UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Weslley Oliveira da Silva

Tolerância de Cultivares de Sorgo à Disponibilidade Hídrica em Duas Épocas de Plantio

PETROLINA

2023

Weslley Oliveira da Silva

Tolerância de Cultivares de Sorgo à Disponibilidade Hídrica em Duas Épocas de Plantio

Dissertação apresentada para aprovação no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco, para obtenção de título de Mestre.

Orientador(a): Vanderlise Giongo
Coorientador(a): Francislene Angelotti

PETROLINA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco
Núcleo de Gestão de Bibliotecas e Documentação (NBID)

S586t

Silva, Weslley Oliveira da.
Tolerância de cultivares de sorgo à disponibilidade hídrica em duas épocas de plantio / Weslley Oliveira da Silva. – Petrolina: do autor, 2023.
52 f. : PDF ; 626 KB.

Orientador(a): Vanderlise Giongo.
Coorientador(a): Francislene Angelotti.
Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade de Pernambuco, *Campus* Petrolina, Petrolina-PE, 2023.

1. *Sorghum bicolor* (L) Moench. 2. Fisiologia. 3. Estresse abiótico. 4. Mudanças climáticas. I. Giongo, Vanderlise. II. Angelotti, Francislene. III. Universidade de Pernambuco - *Campus* Petrolina - PPGCTA. IV. Título.

CDD 633.62

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Danilo Trindade Barbosa, CRB 4/2285, Universidade de Pernambuco – Campus Petrolina.

WESLLEY OLIVEIRA DA SILVA

TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE SORGO À DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM DUAS ÉPOCAS DE PLANTIO

Dissertação apresentada para aprovação no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco, para obtenção de título de Mestre.

Defendida e aprovada em: 28 de março de 2023

BANCA EXAMINADORA

Dra. Francislene Angelotti (Coorientadora)
Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina (UPE)

Dr. Hiram Marinho (Membro interno)
Universidade de Pernambuco *Campus* Garanhuns (UPE)

Dr. Anderson Ramos de Oliveira (Membro externo)
Embrapa Semiárido (Petrolina)

PETROLINA

2023

AGRADECIMENTOS

À Deus, acima de tudo, que sempre esteve comigo, que me amou e me ama incondicionalmente, que me deu a capacidade de realizar e conquistar tudo o que tenho. Sem Ele, nada sou.

Aos meus pais, Regina e Gilmar, por todo amor e incentivo durante todos esses anos, por sempre me guiarem pelo caminho justo e correto. Amo vocês!

Aos meus irmãos, Anderson e Jirlândia, por sempre estarem me apoiando e torcendo pelo meu bem. Amo vocês!

À minha Orientadora, Dra. Francislene, que sempre se fez presente com muita paciência e humanidade, sendo fundamental para meu crescimento acadêmico e também pessoal. Mulher guerreira e com um enorme coração. Obrigado pela oportunidade de trabalhar nesse projeto e pela confiança para continuar me orientando nessa nova etapa que se inicia.

À Dr. Welson Simões, por todo o apoio e incentivo que tem dado desde o início da minha graduação. Sua contribuição para minha formação é enorme!!

À Dra. Juliane Barros pela ajuda diária nas correções e dúvidas que eu tinha. Sempre se pôs à disposição para contribuir no meu crescimento. Muito Obrigado!!

À Dra. Alessandra Salviano, Dr. Miguel Guimarães e a todos que sempre foram solícitos em responder qualquer dúvida que eu tivesse e contribuir para o melhor desenvolvimento do meu projeto.

À banca examinadora (Dr. Anderson e Dr. Hiram), pela paciência em me corrigir e por estar me acompanhando desde o início do projeto, contribuindo imensamente para o desenvolvimento do mesmo, além de enriquecer e agregar a dissertação do trabalho.

À minha grande amiga e irmã que esse mestrado me presenteou, Layana, que esteve comigo nos bons e maus momentos, sendo um grande apoio em todas as etapas. Obrigado por ajudar a me tornar uma pessoa melhor, você foi e é muito importante pra mim.

Aos meus amigos de sala e de vida: Kaio, Vitória, Amon, Márcia, Ítala, Bruno, Yuri e Ângela. Nossas conversas diárias e brincadeiras serão sempre lembradas! Muito obrigado por toda a ajuda durante as etapas desse trabalho. Vocês foram essenciais!

Aos meus amigos da equipe MudClima: Eli, Camila, Winngly, Gil e Galego. Obrigado por todo apoio nesse processo, vocês foram fundamentais para que fosse possível a realização desse trabalho!

Aos meus amigos de graduação, que sempre foram presentes e me apoiaram demais: Bianca, Rebecca, Jéssica, Marcos, Alana, Ádila. Torço pelo sucesso de cada um de vocês!

À Embrapa Semiárido, pela infraestrutura para a realização do experimento.

À UPE, pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco, pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À todos amigos, colegas e conhecidos que não foram citados mas, de alguma forma, contribuíram nesse processo ou que torceram por mim. À todas as pessoas que encontrei no caminho e que estão longe ou perto. Muito obrigado!!

Obrigado!!

RESUMO

SILVA, Weslley Oliveira da. **Tolerância de cultivares de sorgo à disponibilidade hídrica em duas épocas de plantio**. 2023. 52 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Petrolina, 2023.

O rendimento dos cultivos é afetado diretamente pelo aumento da temperatura do ar e pela disponibilidade de água no solo. Diante disso, objetivou-se avaliar o desempenho vegetativo e produtivo de cultivares sorgo sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica em duas épocas de plantio. O experimento foi conduzido com delineamento experimental em blocos casualizados, em arranjo fatorial 2x6x4, sendo duas épocas de cultivo (Época 1: plantio em junho; Época 2: plantio em janeiro), seis cultivares de sorgo (AGRI002E, BRS 716, BRS 506, SF 15, IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra) e quatro níveis de disponibilidade hídrica (25; 50; 75 e 100% da capacidade de campo - CC), com quatro repetições. Foram avaliadas: a massa seca total, a eficiência no uso da água, a fotossíntese, a condutância estomática, a transpiração e a temperatura foliar. As cultivares de sorgo apresentaram respostas diferenciadas frente ao aumento da temperatura do ar (em diferentes épocas de plantio) e o déficit hídrico. As cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra produziram maior quantidade de massa seca quando plantadas em junho, com temperaturas máximas variando de 26 a 34 °C e com 100% da CC. A cultivar AGRI002E apresentou maior produção de massa seca na época com as temperaturas mais altas (temperatura máxima entre 27,9 e 36,6 ºC), demonstrando adaptação ao aumento da temperatura. A cultivar AGRI002E apresentou a maior taxa de fotossíntese, condutância estomática e transpiração foliar entre as demais cultivares na época 2, com a disponibilidade hídrica em 100% da CC.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L) Moench; mudanças climáticas; estresse abiótico; fisiologia.

ABSTRACT

SILVA, Weslley Oliveira da. **Tolerance of sorghum cultivars to water availability in two planting seasons.** 2023. 52 p. Dissertation (Master's) - University of Pernambuco, Petrolina, 2023.

Crop yields are directly affected by increasing air temperature and soil water availability. Given this, the yield of crops is directly affected by increasing air temperature and soil water availability. Therefore, the objective was to evaluate the vegetative and productive performance of sorghum cultivars under different levels of water availability in two planting seasons. The experiment was conducted in randomized block design, in 2x6x4 factorial arrangement, with two growing seasons (Season 1: June planting; Season 2: January planting), six sorghum cultivars (AGRI002E, BRS 716, BRS 506, SF 15, IAC Santa Elisa and BRS Ponta Negra) and four levels of water availability (25; 50; 75 and 100% of field capacity - FC), with four repetitions. Total dry mass, water use efficiency, photosynthesis, stomatal conductance, transpiration and leaf temperature were evaluated. The sorghum cultivars showed different responses to increased air temperature (at different planting times) and water deficit. The cultivars SF 15 and BRS Ponta Negra produced a larger quantity of dry mass when planted in June, with maximum temperatures varying from 26 to 34 ºC and with 100% of FC. The cultivar AGRI002E showed the highest production of dry mass in the period with the highest temperatures (maximum temperature between 27.9 and 36.6 ºC), showing adaptation to increased temperature. The cultivar AGRI002E showed the highest rate of photosynthesis, stomatal conductance and leaf transpiration among the other cultivars in season 2, with water availability at 100% of FC.

Keywords: *Sorghum bicolor* (L) Moench; climate change; abiotic stress; physiology.

RESUMEN

SILVA, Weslley Oliveira da. **Tolerancia de cultivares de sorgo a la disponibilidad de agua en dos épocas de siembra.** 2023. 52 p. Disertación (Maestría) - Universidad de Pernambuco, Petrolina, 2023.

