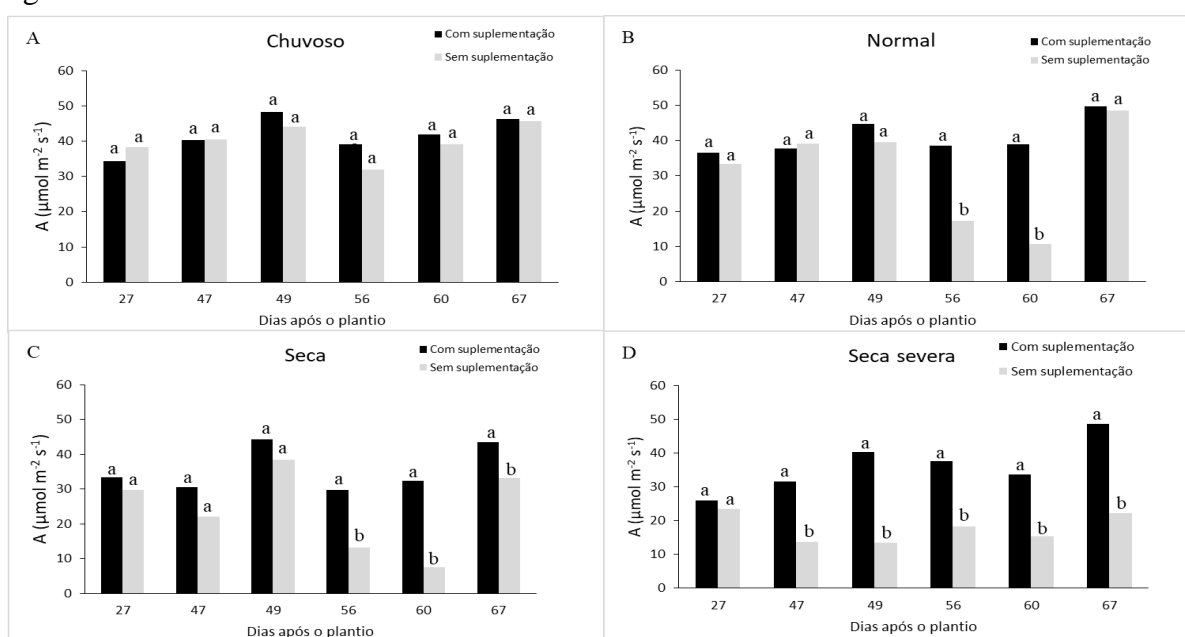
A Figura 10 mostra as taxas de fotossíntese do milho com valores superiores a 30  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , os quais são compatíveis com espécies do metabolismo fotossintético do tipo C4 (LARCHER, 2000; OSBORNE e SACK, 2012; SOUZA 2018). Para o cenário hídrico chuvoso não se observou diferenças nas taxas de fotossíntese entre os tratamentos com e sem suplementação nas seis medições, indicando a inexistência de estresse hídrico e também que a irrigação suplementar não seria necessária para esse cenário (Figura 10A). Porém, para o cenário Normal (Figura 10B) fica evidente a necessidade da irrigação suplementar, a qual foi necessária nos períodos de veranicos na fase reprodutiva (56 e 60 dias após o plantio), incrementando significativamente a taxa de fotossíntese em relação ao tratamento sem suplementação. Para o cenário de seca, verifica-se que a irrigação suplementar foi importante para manutenção da taxa de fotossíntese em três das seis datas avaliadas (Figura 10C), enquanto que no cenário de seca severa isso foi observado em cinco das seis datas avaliadas

(Figura 10D), refletindo a distribuição dos veranicos e a umidade do solo apresentados previamente neste trabalho (Figuras 2 e 3).

A redução na taxa de fotossíntese pode ser ocasionada por diversos fatores bióticos e abióticos, e do ponto de vista fisiológico pode ser explicada por limitações estomáticas, redução na concentração de clorofila, e inibições fotoquímicas e enzimáticas (RAHNAMA *et al.*, 2010; TAIZ *et al.*, 2015; LACERDA *et al.*, 2020).

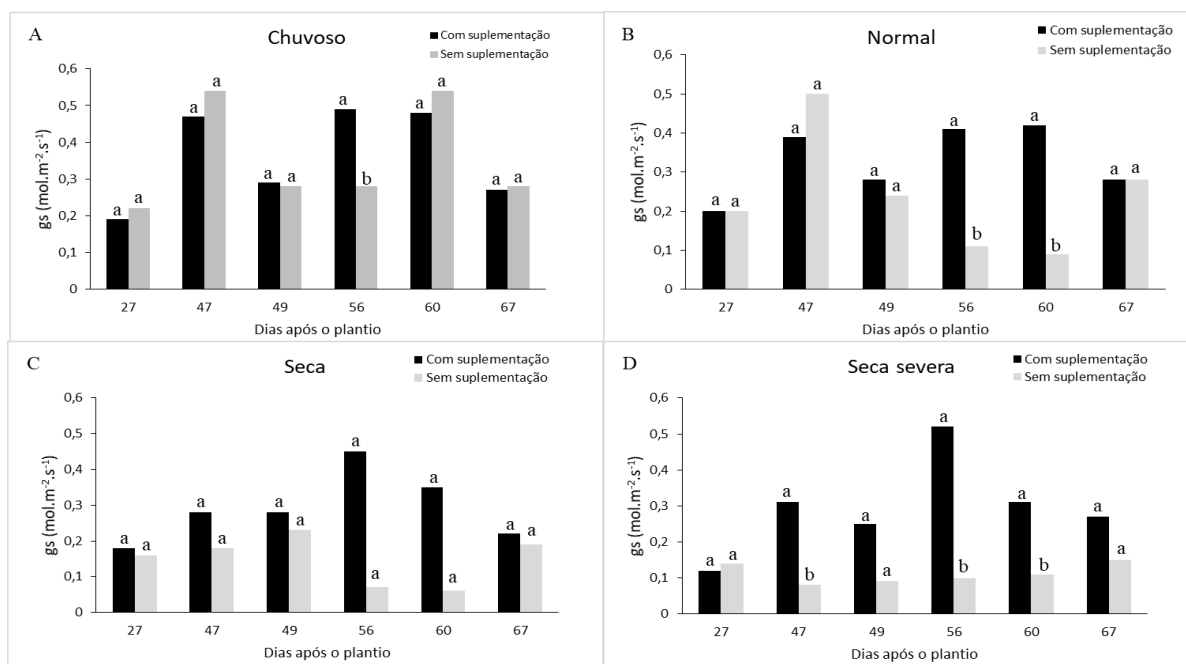
Os dados de condutância estomática (Figura 11) mostram que os efeitos negativos do estresse hídrico foram relacionados, em grande parte, à redução na abertura estomática que limita a absorção de CO<sub>2</sub> para o processo de assimilação (TAIZ *et al.*, 2015). Entretanto, para algumas datas se observa concomitante redução da taxa de fotossíntese (Figura 10) e aumento na concentração interna de CO<sub>2</sub> (Figura 12), para os tratamentos sem irrigação suplementar, especialmente nos cenários de seca e seca severa. Isso indica que os veranicos de maior duração nestes cenários hídricos resultam em efeitos sobre o metabolismo fotossintético, decorrentes da maior severidade do estresse hídrico, de modo que não há falta de substrato (CO<sub>2</sub>), mas há deterioração do aparato fotoquímico e, ou bioquímico do processo de assimilação de carbono nos cloroplastos.

Figura 10 – Taxas de fotossíntese líquida em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição (dias após o plantio) e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.



<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras nas barras, para cada época de medição, não diferem ( $p > 0,05$ ) entre si estatisticamente pelo teste Tukey. Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).

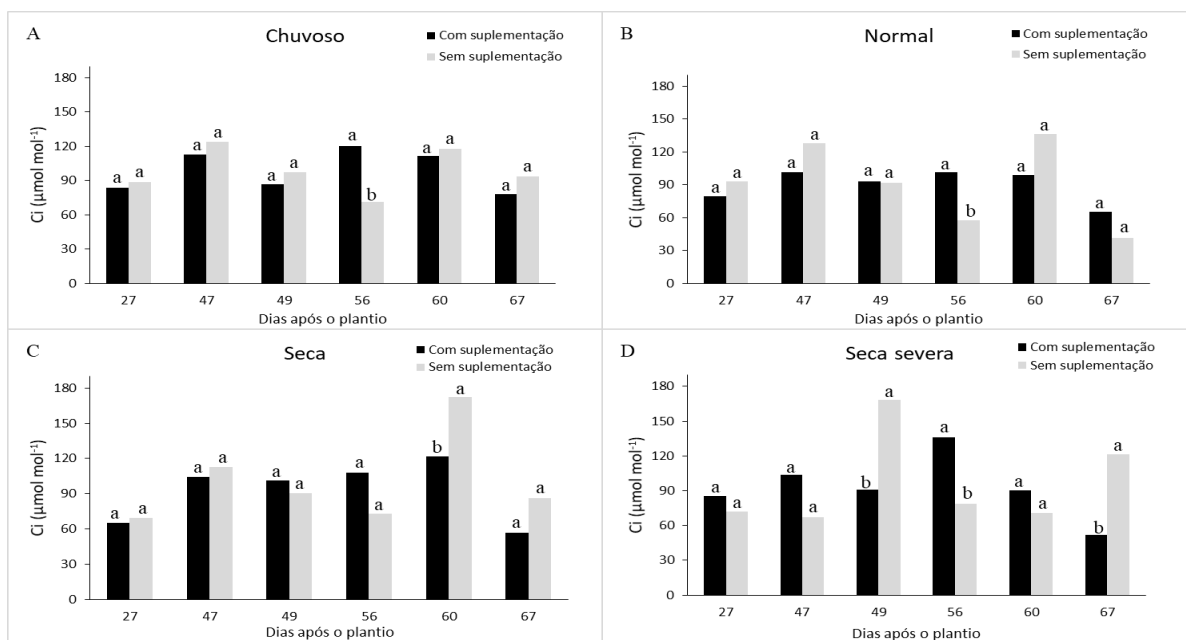
Figura 11 – Condutância estomática em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.



<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras nas barras, para cada época de medição, não diferem ( $p > 0,05$ ) entre si estatisticamente pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).

Figura 12 – Concentração interna de  $\text{CO}_2$  em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.



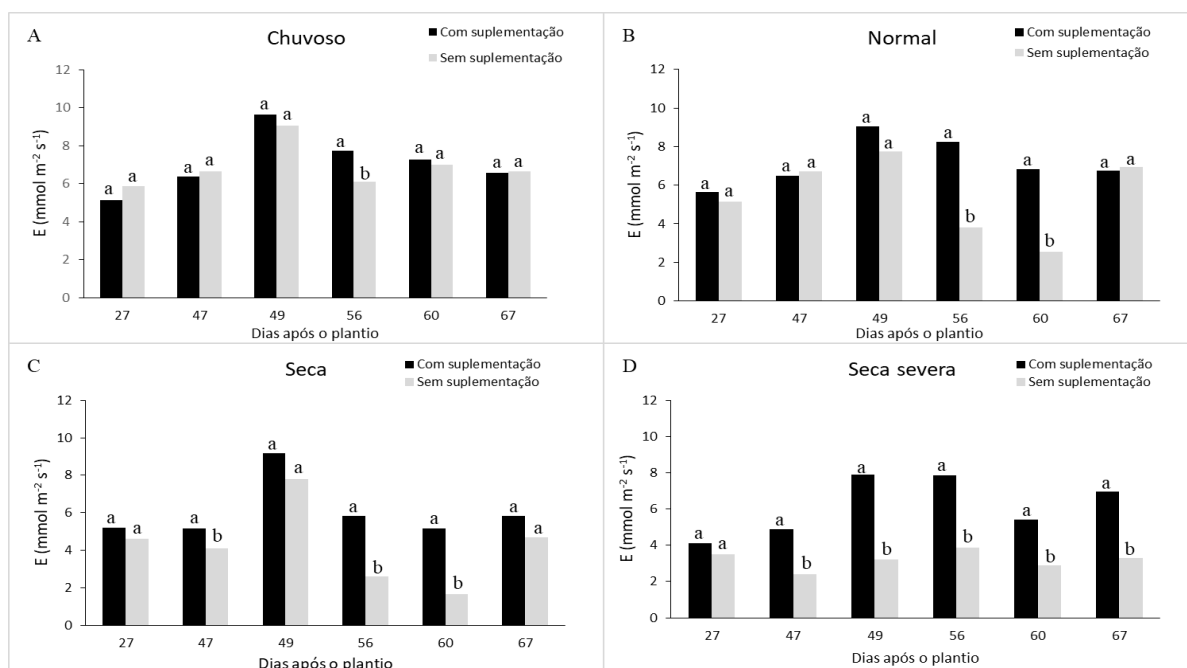
<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras nas barras, para cada época de medição, não diferem ( $p > 0,05$ ) entre si estatisticamente pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).

Os dados de taxa de transpiração (Figura 13) mostram comportamento semelhante aos dados da taxa de fotossíntese líquida (Figura 10), demonstrando fortes limitações estomáticas associadas principalmente ao déficit de água durante os veranicos. Para o cenário hídrico chuvoso não se observou diferenças entre os tratamentos com e sem suplementação, com valores variando ao longo do tempo, possivelmente em função das variáveis ambientais. No outro extremo, verifica-se que para o cenário de seca severa têm-se reduções em todas as leituras, exceto na primeira realizada aos 27 dias após o plantio, sendo reflexo claro da simulação do aporte de água durante o ciclo da cultura (Figuras 2 e 3).

Os dados de taxas de transpiração e de taxas de fotossíntese líquida também mostram a rápida capacidade de recuperação das trocas gasosas após um veranico, fato bem evidente para o tratamento sem suplementação nos cenários normal e de seca. Essa capacidade de recuperação das trocas gasosas ao final de um veranico foi também relatada por Fernandes *et al.* (2015) em plantas de feijão-caupi, sendo que tais respostas ocorrem mesmo após chuvas de baixa intensidade. Entretanto, estresses mais severos associados com veranicos muito extensos podem ocasionar danos celulares permanentes, não sendo possível a total recuperação dos processos fisiológicos e do crescimento da planta (LARCHER, 2000).

Figura 13 – Taxa de transpiração em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.

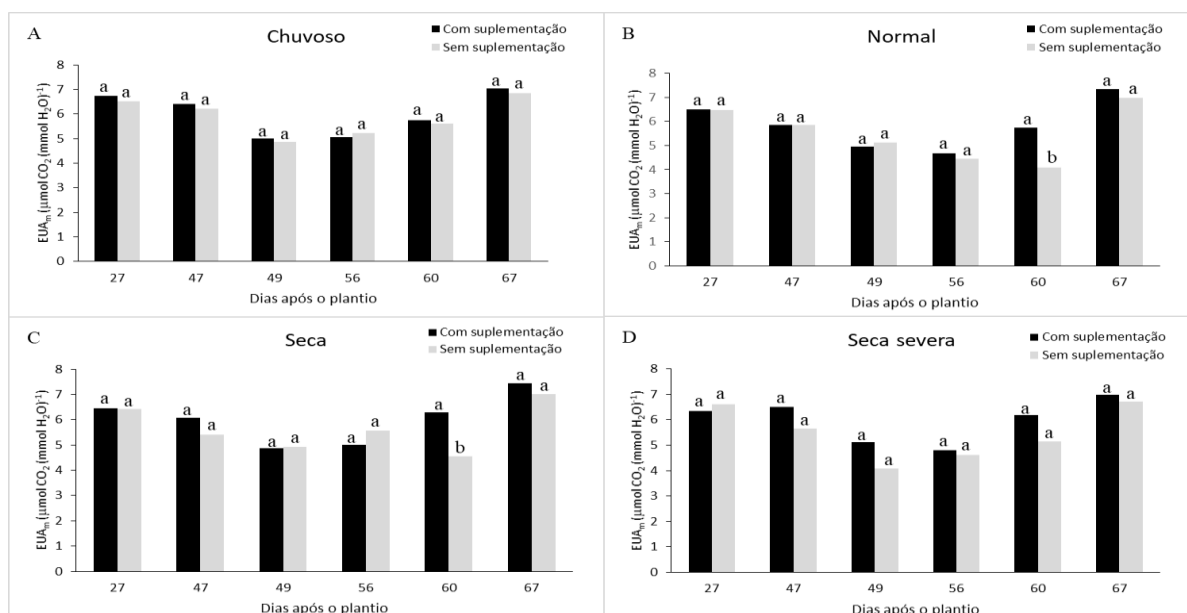


<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras nas barras, para cada época de medição, não diferem ( $p > 0,05$ ) entre si estatisticamente pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A similaridade das respostas das taxas de fotossíntese (Figura 10) e da taxa de transpiração (Figura 13) resultou em variações mínimas na eficiência momentânea do uso da água (Figura 14), a qual é obtida exatamente pela relação entre as taxas desses dois processos fisiológicos. Observa-se na Figura 14 que há semelhança nas respostas das plantas dos diferentes cenários, com valores menores de  $EUA_m$  nas medições realizadas aos 56 e 60 dias após o plantio, associados possivelmente ao maior déficit de pressão de vapor e aumento nas taxas de transpiração nesse período (Figura 13). Na comparação entre os tratamentos com e sem irrigação suplementar com água salobra, observa-se redução na  $EUA_m$  apenas aos 60 dias após o plantio nos cenários normal e de seca, resultado explicado pela queda expressiva na taxa de fotossíntese durante um veranico (Figura 10).

Figura 14 – Eficiência momentânea no uso da água ( $EUA_m$ ) em folhas de milho sob diferentes cenários hídricos, datas de medição e presença ou ausência da irrigação suplementar com águas salobras.