El rendimiento de los cultivos se ve directamente afectado por el aumento de la temperatura del aire y la disponibilidad de agua en el suelo. En vista de ello, El rendimiento de los cultivos se ve directamente afectado por el aumento de la temperatura del aire y la disponibilidad de agua en el suelo. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento vegetativo y productivo de cultivares de sorgo bajo diferentes niveles de disponibilidad de agua en dos temporadas de siembra. El experimento fue conducido en un diseño de bloques al azar, en arreglo factorial 2x6x4, con dos estaciones de crecimiento (Estación 1: siembra en junio; Estación 2: siembra en enero), seis cultivares de sorgo (AGRI002E, BRS 716, BRS 506, SF 15, IAC Santa Elisa y BRS Ponta Negra) y cuatro niveles de disponibilidad de agua (25; 50; 75 y 100% de la capacidad de campo - CC), con cuatro repeticiones. Se evaluaron la masa seca total, la eficiencia en el uso del agua, la fotosíntesis, la conductancia estomática, la transpiración y la temperatura foliar. Los cultivares de sorgo mostraron diferentes respuestas al aumento de la temperatura del aire (en diferentes épocas de plantación) y al déficit hídrico. Los cultivares SF 15 y BRS Ponta Negra produjeron mayor cantidad de masa seca cuando fueron plantados en junio, con temperaturas máximas que variaron de 26 a 34 ºC y con 100% de CC. El cultivar AGRI002E presentó la mayor producción de masa seca en el período de mayores temperaturas (temperatura máxima entre 27,9 y 36,6 ºC), mostrando adaptación al aumento de temperatura. El cultivar AGRI002E presentó la mayor tasa de fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración foliar entre los demás cultivares en la temporada 2, con disponibilidad de agua al 100% de CC.

Palabras clave: *Sorghum bicolor (L)* Moench; cambio climático; estrés abiótico; fisiología.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **10**

2 OBJETIVOS **12**

2.1 Geral 12

2.2 Específico 12

3 REVISÃO DE LITERATURA **13**

3.1 Cultura do sorgo e importância socioeconômica 13

3.2 Mudanças Climáticas x Agricultura 16

3.2.1 Temperatura *17*

3.2.2 Disponibilidade hídrica *19*

3.3 Adaptabilidade às mudanças climáticas *21*

3.4 Sorgo biomassa 22

3.4.1 Etapas de crescimento (EC) do sorgo biomassa *23*

REFERÊNCIAS **26**

CAPITULO 1: Disponibilidade hídrica e temperatura do ar no desempenho de cultivares de sorgo **33**

Introdução **34**

Material e métodos **35**

Resultados **37**

Discussão **43**

Conclusão **46**

Agradecimentos **47**

Referências **48**

ANEXO **52**

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, as mudanças no clima têm afetado a agricultura, tornando os rendimentos agrícolas vulneráveis, devido ao aumento das temperaturas e às variações no padrão da precipitação, que impactam negativamente os cultivos (OECD, 2016), uma vez que, causam alterações nos parâmetros fisiológicos e biométricos das plantas (TAIZ *et al*. 2017). De acordo com Hasanuzzaman *et al.* (2019), até o ano de 2050, o déficit hídrico poderá afetar drasticamente o crescimento e desenvolvimento das plantas em mais de 50% das terras agricultáveis.

Mesmo o déficit hídrico sendo um dos fatores abióticos que mais afeta as plantas, a intensidade de seu efeito dependerá da interação com a temperatura do ar (JUMRANI e BHATIA, 2018). Com o aumento da temperatura do ar, a demanda hídrica tende a se elevar, em função de maiores perdas por evapotranspiração, diminuindo a disponibilidade de água para as plantas (BERGAMASCHI e BERGONCI, 2017). Em cenários de mudanças climáticas, há previsão de aumento da frequência dos eventos extremos, com ondas de calor e períodos de seca prolongados (IPCC, 2021).

Em cenários regionalizados, estudos apontam que para o Nordeste brasileiro, há tendência de aumento na ocorrência de estiagens e maior aridez na região semiárida (BRITO *et al.* 2017, MARENGO *et al.* 2021), afetando consideravelmente a disponibilidade hídrica e as atividades dependentes de chuva. Diante disso, avanços científicos sobre a demanda hídrica dos cultivos em cenários de mudanças climáticas e adoção de tecnologias para aumentar o uso eficiente da água, em particular a seleção de cultivares tolerantes ao estresse hídrico, será uma medida imperativa para a manutenção da produtividade dos cultivos (BARROS *et al.* 2023).

Nesse contexto, o sorgo é uma opção promissora, devido às suas características agronômicas, tendo destaque para a sua tolerância aos estresses abióticos (NASCIMENTO, 2022) e para o alto acúmulo de biomassa (OLIVEIRA *et al.* 2020), como é o caso do sorgo tipo biomassa [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], com desempenho vegetativo de 150 toneladas por hectare de massa fresca (50 t ha^{-1} de matéria seca) (MAY *et al.* 2013). Entretanto, estudos de seleção que determinem a influência das diferentes condições ambientais das épocas de plantio sobre a cultura do sorgo são escassos, sendo a busca por cultivares que apresentem as melhores respostas adaptativas de extrema importância para os programas de melhoramento.

A implementação de abordagens estratégicas de adaptação, como seleção de variedades e datas de plantio, pode trazer benefícios como a manutenção e o aumento do rendimento da safra.

Diante disso, objetivou-se avaliar o desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de sorgo em função da disponibilidade de água no solo e da temperatura da época de cultivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o desempenho vegetativo e produtivo de cultivares sorgo sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica em duas épocas de plantio.

2.2 Específico

- Avaliar o desempenho fisiológico de diferentes cultivares de sorgo em função da disponibilidade hídrica e da temperatura da época de cultivo.

- Avaliar o efeito da interação época de plantio x disponibilidade hídrica sobre os parâmetros produtivos de cultivares de sorgo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

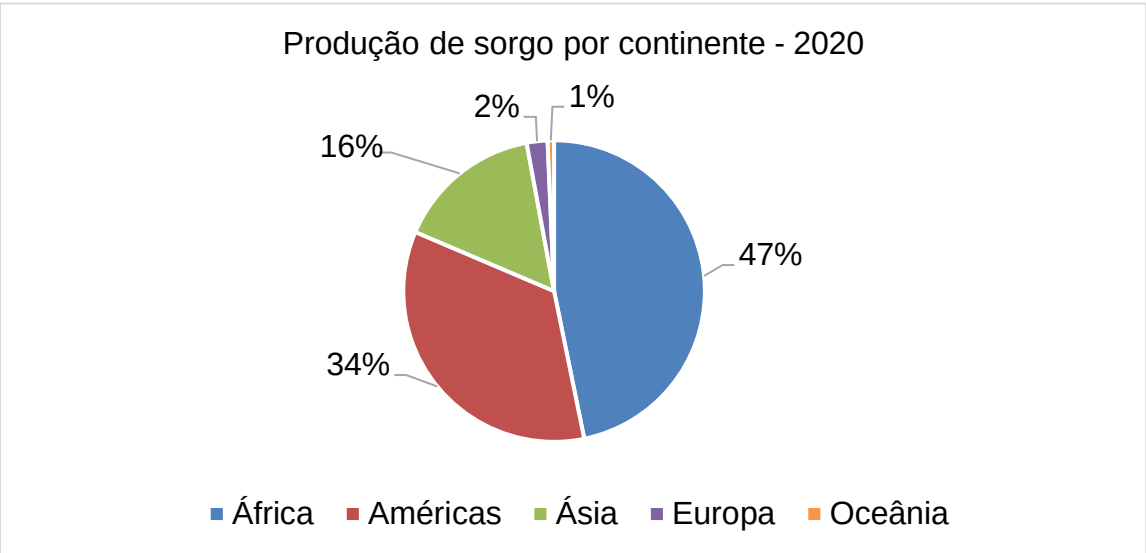
3.1 Cultura do sorgo e importância socioeconômica

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma gramínea da família Poaceae, com evidências de sua domesticação em regiões do Sudão, Etiópia e África Ocidental como centros de origem (ANANDA *et al*. 2020). No Brasil, a introdução do sorgo ocorreu na região Nordeste durante o período de colonização (RIBAS, 2014), sendo reintroduzido durante a década de 60 por meio do setor de pesquisa pública e de universidades, e ampliando sua produção a partir da década de 70, por meio do setor privado, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, São Paulo, Bahia e Paraná (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2009).

O sorgo é o quinto cereal mais produzido no mundo, sendo utilizado principalmente para produção de grãos e de forragem para alimentação animal (FAO, 2020). Além disso, pode ser utilizado como fonte alternativa de energia renovável para produção de etanol lignocelulósico e na geração de energia (elétrica, térmica e mecânica) com a queima da biomassa (PARRELLA, 2011).

Os países em desenvolvimento são responsáveis pela maior parte do sorgo produzido no mundo, com destaque para a África e as Américas, responsáveis por 47% e 34% da produção total do sorgo, respectivamente (Figura 1) (FAO, 2020).

Figura 1: Percentual de Produção do Sorgo por continente no ano de 2020.



Fonte: http://www.fao.org/faostat/en/#data/ET. Elaborado pelo autor (2022).