<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras nas barras, para cada época de medição, não diferem ( $p > 0,05$ ) entre si estatisticamente pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### Estresse hídrico x estresse salino

Os tratamentos com e sem irrigação suplementar com águas salobras podem resultar em dois tipos de estresse abiótico: o estresse hídrico no tratamento sem irrigação



suplementar e o estresse salino associado ao uso da água de maior salinidade. É interessante que ambos tendem a se tornar mais severos quanto maior o número e a duração dos veranicos. A falta de chuvas por mais de cinco dias reduz a taxa de fotossíntese do milho (Figura 10B), porém esses efeitos se tornam expressivo nos cenários de seca (Figura 10C) e seca severa (Figura 10D), quando a duração dos veranicos é maior que nos demais cenários. Por outro lado, o estresse salino tende a se tornar mais relevante quanto mais irrigações suplementares com água salobra forem realizadas, o que se observa também nos cenários de veranicos mais intensos, resultando em maior acúmulo de sais no solo (Figura 9) e maior intensidade dos efeitos osmóticos e tóxicos da salinidade (MUNNS & TESTER, 2008).

A produção de biomassa por planta, apresentada na Tabela 7 e na Figura 15, demonstram claramente que os efeitos do estresse hídrico são muitas vezes mais deletérios para o milho do que o estresse salino associado à irrigação suplementar com águas salobras.

Tabela 7 – Valores médios de biomassa fresca da parte aérea (vegetativa, reprodutiva e total), relação biomassa reprodutiva/biomassa total, eficiência do uso da água (EUA) e eficiência da água aplicada na irrigação suplementar ( $EUA_{is}$ ) na cultura do milho, em função dos cenários hídricos e da suplementação com água salobra ( $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Irrigação Suplementar	Cenários hídricos simulados			
	Chuvoso	Normal	Seca	Seca Severa
	Biomassa fresca vegetativa (g por planta) <sup>1</sup>			
Com	210,6 ± 9,8	229,5 ± 10,4	218,4 ± 10,6	198,5 ± 3,2
Sem	204,7 ± 18,9	137,7 ± 21,5	78,3 ± 6,95	35,2 ± 7,1
	Biomassa fresca reprodutiva (g por planta)			
Com	192,8 ± 16,1	191,7 ± 6,1	188,4 ± 11,9	162,8 ± 6,9
Sem	181,8 ± 22,5	153,4 ± 13,6	71,7 ± 11,4	19,9 ± 3,5
	Biomassa fresca total (g por planta)			
Com	403,4 ± 23,1	421,3 ± 14,1	406,8 ± 21,9	361,4 ± 8
Sem	386,6 ± 41,3	291,2 ± 26	150 ± 15,7	55,1 ± 10,6
	Relação biomassa reprodutiva/biomassa total			
Com	0,47 ± 0,03	0,45 ± 0,01	0,46 ± 0,02	0,45 ± 0,01
Sem	0,47 ± 0,03	0,52 ± 0,04	0,47 ± 0,07	0,36 ± 0,06
	EUA ( $\text{g L}^{-1}$ ) <sup>2</sup>			
Com	6,34 ± 0,36	9,29 ± 0,31	9,86 ± 0,53	9,03 ± 0,20
Sem	6,48 ± 0,69	7,82 ± 0,70	5,43 ± 0,57	2,87 ± 0,39
	$EUA_{is}$ ( $\text{g L}^{-1}$ ) <sup>3</sup>			
Com	4,12 ± 8,08	15,95 ± 3,90	18,66 ± 0,78	14,72 ± 0,68

<sup>1</sup>Valores médios ± erro padrão da media (n=4). <sup>2</sup>Para o calcular da eficiência do uso da água (EUA) foi utilizada a biomassa fresca total e os volumes de água aplicado por planta. <sup>3</sup>Para o cálculo da eficiência do uso da água aplicada na irrigação suplementar ( $EUA_{is}$ ) foi feita a relação entre o incremento de biomassa total e volume de água suplementar aplicado por planta, considerando-se aplicação localizada.

Figura 15 – Vista superior da área experimental



Legenda	
— Chuvoso com suplementação	— Seca com suplementação
..... Chuvoso sem suplementação	..... Seca sem suplementação
— Normal com suplementação	— Seca severa com suplementação
..... Normal sem suplementação	..... Seca severa sem suplementação

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nota-se que a produção de biomassa permanece com pouca alteração quando se compara a produção de biomassa vegetativa, reprodutiva e total dos cenários chuvoso e normal, quando se utiliza a irrigação suplementar (Tabela 7). Para os mesmos cenários sem suplementação, as reduções são acentuadas para o cenário normal e se tornam drásticas para os cenários de seca e seca severa (Figura 15). O tratamento de seca severa é o único que apresenta redução na produção de biomassa com a irrigação suplementar, indicando que a salinidade ponderada de água de irrigação de  $2,8 \text{ dS m}^{-1}$ , já resulta em impactos negativos no crescimento da planta. Vale ressaltar que a água salobra utilizada no presente estudo é cerca de quatro vezes superior à salinidade limiar da cultura do milho ( $1,1 \text{ dS m}^{-1}$ ), segundo dados de Ayers & Westcot (1999). Por outro lado, o cenário de seca severa sem suplementação é o único que altera a partição de fotoassimilados, com queda de cerca de 20% na produção de biomassa reprodutiva, em relação à biomassa total.

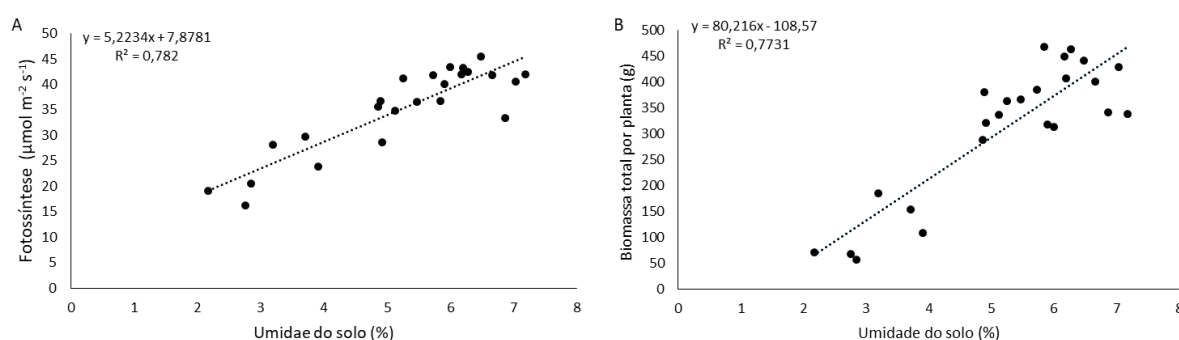
Em contraste com os resultados da eficiência momentânea do uso da água (Figura 14), foram observadas diferenças marcantes na eficiência do uso da água entre os cenários e tratamentos com e sem suplementação, quando se considerou a relação entre a produção de biomassa e o volume de água aplicado (Tabela 7). Verificou-se que a irrigação suplementar não incrementou os valores de EUA apenas para o cenário chuvoso, e as maiores diferenças entre os tratamentos com e sem suplementação foram observadas nos cenários de seca e seca severa. Quando se considera apenas a eficiência do uso da água aplicada na irrigação suplementar ( $\text{EUA}_{\text{is}}$ ) verificam-se incrementos de 4,12 a  $18,66 \text{ g L}^{-1}$  de água aplicado, com o menor valor no cenário chuvoso, o qual também mostrou maior variabilidade visto que algumas repetições sem suplementação deram resultados maiores que com suplementação.

De modo geral, os valores nos demais cenários são bem expressivos e maiores do que os obtidos na irrigação plena, visto que esta utiliza lâminas de irrigação entre 350 e 500 mm para a produção do milho verde (EMBRAPA, 2008; PEREIRA FILHO, 2010), as quais são bem superiores às utilizadas na irrigação suplementar nos cenários normal (102 mm) e de seca (172 mm), por exemplo. Porém, se observa uma menor resposta à irrigação suplementar no cenário de seca severa em relação ao cenário de seca, o que se deve à maior lâmina aplicada na suplementação no primeiro cenário e também à pequena redução na produção de biomassa, possivelmente ocasionada possivelmente pelo acúmulo de sais no solo.

As análises de regressão relacionando a umidade e a salinidade do solo com variáveis-resposta das plantas também demonstram que a irrigação suplementar com água salobra reduz os efeitos deletérios do estresse hídrico durante os veranicos, sem ocasionar danos associados ao estresse salino. Os dados da Figura 16 demonstram que a redução da

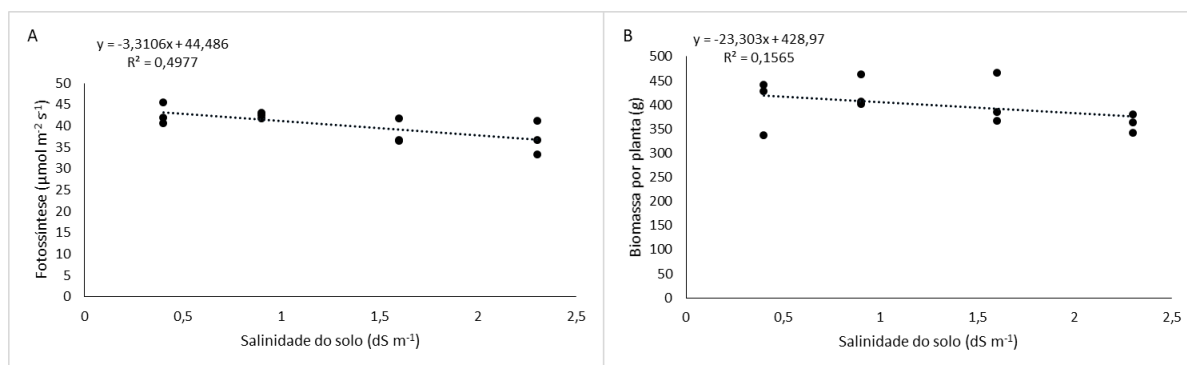
umidade do solo (média de quatro leituras ao longo do ciclo) de 7 para 2% resultou em redução de 58% na taxa de fotossíntese líquida (Figura 16A) e de 88% na produção de biomassa (Figura 16B), considerando-se os dados dos tratamentos com e sem suplementação. Por outro lado, o aumento da salinidade ponderada da água de irrigação de 1,1 dS m<sup>-1</sup> (cenário chuvoso) para 2,8 dS m<sup>-1</sup> (cenário de seca severa) reduziu em apenas 14 e 11% a taxa de fotossíntese (Figura 17A) e a produção de biomassa total (Figura 17B), respectivamente. Essas reduções poderiam ser ainda menores ou inexistentes numa condição real, visto que a baixa salinidade da água da chuva reduz ainda mais a salinidade ponderada associada à irrigação suplementar com água salobra, além de favorecer a maior lixiviação dos sais.

Figura 16 – Análise de correlação entre a umidade do solo (1:1) e a taxa de fotossíntese (A) e entre a umidade do solo e a produção de biomassa total por planta (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 17 – Análise de correlação entre a salinidade do solo e a taxa de fotossíntese (A) e entre a salinidade do solo e a produção de biomassa total por planta (B).



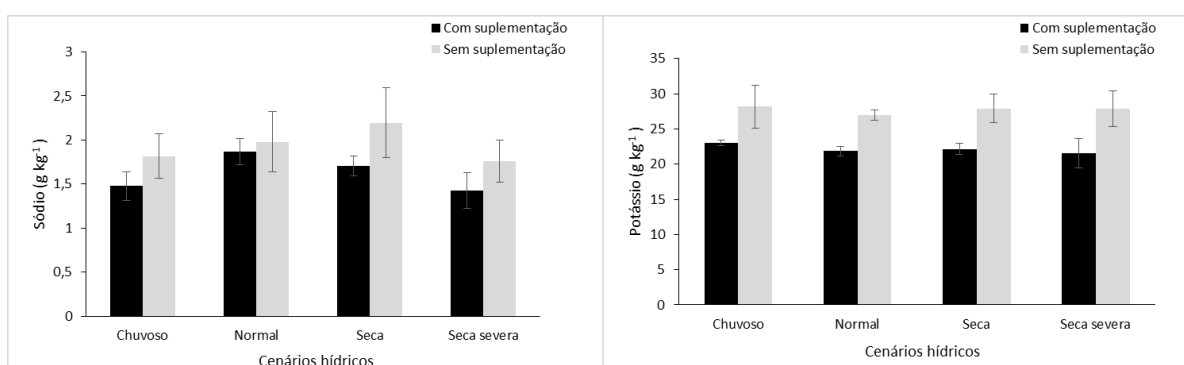
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os dados de análise mineral nas folhas também demonstram que a utilização de águas salobras na irrigação suplementar não resultou em acúmulos letais de sódio (Figura 18A)



nem na limitação no acúmulo do potássio (Figura 18B). Para os tratamentos com suplementação não foi verificada nenhum aumento no teor de sódio, mesmo quando a condutividade elétrica ponderada da água de irrigação passou de 1,1 dS m<sup>-1</sup> (cenário chuvoso) para 2,8 dS m<sup>-1</sup> (cenário de seca severa), e nenhum incremento foi observado em relação aos tratamentos sem suplementação. Os teores de sódio também foram inferiores a 2,5 g kg<sup>-1</sup>, os quais são considerados baixos mesmo para glicófitas moderadamente sensíveis. É possível que as irrigações com água de baixa salinidade, simulando a ocorrência de chuvas, tenha reduzido o acúmulo de sais no solo e conseqüentemente na planta, conforme demonstrado por Barbosa *et al.* (2012) em trabalho com uso cíclico de água de baixa e alta salinidade na cultura do milho. Por outro lado, os teores de potássio se encontram dentro da faixa adequada para a cultura do milho (BULL, 1993) e não foram reduzidos com o aumento da salinidade, como observado em outros estudos com gramíneas sob salinidade contínua (LACERDA *et al.*, 2003). Os teores de potássio, assim como os de sódio, foram ligeiramente superiores nos tratamentos sem irrigação suplementar, o que pode ser explicado pelo efeito de diluição dos sais (BARBOSA *et al.*, 2012; MARSCHNER, 2012) nos tratamentos com suplementação, nos quais as plantas apresentaram maior acúmulo de biomassa (Tabela 7).

Figura 18 – Teores de Na (A) e K (B) em folhas maduras de milho em função dos cenários hídricos e da suplementação ao não com águas salobras.



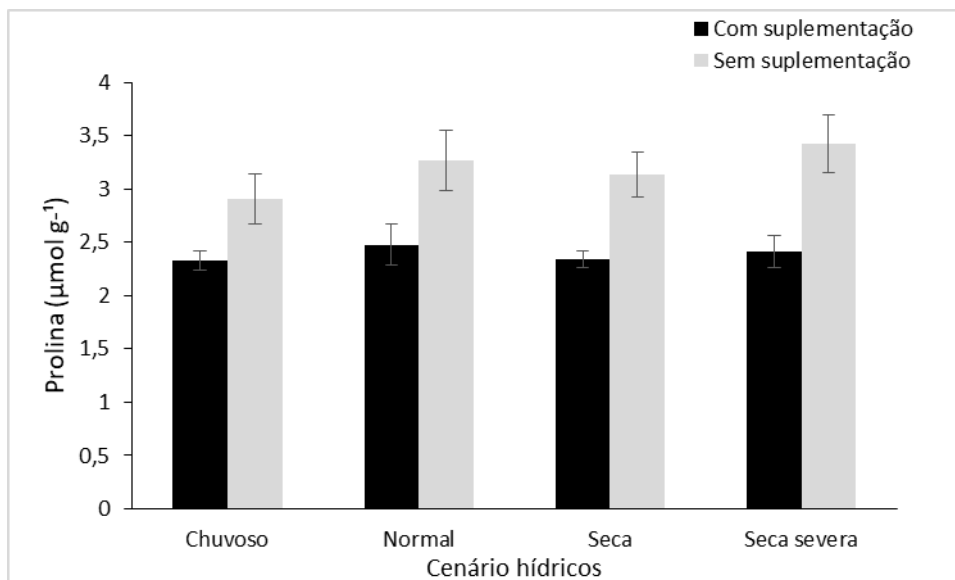
<sup>1</sup>Os dados são médias de três coletas (47, 56 e 60 dias após o plantio) ± erro padrão da média.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os dados médios do teor de prolina, obtidos de três leituras ao longo do ciclo, não apresentaram tendência de aumento nos tratamentos com irrigação suplementar (Figura 19), indicando que o estresse salino não foi intenso suficiente para promover o acúmulo desse soluto. Por outro lado, verifica-se em todos os cenários que os teores foliares de prolina foram maiores nos tratamentos sem suplementação do que nos tratamentos com suplementação.

Estes resultados indicam que o estresse hídrico foi mais determinante para o incremento no teor de prolina do que o estresse salino.

Figura 19 – Teores de prolina em folhas maduras de milho em função dos cenários hídricos e da suplementação ao não com águas salobras.



<sup>1</sup>Os dados são médias de três coletas (47, 56 e 60 dias após o plantio)  $\pm$  erro padrão da média.

Embora o acúmulo de prolina seja uma resposta comum nas plantas sob estresse hídrico e salino, há controvérsias em relação ao papel desempenhado por este aminoácido. Para muitos autores o acúmulo de prolina é uma resposta adaptativa importante para as plantas sob estresse (VERSLUES e BRAY, 2006; CHEN *et al.*, 2007; KISHOR *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2015; ZHANG & BECKER, 2015; LI *et al.*, 2018), podendo contribuir para o ajustamento osmótico e para a proteção de estruturas e funções celulares. Para outros autores, entretanto, a prolina medida pelo método de Bates *et al.* (1973) é um indicativo muito mais associado aos danos provocados pelo estresse hídrico (HANSON *et al.*, 1977; FERREIRA *et al.*, 1979) e salino (LUTTS *et al.*, 1996; LACERDA *et al.*, 2003; LACERDA *et al.*, 2006; LACERDA *et al.*, 2020), não apresentando correlação positiva com a tolerância. Os dados do presente estudo estão em consonância com esses últimos autores, visto que um maior acúmulo de prolina (Figura 19) foi verificado nas plantas que sofreram mais com o estresse hídrico, como revelado pelos dados de umidade do solo (Figura 8), trocas gasosas foliares (Figura 10) e produção de biomassa (Tabela 7).