Segundo o levantamento de safras (2022/23) da Companhia Nacional do Abastecimento – CONAB, o Brasil atingiu uma estimativa de 1.177,9 mil hectares de área cultivada, produzindo 3,5 milhões de toneladas de produção de grãos, com produtividade de 3 t ha^{-1} (CONAB, 2023).

Durante o seu ciclo produtivo, que dura de três a quatro meses, a maioria das cultivares se desenvolvem melhor em temperaturas superiores a 21 ºC e com precipitação entre 375 e 625 mm (RIBAS, 2003). Destaca-se que o cultivo do sorgo pode ser realizado tanto em regime irrigado como em regime de sequeiro, sendo apropriado para a agricultura comercial e a de subsistência (RIBAS, 2003). Assim, em regiões onde os níveis de precipitação são insuficientes para suprir a demanda evapotranspiratória, torna-se fundamental o uso eficiente da irrigação, para que as culturas possam expressar o seu potencial agronômico e serem economicamente rentáveis (SIMÕES *et al*. 2019).

Agronomicamente, o sorgo pode ser classificado em seis grupos: o sorgo granífero, para produção de grãos; o sorgo forrageiro, para produção de silagem; o sorgo de corte e pastejo, para uso direto como forragem; o sorgo vassoura, para produção de vassoura artesanal; o sorgo sacarino, para produção de etanol; e o sorgo biomassa, que pode ser utilizado como fonte de energia térmica em usinas, ou para palhada no sistema de plantio direto (MENEZES *et al*. 2021a).

A diversidade genética entre as cultivares de sorgo distingue os materiais quanto à produtividade, morfologia, qualidade da forragem, finalidade e adaptação às condições ambientais (MAGALHÃES *et al.* 2008)

Por ser uma planta de metabolismo fotossintético C4, os processos de bioconversão de energia são mais afetados ambientalmente por radiação, disponibilidade hídrica, nutrientes e temperatura, fazendo com que o sorgo absorva e utilize o CO_2 de uma forma mais eficiente que plantas C3, tornando-o apropriado para a produção e acúmulo de biomassa (MAGALHÃES *et al*. 2008). Além disso, o uso eficiente da água, tolerância à seca e à salinidade, mecanismos de adaptação às condições edafoclimáticas que conferem tolerância aos estresses abióticos, como a presença de depósitos cerosos na junção bainha-folha, o que resulta em menor perda de água por transpiração (BUROW et al. 2009), e sistema radicular bem desenvolvido, auxiliando na absorção de água e nutrientes mesmo em solos secos, são características que favorecem o seu cultivo (SANTOS *et al*. 2015).

Dentre as cultivares de sorgo, a IAC Santa Elisa foi uma das primeiras a ser produzida em larga escala, sendo desenvolvida pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC), apresentando grande potencial forrageiro (RODRIGUES *et al.* 2021). Conhecida também como sorgo gigante, a cultivar chega a 4,4 m de altura (SAWAZAKI *et al.* 2018) e possui um ciclo longo (160 a 170 dias), com grande produtividade de massa seca (30 t ha^{-1}) e colmo suculento, porém possui baixa produtividade de grãos (PAZIANI *et al.* 2020).

Surgindo como uma cultivar promissora, o sorgo AGRI002E, também conhecido como sorgo gigante boliviano, tem ganhado destaque com seu uso em sistemas de rotação de culturas em regiões de inverno seco, além de servir como cobertura de solo e alternativa como silagem para alimentação animal (VENTURINI, 2019). Possui como principais características agronômicas o porte elevado (4 a 6 m), alto perfilhamento e fotossensibilidade (CARAFFA *et al.* 2017), com uma produção de 149 t ha^{-1} de massa fresca e 25,3 t ha^{-1} de massa seca em um ciclo fenológico que varia de 100 a 120 dias (VENTURINI, 2019).

Desenvolvida pela Embrapa Milho e Sorgo, a cultivar BRS 506 é considerada como sorgo de dupla aptidão (forrageiro/sacarino), é adaptada para a produção em larga escala, principalmente em sistemas de agricultura familiar (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2000; 2012). Apresenta um porte elevado (2,91 m), ciclo de 120 a 130 dias, colmo com alto teor de açúcares, silagem de alta qualidade e produção de 85,99 t ha^{-1} de biomassa fresca (PEREIRA FILHO *et al.* 2013). Além disso, o bagaço da cultivar BRS 506 possui um poder calorífico superior ao da cana-de-açúcar, mostrando-se muito eficaz na cogeração de energia por meio da queima. Diante das condições atuais da produção do etanol no Brasil, a cultivar também é adequada para fornecer matéria-prima de alta qualidade entre janeiro e abril, quando a produção de etanol do país cai drasticamente (DEL AGUILA *et al.* 2020)

Sendo o primeiro híbrido de sorgo biomassa desenvolvido pela Embrapa Milho e Sorgo, lançado em 2014, o sorgo BRS 716 teve como principal finalidade a geração de energia por meio da queima de biomassa. Apresenta alta produção de massa fresca (120 a 150 t ha^{-1}) e seca (50 t ha^{-1}) em um ciclo de seis meses e possui alta resistência ao acamamento e adaptação a diversas condições ambientais (LANZA, 2017). Devido a sua alta produção de biomassa e a sua composição fibrosa das folhas e colmo serem equivalentes à das cultivares forrageiras, o sorgo BRS 716 também é

visto como uma alternativa viável para o uso na alimentação animal de ruminantes (LANZA, 2017).

Desenvolvida pelo Instituto Agronômico de Pesquisa (IPA) em conjunto com a Secretaria de Agricultura de Alagoas (Seagri), a cultivar de sorgo SF 15 possui finalidades múltiplas (TABOSA *et al.* 2021). Sendo considerada forrageira/sacarina, a cultivar também é muito apropriada para silagem. Na região semiárida central, os dados para as variedades sacarinas sugerem que as baixas produtividades são afetadas por fatores edafoclimáticos. No entanto, com manejo adequado, adubação química e orgânica e irrigação, a cultivar SF 15 pode atingir níveis de produtividade experimental de 194 t ha^{-1} de massa fresca (TABOSA *et al.* 2013b) e pode chegar a 3,5 m de altura em condições específicas de fertilidade e irrigação durante o ciclo de cultivo (DIÓGENES *et al.* 2012).

A Embrapa Milho e Sorgo e a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (Emparn) desenvolveram em conjunto o sorgo forrageiro BRS Ponta Negra. É uma cultivar tolerante ao acamamento, à toxicidade do alumínio no solo e tem alta capacidade de rebrota. A BRS Ponta Negra é uma cultivar autopolinizadora, de ciclo médio (110-120 dias), cultivada para produção de feno e corte, tendo a sua produção de grãos aos 90 dias de safra (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2005). É insensível ao fotoperiodismo, a sua forragem é de alta qualidade, produz muita biomassa, é de baixo custo de produção e resistente a muitas doenças. Pode ser utilizada em áreas com poucos recursos hídricos devido ao seu caráter autopolinizador que o torna ideal para grandes e pequenos produtores do Nordeste e Semiárido brasileiro (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2005).

Além da influência genética, as diferentes características das cultivares de sorgo também são influenciadas pelos elementos climáticos, como a disponibilidade hídrica, a temperatura do ar e a radiação solar (TARDIN *et al*. 2013; ALBUQUERQUE *et al*. 2013).

3.2 Mudanças Climáticas x Agricultura

As principais consequências das mudanças do clima estão relacionadas ao aumento na frequência e na intensidade dos eventos climáticos extremos, tais como chuvas irregulares, ondas de calor e secas (IPCC, 2021). Tais consequências afetam negativamente a produção agrícola em todos os níveis, como na disponibilidade,

estabilidade de produção, acesso e utilização (PENG *et al*. 2019). Além disso, as temperaturas extremas e as chuvas irregulares impedem completamente o crescimento e desenvolvimento das culturas, especialmente em regiões tropicais, representando uma grande ameaça à segurança alimentar em todo o globo (DILLEY *et al*. 2005).

De acordo com o IPCC (2021), no Brasil as regiões semiáridas devem experimentar as maiores elevações de temperatura durante as estações mais quentes do ano, atingindo o dobro da taxa de aquecimento global. Além disso, os riscos associados à saúde, meios de subsistência, segurança alimentar, abastecimento de água, segurança humana e crescimento econômico aumentam com 1,5 °C de aquecimento global e são mais extremos em 2 °C (IPCC, 2021).

Esse aumento de 1,5 ºC da temperatura média irá reduzir as lavouras de milho, arroz, trigo e outros cereais como o sorgo, principalmente nas regiões áridas e semiáridas, que sofrem pelo menor índice de desenvolvimento econômico e social e a grande dependência da disponibilidade dos recursos naturais pelos agricultores dessas regiões (IPCC, 2021).

A implementação de medidas estratégicas de adaptação, como seleção de cultivares tolerantes à seca e às altas temperaturas e a determinação de épocas de semeadura mais adequada, poderão contribuir para reduzir os impactos negativos do aumento de temperatura e déficit hídrico, principalmente das regiões semiáridas, contribuindo com a produção e a renda dos pequenos produtores.