#### 4.4 Conclusões

Os veranicos reduzem a capacidade fotossintética de folhas de milho, mesmo no cenário hídrico normal, porém os efeitos se tornam drásticos nos cenários de seca e seca severa em decorrência de efeitos estomáticos e não estomáticos. A irrigação suplementar com águas salobras reduz o estresse hídrico do milho durante os veranicos e melhora as trocas gasosas foliares, com reflexo direto na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e na produção de biomassa da parte aérea. Os resultados de sódio, potássio e prolina demonstram que o estresse salino associado ao uso da irrigação suplementar tem impacto bem menor do que o estresse hídrico.

## 5. USO DA ESPECTROMETRIA DE REFLECTANCIA E NÍVEIS FOLIARES DE PROLINA PARA IDENTIFICAR NÍVEIS DE ESTRESSE HÍDRICO E SALINO NA CULTURA DO MILHO

**RESUMO:** Os estudos com irrigação suplementar com águas salobras permitem avaliar a ocorrência tanto do estresse hídrico como do estresse salino, sendo o acúmulo de prolina nas folhas uma resposta comumente observada quando as plantas são submetidas a esses dois fatores abióticos. O objetivo deste estudo foi a análise hiperespectral das folhas de milho, bem como a associação destes fatores de reflectância com o conteúdo de prolina foliar. A cultura do milho foi submetida a diferentes cenários hídricos e intensidades de veranicos, com e sem a aplicação de água salobra. O experimento seguiu um delineamento de blocos casualizados no esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas foram formadas simulando o abastecimento de água no solo correspondente a quatro cenários hídricos (chuvoso, normal, seca e seca severa), e as subparcelas com ou sem irrigação suplementar com água salobra (condutividade elétrica de 4,5 dS m<sup>-1</sup>). Os teores foliares de prolina e as leituras espectrais foram obtidas aos 60 dias após o plantio. Valendo-se do espectrorradiômetro FieldSpec 3 foram coletados dados hiperespectrais de 24 amostras representativas dos tratamentos admitidos e análises gráficas, derivativas, de estatísticas descritivas e Análise de Componentes Principais (ACP) foram implementadas. Dentre os principais resultados encontrados observou-se que o estresse hídrico causado pelos veranicos foi preponderante sobre as oscilações espectrais em relação ao estresse salino provocado pela aplicação de água salobra na suplementação. As concentrações de prolina foram fracamente correlacionadas aos comprimentos de onda estudados, sendo as maiores na faixa do visível. A derivada de primeira ordem permitiu a visualização mais detalhada dos tratamentos e ao final a ACP apontou dois constructos que generalizam comprimentos de onda da região do vermelho visível e da caracterização de constituintes das paredes celulares.

**Palavras-chave:** *Zea mays* L. Acúmulo de prolina. Respostas espectrais.



## 5.1 Introdução

Os estresses hídrico e salino comprometem o desenvolvimento das plantas ao afetar uma série de processos bioquímicos e fisiológicos. Com isso, as plantas desenvolveram complexos mecanismos fisiológicos e moleculares para suportá-los periodicamente e, assim, dar continuidade a seu ciclo fenológico. Como uma das respostas mais comuns aos estresses abióticos, o acúmulo de osmólitos celulares foi amplamente confirmado em muitas plantas. Entre muitos osmólitos, a prolina é um composto amplamente acumulado em plantas sob condições de estresse salino e hídrico e tem atraído a atenção de muitos pesquisadores (YAMAGUCHI-SHINOZAKI e SHINOAKI, 2006; KANASHIRO *et al.*, 2009; SHARMA e VERSLUES, 2010; WANG *et al.*, 2015).

O acúmulo de prolina é uma resposta comum aos estresses hídrico e salino em muitas plantas, podendo ocorrer aumento na concentração nas raízes, caules e folhas, com incrementos mais significativos nos tecidos foliares (KISHOR e SREENIVASULU, 2014; BHASKARA *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2015; SIGNORELLI, 2016). Como a prolina se acumula rapidamente em resposta ao excesso de sal ou à desidratação, os níveis intracelulares aumentados de prolina livre são considerados uma marca registrada das reações adaptativas nas plantas (VERSLUES e BRAY, 2006; CHEN *et al.*, 2007; KISHOR *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2015; ZHANG e BECKER, 2015). Para alguns autores, entretanto, a prolina medida pelo método de Bates *et al.* (1973) é um indicativo muito mais associado aos danos provocados pelo estresse hídrico (HANSON *et al.*, 1977; FERREIRA *et al.*, 1979) e salino (MOFTAH e MICHEL, 1987; LUTTS *et al.*, 1996; LACERDA *et al.*, 2003; LACERDA *et al.*, 2006; LACERDA *et al.*, 2020), não apresentando correlação positiva com a tolerância.

O método convencionalmente utilizado para a determinação da prolina é classificado essencialmente como destrutivo. Estes tipos de análise na estimativa do conteúdo de nutrientes ou outros elementos são considerados muito precisos, entretanto são caros e demorados (ERDLE *et al.*, 2011; CORTI *et al.*, 2017). O sensoriamento remoto, então, surge como uma excelente alternativa, pois o mesmo é um método com potenciais não destrutivo (CARVALHO *et al.*, 2016) quando obtidos em campo. Esta técnica pode auxiliar, por exemplo, na determinação dos teores de prolina em folhas de plantas, bem como na classificação de níveis de estresse e produtividade das culturas sob condições limitantes. Isto se dá em virtude de agentes estressores, como os déficits hídrico e salino, desencadearem alterações metabólicas que originam acúmulos de soluto orgânico nas plantas e conseqüentemente, alteram as propriedades físicas de reflectância, transmitância e absorção de suas folhas

(JENSEN, 2011).

A aplicação de tecnologia de sensoriamento remoto na agricultura tem se tornado cada vez mais frequente entre os médios e grandes agricultores devido à sua capacidade de otimizar o *status* da cultura, facilitando o monitoramento da lavoura. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de sensores manuais de dossel das lavouras permitiu que a agricultura de precisão fosse usada para leitura de atributos biofísicos, fisiológicos ou bioquímicos das lavouras. O sensoriamento remoto pode coletar dados de refletância espectral úteis no fornecimento rápido e preciso do desenvolvimento das plantas amostradas (DIACONO *et al.*, 2013; DIN *et al.*, 2017; PEI *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2013 ).

Os avanços tecnológicos associados ao uso de técnicas de sensoriamento remoto apresentam a oportunidade para o uso de novas abordagens, como medidas de temperatura do dossel, conteúdo de água nas células e folhas e a composição dos pigmentos fotossintéticos das folhas. Essas variáveis permitem o uso de imagens térmicas e multiespectrais como opções viáveis para entender fenômenos biológicos e selecionar plantas sob determinados estresses (ADEBAYO *et al.*, 2014; ARAUS *et al.*, 2018 CAIRNS *et al.*, 2012; FERNÁNDEZ CALLEJA *et al.*, 2020). A vantagem desta caracterização bioquímica ser aplicável a diferentes escalas no meio ambiente e em atividades agrícolas acelera bastante o entendimento sobre a paisagem que se trabalha. Como exemplo de detecção da salinidade cita-se trabalhos como os de Rocha Neto *et al.* (2017), ao avaliar o desempenho de quatro modelos computacionais na estimativa remota da condutividade elétrica (CE) dos solos, através da espectroscopia de refletância em laboratório. Já estudos quimiométricos na cultura do milho também podem ser citados, neste sentido, como os de Campelo (2018) na construção de modelos preditivos a partir de dados hiperespectrais para quantificação de N.

Neste cenário, valendo-se de técnicas matemáticas e estatísticas multivariadas, objetivou-se realizar uma análise hiperespectral das folhas e a associação destes fatores de refletância com o conteúdo de prolina foliar na cultura do milho submetida a diferentes cenários hídricos e intensidades de veranicos, com e sem a irrigação suplementar com água salobra. Acredita-se que é possível discriminar níveis de prolina na cultura do milho por meio de sensoriamento foliar hiperespectral, bem como identificar remotamente níveis de estresse hídrico ou salino.

## 5.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido na área experimental do Laboratório de Hidráulica

e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, localizado nas coordenadas 3°74' S, 38°58' W e altitude de 19 m. O solo da área é classificado como Argissolo Vermelho-amarelo (EMBRAPA, 2006), apresentando textura franco-arenosa no horizonte A.

O delineamento adotado foi em blocos casualizados no arranjo de parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas foram formadas pela simulação do suprimento de água no solo correspondente a quatro regimes hídricos: *i*) Chuvoso (CHU); *ii*) Normal (NOR); *iii*) Seca (SEC); e *iv*) Seca Severa (MSEC). Já as subparcelas foram classificadas de: com irrigação suplementar (CS) e sem irrigação suplementar (SS).

Os padrões de chuvas e veranicos foram definidos com base em série histórica de 30 anos dos dados de precipitação fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - Funceme para a região do Vale do Curú – CE, região caracterizada como semiárida. Os dados foram extraídos dos meses de fevereiro a maio (meses que representam o cultivo de sequeiro da região. De posse das informações obtidas pela Funceme, foram determinados os totais de lâminas de água a serem aplicadas em cada regime hídrico: 900 mm para o tratamento chuvoso, 530 mm para o normal, 395 mm para o seca e 260 para o seca severa. É válido ressaltar que a ocorrência de veranico foi representada por pelo menos cinco dias sem chuvas, sendo a duração e quantidade definidas pela distribuição das precipitações a partir da série histórica supracitada.

O experimento foi desenvolvido no período de 28 de setembro a 18 de dezembro de 2019. A cultura utilizada foi o milho (*Zea mays*), sendo empregadas sementes de milho Híbrido BRS 2022. A semeadura em cada ano foi realizada após aplicação de uma lâmina de 30 mm, simulando uma condição de umidade do solo normalmente utilizada por agricultores que cultivam em sequeiro. Cada parcela foi formada por seis linhas de plantio, com 10 m de comprimento, e cada subparcela possuía três linhas de plantio e 10 m de comprimento, aplicando-se o espaçamento de 0,80 x 0,20 m. A irrigação se deu por gotejamento, sendo utilizadas fitas gotejadoras com emissores autocompensantes, com vazão de 2,7 L.h<sup>-1</sup> por emissor e espaçamento entre emissores de 0,40 m.

Foram realizadas irrigações com dois tipos de águas: água de baixa salinidade e água de maior salinidade. Nos períodos sem veranicos, as irrigações com água de baixa salinidade (condutividade elétrica de água - CEa = 0,9 dS m<sup>-1</sup>), almejavam volumes de água em consonância com a série histórica de dados de precipitações. Já nas suplementações com água salobra (CEa = 4,5 dS m<sup>-1</sup>) foram realizadas com o intuito de reduzir o estresse ocasionado pelo veranico, utilizando possíveis fontes de água disponíveis na propriedade

agrícola.

As suplementações foram realizadas com base nos valores da evapotranspiração da cultura (ALLEN *et al.*, 1998), estimada durante os períodos de veranicos, acrescentando-se uma fração de lixiviação de 20% em cada evento de irrigação. Os totais de água salobra aplicados na suplementação foram de 51, 102, 172 e 260 mm, respectivamente para os tratamentos Chuvoso, Normal, Seca e Seca Severa. Os eventos de chuvas naturais (e não programados) sobre a área experimental foram devidamente contabilizados e os valores descontados da irrigação total.

A água salobra foi preparada com os sais de NaCl, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O e MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, na respectiva proporção equivalente de 7:2:1, simulando uma fonte hídrica similar às águas salobras encontradas na região Nordeste do Brasil. Acrescente-se a isto que valor de 4,5 dS.m<sup>-1</sup> é comumente encontrado em águas de poços do semiárido brasileiro (MEDEIROS, 1992; BARBOSA *et al.*, 2012).

Foram realizadas adubações com nitrogênio, fósforo e potássio, de acordo com as recomendações de adubação para a cultura do milho em condição de sequeiro no Estado do Ceará (FERNANDES *et al.*, 1993), utilizando-se os fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. A dose de nitrogênio foi dividida em três parcelas: uma na semeadura e duas em cobertura (totalizando 70 kg ha<sup>-1</sup>), a dose de fósforo foi aplicada em fundação (40 kg ha<sup>-1</sup>), a dose de potássio foi dividida em duas parcelas iguais: uma na semeadura e uma em cobertura (totalizando 20 kg ha<sup>-1</sup>).

A coleta das folhas para a leitura do espectro e posteriormente análise de prolina foi realizada aos 60 DAP. Para a análise de prolina, após a leitura do espectrorradiômetro, as amostras foram conduzidas ao laboratório para serem liofilizadas. As amostras liofilizadas foram trituradas e, a partir deste material, foi preparado um extrato para realização da leitura de prolina livre. Para a elaboração do extrato foi seguida a metodologia de Cataldo *et al.* (1975), em que foi utilizado 200 mg do material do material vegetal e 10 mL de água deionizada, inseridos em um tubo de ensaio e mantido em banho-maria a 45°C durante 1 hora, com agitações realizadas a cada 15 minutos. Por fim, o extrato foi filtrado e armazenado em um freezer.

Os teores de prolina livre foram determinados de acordo com o método descrito por Bates *et al.* (1973). Em uma alíquota de 1,0 mL do extrato diluído, foi adicionado 1 mL de ninhidrina ácida (1,25 g de nihindrina, dissolvida em 30 mL de ácido acético glacial e 20 mL de ácido fosfórico a 6 M e 1,0 mL de ácido acético glacial). Após a adição de nihindrina ácida, os tubos foram fechados, agitados vigorosamente em agitador e colocados em banho-

maria por 1 h a 100°C. Em seguida, a reação foi interrompida resfriando os tubos de ensaios em banho de gelo. Por fim, foi adicionado 2 mL de tolueno nos tubos de ensaio e os mesmos foram novamente agitados. Após agitação vigorosa da solução, a fase superior menos densa foi aspirada com o auxílio de uma pipeta Pasteur e submetida à leitura de absorbância de 520 nm, sendo o tolueno utilizado como branco. A concentração de prolina livre foi estimada com base em uma curva padrão, ajustada a partir de concentrações crescentes de prolina, sendo expressos em  $\mu\text{mol.g}^{-1}$  de matéria seca (M.S.).

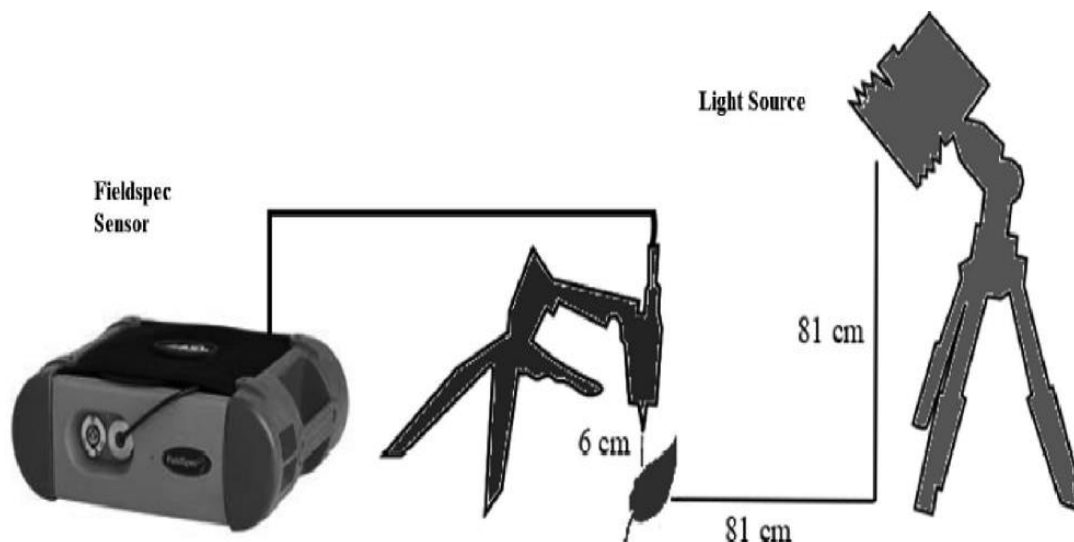
Para a realização da leitura no espectrorradiômetro, as folhas do milho foram levadas ao laboratório (*dark-room*) para serem realizadas as leituras. O horário de coleta foi entre 08:00 e 10:00 horas da manhã, com o intuito de produzir o menor estresse possível às plantas. Seguindo a metodologia aplicada por Oliveira *et al.* (2020), as paredes do laboratório foram cobertas por revestimentos pretos com o intuito de bloquear a passagem de qualquer outra fonte de luz que incida sobre as amostras além da lâmpada halógena durante as leituras.

O espectrorradiômetro utilizado foi o FieldSpec Pro FR 3® (*Analytical Spectral Devices Inc.*), cuja faixa de operação se entende entre as bandas 350 e 2500 nm, com resolução espectral de 3 nm nas faixas do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) e 10 nm na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR I e II), reamostrados para 1 nm. Foi utilizada uma placa Spectralon branca de alta reflectância como padrão de referência máxima, sendo a proporção entre a energia refletida e esta referência, o valor de sua reflectância.

Para a realização das leituras, foi seguida a metodologia padronizada por Moreira, Teixeira e Galvão (2014). Os equipamentos foram distribuídos em uma bancada escura, onde a lâmpada halógena com feixe colimado ao plano visado foi posicionada a uma distância de 81 cm, formando um ângulo zenital de 45° de incidência sobre a folha. A folha, por sua vez, foi posicionada a 6 cm do sensor FieldSpec (Figura 20).

Foram realizadas três leituras no limbo adaxial da folha do milho, para obtenção dos valores de Números Digitais (ND) de cada folha. Em seguida, tais valores foram convertidos para fatores de reflectância através do software ViewSpec Pro® versão 6.2.0 (*ADS Inc.*) e, então, realizada a média aritmética das três leituras ao longo do mesmo tecido foliar. Apesar das leituras espectrais terem sido realizadas em mais tecidos, ao final obteve-se o pareamento de 24 amostras de prolina e dados hiperespectrais úteis na investigação.

Figura 20 – Esquematização da leitura do fator de reflectância.



Fonte: Oliveira *et al.* (2020).