3.2.1 Temperatura

As atividades humanas já provocaram um impacto significativo no clima global, e ainda atuam sobre as perspectivas futuras (IPCC, 2021). Estima-se o aumento de aproximadamente 1,5 °C na temperatura média da superfície terrestre entre os anos de 2021-2040 (Tabela 1). Sem uma reação imediata para a redução da emissão dos gases de efeito estufa, no conjunto de cenários de emissões impulsionados por diferentes premissas socioeconômicas, que são os SSPs (Shared Socio-Economic Pathways - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados), no cenário SSP5 – 8,5 (cenário de emissões muito altas de Gases de Efeito Estufa) este aumento pode chegar a 1,9 ºC até 2040, e a 5,7 ºC em 2100 (IPCC, 2021).

Tabela 1: Previsão do aumento da temperatura média da superfície terrestre em diferentes cenários.

Cenário	**Curto prazo (2021-2040)**	**Curto prazo (2021-2040)**	**Médio prazo (2041-2060)**	**Médio prazo (2041-2060)**	**Longo prazo (2081-2100)**	**Longo prazo (2081-2100)**
	Melhor estimativa (ºC)	Estimativa muito provável (ºC)	Melhor estimativa (ºC)	Estimativa muito provável (ºC)	Melhor estimativa (ºC)	Estimativa muito provável (ºC)
SSP1- 1,9	1,5	1,2 a 1,7	1,6	1,2 a 2,0	1,4	1,0 a 1,8
SSP1- 2,6	1,5	1,2 a 1,8	1,7	1,3 a 2,2	1,8	1,3 a 2,4
SSP2- 4,5	1,5	1,2 a 1,8	2,0	1,6 a 2,5	2,7	2,1 a 3,5
SSP3- 7,0	1,5	1,2 a 1,8	2,1	1,7 a 2,6	3,6	2,8 a 4,6
SSP5- 8,5	1,6	1,3 a 1,9	2,4	1,9 a 3,0	4,4	3,3 a 5,7

Fonte: IPCC, 2021

A mudança gradativa na temperatura da superfície afeta negativamente a cultura do sorgo e restringe seu o potencial de rendimento (CHADALAVADA *et al*. 2021). Uma das consequências do aumento da temperatura é a desnaturação de proteínas, que perdem sua função, levando a alterações no metabolismo da planta (MAGALHÃES *et al.* 2021). De acordo com Ribas (2003) a temperatura ideal para a cultura do sorgo está entre 21-35 °C durante a germinação, 26-34 °C durante o crescimento vegetativo e 21-35 °C no crescimento reprodutivo.

Segundo Hammer e Broad (2003), o estádio reprodutivo do sorgo é mais sensível ao estresse térmico do que o estádio vegetativo. Altas temperaturas durante o início da floração podem resultar na redução do número e do tamanho dos grãos, prejudicando a produtividade (CHADALAVADA *et al*. 2021). Além disso, a exposição da planta a temperaturas acima de 40 ºC por longas horas do dia pode atrasar em até 28 dias o surgimento da panícula e em 20 dias a floração (PRASAD *et al*. 2008). O estresse térmico diminui significativamente a altura da planta na maturação, reduzindo também o número e o tamanho dos grãos, contudo, não causa nenhum impacto significativo na área foliar e no peso seco das folhas (CHADALAVADA *et al*. 2021). Durante o período de emergência da panícula, o estresse térmico diminui a duração e a taxa de enchimento dos grãos, reduzindo o tamanho e o peso dos grãos.

A temperatura exerce influência sobre diversos processos fisiológicos da planta, como a fotossíntese, a transpiração e a respiração, os quais, por sua vez,

afetam o desenvolvimento e crescimento do sorgo (QASEEM et al. 2019). Quando a temperatura se eleva demasiadamente, as proteínas podem desidratar e desnaturar, danificando as folhas e raízes do sorgo, prejudicando a produção de biomassa (CHADALAVADA et al. 2021).

Apesar disso, os genótipos apresentam diferentes respostas ao estresse térmico (PRASAD *et al*. 2015; SINGH *et al*. 2015). Sendo que o impacto no desenvolvimento da panícula e no número e peso dos grãos variam de acordo com a tolerância e susceptibilidade das cultivares de sorgo (PRASAD *et al*. 2015).

Em relação à bioquímica, o estresse térmico pode diminuir o acúmulo de amido, reduzindo a síntese e alterando a relação de amilose para amilopectina. Isto promove um impacto negativo para a indústria de biocombustíveis, pois, quando estressada, as plantas de sorgo liberam menos açúcares devido ao acúmulo e composição alterada do amido, causando redução na produção de etanol em comparação com os grãos de sorgo sem estresse (CHADALAVADA *et al*. 2021).

3.2.2 Disponibilidade hídrica

Além do aumento das temperaturas, as mudanças climáticas estão associadas à variação na disponibilidade hídrica e, como resultado, há uma tendência para mais eventos de seca em algumas partes do mundo, especialmente nas regiões áridas e semiáridas (IPCC, 2021).

A seca é caracterizada pela escassez e redução da disponibilidade de água para as plantas, o que acaba levando à ruptura da homeostase celular, impedindo que as células vegetais tolerem grandes variações de pressão em relação ao meio intersticial, além de causar a redução da assimilação de carbono, o que, por sua vez, leva a menores taxas de crescimento e, portanto, menores rendimentos (SOUZA *et al.* 2018). Esses fatores podem ser ainda mais intensos, principalmente no Semiárido nordestino, devido ao clima instável da região, que por conta das chuvas restritas e irregulares, faz com que o estresse hídrico se torne uma ameaça ainda maior à produtividade e à fisiologia das plantas (QUEIROZ *et al.* 2005; KAVAMURA *et al.* 2013; SOUSSI *et al.* 2015). Portanto, o conhecimento da resposta de genótipos tolerantes a esse estresse é necessário para programas de melhoramento genético (FRACASSO *et al.* 2016).

Comparado com outras culturas de cereais, o sorgo é mais tolerante ao déficit hídrico e, portanto, pode ser cultivado em áreas de escassez de água (DEVNARAIN *et al*. 2016). Porém, os níveis de tolerância ao déficit hídrico variam entre os seus genótipos e a fase de desenvolvimento da cultura (MAGALHÃES *et al.* 2021).

Os genótipos considerados mais tolerantes apresentam maior rendimento de biomassa e maior índice de tolerância em condições de menor teor de umidade do solo, além de alta capacidade de restaurar o aparato foliar após estresse hídrico (FRACASSO *et al.* 2016).

Em estresse severo, a deficiência hídrica no sorgo leva a uma redução no nitrogênio foliar, resultando em desequilíbrio de carbono e nitrogênio nas folhas maduras, induzindo à senescência foliar, o que resulta na redução da produtividade dessas plantas (CHEN *et al.* 2015). Além da expressão diferencial de genes marcadores de senescência, as folhas senescentes geralmente apresentam sintomas de redução na fotossíntese, na eficiência fotoquímica do fotossistema II e no teor de clorofila (CHEN *et al.* 2015).

Segundo Kranner *et al*. (2010), a falta de água durante a floração resulta na redução da taxa fotossintética, com o fechamento dos estômatos e perda substancial de produtividade do sorgo. Assim, o estresse causado pela deficiência hídrica aumenta a fotorrespiração e a concentração interna de oxigênio, resultando na formação de espécies reativas de oxigênio que levam a morte celular, reduzindo assim, a produção da matéria seca total (PERRY *et al*. 1983; TERBEA *et al*. 1995).

O déficit hídrico durante a fase vegetativa impossibilita o desenvolvimento de pólen e óvulos, impedindo a fertilização e causando aborto prematuro de óvulos fertilizados (SAINI, 1997; McWILLIAMS, 2003), como resultado têm-se redução no número de panículas, no número e tamanho do grão. O déficit hídrico após a floração pode reduzir o tamanho e o número grãos por planta em até 55 e 36%, respectivamente (ASSEFA *et al*. 2010). Essa redução está relacionada à diminuição da duração do período de enchimento dos grãos em função da deficiência hídrica (IMPA *et al*. 2019). Geralmente, uma cultivar de sorgo de maturação média à tardia requer 375-625 mm de água durante a estação de crescimento (FAO, 2002; RIBAS, 2009), embora as necessidades diárias dependam da fase de crescimento.

Diante disso, o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca, com a ajuda do melhoramento genético, pode contribuir de maneira significativa como medida para

aumentar/manter a produtividade, como também fornecer genótipos para sistemas de produção sustentáveis (CHADALAVADA *et al*. 2021).

3.3 Adaptabilidade às mudanças climáticas

A inovação tecnológica desempenha um grande papel na agricultura moderna, principalmente diante das preocupações sobre questões ambientais. A busca pelo uso sustentável de recursos tem se tornado cada vez mais comum, uma vez que condições climáticas extremas surgem como os maiores e mais difíceis obstáculos a serem superados (LEITE, 2008).