Para a avaliação dos dados físicos e bioquímicos correspondentes, os fatores de reflectância foram submetidos à técnica de suavização de dados, com o intuito de otimizar a relação sinal/ruído, majoritariamente observado nas extremidades do espectro (50 a 400 nm e 2450 a 2500 nm). A janela de suavização foi de cinco comprimentos de onda consecutivos e foi calculado por meio da média móvel central.

A análise estatística multivariada, consistiu na aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP), que tem por finalidade básica reduzir a dimensionalidade dos dados, pela detecção de entidades – os componentes principais – que representam a estrutura dos dados originais sem perda de informação (ROCHA NETO *et al.*, 2017; VARELLA, 2008). Para tanto, foi empregado o software SPSS® v.13, licenciado pela Universidade Federal do Ceará, onde os componentes principais (CP) foram produzidos e apresentados em gráficos de declive (scree plot) da respectiva variância explicada. Além disto, as cargas dos componentes foram inspecionadas para quantificar a contribuição de cada faixa do espectro em padrões de oscilação.

Técnicas matemáticas também foram aplicadas na análise derivativa de primeira ordem. Para isso, fez necessário valer-se da técnica de aproximação por diferença simétrica ou, ainda, aproximação finita (OLIVEIRA, 2020). Um dos benefícios de se aplicar esta técnica é por se tratar de um método de fácil execução computacional (ENNES, 2008). A primeira derivada de uma curva espectral (RUDORFF, 2006) é obtida pela equação 1, a seguir:

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_n \approx \frac{\rho(\lambda_{n+1}) - \rho(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda}$$

(Eq. 1)

Onde:  $\Delta\lambda$  representa a separação entre bandas adjacentes;  
 $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$ , para  $\lambda_j > \lambda_i$ , com o intervalo entre as bandas constante;  
 $\rho(\lambda_n)$  representa o valor do espectro na faixa de comprimento de onda  $\lambda_n$ .

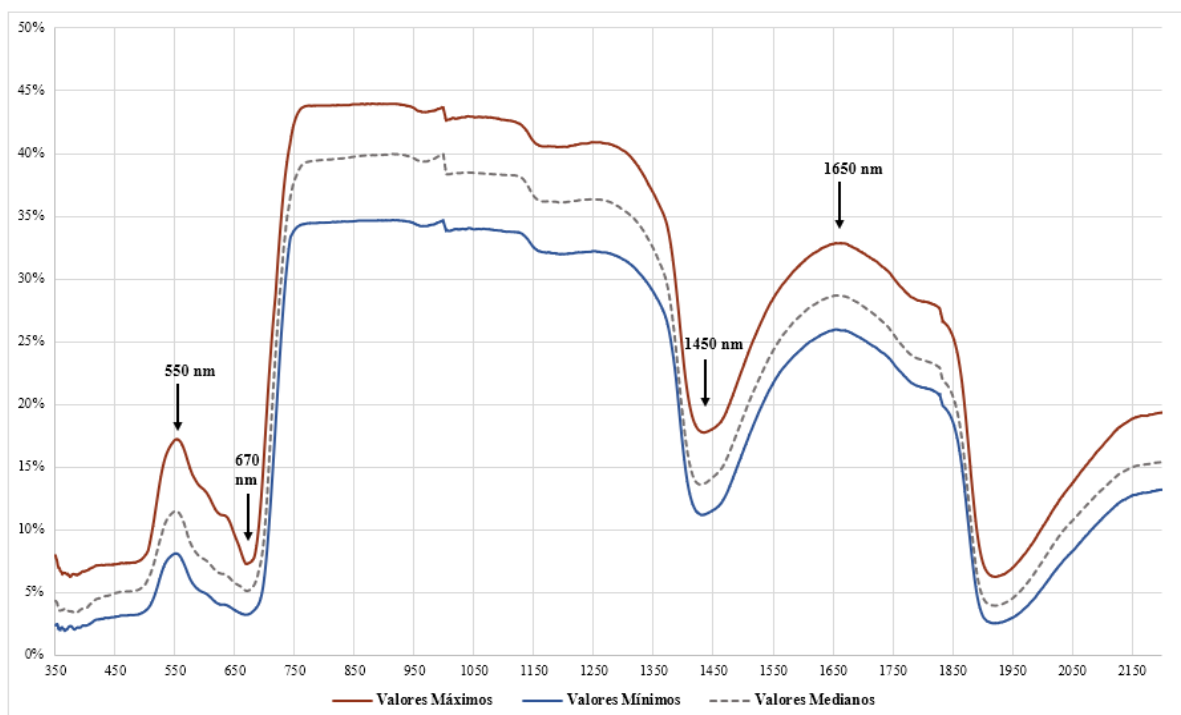
Conforme Jensen (2011), geralmente derivadas de ordens superiores são relativamente insensíveis às variações de intensidade de iluminação, se tornando meramente oscilações matemáticas e sem representatividade física. Assim, análises derivativas de 1ª ordem ainda são consistentes para análises hiperespectrais, uma vez que captam a taxa de variação de reflectância do alvo entre comprimentos de onda vizinhos (BARBOSA, 2005).

### 5.3 Resultados e Discussão

A seguir são apresentados os fatores de reflectância observados em laboratório e padronizados ao longo de todas as 24 leituras. Mesmo diante de uma restrita parcela analisada espectralmente, foi possível perceber nuances entre os diferentes tratamentos fornecidos às plantas. Estas oscilações foram mais proeminentes na região do espectro visível (VIS), em função das diferentes tonalidades apresentadas nos tecidos das plantas. A amplitude entre todos os fatores de reflectância para cada comprimentos de onda é apresentado na Figura 21, ao indicar o padrão comportamental que as folhas de milho manifestaram em todos os tratamentos. Cabe salientar que tais valores são dados pontuais e não representam dados de um único indivíduo.

É possível observar na Figura 21 que determinados porções do espectro eletromagnético mostraram-se mais suscetíveis às variações dos tratamentos, como por exemplo entre 500 nm e 700 nm ou entre 1600 nm e 1850 nm. Nestas regiões, as variações máximas foram evidentes não apenas pela reprodução do comportamento mínimo com maior intensidade, mas também pelo incremento nos comprimentos de onda imediatamente adjacentes. Este fato modificou a feição máxima possível dos picos e vales, tornando-os mais agudos aos 550 nm, 670 nm, 1400nm e 1650 nm.

Figura 21 – Fatores de reflectância máximos, medianos e mínimos para cada comprimento de onda estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

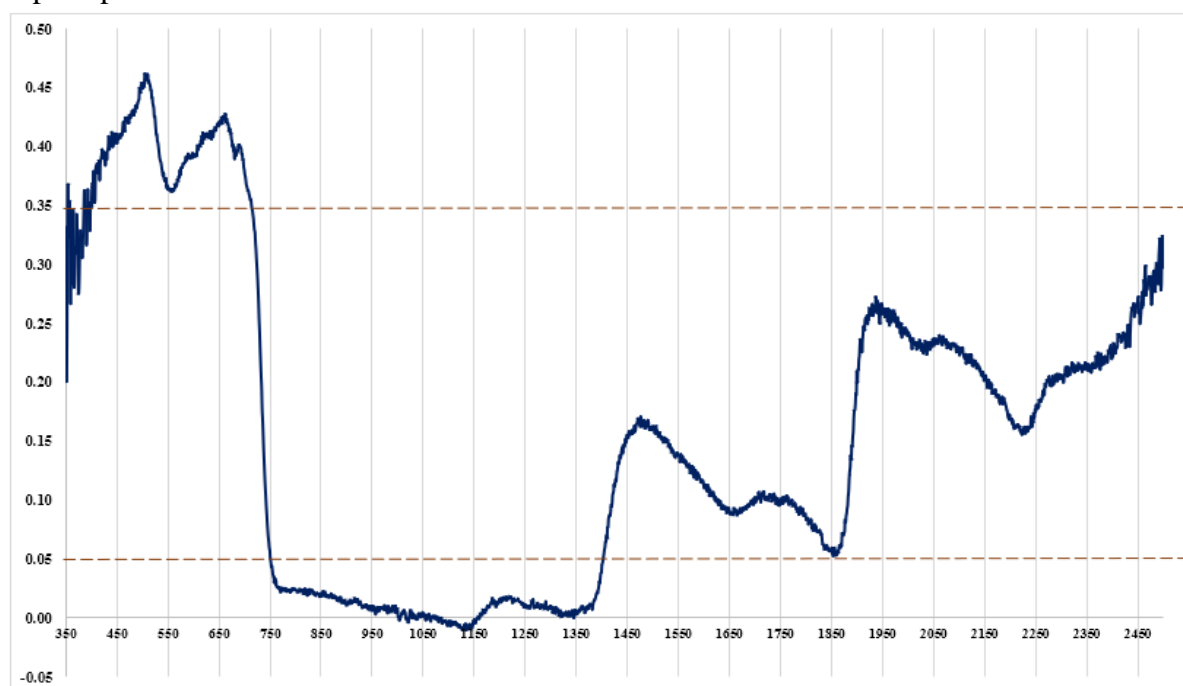
No que se refere ao estudo dos fatores de reflectância investigados em cada tecido foliar, reitera-se que alguns comprimentos de ondas mantêm estreita correlação com os pigmentos fotossintetizantes no interior das células (GITELSON e MERZYLYAK, 1996). Nas faixas visíveis (400-700 nm), a absorção de luz pelos pigmentos foliares domina o espectro de reflectância da folha, fato que leva a uma reflectância geralmente reduzida. Na região do visível (VIS), a vegetação tipicamente apresenta maior absorção quando comparada ao Infravermelho próximo (NIR), sendo o comprimento de onda 550 nm (verde) com os fatores de reflectância mais proeminentes nesta faixa (NOVO, 2008). Neste estudo, todas as amostras registraram fatores de reflectância máximos em torno de 15 % de energia refletida. Contudo, variações nas tonalidades das folhas resultam em diferentes níveis de esverdeamento das plantas (ROSA, 2009), onde folhas cloróticas foram observadas pela maior intensidade de fatores na faixa correspondente ao amarelo/laranja, provavelmente em função do maior acúmulo de  $\beta$ -carotenos, conforme descrevem (DAUGHTRY *et al.*, 2000). Tecidos foliares cloróticos são resultado de desordens metabólicas que promovem a degradação natural de seus pigmentos ativos (CILIA *et al.*, 2014).

Esta primeira zona (350 a 750 nm) foi especialmente útil no entendimento da estrutura dos dados espectrais com a análise de correlação de Pearson (Figura 22). O



correlograma sugere que cada comprimento de onda possui três extratos de associação com a concentração de prolina nas folhas de milho, sendo de 350 nm a 2500 nm predominantemente positivo. Isto sugere que o incremento nos teores de prolina foliares estão registrados juntamente com o aumento na intensidade dos fatores de reflectância nesta cultura. No entanto, não se pode inferir que, no geral, tal implicância é verdadeira. As correlações positivas são expressivas na região visível (pico aos 490 e 670 nm), e na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR) (com pico aos 1450 e 1950 nm). É importante salientar que estas duas variáveis são indiferentes na região do infravermelho próximo (NIR), chegando a atingir correlações fracamente negativas aos 1100 nm.

Figura 22 – Correlograma das concentrações de prolina e comprimentos de onda hiperespectrais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

No VIS, existem duas bandas principais de absorção: *i*) no azul (490 nm); e *ii*) no vermelho (670 nm), devido à absorção dos dois principais pigmentos foliares: Clorofila a e b, Clorofila total e Carotenóides (TAIZ & ZEIGER, 2009) e que representam 65% do total de pigmentos foliares (MOSS & LOOMIS, 1952). Estas zonas são essenciais para o desenvolvimento das plantas, pois são responsáveis pela captura da energia solar utilizada na fotossíntese. Gitelson *et al.* (2003) descrevem a *Cl-a* como mantenedora das funções bioquímicas, enquanto a *Cl-b* funciona apenas como um pigmento de coleta de luz, transferindo sua energia para *Cl-a*. Especificamente, Christiensen (2004) enfatiza alguns

pontos importantes de absorção da Clorofila-*a* aos 435, 670 e 740 nm, e para a Clorofila-*b*, nos comprimentos de 480 e 650 nm.

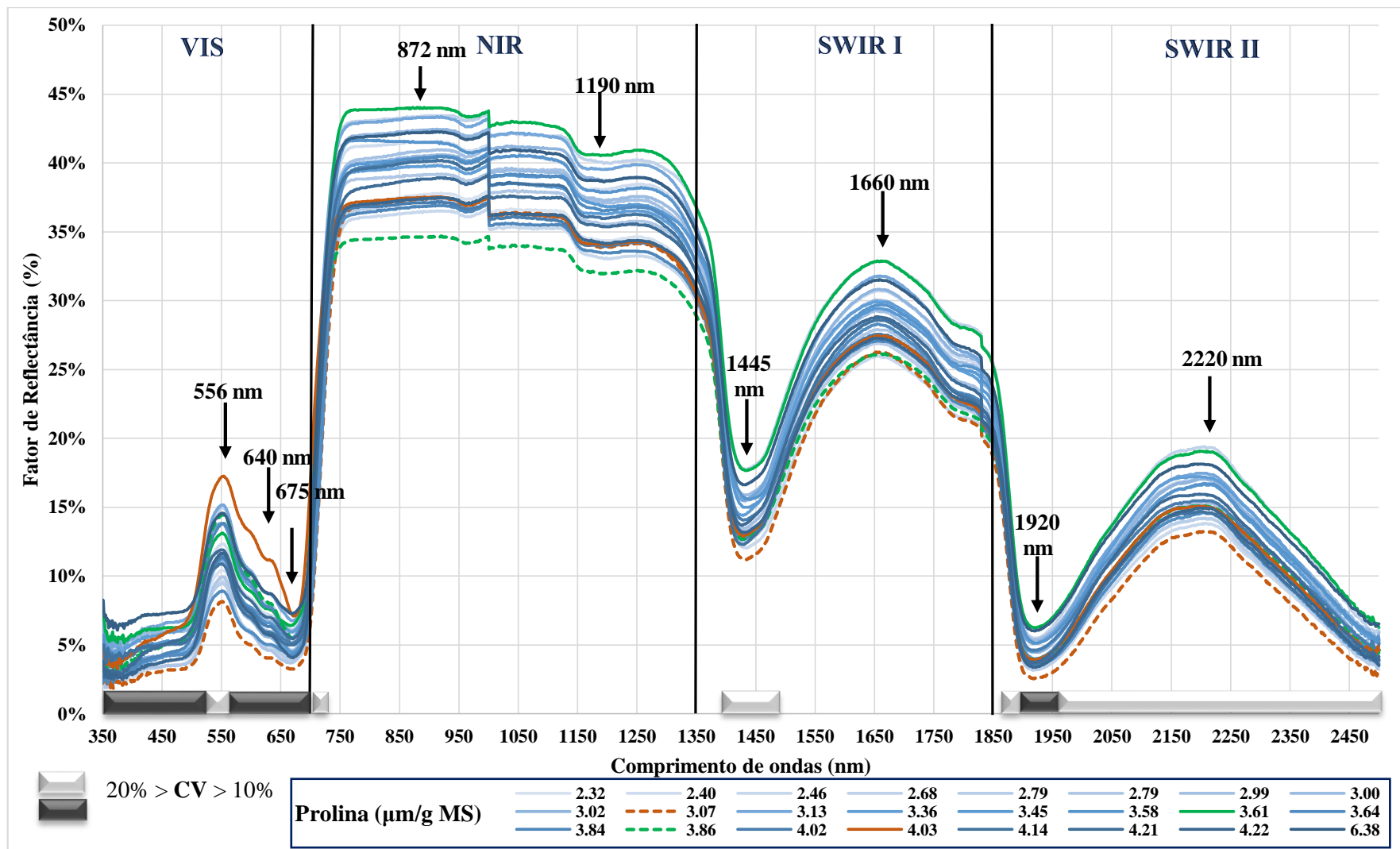
Outras regiões do espectro tipicamente referido como vales de absorção foram registradas como correlações intermediárias em relação aos demais comprimentos de onda e dizem respeito à umidade foliar que cada folha apresenta. Especificamente, a faixa espectral situada entre os comprimentos de 1440 a 2500 nm, caracteriza-se mais fortemente pela absorção de luz pela presença de água (NOVO, 2010) no tecido e na atmosfera, portanto a caracterização deste intervalo só foi possível graças ao ambiente adequadamente preparado (*dark-room*) (CAMPELO, 2018), caso contrário, medidas em campo perderiam totalmente esta informação relevante. Em função de a água absorver fortemente a radiação nas faixas próximas a 1450 e 1950 nm (JENSEN, 2011), foi possível observar que ambas as os vales estão mais associados com as variações nos teores de prolina que os demais comprimentos de onda do SWIR I e II.

Na faixa espectral do infravermelho próximo (NIR) que corresponde ao intervalo de 700 a 1000 nm, a estrutura do mesófilo foliar explica suas propriedades ópticas. Este intervalo, inicialmente indiferente à concentração de prolina nos tecidos, tem a característica de não ser influenciado pelos pigmentos da folhas e ou concentração de umidade. O nível desse platô depende da quantidade de espaços intercelulares no mesófilo esponjoso preenchidos com ar ou água (HEEGE *et al.*, 2008). Assim, a reflectância foliar relativa aumenta para formas e conteúdos celulares com maior número de camadas de células do parênquima, menor número de espaços intercelulares ou em maiores tamanhos de células (CHRISTIASSEN, 2004).

O coeficiente de variação calculado para cada comprimento de onda ao longo das 24 amostras, indicou que existem regiões do espectro mais suscetíveis a maiores variações, porque a natureza do cálculo considera o desvio padrão e a média dos valores. Ao se analisar a Figura 21, espera-se que zonas onde haja maiores amplitudes de fatores de reflectância haja maiores coeficientes de variação, uma vez que o desvio padrão é superior. Logo, regiões tipicamente homogêneas são, por consequência, menos conclusivas na investigação de níveis bioquímicos nas folhas.

Na Figura 23, é possível identificar as porções do espectro com maiores coeficientes de variação, sendo classificado em dois níveis: i) zonas com coeficientes de variação entre 10% e 20%; e ii) zonas com coeficientes de variação superiores a 20%. As demais regiões apresentaram coeficientes de variação entre 6 e 10%.