O déficit hídrico, altas temperaturas, os solos inférteis e não agricultáveis, são alguns dos desafios enfrentados pela agricultura. Esses desafios são cada vez mais agravados pela ação antrópica que por uso irracional do solo e dos recursos hídricos, acabam degradando áreas agricultáveis, além de intensificar os efeitos do aquecimento global, deixando cada vez mais irregular o período chuvoso em diversas regiões, em especial em regiões áridas e semiáridas (ANGELOTTI e GIONGO, 2019).

Diante disso, destaca-se a importância da realização de trabalhos com foco nas inovações tecnológicas voltada às mudanças climáticas, tais como melhor manejo dos recursos hídricos e uso de genótipos adaptados, principalmente em regiões em desenvolvimento e que estão mais vulneráveis às condições ambientais (ANGELOTTI e GIONGO, 2019; LEITE, 2008). Um conhecimento mais aprofundado nessa área é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de adaptação que sejam mais efetivas para alcançar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Além do mais, a busca pela segurança alimentar tem se tornado cada vez mais global, deixando de ser um problema apenas das regiões em desenvolvimento (LEITE, 2008)

As mudanças climáticas se consolidam como um importante componente de risco para a manutenção dos sistemas agrícolas. Diante dessa situação, as estratégias de adaptação passam a ser a base para mitigar os impactos e sustentar a agricultura mundial (ANGELOTTI e GIONGO, 2019). Para isso, o desenvolvimento tecnológico é fundamental, no sentido de fornecer alternativas que permitam aos sistemas de produção serem mais adaptáveis e, assim, responder satisfatoriamente às demandas do mundo em crescimento (LEITE, 2008)

O potencial do sorgo no Semiárido e as diversas características e usos das cultivares têm levado instituições de pesquisa, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa e o Instituto Agronômico de Pesquisa – IPA, a continuar estudando diferentes parâmetros de produção e aproveitamento da cultura. Essas práticas são essenciais para a seleção e desenvolvimento de cultivares, aumentar e atender às necessidades agrícolas (TABOSA *et al.* 2021).

Diante da tolerância às condições físicas ambientais, dois aspectos estão intimamente relacionados à adaptabilidade do sorgo. O primeiro é desenvolver material genético que possa tolerar oscilação de curto prazo nas condições ambientais. Outro aspecto está relacionado com a formação de cultivares com específica adaptação com objetivo de serem introduzidos em locais onde as condições ambientais são restritas devido às questões naturais (MENEZES *et al.* 2021; CASTRO *et al*. 2015).

Tendo em vista as peculiaridades e possibilidades de melhoramento, é fundamental a obtenção de materiais cada vez mais adequados como medida de adaptação às mudanças climáticas. A ênfase na busca por novas cultivares adaptadas a diferentes ambientes e condições ambientais como altas temperaturas, estresse hídrico e salinidade do solo, é a base para melhoramento genético e produtivo do sorgo (MENEZES *et al.* 2021). Dentro desse contexto, o sorgo tipo biomassa é visto no mercado como uma cultura promissora, sendo procurada principalmente devido às suas características agronômicas, tendo destaque para a sua tolerância aos estresses abióticos e pelo alto acúmulo de biomassa (OLIVEIRA et al. 2020).

3.4 Sorgo biomassa

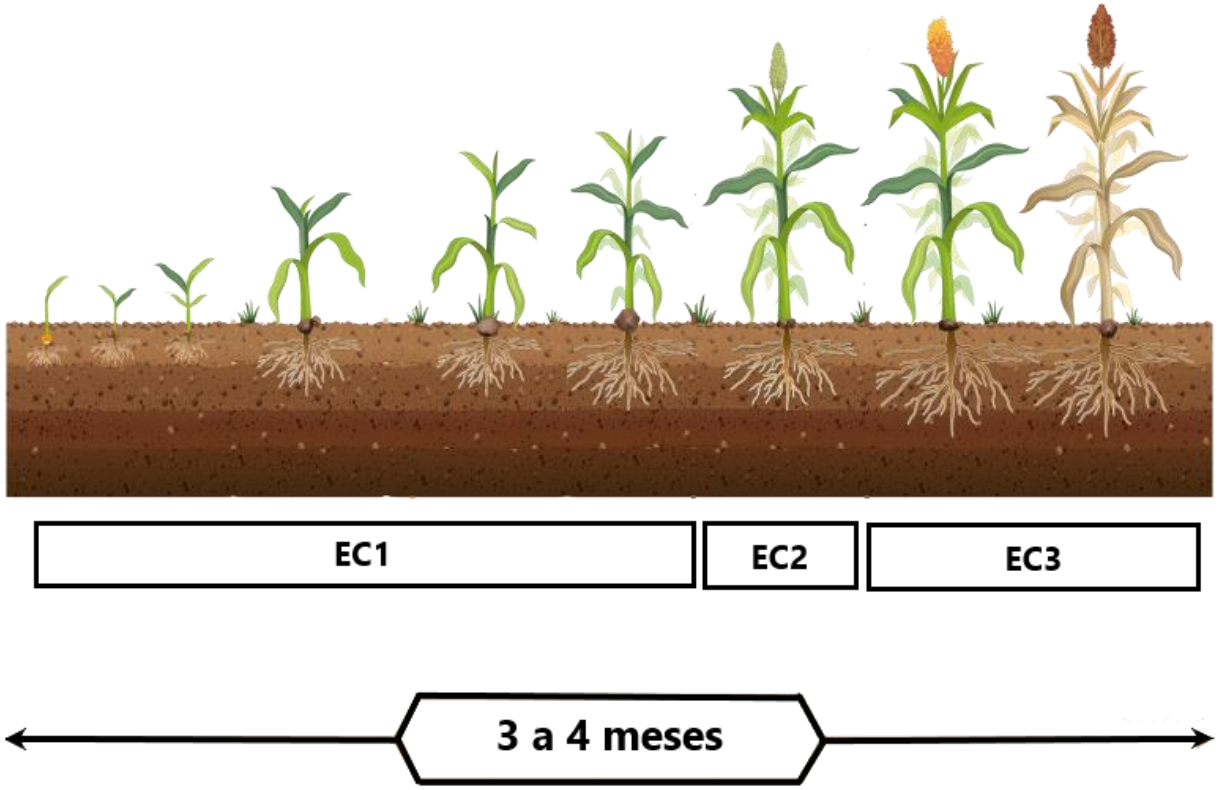
O sorgo biomassa está entre as culturas alternativas potencialmente energéticas, devido à sua versatilidade como fonte de amido, açúcar e lignocelulose (LANZA, 2017). Desta maneira, este grupo tem ganhado destaque em estudos como matéria-prima para uso na produção de eletricidade por meio da queima da sua biomassa (SILVA *et al*. 2016). Além disso, o sorgo biomassa possui desempenho em múltiplos usos, como na produção de forragem (BORGHI *et al*. 2020; LANZA, 2017), de biomassa adaptável para as novas tecnologias, como o desenvolvimento de insumos químicos renováveis (CARRILLO *et al.* 2014), e uso na produção de biocombustíveis (PARRELLA *et al*. 2014).

O sorgo biomassa vem apresentando grande destaque no cenário brasileiro, principalmente devido à sua alta capacidade produtiva, com potencial para produzir mais de 50 toneladas por hectare de matéria seca por ciclo, quando cultivado em regiões de clima tropical (PARRELLA, 2010), e devido ao seu porte alto e colmo fibroso (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2014). Além disso, o sorgo biomassa possui a particularidade de ser sensível ao fotoperíodo, o que possibilita o aumento no seu ciclo produtivo, e por consequência, maior produção de biomassa por hectare, em comparação com as cultivares insensíveis ao fotoperíodo (PARRELLA *et al*. 2010; PEREIRA *et al*. 2012). Ademais, é uma cultura totalmente mecanizável, sendo cultivada na entressafra da cana-de-açúcar, principalmente na região Centro-Sul do Brasil (MAY *et al.* 2013), durante os meses de dezembro a abril, fazendo com que haja uma redução no período de ociosidade das usinas e termoelétricas e gerando mais renda (PARRELLA *et al*. 2011; CASTRO, 2014).

3.4.1 Etapas de crescimento (EC) do sorgo biomassa

O período de crescimento e desenvolvimento do sorgo pode ser classificado em três fases: vegetativa (EC1), reprodutiva (EC2) e maturação do grão (EC3) (Figura 2) (MAGALHÃES *et al.* 2021).

Figura 2: Fases de crescimento do sorgo biomassa



Fonte: Adaptado de IQCHEM (2019).

A primeira etapa (EC1) é caracterizada pela germinação, surgimento da plântula, crescimento das folhas e estabilização do sistema radicular fasciculado. Durante essa fase diversos elementos climáticos podem afetar o rendimento produtivo, como a radiação, a temperatura e a água. Além disso, nutrientes e presença de pragas podem provocar redução na quantidade de espiguetas viáveis que irão se desenvolver na próxima fase de crescimento (CASTRO, 2018).

A segunda etapa (EC2) tem início a partir da distinção do meristema apical em meristema floral e completa com o florescimento de 50% da panícula. Nesse período, a planta inicia o processo gradual de acúmulo de matéria seca, chegando a atingir cerca de 60 a 70% de massa seca total. O desenvolvimento da panícula está completo quando a extensão dos entrenós alcança o seu tamanho potencial, definindo a altura final da planta. Qualquer estresse sofrido pela planta durante esse período pode causar prejuízos no seu rendimento produtivo, como redução do tamanho da planta e da área foliar, e do número de grãos por panícula (MENEZES *et al*. 2015).