Figura 23 - Caracterização espectral suavizado média das folhas avaliadas, segundo as concentrações de prolina (N=24).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Verificou-se que as zonas próximas à 556 nm e 675 nm, apresentaram-se com CV sutilmente inferior ao limiar de 20%, sugerindo que, à exceção da baixa relação sinal/ruído nos 50 nm iniciais, todo o espectro visível é teoricamente decisivo nas oscilações metabólicas produzidas pelos tratamentos. Contudo, cabe ressaltar que em valores mais elevados de reflectância, a média em um dado comprimento de onda é mais elevada e, portanto, a proporção do desvio padrão é pouco influente no cálculo, tornando os coeficiente de variação menores em patamares de reflectância que em zonas absortivas.

Em todos os tratamentos observou-se um pico de reflectância no verde entre 550 nm e 560 nm, um suave ponto de inflexão em torno de 630 nm, uma acentuada absorção na região do vermelho (670 nm), a brusca elevação entre 700 e 730 nm, denominada borda vermelha (red-edge) e um pico de reflectância no infravermelho próximo (aos 872 nm) que progride a um platô de máxima reflectância (40%-45%) entre 760 e 1290 nm.

Ainda na Figura 23, é possível observar que as concentrações de prolina em todos os tratamentos não desenvolveram padrões claros de evolução. A coloração de tais curvas seguiu de um tom mais claro ao mais escuro em função da prolina ( $\mu\text{m/g MS}$ ) determinada em laboratório. Entretanto, observou-se que os indivíduos que empreenderam menores e maiores fatores de reflectância não são os de concentrações extremas de prolina. Adversamente, concentrações moderadas (3,07  $\mu\text{m/g MS}$ ) apresentaram os menores fatores de reflectância ao longo de todo o espectro VIS e SWIR I e II.

A clorose evidenciada pela maior reflectância aos 630 nm também foi um destaque para o espectro visível em todas as plantas, indicando a predominância de desordens metabólicas na maioria dos indivíduos. Outro ponto a ser abordado na região VIS é que os máximos fatores de reflectância foram medidos na amostras de 4,03  $\mu\text{m/g MS}$ . Reconhecendo-se que durante todas as leituras, a geometria de aquisição (Figura 20) permaneceu constante, é possível admitir uma maior cerosidade deste tecido, uma vez que a variável brilho (OLIVEIRA *et al.*, 2020) foi preponderante em outros indivíduos. Tal adaptação é razoável quando se verifica que este comportamento se dá sob o tratamento de seca severa sem suplementação (MSEC\_SS). Portanto, a estratégia fisiológica em se refletir radiação pelo acúmulo de cerosidade na cutina é uma estratégia foliar útil frente ao agente estressor hídrico.

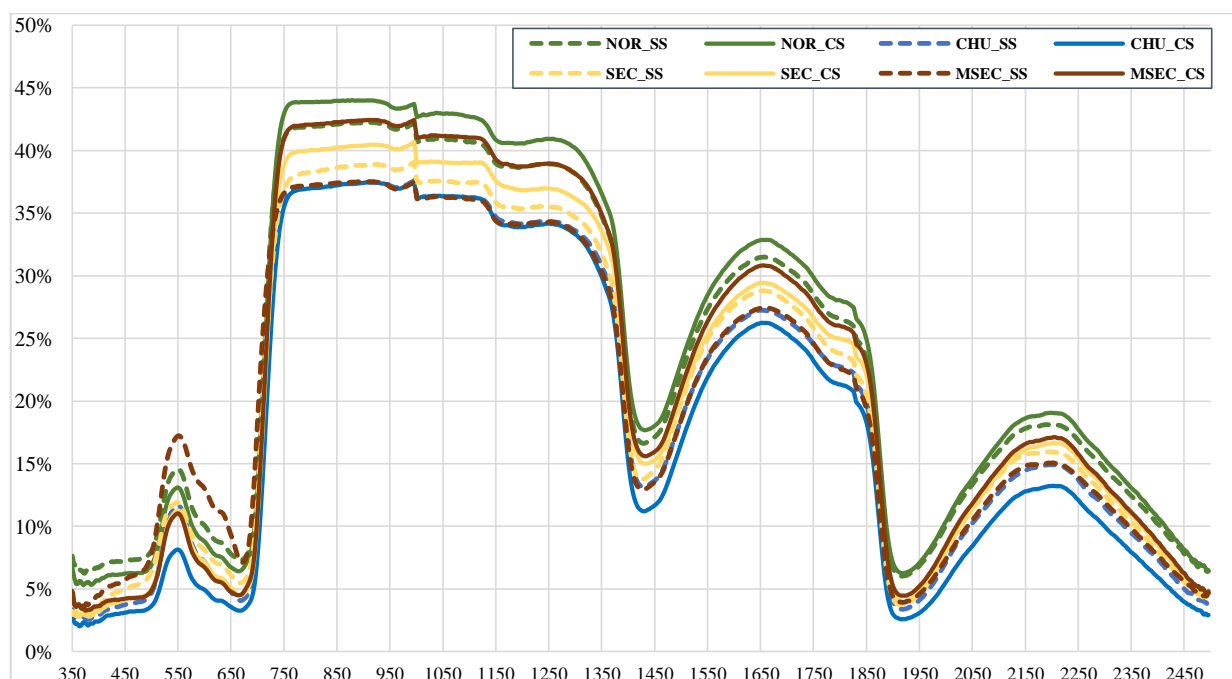
O estresse hídrico também mostrou-se mais impactante que a salinidade na região do infravermelho (NIR e SWIR), onde os padrões espectrais sugerem que o mesófilo foliar sofreu alterações estruturais, indicando um mesófilo esponjoso com mais espaços

intercelulares no indivíduo com  $3,86 \mu\text{m}$  de prolina. $\text{g}^{-1}$  MS, também sob o tratamento de seca severa sem suplementação (MSEC\_SS). Comportamento contrário foi observado no tratamento normal com suplementação (NOR\_CS) que apresentou padrões espectrais típicos de uma estrutura paliçádica e esponjosa mais firmemente preenchida (MIPHOKASAP *et al.*, 2012), desencadeando maior aptidão em refletir energia incidente. Importante destacar que a concentração de prolina foi, de fato, indiferente, haja vista que as concentrações deste soluto foram levemente inferiores ( $3,61 \mu\text{m/g}$  MS).

Comportamento interessante foi observado na região do SWIR I e II, onde os mesmos indivíduos de destaque no VIS e no NIR se apresentaram como os de maiores e menores absorções, respectivamente. Esta zona é especialmente importante porque também é referenciada na literatura internacional como forte indicadora de elementos complexos nos vegetais, como proteínas (CURRAN, 1989), carboidratos (CAO *et al.*, 2015) e constituintes da parede celular (ASD, 2010).

A Figura 24 apresenta distinções claras entre os tratamentos nas três regiões do espectro estudadas. Como observado individualmente, o tratamento MSEC\_SS demonstrou maior brilho na região visível que os demais tratamentos, isto elevou todos os fatores de reflectância proporcionalmente. Após os 710 nm, observa-se a estreita relação que os tratamentos opostos chuvoso sem suplementação (CHU\_SS) e seca severa sem suplementação (MSEC\_SS) apresentaram.

Figura 24 – Comportamento espectral suavizado médio por tratamentos nas folhas de milho.

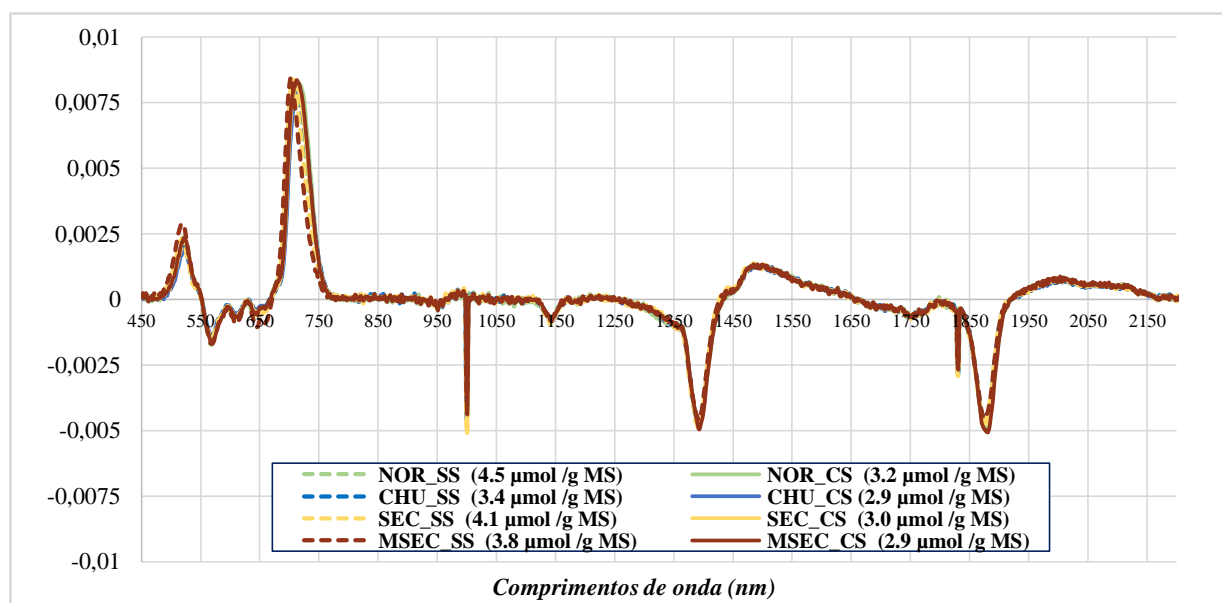


Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).

Entendendo-se que o tratamento de referência é o normal sem suplementação (NOR\_SS), percebe-se que, à exceção do MSEC\_SS, todos os demais tratamentos foram afetados negativamente pelos dois agentes estressores (estresse hídrico e salino). O tratamento chuvoso com suplementação (CHU\_CS) foi o que apresentou os menores fatores de reflectância entre as condições experimentais, sendo inclusive inferior à ausência de irrigação com água salobra. A maior disponibilidade hídrica ou comportamentos de intensa absorção em toda a faixa que se estende desde 350 a 2500 nm. O tratamento normal com suplementação (NOR\_CS) implicou em um menor brilho na zona visível, com os vales de absorção em 480 nm e 670 nm mais agudos que a condição normal sem suplementação (NOR\_SS). Sob a mesma perspectiva, o tratamento MSEC\_CS apresentou-se menos esverdeada (556 nm), com configuração de espaços intercelulares pouco alterada, e com menos conteúdo de água e elementos complexos nos tecidos (ROSA, 2009).

Independente de qual estresse foi preponderante, entre as quatro parcelas foi notória a representação de três níveis de reflectância, nesta ordem decrescente: normal (NOR), seca (SEC) e chuvoso (CHU), sendo a parcela seca severa (MSEC) com padrões espectrais bastante similares aos dois casos supracitados (CHU\_SS e NOR\_SS). Tal comportamento aponta que o efeito do estresse hídrico causado pelos veranicos é mais pronunciado que o estresse salino associado à irrigação suplementar com água salobra. Na análise derivativa de primeira ordem (Figura 25), foi possível detectar os pontos de maior mudança entre os fatores de reflectância de comprimentos de onda consecutivos.

Figura 25 – Análise derivativa de primeira ordem por tratamento em folhas de milho.

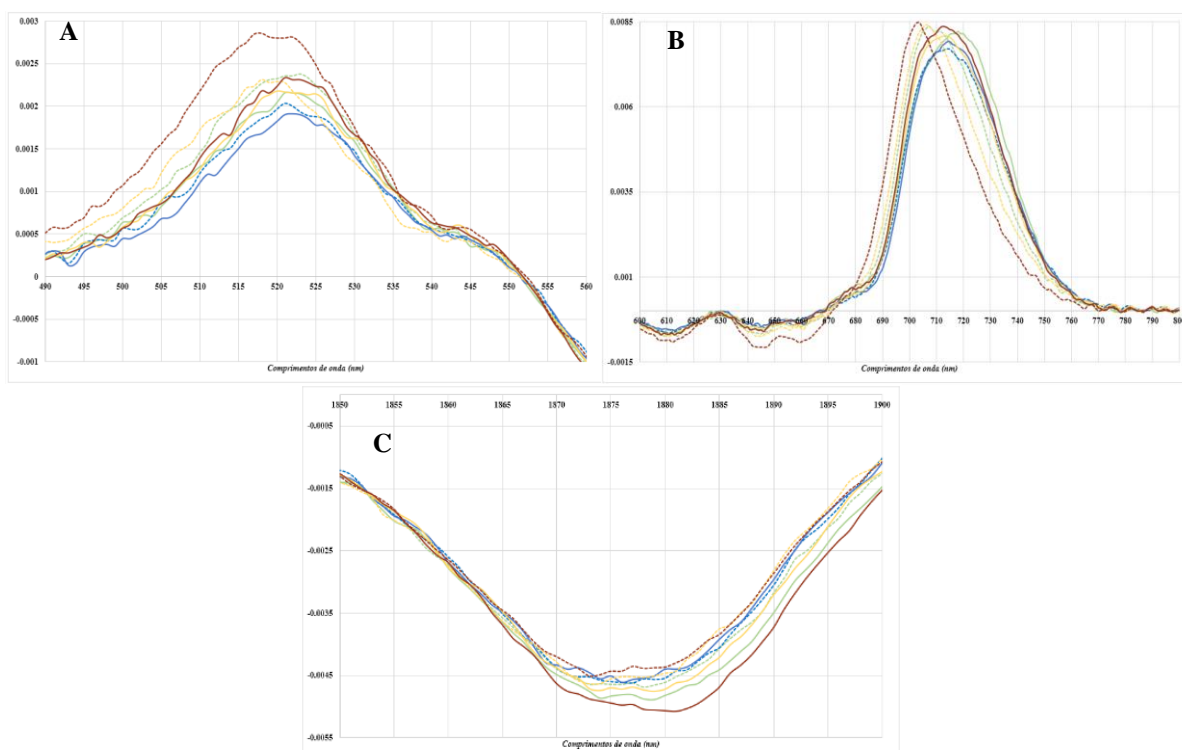


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Todos os tratamentos registraram variações locais típicas do espectro de vegetação. Nas proximidades de 490 nm houve um pico de baixa intensidade e elevação a partir deste comprimento na respectiva curva de reflectância (Figura 24), sendo seguido pelo cruzamento do eixo aos 550 nm e um vale indicando o início da estabilização na região do amarelo/laranja visível (620 nm e 640 nm) (JENSEN, 2011).

Para elucidar tais correlações, as concentrações médias de prolina por tratamento também foram apresentadas e exigiram uma análise específica nos comprimentos de onda de 550 nm, 710 nm e 1900 nm, haja vista serem os pontos-chave de heterogeneidade ao longo de todo o espectro. A Figura 27 identifica mais claramente as variações em função do estresse sofrido nos intervalos entre 490 e 560 nm (VIS), entre 600 e 800 nm (VNIR) e entre 1800 e 1950 nm (SWIR II).

Figura 26 – Detalhe da análise derivativa de primeira ordem por tratamentos. A) Visível. B) NIR. C) SWIR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nas três porções do espectro em que os oito tratamentos foram mais heterogêneos, observou-se na análise derivativa um comportamento anômalo na parcela seca severa. As subparcelas seca severa sem suplementação (MSEC\_SS) foram mais pronunciadas no visível e no infravermelho próximo, enquanto as subparcelas seca severa com suplementação

(MSEC\_CS) foram destaque no infravermelho de ondas curtas. As inferências que podem ser feitas acerca destes resultados são que o vale de absorção no azul (480 nm) não se mostrou tão profundo quanto os demais tratamentos, assegurando uma elevação menos abrupta (Figura 24) e sugerindo ineficiências na habilidade fotossintética destes indivíduos. O pigmento azul, também conhecido como xantofila, faz parte do grupo dos carotenoides e é derivado de cadeias de polieno com 40 carbonos (CUNNINGHAM & GANTT, 1998). As xantofilas atuam principalmente na fotoproteção, isto é, como supressor de luz, absorvendo o excesso de energia das moléculas de clorofila e dissipando-a na forma de calor (BAROLI & NIYOGLI 2000). Na ausência de uma adequada função, as plantas precisam de outra forma de dissipar o calor e evitar mais desidratação.