A terceira etapa (EC3) corresponde à maturação dos grãos e senescência das folhas. A duração do estágio e o acúmulo da matéria seca no grão são os fatores determinantes para o rendimento e a qualidade. É nessa etapa que o sorgo alcança a maturação fisiológica, sendo que os genótipos mais sensíveis ao fotoperíodo chegam nessa fase com 135 a 185 dias (VON PINHO *et al.* 2014). Segundo Parrella *et al*. (2010), a sensibilidade ao fotoperíodo promove um ciclo vegetativo mais prolongado quando as plantas são cultivadas em épocas de dias mais longos (>12h).

A análise das etapas de crescimento, ou fenologia, é determinada como a caracterização das condições morfofisiológicas da planta em diferentes períodos, sendo vista como um método eficiente para avaliar a contribuição dos processos fisiológicos durante as diferentes fases da cultura, bem como a produtividade e as respostas da planta a diferentes ambientes e manejos (CASTRO, 2018).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. J. B.; JARDIM, R. R.; ALVES, D. D.; GUIMARÃES, A. S.; PORTO, E. M. V. **Características agronômicas e bromatológicas dos componentes vegetativos de 53 genótipos de sorgo forrageiro em Minas Gerais**. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 12, n. 2, p.164-182, 2013.

ANANDA G.K.; MYRANS H.; NORTON S.L.; GLEADOW R.; FURTADO A.; HENRY R.J. **Wild sorghum as a promising resource for crop improvement.** Frontiers in Plant Science, v 11, p. 1108, 2020.

ANGELOTTI, F.; GIONGO, V. Ações de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. In: MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. (Orgs.). **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**, p. 445-467, 2019.

ASSEFA, Y.; STAGGENBORG, S. A.; PRASAD, V. P. **Grain sorghum water requirement and responses to drought stress**: **a review.** Crop Manage, v. 9, p. 1–11, 2010.

BARROS, J.R.A; GUIMARÃES, M.J.M.; SIMÕES, W.L.; MELO, N.F.; ANGELOTTI, F. Temperature: A major climatic determinant of cowpea production. Acta Scientiarum Agronomy. v, 45(1), e56812, 2023.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. As plantas e o clima: Princípios e aplicações. Guaíba: Agrolivros, 2017. 352p.

BORGHI, E., SILVA, G. F., CALONEGO, J. C., PARRELLA, R. A. C., ANTÔNIO, M. S. **Sorgo biomassa BRS 716 para produção de forragem e palha em sistema de plantio direto e preparo convencional com soja.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 25p. 2020. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 216).

BRITO, S.S.B., CUNHA, A.P.M.A., CUNNINGHAM, C.C., ALVALÁ, R.C., MARENGO, J.A. AND CARVALHO, M.A. **Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region**. Int. J. Climatol, v. 38, p. 517-529, 2017.

BUROW, G. B.; FRANKS, C. D.; ACOSTA-MARTINEZ, V.; XIN, Z. **Molecular mapping and characterization of BLMC, a locus for profuse wax (bloom) and enhanced cuticular features of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.).** Theoretical Applied Genetics, v. 118, p. 423-431, 2009.

CARAFFA, M.; RIFFEL, C.T.; CARNEIRO, E.A.; ZAWACKI, M.E.; WITCZAK, G.P. **Ensaio Estadual de avaliação de genótipos de sorgo silageiro-sacarino, Três de Maio, RS, na safra 2016/17.** Anais... 45º Reunião Técnica Anual da Pesquisa do sorgo. p.182-185, 2017.

CARRILLO, M. A.; STAGGENBORG, S. A.; PINEDA, J. A. **Washing sorghum biomass with water to improve its quality for combustion.** Fuel, v. 116, p. 427-431, 2014.

CASTRO, F. M. R. **Acúmulo de biomassa e compostos lignocelulósicos em híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo.** Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia), 75p. Lavras, MG, 2018.

CASTRO, F. M. R., LOMBARDI, G. M. R., NUNES, J. A. R., DA COSTA PARRELLA, R. A., & BRUZI, A. T. **Accumulation of biomass and lignocellulosic compounds in photoperiod-sensitive biomass sorghum genotypes.** Biomass and Bioenergy, v. 158, p. 106344, 2022. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106344

CASTRO, F. M. R.; BRUZI, A. T.; NUNES, J. A. R.; PARRELLA, R. A. C.; LOMBARDI, G. M. R.; ALBUQUERQUE, C. J. A.; LOPES, M. **Agronomic and energetic potential of biomass sorghum genotypes.** American Journal of Plant Sciences, v. 6, n. 6, p. 1862-1873, 2015.

CASTRO, F. M. R. **Potencial agronômico e energético de genótipos de sorgo biomassa**. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal), 84p. Lavras, MG, 2014.

CHADALAVADA, K.; KUMARI, B.D.R.; KUMAR, T.S. **Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality**. Planta, v. 253, p. 1–19, 2021.

CHEN, D.; WANG, S.; XIONG, B.; CAO, B.; DENG, X. **Carbon/nitrogen imbalance associated with drought-induced leaf senescence in *Sorghum bicolor*.** PloS One, v. 10, n. 8, 2015.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v.10, safra 2022/23, n.6, 2023.

DEL AGUILA, L.S.H.; GEHLING, R. K.; CAPUTO, T. D. F. M.; DEL AGUILA, J. S. **Melhor arranjo de plantas para os genótipos de sorgo sacarino BR 506 e BR 511 visando à produção de etanol.** Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 3, n. 2, p. 648-653, 2020.

DEVNARAIN, N.; CRAMPTON, B. G.; CHIKWAMBA, R.; BECKER, J. V. W.; O'KENNEDY, M. M. **Physiological responses of selected African sorghum landraces to progressive water stress and re-watering.** South African jornal of Botany, v. 103, p. 61-69, 2016.

DILLEY M, CHEN RS, DEICHMANN U, LERNER-LAM AL, ARNOLD M. **Natural disaster hotspots: a global risk analysis.** World Bank, Washington, 2005.

DIÓGENES, C.N. et al. **Desempenho de cultivares de sorgo com potencial forrageiro para o Vale do Açu-RN.** Revista Científica de Produção Animal, v. 14, p. 29-31, 2012.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **BRS 506 o sorgo sacarino mais testado e plantado no brasil.** Folheto. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **BRS 506: Sorgo forrageiro.** Folheto. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo: Embrapa Negócios Tecnológicos, 2000.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **BRS BRS Ponta Negra: sorgo com grande potencial forrageiro.** Folheto. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo; Brasília: Embrapa Transferência de Tecnologia, 2005.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistemas de Produção**, Versão Eletrônica – 5ª edição Set./2009 Produção de sorgo, 2009.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **Cultivo do sorgo**. Brasília, 2014.

FAO. **FAOSTAT Production crops.** Online, 2020. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC. Acesso em: 19 dez. 2022.

FAO. **Crop water management.** Online. AGLW Water Management Group, United Nations FAO, Rome, Italy, 2002.

FRACASSO, A.; TRINDADE, L. M.; AMADUCCI, S. **Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-Seq in two sorghum genotypes with contrasting** WUE. BMC Plant Biology, v. 16, article 115, 2016.

HAMMER G. L.; BROAD I. J. **Genotype and environment effects on dynamics of harvest index during grain filling in sorghum**. Agronomy Journal, v. 95, p. 199–206, 2003.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M. B.; ANEE, T. I.; PARVIN, K.; NAHAR, K.; MAHMUD, J. A.; FUJITA, M. **Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic atress**. Antioxidants v. 8, p. 384, 2019.

IMPA S. M.; PERUMAL R.; BEAN S. R.; SUNOJ V. J.; JAGADISH S. K.; **Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum.** Cereal Science, v. 86, p. 124–131, 2019.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. International Panel on Climate Change, 2021.

IQCHEM. **Sorgo.** 2019. Disponível em:<https://www.iqchem.mx/sorgo/>. Acesso: 20 de nov de 2021.

JUMRANI K.; BHATIA V. S. **Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean**. Physiology and Molecular Biology of Plants, v. 24, p. 37–50, 2018.

KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L.; PARMA, M. M.; ÁVILA, L.A.; VISCONT, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO I. S. **Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought.** Microbiological Research, v 168, p. 183–191, 2013.

KRANNER, I; MINIBAYEVA, F. V.; BECKETT, R. P; SEAL, C. E. N**ornal stress? Concepts, definitions ad applications in seed Science.** New Phytologist, v. 188, n. 3, p. 655-673, 2010.

LANZA, A. L. L. **Avaliação forrageira do sorgo biomassa (BRS 716) em diferentes épocas de corte e estratégias de adubação em cobertura.** 63p. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal do São João del Rei, Sete Alagoas: Universidade Federal de São João del -Rei, 2017.

LEITE, J. G. D. B. **Inovação tecnológica na agricultura como estratégia de adaptação às mudanças climáticas:** um estudo de caso. Dissertação(mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, 2008.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Ecofisiologia.** In: Cultivo do Sorgo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. (Sistemas de Produção 2), 2008.

MAGALHÃES, P. C.; DURAES, F.; SCHAFFERT, R. E. **Fisiologia da planta de sorgo.** Sete Lagoas (MG): Embrapa, 2008, 46p. (EMBRAPA – CNPMS (Circular Técnica, 3).

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; SOUZA, K. R. D. **Biologia e fisiologia do sorgo.** In: MENEZES, C.B. Melhoramento genético de sorgo. Embrapa, Brasília, DF. p. 81-114, 2021.

MARENGO, J.A., GALDOS, M.V., CHALLINOR, A., CUNHA, A.P., MARIN, F.R., VIANNA, M.D.S., ALVALA, R.C.S., ALVES, L.M., MORAES, O.L. & BENDER, F. (2022) **Drought in Northeast Brazil:** A review of agricultural and policy adaptation options for food security. Climate Resilience and Sustainability, v. 1, e17, 2021. https://doi.org/10.1002/cli2.17

MAY, A.; MENDES, S. M.; SILVA, D. D.; PARRELLA, R. A. C.; MIRANDA, R. A. de; SILVA, A. F.; PACHECO, T. F.; AQUINO, L. A. de; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; KARAM, D.; PARRELLA, N. N. L. D.; SCHAFFERT, R. E. **Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 36p, 2013. (Circular Técnica, 186)

MCWILLIAMS, D. **Drought strategies for corn and grain sorghum.** Cooperative Extension Service, v. 580. New Mexico State University, Las Cruces, NM, 2003.

MENEZES, C.M.; FERNANDES, E.A.; PARELLA, R.A.C.; SCHAFFERT, R.E.; RODRIGUES, J.A.S. **Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil.** In: MENEZES, C.B. Melhoramento genético de sorgo. Embrapa, Brasília, DF. 2021a.

MENEZES, C.B.; SILVA K.J.; SANTOS C.V. **Melhoramento genético do sorgo granífero.** 2021. In: MENEZES, C. B. Melhoramento genético de sorgo. Embrapa, Brasília, DF. p.13-58. 2021b.

MENEZES, C.B.; RIBEIRO, A.D.S.; TARDIN, F.D.; CARVALHO, A.J.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; PORTUGAL, A.F.; SILVA, K.J.; SANTOS, C.V.; ALMEIDA, F.H.L. **Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgo em ambientes com e sem restrição hídrica.** Embrapa Meio Norte, 2015.

NASCIMENTO, G.S.G. **Tolerância de cultivares de sorgo à alta temperatura para o polo gesseiro do Araripe.** 90p. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade de Pernambuco, Petrolina, 2022.

OECD, 2016. **Agriculture and Climate Change:** Towards Sustainable, Productive and Climate-Friendly Agricultural Systems. OECD Meeting of Agriculture Ministers, Bachground note, 2016. Disponível em: <https://www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/4_background_note.pdf.>. Acesso em: 17 nov. 2021.

OLIVEIRA, I. C. M., GUILHEN, J. H. S., DE OLIVEIRA RIBEIRO, P. C., GEZAN, S. A., SCHAFFERT, R. E., SIMEONE, M. L. F., ... & PASTINA, M. M. (2020**). Genotype-by-environment interaction and yield stability analysis of biomass sorghum hybrids using factor analytic models and environmental covariates.** Field Crops Research, p. 257, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107929

PARRELLA, R. A. C. **Desempenho agronômico de híbridos de sorgo biomassa.** Sete Lagoas: EMBRAPA MILHO E SORGO, 2011. 19p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 41).

PARRELLA, R. A. C.; MENEZES, C. B.; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. **Sorgo do plantio à colheita.** Viçosa: Editora UFV, 275p, 2014.

PARRELLA, R. A. C.; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIN, F. D.; DAMASCENO, C. M. B.; SCHAFFERT, R. E. **Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa.** Sete lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 25p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 28).

PAZIANI, S.F.; FREITAS, R.S.; DUARTE, A.P.; TICELLI, M.; SAWAZAKI, E.; NUSSIO, L.G.; MARTINS, A.L.M.; GALLO, P.B. **Sorgos "gigantes" para silagem.** Brazilian Journal of Development, 6(12), p. 99936-99946, 2020.

PENG W.; BERRY E. M.; FERRANTI P.; BERRY E., ANDERSON J. **The concept of food security**. Encycl Food Secur Sustainability, v. 2, p. 1–7, 2019.

PEREIRA FILHO, I. A. et al. **Avaliação de cultivares de sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] em diferentes densidades de semeadura visando a características importantes na produção de etanol.** Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 12, n. 2, p. 118-127, 2013.

PEREIRA, G. A. *et al*. **Desempenho agronômico de híbridos de sorgo biomassa**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, Águas de Lindóia. Anais. Águas de Lindóia: [s. n.], 2012.

PERRY S. W.; KRIEG D. R.; HUTMACHER R. B. **Photosynthetic rate control in cotton.** Plant Physiol, v. 73, p. 662–665, 1983.

PRASAD PVV, DJANAGUIRAMAN M, PERUMAL R, CIAMPITTI IA. **Impact of high temperature stress on floret fertility and individual grain weight of grain sorghum: sensitive stages and thresholds for temperature and duration.** Front Plant Science, v. 6, p. 820, 2015.

PRASAD P. V. V.; PISIPATI S. R.; MUTAVA R. N.; TUINSTRA M. R. **Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development.** Crop Science, v. 48, p. 1911–1917, 2008.

QASEEM, M.F.; QURESHI, R.; SHAHEEN, H. **Effects of pre-anthesis drought, heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat (Triticum aestivum L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress.** Sci. Rep. v, 9. p. 6955, 2019.

QUEIROZ, L. P.; RAPINI, A.; GIULIETTI, A. M. **Rumo ao amplo conhecimento da biodiversidade do Semiárido brasileiro.** Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília, 2005.

RIBAS, P. M. **Origem e importância econômica**. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELA, R. Sorgo**:** do plantio à colheita. Editora UFV, 275p, 2014.

RIBAS, P. M. **Sorgo:** introdução e importância, Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas MG, 16p, 2003.

RODRIGUES, J. A. S.; JULIO, B, H. M.; MENEZES. C. B. **Melhoramento genético de sorgo forrageiro.** In: MENEZES, C.B. **Melhoramento genético de sorgo.** Embrapa, Brasília, DF. 2021.

SAINI, H.S. **Effects of water stress on male gametophyte development in plants.** Sex Plant Reprod. V. 10, p. 67–73, 1997.

SANTOS, R.F.; PLACIDO, H.F.; GARCIA, E.B.; CANTÚ, C.; ALBRECHT, A.J.P.; ALBRECHTL. P.; FRIGO, K.D.A**. Sorgo sacarino na produção de agroenergia.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, p. 1-12, 2015.

SAWAZAKI, E.; FREITAS, R.S.; GALLO, P.B.; PAZIANI, S.F.; DUARTE, A.P.; SILVA, P.H.G. **Produtividade de sorgo sacarino e forrageiro em duas épocas de semeadura em Campinas-SP.** In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 32, 2018, Lavras). Anais...Lavras: ABMS, 2018. P. 214. ISBN: 978-85-63892-08-9.

SILVA, A. L.; TARDIN, F. D.; ROTTA, G. W.; BALDONI, A. B.; BARELLI, M. A. A.; SILVA, A. F.; GONÇALVES, D. R.; SILVA, F. B.; RIBEIRO, J. R. D.; PARRELLA, R. A. C. **Characterization of biomass sorghum cultivars aiming to generate energy for the north region of Mato Grosso, Brazil.** Nativa, v. 4, n. 3, p. 175-178, 2016.

SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; GUIMARÃES, M. J. M.; OLIVEIRA, A. R.; PINHEIRO, M. P. M. A. **Sugarcane crops with controlled water deficit in the sub-middle São Francisco Valley, Brazil**. Revista Caatinga, v. 31, p. 963-971, 2019.

SINGH V.; NGUYEN C.T.; VAN OOSTEROM E.J.; CHAPMAN S.C.; JORDAN D.R.; HAMMER G.L. **Sorghum genotypes differ in high temperature responses for seed set.** Field Crops Research, v. 171, p. 32-40, 2015.

SOUSSI, A.; FERJANI, R.; MARASCO, R.; GUESMI, A.; CHERIF, H.; ROLLI, E.; MAPELLI, F.; OUZARI, H. I.; DAFFONCHIO, D.; CHERIF, A. **Plant-associated microbiomes in arid lands: diversity, ecology and biotechnological potential.** Plant Soil, p.1-14, 2015.

SOUZA, T. C. de; SOUZA, K. R. D. de; MAGALHÃES, P. C. **Respostas morfofisiológicas do milho e sorgo sob déficit hídrico.** In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 32., 2018, Lavras. Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil: livro de palestras. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, p. 576-621, 2018.