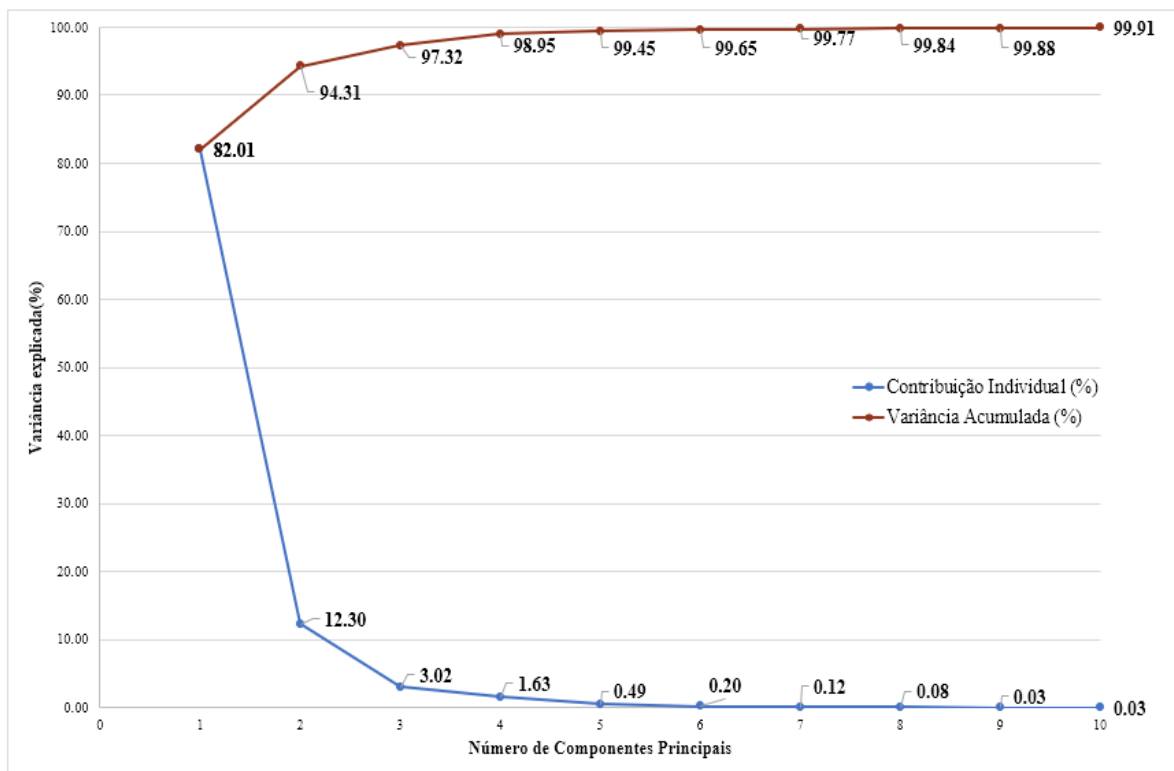
Os tratamentos (MSEC\_SS) e o SEC\_SS apresentaram a região de transição entre o vermelho visível e o infravermelho próximo em comprimentos de onda menores que os demais tratamentos, deslocando o platô do NIR levemente para a esquerda. Resultados semelhantes foram encontrados por Inoue *et al.* (2016) ao averiguar, com a primeira derivada, as variações do espectro em relação ao crescente conteúdo de clorofila na cultura do arroz.

As parcelas normal, seca e seca severa se destacaram na região típica de umidade foliar quando os tratamentos com suplementação (MSEC\_CS, SEC\_CS e NOR\_CS) atingiram os valores mais baixos que as demais curvas de 1ª ordem. Esta transição corresponde ao intervalo de queda entre 1850 e 1870 nm (Figura 24) que antecede o vale aos 1900 nm (GIRARD & GIRARD, 2003) e sugere que a irrigação com água salobra desenvolveu quedas mais abruptas que nos tratamentos que não foram expostos à salinidade.

Em relação às análises de fatores de reflectâncias brutos, foi possível verificar a construção de Componentes Principais (CPs). Estas supervariáveis englobam características das variáveis originais, mas mantêm a representatividade do seu comportamento (YANG *et al.*, 2016). A Figura 27 apresenta habilidade de cada CP ao expressar a estrutura dos dados espectrais nos tratamentos admitidos. Claramente, é identificada a superioridade (82,0%) da primeira componente ao ser representativo dos 2151 comprimentos de onda avaliados, sendo complementada pela segunda CP e já sendo capaz de explicar 94,31% da variância dos dados.



Figura 27 – Análise de Componentes Principais para os tratamentos em milho (N=24).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A redução da grande dimensionalidade destes dados espectrais pode auxiliar no entendimento de zonas elementares na análise espectral de prolina nas folhas. Admitindo pouquíssima perda estatística de informação, de acordo com seus autovalores (*eigenvalues*), as oscilações nos tecidos vegetais podem ser razoavelmente explicadas em apenas 2 ou 3 das primeiras componentes principais LIU *et al.* (2017), ao invés de um grande conjunto de dados. A Tabela 8, a seguir, discrimina os vinte comprimentos de onda mais influentes na construção dos dois primeiros componentes.

Tabela 8 – Discriminação dos comprimentos de onda em cada Componente.

Nomes das Componentes Principais	Comprimentos de onda (nm)
1ª CP – Parede Celular	1730, 1736, 1745, 1749, 1750, 1751, 1752, 1753, 1755, 1756, 1757, 1758, 1759, 1760, 1761, 1762, 1763, 1764, 1766, 1770.
2ª CP – Clorofila total	586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Foram observadas as cargas (*loadings*) de todas as variáveis originais e percebeu-se a contribuição de cada uma destas na aglomeração dos componentes. Assim, a hierarquia das vinte cargas mais proeminentes apontou dois setores importantes no espectro eletromagnético da vegetação. O primeiro deles, e de maior poder explicativo, foi denominado “Parede celular” em virtude de esta ser a componente que agrega comprimentos de onda historicamente acerca de elemento facilmente associáveis entre si, como é o caso da lignina, celulose e matéria seca (JENSEN, 2011). As feições de absorção localizadas nas proximidades de 1700 nm são retratadas por Jensen (2011) e Curran (1989) como comprimentos associadas à deposição de lignina, e neste contexto, os estudos da fisiologia celular de Niinemets *et al.* (2005) suportam a teoria de que o estresse hídrico nas plantas desencadeia o espessamento e a lignificação da parede celular, tornando-a mais rígida e reduzindo a perda de água para a atmosfera (STRABELI, 2016). Trabalhos como os de Tolbert *et al.* (2014) apontam a lignina como um tipo de polifenol associada a celulose na parede celular, útil na constituição de mais matéria seca dos tecidos foliares. Outras regiões do espectro também foram citadas por manifestarem a maior deposição de lignina e celulose nas paredes celulares aos 1120 nm, 1200 nm, 1450 nm, 1690 nm (ASD, 2010) e 1940 nm (RIVARD & SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2011) ou em estudos mais recentes em torno de 1510 nm (DECHANT *et al.*, 2017) e 1260 nm (OLIVEIRA, 2019).

O segundo componente denominado “Clorofila total” faz referência aos comprimentos de onda especificamente citados como regiões típicas de absorção de radiação solar no processo de fotossíntese, pelas ações das clorofilas *a* e *b*. Este intervalo entre 586 e 705 consiste em um excelente indicador de performance fisiológica (CILIA *et al.*, 2014), uma vez que quanto mais profundo é este vale (Figura 24), mais intensa é a atividade fotossintética da planta (PONZONI *et al.*, 2012). Há de se ressaltar que este componente denota variações espectrais bastante comuns (CHRISTENSEN, 2004) entre diferentes tipos de agente estressores (nutricional, hídrico, salinidade, patológico, entre outros.). Assim, os dados hiperespectrais têm sido continuamente empregados na detecção de um efeito característico destes agentes (CORTI *et al.*, 2017). Exemplos clássicos foram os de Al-Abbas *et al.* (1974) e Masoni *et al.* (1996) ao estudarem comprimentos de onda próximos aos desta segunda componente principal e concluíram que todos os estresses ministrados reduziram as concentrações de clorofila nas folhas, aumentaram a reflexão e a transmissão, e diminuíram a absorvância dos tecidos.

Em contraste ao NIR, onde menores oscilações foram observadas nas faixas correspondentes à estrutura do mesófilo (730-1300 nm) (LIU, 2015), estas duas zonas se

mostraram ser fundamentais nas análises espectrais sob diferentes lâminas de irrigação e os efeitos da salinidade.

#### **5.4 Conclusões**

Conclui-se que as concentrações de prolina foram fracamente correlacionadas aos comprimentos de onda estudados, sendo as maiores na faixa do visível. Além disso, a partir das respostas espectrais observou-se que o estresse hídrico associado aos veranicos foi mais marcante que o estresse salino, demonstrando que a utilização de água salobra de  $4,5 \text{ dS m}^{-1}$  pode ser benéfica para a cultura do milho. A derivada de primeira ordem permitiu a visualização mais detalhada dos tratamentos e ao final a ACP apontou dois constructos que generalizam comprimentos de onda da região do vermelho visível e da caracterização de constituintes das paredes celulares.

Este estudo instiga novos trabalhos orientados a estas regiões mais sensíveis do espectro que acelerem a detecção e, até mesmo, a estimativa de determinados elementos no interior das células.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente estudo indicaram que a suplementação com água salobra ( $CEa = 4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) incrementou a produtividade comercial de espigas de milho verde durante dois ciclos de cultivo, potencializando a produtividade do milho no cultivo de sequeiro. Verificou-se ainda que parte dos prejuízos dos pequenos agricultores e os gastos governamentais podem ser reduzidos pelo uso da irrigação suplementar com águas salobras disponíveis na região. Os dados da pesquisa, incluindo as análises das respostas fisiológicas foliares, indicam que os efeitos benéficos da irrigação suplementar podem ser observados mesmos em veranicos que ocorrem em anos com média pluviométrica normal. Isso é importante, visto que a seca representa um fenômeno natural de regiões semiáridas, havendo possibilidade desse problema se agravar face às mudanças climáticas globais.

Apesar dos resultados promissores obtidos com irrigação suplementar, sabe-se que uma estratégia isolada não será suficiente para resolver os problemas dos agricultores no semiárido. Então, uma ação que inclua a irrigação suplementar com fontes alternativas de água no contexto da agricultura cearense deve levar em conta outras estratégias, muitas delas já em uso, de modo a fortalecer as políticas públicas desenvolvidas na administração estadual. Dentre estas outras estratégias podemos citar a captação de água “in situ”, captação de água de chuva, sistemas de cultivos consorciados, rotação de culturas, dentre outras. A criação de peixes com águas salobras, com destaque para a tilápia, já é algo que vem sendo testado por produtores no Estado, podendo ser incluída em sistema de produção integrado.

Um percentual relativamente alto dos poços do Estado do Ceará (cerca de 50%) possui águas salobras. Os poços com águas salobras estão presentes em grande parte dos municípios do Estado, e se localizam principalmente em áreas de cristalino (mais de 60% dos poços do cristalino), onde as vazões são relativamente mais baixas. Entretanto, águas salobras são também encontradas em cerca de 10% dos poços em áreas sedimentares e em 30% dos poços em aluviões. Diante às baixas vazões da maioria desses poços, especialmente nas áreas de cristalino, há necessidade de se ampliar essa oferta hídrica, tanto pelo seu armazenamento como pela captação de água de chuva, as quais permitirão também diluir as águas com salinidade mais restritiva. Além disso, aquíferos aluvionais e as águas residuárias podem ser componentes importantes dentro do contexto da irrigação suplementar. Modelos de sistemas de produção com culturas alimentícias, plantas forrageiras, oleaginosas, dentre outras, podem ser desenvolvidos de modo a atender as especificidades locais. É importante salientar que esses sistemas deverão contemplar também a utilização de técnicas de conservação de solo e

água e a manutenção da produtividade do solo.

Para concluir, é importante enfatizar dois aspectos: o primeiro é que o trabalho ora desenvolvido foi baseado numa série histórica de dados pluviométricos da estação chuvosa, porém simulados por irrigação localizada durante a estação seca. Apesar dessa limitação, os resultados obtidos indicam que a simulação dos veranicos, realizada durante dois anos, se aproximou da realidade do semiárido cearense. As perdas de produtividade do milho foram significativas e compatíveis com os dados obtidos em anos de seca e seca severa, notadamente quase se tem aumento do número e da intensidade dos veranicos. Entretanto, ensaios de campo são requeridos ao longo dos anos para avaliar os resultados dentro de uma condição hídrica e climática mais realista. Sob condições reais muito possivelmente a demanda hídrica da cultura é menor e os impactos de uso de águas salobras são ainda menos intensos, comparando-se aos obtidos no presente estudo, visto que a condição climática da estação chuvosa é naturalmente mais amena. O segundo aspecto a ser considerado é que a oferta de água foi baseada unicamente na demanda da cultura, tendo por base a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultivo. Além da possibilidade real de que essa demanda seja menor nas condições reais da quadra chuvosa, é preciso considerar também a capacidade de armazenamento de água em diferentes tipos de solo, face as suas características e a padrão de precipitação da região. Desse modo, os impactos dos veranicos e a necessidade de irrigação suplementar podem ser melhor avaliados. Estudos dentro dessa perspectiva devem ser realizados nos próximos anos.

## REFERÊNCIAS

- ABROL, I. P.; YADAV, J. S. P.; MASSOUD, F. I. **Salt-affected soils and their management**. 1988. Disponível em: <http://www.fao.org/3/x5871e/x5871e04.htm>. Acesso em: 14 Nov 2020.
- ADEBAYO, M. A.; MENKIR, A.; BLAY, E.; GRACEN, V.; DANQUAH, E.; HEARNE, S. Genetic analysis of drought tolerance in adapted × exotic crosses of maize inbred lines under managed stress conditions. **Euphytica**, 196, 261–270, 2014. Doi: 10.1007/s10681-013-1029-5
- AL ABBAS, A. H.; BARR, R.; HALLJD, CRANE, F. L.; BAUMGARDNER, M. F. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves 1. **Agronomy Journal**, 66(1):16 20. 1974.
- ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M. **Cultivo do milho**. 2007. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/69853/1/Irrigacao-1.pdf>. Acesso em: 21 Nov. 2020.
- ALI, A. B. M.; SHUANG-EN, Y. U.; PANDA, S.; GUANG-CHENG, S. Water harvesting techniques and supplemental irrigation impact on sorghum production. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.95, n.15, p.3107-3116, 2015. Doi: 10.1002/jsfa.7047.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO: Rome, Italy. 1998.
- ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES. **FieldSpec 3 user manual**. Boulder: ASD, 2010. (ASD Document, 600540).
- ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C.; ZAMAN-ALLAH, M.; OLSEN, M. S.; CAIRNS, J. E. Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. **Trends Plant Science**, 23, 451–466, 2018. doi: 10.1016/j.tplants.2018.02.001
- ASSIS JUNIOR, J. O.; LACERDA, C. F.; SILVA, F. B.; SILVA, F. L. B.; BEZERRA, M. A.; GHEYI, H. R. Produtividade do feijão-de-corda e acúmulo de sais no solo em função da fração de lixiviação e da salinidade da água de irrigação. **Engenharia Agrícola**. v.27, n.3, p.702-713, 2007. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400013>.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade de água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.
- BARBOSA, F. S. A.; LACERDA, C. F.; GHEYI, H. R.; FARIAS, G. C.; SILVA JUNIOR, R. J. C.; LAGE, Y. A.; HERNANDEZ, F. F. F. Yield and ion content in maize irrigated with saline water in a continuous or alternating system. **Ciência Rural**, v.42, n.10, p.1731-1737, 2012.
- BAROLI, I.; NIYOGI, K. K. Molecular genetics of xanthophyll dependent photoprotection in green algae and plants, Philosophical transactions of the royal society of London Biological **Sciences**, 355(1402):1385-1394, 2000. doi:10.1098/rstb.2000.0700

BARRON, J.; ROCKSTROM, J.; GICHUKI, F.; HATIBU, N. Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in east Africa. **Agric. For. Meteorol.**, v. 117, p. 23–37. 2003.

BARROS, G. S. de C.; ALVES, L. R. A. maior eficiência econômica e técnica depende do suporte das políticas públicas. **Visão Agrícola – USP/ESALQ**, São Paulo, ano 9, n. 13, p. 4 – 7, jul./dez. 2015.

BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, J. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205-207, 1973.

BELLALOU, N.; GILLEN, A. M.; MENGISTU, A.; KEBEDE, H.; FISHER, D. K.; SMITH, J. R.; REDDY, K. N. Responses of nitrogen metabolism and seed nutrition to drought stress in soybean genotypes differing in slow-wilting phenotype. **Front. Plant Sci.** 4:498, 2013. Doi: 10.3389/fpls.2013.00498

BELTRÁN, J. M. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. **Agricultural Water Management** 40: 183-194, 1999. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00120-6).

BEZERRA, A. K. P.; LACERDA, C. F.; HERNANDEZ, F. F. F.; SILVA, F. B.; GHEYI, H. R. Rotação cultural feijão caupi/milho utilizando-se águas de salinidades diferentes. **Ciência Rural**, v.40, n.5, 2010.

BHASKARA, G. B.; YANG, T. H.; VERSLUES, P. E. Dynamic proline metabolism: importance and regulation in water limited environments. **Frontiers Plant Science**, 6:484, 2015. doi: 10.3389/fpls.2015.0048

BRAZ, R. S. **Efeitos da adubação nitrogenada na cultura do milho sob estresse salino em dois solos**. 2018. 125f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BREDA, N., HUC, R., GRANIER, A., DREYER, E. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. **Ann. For. Sci.**, v. 63, p. 625–644, 2006. doi: 10.1051/forest:2006042

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (eds.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1993.

CAIRNS, J. E.; SANCHEZ, C.; VARGAS, M.; ORDOÑEZ, R.; ARAUS, J. L. Dissecting maize productivity: Ideotypes associated with grain yield under drought stress and well-watered conditions. **Journal of Integrative Plant Biology**, 54, 1007– 1020, 2012. doi: 10.1111/j.1744-7909.2012.01156.x

CAMPELO, D. H., **Uso do sensoriamento remoto para diagnóstico nutricional na cultura do milho irrigado**. 2018. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C.; MARTINZ, D. D. G.; VASCONCELOS, L. S. V. Contribuições ao Debate Sobre as Eficiências de Pequenos e Grandes Reservatórios. **Revista**

**Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2. 2003.

CAO, Z.; WANG, Q.; ZHENG, C. Best hyperspectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. **Ecological Indicators**, v. 54, p. 96-107, 2015.

CARVALHO S.; VAN DER PUTTEN, W. H.; HOL, W. H. G. The potential of hyperspectral patterns of winter wheat to detect changes in soil microbial community composition. **Frontiers Plant Science**, v. 7, p.759, 2016. doi: 10.3389/fpls.2016.00759

CARVALHO, D. F.; FARIA, R. A.; SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Q. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do Rio Verde Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 172-176. 2000. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200007>

CATALDO, J. M.; HAROOM, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.6, p.71-80, 1975.

CATALDO, J. M.; HAROOM, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.6, p.71-80, 1975.

CAVALCANTE. L. F.; SANTOS. R. V.; HERNANDEZ. F. F. F.; GHEYI. H. R.; DIAS. T. J.; NUNES. J. C.; LIMA. G. S. Recuperação de solos afetados por sais. In: GHEYI. H. R.; DIAS. N.S.; LACERDA. C.F.; GOMES FILHO. E. (eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016, cap.28, p.461-477.

CHAUHAN, C. P. S.; SINGH, R. B.; GUPTA, S. K. Supplemental irrigation of wheat with saline water. **Agricultural Water Management**, v.95, n.3 p. 253–258, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.10.007>.

CHAVES, L. C. G; ANDRADE, E. M.; FEITOZA, R. M.; RODRIGUES, J. O.; ALEXANDRE, D. M. B. 2010. **Distribuição espacial da qualidade da água superficial para irrigação no estado do Ceará**. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/pdf/Distribuicao-espacial-qualidade-agua-superficial-irrigacao-Ceara.pdf>. Acesso em: 25 Mar. 2020.

CHEN, Z.; CUIN, T. A.; ZHOU, M.; TWOMEY, A. NAIDU, B. P.; SHABALA, S. Compatible solute accumulation and stress-mitigating effects in barley genotypes contrasting in their salt tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, p.4245–4255, 2007.

CHRISTENSEN, L. K.; BENNEDSEN, B. S.; JORGENSEN, R. N.; NIELSEN, H. Modelling nitrogen and phosphorus content at early growth stages in spring barley using hyperspectral line scanning. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 1, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.02.006>.



CILIA, C.; PANIGADA, C.; ROSSINI, M.; MERONI, M.; Busetto, L.; AMADUCCI, S.; COLOMBO, R. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6549-6565, 2014.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recurso hídricos para o semiárido. **Estudos Avançados**, n. 22, v.63, p. 61-82, 2008.

CONAB. **Conjuntura Agropecuária**. Brasília: DF, 2018. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18\\_02\\_21\\_16\\_03\\_34\\_conjuntura\\_semanal\\_de\\_milho\\_12.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18_02_21_16_03_34_conjuntura_semanal_de_milho_12.pdf). Acesso em: 26 fev. 2018.

CONAB. **Conjuntura Agropecuária**. Brasília: DF, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 26 Mar. 2020.

CONTINI, E.; GAZZONI, D.; ARAGÃO, A.; MOTA, M.; MARRA, R. **Complexo soja: caracterização e desafios tecnológicos: parte 1**. Brasília, DF, Embrapa, 2018. 35 p. (Desafios do Agronegócio Brasileiro). Nota técnica. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/0/COMPLEXO+SOJA+-+Caracteriza%C3%A7%C3%A3o+e+Desafios+Tecnol%C3%B3gicos/709e1453-e409-4ef7-374c-4743ab3bdcd6>. Acesso em: 17 nov. 2020.

CORTI, M.; GALLINA, P. M.; CAVALLI, D.; CABASSI, G. Hyperspectral imaging of spinach canopy under combined water and nitrogen stress to estimate biomass, water, and nitrogen content. **Biosystems Engineering**, v. 158, p. 38-50, 2017.

COSTA, R. N. T.; OLIVEIRA, V. R.; ARAÚJO, D. F. **Planejamento, gerenciamento e uso racional de águas em perímetros públicos de irrigação**. In: GHEYI, H. R.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. Recursos hídricos em regiões semiáridas. Cruz das Almas: INSA/UFRB, 2011. Cap. 4, p.88-110.

CPRM. **Atlas digital dos recursos hídricos subterrâneos do Estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM/Serviço Geológico do Brasil, 1988. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgi-lua.exe/sys/start.htm?sid=36&infol=588>. Acesso em: 25 Mar. 2020.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; CAL GARCIA, J. V.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, 10: 642, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>

CUNNINGHAM, J. R.; GANTTE, F. X. Genes and enzymes of carotenoid biosynthesis in plants. **Annual Review of Plant Biology**, n;49(1):557-83. 1998.

CURRAN, P.J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote sensing of environment**, 30(3), 271-278, 1989.

DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; DE COLSTOUN, E. B.; McMURTREY, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

DECHANT, B.; CUNTZ, M.; VOHLAND, M.; SCHULZ, E.; DOKTOR, D. Estimation of photosynthesis traits from leaf reflectance spectra: Co rrelation to nitrogen content as the dominant mechanism. **Remote Sensing of Environment**, v. 196, p. 279-292, 2017.

DELGADO-BAQUERIZO, M. et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. **Nature** v.502, p.672–676. 2013. Doi: <https://doi.org/10.1038/nature12670>

DIACONO, M.; RUBINO, P.; MONTEMURRO, F. Precision nitrogen management of wheat. A review. **Agronomy Sustainable Development**, v. 33, p. 219–241, 2013. doi: 10.1007/s13593-012-0111-

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; SOUSA NETO, O. N.; QUEIROZ, I. S. R. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. In: GHEYI, R. H.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016. cap.11, p.151-162.

DIN, M.; ZHENG, W.; RASHID, M.; WANG, S.; SHI, Z. Evaluating hyperspectral vegetation indices for leaf Area index estimation of *Oryza Sativa* L. at diverse phenological stages. **Frontiers Plant Science**, 8:820, 2017. doi: 10.3389/fpls.2017.00820

DUDLEY, L. M.; BEN-GAL, A.; SHANI, U. Influence of plant, soil and water properties on the leaching fraction. **Vadose Zone Journal**, v.7, p. 420-425, 2008. Doi: <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2007.0103>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **A cultura do milho-verde**. 2008. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/11921/2/00082390.pdf>. Acesso em: 15 Nov. 2020.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 1997. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/173611/1/Pt-2-Cap-20-Sais-soluveis.pdf>. Acesso: 13 Nov 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Milho Verde**. 2012. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fy779fnk02wx5ok0pv04k3c1v9rbg.html>. Acesso em: 02 out. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Manual de métodos de análise de solo**. 1997. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos\\_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf). Acesso em: 10 Nov. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONTAG01\\_16\\_2212200611542.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_16_2212200611542.html). Acesso em: 21 Nov. 2020.

ENNES, R. **Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2008.

EPRS - EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE. **Irrigation in EU agriculture**. 12p, 2019. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/644216/EPRS\\_BRI\(2019\)644216\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/644216/EPRS_BRI(2019)644216_EN.pdf). Acesso em: 30 Mar. 2020

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, v. 124, p. 74–84, 2011. doi: 10.1016/j.fcr.2011.06.007

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Land use indicators**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EL/visualize>. Acesso em: 10 Mar 2020.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Land use indicators**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EL/visualize>. Acesso em: 20 Mar. 2020.

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 506-515, 2015.

FERNANDES, F. H. F.; AQUINO, A. B.; AQUINO, B. F.; HOLANDA, F. J. M.; FREIRE, J. M.; CRISOSTOMO, L. A.; COSTA, R. I.; UCHOA, S. C. P.; FERNANDES, V. L. B. **Recomendações de adubação e calagem para o estado do ceara**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil S.A., 1993. 247p.

FERNÁNDEZ-CALLEJA, M.; MONTEAGUDO, A.; CASAS, A. M.; BOUTIN, C.; PIN, P. A.; MORALES, F.; Rapid on-Site Phenotyping via Field Fluorimeter Detects Differences in Photosynthetic Performance in a Hybrid—Parent Barley Germplasm Set. **Sensors**, 20, 1486, 2020. doi: 10.3390/s20051486

FERREIRA, L. G. R.; SOUZA, J. G.; PRISCO, J. T. Effects of water deficit on proline accumulation and growth of two cotton genotypes of differing drought resistance. **Z. Pflanzenphysiologie**, 93, 189/199, 1979.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Volume Armazenado – Reservatórios**. 2020. Disponível em: [http://www.funceme.br/produtos/script/acudes\\_e\\_rios/Boletim\\_diario\\_nivel\\_acudes/](http://www.funceme.br/produtos/script/acudes_e_rios/Boletim_diario_nivel_acudes/). Acesso em: 20 Mar. 2020.

GIRARD, M. C.; GIRARD, C., M. **Processing of remote sensing data**, Balkem. 2003.457p.

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**. 160(3):271-282, 2003.

GITELSON, A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 58, 289-298. 1996.

GUERRA, H. C. **Física dos solos**. Campina Grande: UFPB, 2000.

HAMDY, A.; SARDOB, V.; GHANEM, K. A. F. Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. **Agricultural Water Management**, 78: 122-127, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.017>.

HAMILTON, A. J.; STAGNITTI, F.; XIONG, X.; KREIDL, X. L.; BENKE, K. K.; MAHER, P. Wastewater irrigation: the state of play. **Vadose Zone Journal**, v.6, p. 823-840, 2007. Doi: <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2007.0026>.

HANIN, M.; EBEL, C.; NGOM, M.; LAPLAZE, L.; MASMOUDI, K. New Insights on Plant Salt Tolerance Mechanisms and Their Potential Use for Breeding. **Front. Plant Sci.** v. 7, p. 1787. 2016. doi: 10.3389/fpls.2016.01787

HANSON, A.; NELSEN, C. E.; EVERSON, E. H. Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barley cultivars. **Crop Science**, v.17, p.720-726, 1977.

HASSANLI, M.; EBRAHIMIAN, H. Cyclic use of saline and non-saline water to increase water use efficiency and soil sustainability on drip irrigated maize. **Spanish Journal of Agricultural Research**, 14: 15, 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016144-9238>.

HEEGE, H. J.; REUSCH, S.; THIESSEN, E. Prospects and results for optical systems for site specific on the go control of nitrogen top dressing in Germany. **Precision Agriculture**, v.9, n. 3, p. 115-131, 2008.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. London: Academic Press, 1980, 413 p.

HUANG, X. F.; ZHOU, D.; LAPSANSKY, E. R.; REARDON, K. F.; GUO, J.; ANDALES, M. J.; Et al. *Mitsuaria* sp. and *Burkholderia* sp. from *Arabidopsis* rhizosphere enhance drought tolerance in *Arabidopsis thaliana* and maize (*Zea mays* L.). **Plant Soil**, v. 419, p. 523-539, 2017. doi: 10.1007/s11104-017-3360-3364

INOUE, Y.; GUÉRIF, M.; BARET, F.; SKIDMORE, A.; GITELSON, A.; SCHLERF, M.; OLIOSSO, A. Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation. **Plant, cell & environment**, v. 39, n. 12, p. 2609-2623, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – INSA. Convivência com o semiárido: Diante das preocupações, as ações. 2012. Disponível em: <https://portal.insa.gov.br/acervo-relatorios/167-relatorio-popularizado-2012>. Acesso em: 20 set. 2020

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: the physical science basis**. Cambridge: University Press, 2013. 1535 p.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE. **Indicadores econômicos do Ceará**. 2017. IPECE: Fortaleza, 107p, 2017.

ISAYENKOV, S. V.; MAATHUIS, F. J. M. Plant Salinity Stress: Many Unanswered Questions Remain. **Front. Plant Sci**, v. 10, p. 80. 2019. doi: 10.3389/fpls.2019.00080

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatingas – Características e uso agrícola. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTE, M. P. F. (eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS/UFV. 1996. p.95-111.

JAIN, S. K.; V. KUMAR. Trend analysis of rainfall and temperature data for India. **Current Science**, v.102, n.1, p. 37-49. 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos SP, Parêntese, 2011. 582p.

KANASHIRO, C. H.; VAZQUEZ, C. C.; LACLETTE, E. I.; ESTRELLA, L.H.; SIMPSON J. Analysis of geneexpression and physiological responses in three mexican maizelandraces under drought stress and recovery irrigation. **Plos One**, v. 4, n.13, 2009.

KANG, Y.; CHEN, M.; WAN, S. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var.ceratina Kulesh) in North China Plain. **Agricultural Water Management**, 97: 1303–1309, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.006>.

KAUR, R.; PAUL, M.; MALIK, R. Impact assessment and recommendation of alternative conjunctive water use strategies for salt affected agricultural lands through a field scale decision support system – A case study. **Environmental Monitoring and Assessment**, 129: 257–270, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9359-6>

KIANI, A. R.; MIRLATIFI, S. M. Effect of different quantities of supplemental irrigation and its salinity on yield and water use of winter wheat (*Triticum aestivum*). **Irrigation and Drainage**, 61: 89–98, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1002/ird.629>

KIANI, A. R.; MOSAVATA, A. Effect of different alternate irrigation strategies using saline and non-saline water on corn yield, salinity and moisture distribution in soil profile. **Journal of Water and Soil**, 30: 1595-1606, 2016. Doi: <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.41857>.

KISHOR, P. B. K.; HIMA KUMARI, P.; SUNITA, M. S. L.; SREENIVASULU, N. Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. **Frontiers Plant Science**, v. 6, p. 544, 2015. Doi: 10.3389/fpls.2015.00544

KISHOR, P. B. K.; SREENIVASULU, N. Is proline accumulation per se correlated with

stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue?. **Plant Cell Environment**, v.37, p.300–311, 2014. doi: 10.1111/pce.12157

KULKARNI, S. Innovative technologies for water saving in irrigated agriculture. **International Journal of Water Resources and Arid Environments**, 1: 226-231, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/229050067\\_Innovative\\_Technologies\\_for\\_Water\\_Saving\\_in\\_Irrigated\\_Agriculture](https://www.researchgate.net/publication/229050067_Innovative_Technologies_for_Water_Saving_in_Irrigated_Agriculture). Acesso: 10 Jan. 2020.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; PRISCO, J. T. Proline accumulation in sorghum leaves is enhanced by salt-induced tissue dehydration. **Revista Ciência Agrônômica**, v.37, p.110-112, 2006.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.49, p.107-120, 2003.

LACERDA, C. F.; OLIVEIRA, E. V.; NEVES, A. L. R.; GHEYI, H. R.; BEZERRA, M. A. B.; COSTA, C. A. G. Morphophysiological responses and mechanisms of salt tolerance in four ornamental perennial species under tropical climate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.10, p.656-663, 2020.

LACERDA, C. F.; SOUSA, G. G.; SILVA, F. L. B.; GUIMARÃES, F. V. A.; SILVA, G. L.; CAVALCANTE, L. F. Soil salinization and maize and cowpea yield in the crop rotation system using saline Waters. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.4, p.663-675, 2011.

LACERDA, C.F.; COSTA, R.N.T.; BEZERRA, M.A.; NEVES, A.L.R.; SOUSA, G.G.; GHEYI, H.R. Estratégias de manejo para o uso de água salina na agricultura. IN: GHEYI, H.R.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2a. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2016. 530p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos, Rima Artes e Textos, 2000. 531p.

LI, J.; MA, J.; GUO, H.; ZONG, J.; CHEN, J.; WANG, Y.; LI, D.; LI, L.; WANG, J.; LIU, J. Growth and physiological responses of two phenotypically distinct accessions of centipede grass (*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.) to salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.126, p.1-10, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.018>

LIU, L.; SONG, B.; ZHANG, S.; LIU, X. A novel principal component analysis method for the reconstruction of leaf reflectance spectra and retrieval of leaf biochemical contents. **Remote Sensing**, v. 9, 11, p. 1113, 2017.

LUTTS, S., KINET, J. M., BOUHARMONT, J., Effects of salt stress on growth, mineral nutrition and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. **Plant Growth Regulation**, 19, 207/218, 1996.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal Climatology**, v. 26, n. 22, p.9137–9154. 2013. doi:10.1175/JCLI-D-12-00642.1

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in northeast Brazil: past, present and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v.129, p. 1189-1200. 2017.

MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3 ed. Academic Press, Cambridge. 2012.

MASONI, A. ERCOLI, L. L.; MARIOTTI, M. **Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium and manganese**. *Agronomy Journal*, v.88, p.937-943, 1996.

MCDOWELL, N. G., BEERLING, D. J., BRESHEARS, D. D., FISHER, R. A., RAFFA, K. F., STITT, M. The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. **Trends Ecol. Evol.**, v. 26, p. 523–532, 2011. doi: 10.1016/j.tree.2011.06.003

MCWILLIAMS, D. **Regional soil and water series: Soil salinity and sodicity limits efficient plant growth and water use**. Guide A-140. Las Cruces: New Mexico State University, 2003.

MEDEIROS, J.F. **Qualidade da água de irrigação utilizada nas propriedades assistidas pelo "GAT" nos Estados do RN, PB, CE e avaliação da salinidade dos solos**. 1992. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; NEVES, J. C. L.; MATOS, A. T.; SOUZA, J. A. A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola ambiental**, v.9, n.4, p.603-612, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000400026>.

MEIRELES, A. C. M.; FRISCHKORN, H.; ANDRADE, E. M. Sazonalidade da qualidade das águas do açude Edson Queiroz, bacia do Acaraú, no semiárido cearense. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, p.25-31, 2007.

MELO JUNIOR, J. C. F.; SEDIYAMA, J. C.; FERREIRA, P. A.; LEAL, B. G.; MINUSI, R. B. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 02, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200024>.

MENDES, B. V. (Ed). **Biodiversidade e desenvolvimento sustentável do Semiárido**. Fortaleza: SEMACE, 1997.

MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B. de; LIMA, R. A. F. de A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 14, n. 2, p. 181-186, 2010. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000200009>.

MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. Estimating canopy nitrogen concentration in sugarcane using field imaging spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 4, p.1 651-1670, 2012.

MIRANDA, R. A. de. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v. 74, n. 829, p. 24-27, jan. 2018.

MOFTAH, A. E.; MICHEL, B. E. The effect of sodium chloride on solute potential and

proline accumulation in soybean leaves. **Plant Physiology**, 83, 238/240. 1987.

MOSS, R. A.; LOOMIS, W. E. Absorption spectra of leaves. I. The visible spectrum. **Plant Physiology**, 27(2), p.370. 1952.

MUNNS, R., AND TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annu. Rev. Plant Biol.** v. 59, p. 651–681. 2008. doi: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

MURTAZA, G.; GHAFOR, A.; QADIR, M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton–wheat rotation. **Agricultural Water Management**, 81: 98–114, 2006.

NANGIA, V.; OWEIS, T.; KEMEZE, F. H.; SCHNETZER, J. Supplemental irrigation: A promising climate-smart practice for dryland agriculture. Climate-Smart Agriculture Practice Brief. Wageningen, Netherlands: CGIAR **Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security** (CCAFS), 2018.

NARESH, R. K.; MINHAS, P. S.; GOYAL, A. K.; CHAUHAN, C. P. S.; GUPTA, R. K. Conjunctive use of saline and non-saline waters. II. Field comparisons of cyclic uses and mixing for wheat. **Agricultural Water Management**, 23: 139-148, 1993. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(93\)90037-B](https://doi.org/10.1016/0378-3774(93)90037-B).

NEIVA, T. S. Potencial de reuso na agricultura da água residuária da estação de tratamento limoeiro. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 2, n. 2, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.17565/gesta.v2i2.12798>.

NEVES, A. L. R.; LACERDA, C. F.; SOUSA, C. H. C.; SILVA, F. L. B.; GHEYI, H. R.; FERREIRA, F. J.; ANDRADE FILHO, F.L. **Growth and yield of cowpea/sunflower crop rotation under different irrigation management strategies with saline water. Ciência Rural** 45: 814-820, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131657>.

NGOLO, A. O.; OLIVEIRA, M. F. de; ASSIS, I. R.; ROCHA, G. C.; FERNANDES, R. B. A. Soil physical quality after 21 years of cultivation in a Brazilian Cerrado Latosol. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 3, p. 124-136, 2019.

NIINEMETS, Ü.; TAMM, Ü. Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands. **Tree physiology**, v. 25(8), p. 1001-1014, 2005.

NORDSTEDT, N. P.; JONES, M. L. Isolation of Rhizosphere Bacteria That Improve Quality and Water Stress Tolerance in Greenhouse Ornamentals. **Front. Plant Sci.**, 11:826, 2020. doi: 10.3389/fpls.2020.00826

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, M. R. R.; QUEIROZ, T. R. G.; TEIXEIRA, A. S.; MOREIRA, L. C. J.; LEÃO, R. A. O. Reflectance spectrometry applied to the analysis of nitrogen and potassium deficiency in cotton. **Revista Ciência Aronômica**, v. 51, n. 4, e20196705, 2020



OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. Response of plants to water stress. **Front. Plant Sci.**, v. 5, n. 86, 2014. doi: 10.3389/fpls.2014.00086

OSBORNE, C. P.; SACK, L. Evolution of C4 plants: a new hypothesis for an interaction of CO<sub>2</sub> and water relations mediated by plant hydraulics. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v.367, p.583–600, 2012. Doi:10.1098/rstb.2011.0261

OSTER, J.; GRATTAN, S. Drainage water reuse. **Irrigation and Drainage Systems**, 16: 297–310, 2002. Doi: <https://doi.org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1023/A:1024859729505>

PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; CHAVES, L. C. G. Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400011>

PARIHAR, P.; SINGH, S.; SINGH, R.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. **Environ Sci Pollut Res**, v. 22, p.4056–4075. 2015. <https://doi-org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11356-014-3739-1>.  
PATERNIANI, E.; CAMPOS, M. S. Melhoramento do milho. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, 1999, p. 429-485.

PEI, W.; LAN, Y.; XIWEN, L.; ZHIYAN, Z.; WANG, Z.; WANG, Y. Integrated sensor system for monitoring rice growth conditions based on unmanned ground vehicle system. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 7, 75–81, 2014.

PENELLA, C.; CALATAYUD, Á.; MELGAR, J. C. Ascorbic Acid Alleviates Water Stress in Young Peach Trees and Improves Their Performance after Rewatering. **Front. Plant Sci.** 8:1627, 2017. doi: 10.3389/fpls.2017.01627

PEREIRA FILHO, I. A.; SILVA, A. R.; COSTA, R. V.; CRUZ, I. **Milho verde**. 2010. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fy779fnk02wx5ok0pv04k3c1v9rbg.html>. Acesso em: 10 Nov. 2020.

PERRIER, E. R.; SALKINI, A. B. **Supplemental irrigation in the near East and North Africa. Proceedings of a Workshop on Regional consultation on supplemental irrigation**. ICARDA and FAO, Rabat, Morocco, 612 p. 1991. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=3oT1CAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR16&ots=\\_8fPwL7E\\_D&sig=KTd\\_WZin8N7OY8xvL-b8oHS6nRI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=3oT1CAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR16&ots=_8fPwL7E_D&sig=KTd_WZin8N7OY8xvL-b8oHS6nRI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Acesso: 12 Abril 2020.

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. S.; SANTOS, R.; FREIRE, F. J.; MIRANDA, M. F. A.; SANTOS, P. R. Saline water irrigation in semiarid region: I - effects on soil chemical properties. **Australian Journal of Crop Science**, 13: 1169-1176, 2019. Doi: 10.21475/ajcs.19.13.07.p1686.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

PORTO FILHO, F. Q.; MEDEIROS, J. F.; SOUSA NETO, E. R.; GHEYI, H. R.; MATOS, J. A. Viabilidade da irrigação do meloeiro com águas salinas em diferentes fases fenológicas. **Ciência Rural**, v.36, p.453-459, 2006. Doi: 10.1590/S0103-84782006000200015

RAHNAMA, A.; JAMES, R. A.; POUSTINI, K.; MUNNS, R. Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. **Functional Plant Biology**, v.37, p.255–269, 2010.

RESENDE, R. S.; AMORIM, J. R. A.; CRUZ, M. A. S.; MENESES, T. N. Distribuição espacial e lixiviação natural de sais em solos do Perímetro Irrigado Califórnia, em Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, supl., p. 46-52, 2014.

REYNOLDS, J. F. Global desertification: Building a science for dryland development. **Science**, V. 316, Issue 5826, p. 847-851. 2007. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1131634>

RHOADES, J. D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: Stewart, D. R.; Nielsen, D. R. (eds.) **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA, CSSA, 1990. p.1089-1142.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, R. H.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016. cap.2, p.9-15.

RIVARD B, SANCHEZ-AZOFEIFA A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. **Remote Sensing of Environment**, v.15, 115(2), p.659-70, 2011.

ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; LEÃO, R. A. O.; MOREIRA, L. C. J.; GALVÃO, L. S. Hyperspectral remote sensing for detecting soil salinization using prospectir vs aerial imagery and sensor simulation. **Remote Sensing**, 2017.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7 ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. 264p.  
ROY, S. J.; NEGRÃO, S.; TESTER, M. Salt resistant crop plants. **Curr. Opin. Biotechnol.** v.26, p.115–124. 2014. doi: 10.1016/j.copbio.2013.12.004

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S. **Spectral mixture analysis of inland tropical Amazon floodplain waters using EO 1 Hyperion**. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, USA. IEEE International, 2006.

SANTOS, J. G. R. **A salinidade na agricultura irrigada: teoria e prática**. Campina Grande: [s.n.t.], 2000. 171p.

SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F. M.; LACERDA, C. F.; SOUZA, E. R.; LIMA, G. S. Interação salinidade-fertilidade do solo. In: GHEYI, R. H.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016. cap.18, p.277-293.

SEDET – Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Trabalho. **Acesso à informação – Perguntas frequentes**. 2019. Disponível em: <https://www.sedet.ce.gov.br/acesso-a-informacao/>. Acesso em: 12 Abril 2020.

SELESHI, Y.; ZANKE, U. Recent changes in rainfall and rainydays in Ethiopia. **Int. J. Climatol.**, v. 24, p. 973–983, 2004.

ŞEN, Z. Regional Wet and Dry Spell Analysis with Heterogeneous Probability Occurrences. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, n. 9, 2015. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001144

SHARMA, D. P.; RAO, K. V. G. K.; SINGH, K. N.; KUMBHARE, P. S.; OOSTERBAAN, R. J. Conjunctive use of saline and non-saline irrigation waters in semi-arid regions. **Irrigation Science**, 15: 25–33, 1994. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00187792>.  
SHARMA, S.; VERSLUES, P. E. Mechanisms independent of abscisic acid (ABA) or proline feedback have a predominant role in transcriptional regulation of proline metabolism during low water potential and stress recovery. **Plant Cell Environment**, v.33, p.1838–1851, 2010. doi: 10.1111/j.1365-3040.2010.02188.x

SIGNORELLI, S. The fermentation analogy: A point of view for understanding the intriguing role of proline accumulation in stressed plants. **Frontiers Plant Science**, 7:1339, 2016. doi: 10.3389/fpls.2016.01339

SILVA JÚNIOR, L. G. A.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. Composição química de águas do cristalino do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 3: 11-17, 1999. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v3n1p11-17

SILVA NETO, B.; DEZEN, M.; SANTOS, P. E. O conceito de reprodução social na análise de unidades de produção agropecuária. **Teoria e Evidência Econômica**, 32: 87-108, 2009. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rtee/article/view/4747/3181>. Acesso: 17 Fev. 2020.

SILVA, F. A. S. E.; RAO, T. V. R. Regimes pluviais, estação chuvosa e probabilidade de ocorrência de veranicos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n.3, p. 440-446. 2002. doi: 10.1590/S1415-43662002000300010.

SILVA, F. J. A.; ARAÚJO, A. L.; SOUZA, R. O. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 28, n. 2, p. 136-159, 2007.

SILVA, P. C. G. da; MOURA, M. S. B. de; KIILL, L. H. P.; BRITO, L. T. de L.; PEREIRA, L. A.; SA, I. B.; CORREIA, R. C.; TEIXEIRA, A. H. de C.; CUNHA, T. J. F.; GUIMARÃES FILHO, C. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (Ed.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010, cap. 1, p. 18-48.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Visão Agrícola – USP/ESALQ**, São Paulo, ano 9, n. 13, p. 4 – 7, jul./dez. 2015.

SOOTHAR, R. K.; ZHANG, W.; ZHANG, Y.; TANKARI, M.; MIRJAT, U.; WANG, Y. Evaluating the performance of SALTMED model under alternate irrigation using saline and

fresh water strategies to winter wheat in the North China Plain. **Environmental Science and Pollution Research**, 26: 34499–34509, 2019. Doi: <https://doi-org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11356-019-06540-w>.

SOUZA FILHO, F. A. **Ceará 2050 – Juntos pensando o futuro**. 2018. Disponível em: <http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wp-content/uploads/2018/10/ceara-2050-estudo-setorial-especial-recursos-hidricos.pdf>. Acesso em: 20 Mar. 2020.

SOUZA, E. M. **As secas no nordeste e seus efeitos recentes na agropecuária do Rio Grande do Norte**. 2017. 129f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Rio grande do Norte, Assú, 2017.

SOUZA, M. L. C. **Parâmetros fisiológicos do cultivo de milho doce sob influência da deficiência hídrica**. 2018. 84f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp, São Paulo, 2018.

STRABELI, T. F. Resposta hiperespectral na determinação do conteúdo de água na folha em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. **Doctoral dissertation**, Universidade de São Paulo, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant physiology and development**. 6.ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2015. 761p.

TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. **Limitations to efficient water use and crop production**. ASA-CSSA-SSSA: Madison, Wisconsin, EUA. 1983.

TEIXEIRA, F. J. C.; CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C.; PINHEIRO, M. I. T.; LUNA, R. M. **O sistema de gerenciamento de recursos hídricos do estado do Ceará, brasil: avaliações e propostas**. 2015. Disponível em: [http://www.deha.ufc.br/ticiana/Arquivos/Publicacoes/Congressos/2005/teixeira\\_Sistema%20de%20Ger%20dos%20Rec%20Hidricos%20do%20Ceara\\_SILUSBA.pdf](http://www.deha.ufc.br/ticiana/Arquivos/Publicacoes/Congressos/2005/teixeira_Sistema%20de%20Ger%20dos%20Rec%20Hidricos%20do%20Ceara_SILUSBA.pdf). Acesso em: 20 Mar. 2020.

TEIXEIRA, M. N. O sertão semiárido. Uma relação de sociedade e natureza numa dinâmica de organização social do espaço. **Revista Sociedade e Estado**, 3:31, 2016.

TERCEIRO NETO, C. P. C.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F.; DIAS, N. S.; CAMPOS, M. S. Produtividade e qualidade de melão sob manejo com água de salinidade crescente. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, p.354-362, 2013. e-ISSN 1983-4063.

TOLBERT, A.; AKI NOSHO, H.; KHUNSUPAT, R.; NASKAR, A. K.; R AGAUS KAS, A. J. Characterization and analysis of the molecular weight of lignin for biorefining studies. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 6, p. 836 856, 2014.

TYAGI, N. K. Managing saline and alkali water for higher productivity. In: KIJNE, J.; MOLDEN, D. J.; BARKER, R. (eds.) **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. CABI: Wallingford, England. 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.1079/9780851996691.0069>.

VARELLA, C. A. A. **Análise de componentes principais**. 2008. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/multivariada%20aplicada%20as%20ciencias%20agrarias/Aulas/analise%20de%20componentes%20principais.pdf>. Acesso em: 10 Nov. 2020.

VENGATESWARI, M.; GEETHALAKSHMI, V.; BHUVANESWARI, K.; PANNEERSELVAM, S. Influence of enso on wet and dry spell frequency for rainfed cropping period over Tamil Nadu. **International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**, v. XLII-3-W6, p. 63-65. 2019.

VERSLUES, P. E.; BRAY, E. A. Role of abscisic acid (ABA) and *Arabidopsis thaliana* ABA- Insensitive loci in low waterpotential-induced ABA and proline accumulation. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.201–212, 2006.

WALTER, J.; LÜCK, E.; BAURIEGEL, A.; FACKLAM, M.; ZEITZ, J. Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: A geophysical approach. **Geoderma**, v. 310, p. 1–11. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.022>

WANG, H.; TANG, X.; WANG, H.; SHAO, H. B. Proline accumulation and metabolism-related genes expression profiles in *Kosteletzkya virginica* seedlings under salt stress. **Frontiers Plant Science**, v.6, p.792, 2015. doi: 10.3389/fpls.2015.00792

WANG, J.; SU, Q.; SHANG, J.; ZHANG, J.; WU, F.; ZHOU, G.; DAI, Q. A New Approach for Estimating Soil Salinity Using A Low-Cost Soil Sensor In Situ: A Case Study in Saline Regions of China's East Coast. **Remote Sens.** v. 12, p. 239. 2020. doi:10.3390/rs12020239.

WICHELNS, D.; CONE, D.; STUHR, G.; Evaluating the impact of irrigation and drainage policies on agricultural sustainability. **Irrigation and Drainage Systems**, v.16 p.1-14, 2002. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1015537818872>.

YADAV, R.; KUMAR, A.; LAL, D.; BATRA, L. Yield responses of winter (rabi) forage crops to irrigation with saline drainage water. **Experimental Agriculture**, 40: 65-75, 2004. doi: <https://doi.org/10.1017/S0014479703001431>.

YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOAKI, K. Transcriptional regulatory networks in cellular responses and tolerance to dehydration and cold stresses. **Annual Review Plant Biology**, v.57, p.781–803, 2006. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105444

YANG, J.; DU, L.; SUN, J.; ZHANG, Z.; CHEN, B.; SHI, S.; SONG, S. Estimating the leaf nitrogen content of paddy rice by using the combined reflectance and laser induced fluorescence spectra. **Optics Express**, v.24, n. 17, 19354–19365, 2016.

ZANINELLI, P. G.; MENÉNDEZ, D. G.; FALCO, M.; FRANCA, N. L.; CARRIL, A. F. Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 1/2, p. 819–830, 2019. DOI 10.1007/s00382-018-4225-0.

ZHANG, L.; BECKER, D. F. Connecting proline metabolism and signaling pathways in plant senescence. **Frontiers Plant Science**, v.6, p.552, 2015. doi: 10.3389/fpls.2015.00552

ZHAO, G.; MIAO, Y.; WANG, H.; SU, M.; FAN, M.; ZHANG, F. A preliminary precision

rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. **Field Crop Research**, v.154, p.10–23, 2013. doi: 10.1016/j.fcr.2013.07.019

## APÊNDICE A – PLANILHA DE IRRIGAÇÃO

Tabela 9 – Planilha de irrigação (ciclos de 2018 e 2019)

Dias após a semeadura	Cenários hídricos			
	Seca severa	Seca	Normal	Muito Chuvoso
	Laminas aplicadas (mm)			
	25	25	25	25
Dia 1				
Dia 2	5	5	5	5
Dia 3				
Dia 4	10	15	20	30
Dia 5				
Dia 6	10	10	10	10
Dia 7				
Dia 8				
Dia 9	20	25	30	50
Dia 10				
Dia 11				
Dia 12	Suplementação	Suplementação	Suplementação	Suplementação
Dia 13				
Dia 14				
Dia 15	Suplementação	Suplementação	Suplementação	45
Dia 16				
Dia 17				
Dia 18	Suplementação	Suplementação	35	20
Dia 19				
Dia 20	Suplementação	25	10	20
Dia 21				
Dia 22				
Dia 23				
Dia 24	15	15	15	15
Dia 25				
Dia 26	15			
Dia 27		5	25	25
Dia 28				
Dia 29				
Dia 30				
Dia 31	10	30	25	35
Dia 32				
Dia 33				
Dia 34				
Dia 35	Suplementação	Suplementação	Suplementação	Suplementação
Dia 36				
Dia 37				35

Dia 38				
Dia 39	Suplementação	Suplementação	Suplementação	30
Dia 40				
Dia 41			15	
Dia 42	Suplementação	Suplementação	15	30
Dia 43				
Dia 44		15		
Dia 45				
Dia 46	Suplementação	15	30	30
Dia 47				
Dia 48	25	30	25	35
Dia 49				
Dia 50				
Dia 51	30	20	25	25
Dia 52				
Dia 53				
Dia 54				
Dia 55	Suplementação	Suplementação	Suplementação	Suplementação
Dia 56				
Dia 57				35
Dia 58				
Dia 59	Suplementação	Suplementação	Suplementação	30
Dia 60				
Dia 61			30	
Dia 62	Suplementação	Suplementação		35
Dia 63				
Dia 64				
Dia 65	Suplementação	10	25	10
Dia 66				
Dia 67	30	30	30	35
Dia 68				
Dia 69	10	30	20	25
Dia 70				
Dia 71				
Dia 72	20	15	20	30
Dia 73				
Dia 74				
Dia 75				
Dia 76	Suplementação	Suplementação	30	35
Dia 77				
Dia 78				
Dia 79	15	25		45
Dia 80				
Dia 81				30



Dia 82		20	25	
Dia 83				40
Dia 84				
Dia 85	10	15	20	
Dia 86				35
Dia 87				
Dia 88	10	15	20	50

---

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).