TABOSA, J. N.; BARROS, A. H. C.; BRITO, A. R.de M. B.; SIMPLÍCIO, J. B. Cultivo do sorgo no semiárido brasileiro: potencialidades e utilizações. In: FIGUEIREDO, M. do V. B.; SILVA, D. M. P. da; TABOSA, J. N. BRITO, J. Z. de; FRANÇA, J. G. E. de; WANDERLEY, M. de B.; SANTOS FILHO, A. S. dos; GOMES, E. W. F.; LOPES, G. M. B.; OLIVEIRA, J. de P.; SANTIAGO, A. D.; SILVA, F. G. da; PACHECO, M. I. N.; SILVA, C. C. F. da. (eds.). **Tecnologias potenciais para uma agricultura sustentável**. Recife: IPA/EMATER/SEAGRI-AL. p. 133–162, 2013a.

TABOSA, J. N. *et al.* **Melhoramento genético do sorgo para o semiárido brasileiro.** In: MENEZES, C.B. Melhoramento genético de sorgo. Embrapa, Brasília, DF. p.13-58. 2021.

TABOSA, J. N.; SILVA, F. G.; NASCIMENTO, M. M. A.; AZEVEDO NETO, A. D.; BRITO, A. R. M. B.; SIMPLÍCIO, J. B.; MESQUITA, F. L. T.; SANTANA, J. A. **Genótipos de sorgo forrageiro e sacarino no semiárido – estimativas de parâmetros genéticos de variáveis de produção em Alagoas e Pernambuco.** Revista Magistra, v. 25, p. 328–329, 2013b.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, E. Z. I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TARDIN, F. D.; ALMEIDA FILHO, J. E.; OLIVEIRA, C. M.; LEITE, C. E. P.; MENEZES, C. B.; MAGALHÃES, P. C.; RODRIGUES, J. A. S.; SCHAFFERT, R. E. **Avaliação agronômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e estresse hídrico**. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 12, n. 2, p.102-117, 2013.

TERBEA, M., VRANCEANU A. V.; PETCU E.; CRAICIU D. S.; MICUT G. **Physiological response of sunflower plants to drought.** Romanian Agriculture Research, v. 3, p. 61–67, 1995.

VENTURINI, T. **Caracterização da silagem do sorgo forrageiro AGRI 002E e utilização na alimentação de bovinos.** 2019. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2019.

VON PINHO, R. G.; FIORINI, I. V. A.; SANTOS, A. O. Botânica. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L. D.; PARRELLA, R. A. C. (Ed.). **Sorgo: do plantio à colheita.** Viçosa, MG: UFV. 275p, 2014

CAPÍTULO 1: Disponibilidade hídrica e temperatura da época de cultivo no desempenho de cultivares de sorgo

Resumo

O rendimento dos plantas é afetado diretamente pelo aumento da temperatura do ar e pela disponibilidade de água no solo. Diante disso, objetivou-se avaliar o desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de sorgo em função da disponibilidade de água no solo e da temperatura da época de cultivo. O experimento foi conduzido com delineamento experimental em blocos casualizados, em arranjo fatorial 2x6x4, sendo duas épocas de cultivo (Época 1: plantio em junho; Época 2: plantio em janeiro), seis cultivares de sorgo (AGRI002E, BRS 716, BRS 506, SF 15, IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra) e quatro níveis de disponibilidade hídrica (25; 50; 75 e 100%), com quatro repetições. Foram avaliadas: a massa seca total (g), a eficiência no uso da água (EUA), a fotossíntese, a condutância estomática, a transpiração e a temperatura foliar. As cultivares de sorgo apresentaram respostas diferenciadas frente ao aumento da temperatura do ar (em diferentes épocas de plantio) e o déficit hídrico. As cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra produziram maior quantidade de massa seca quando plantadas em junho, com temperaturas máximas variando de 26 a 34 ºC e 100% de disponibilidade hídrica. A cultivar AGRI002E apresentou maior produção de massa seca na época com as temperaturas mais altas (temperatura máxima entre 27,9 e 36,6 ºC), demonstrando adaptação ao aumento da temperatura. A cultivar AGRI002E apresentou a maior taxa de fotossíntese, condutância estomática e transpiração foliar entre as demais cultivares na época 2, com 100% da capacidade de retenção de água do solo.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.) Moench; mudanças climáticas; estresse abiótico; fisiologia.

Introdução

O Semiárido brasileiro possui características ambientais e climáticas peculiares, com precipitação irregular, variando de 400 a 800 mm e períodos de seca com duração de seis a oito meses (Araújo Filho et al. 2019). Diante desse desafio, pesquisas que forneçam tecnologias específicas locais, tais como o uso eficiente da água e a seleção de cultivares tolerantes ao déficit hídrico e às altas temperaturas são importantes para a manutenção da atividade agropecuária na região (Barros et al. 2023).

Nesse contexto, o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] é uma alternativa de cultivo por apresentar uma significativa tolerância às condições estressantes de déficit hídrico e elevadas temperaturas, condições comuns em regiões semiáridas (Chadalavada et al. 2021), e pelo seu potencial produtivo de uso múltiplo, podendo ser utilizado para a produção de grãos de alta qualidade, e para a produção de silagem (Tabosa et al. 2020) e alimentação humana (Kanti Meena et al. 2022). Além de sua utilização como biomassa com potencial para a queima e para produção de biocombustíveis (Pimentel et al. 2017, Silva et al. 2018). Essas características contribuem para sua colocação como o quinto cereal mais cultivado no mundo (FAO 2022).

De acordo com Ribas (2003), a temperatura ideal para o cultivo do sorgo depende das diferentes fases fenológicas, sendo entre 21-35 °C para a germinação, 26-34 °C para o crescimento vegetativo e 21-35 °C na fase de reprodução. Além disso, as plantas necessitam de 330 kg de água para produzir um quilograma de massa seca (Magalhães et al. 2010). Desse modo, as alterações previstas pelos cenários climáticos, com aumento da temperatura do ar e períodos de seca prolongados (IPCC 2021) representam um alerta para o potencial produtivo do sorgo, uma vez que a maioria das regiões produtoras de sorgo se caracterizam por altas temperaturas e baixa disponibilidade hídrica (Eggen et al. 2019, Prasad et al. 2021). Assim, a seleção de cultivares tolerantes ao aumento da temperatura e ao déficit hídrico é uma das medidas de adaptação que pode contribuir para manutenção e/ou o aumento da produção de sorgo.

Para entender a resposta das cultivares frente aos cenários futuros, Nascimento (2022) avaliou, em condições controladas, a resposta de cultivares de sorgo sob o aumento de 4,8 e 6,3 ºC na temperatura do ar. Este aumento afetou positivamente a produção da massa seca do sorgo, demonstrando a tolerância da

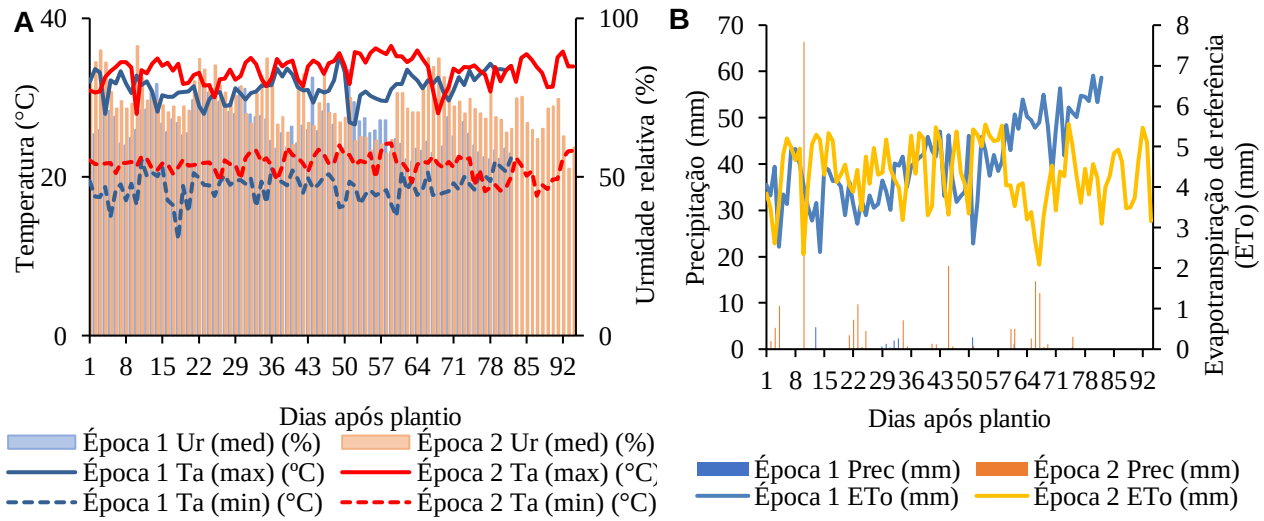
cultura a altas temperaturas. Entretanto, em ambiente natural, os estresses abióticos não ocorrem de maneira isolada e o impacto do déficit hídrico depende da interação com a temperatura do ar (Jumrani e Bhatia 2018). Sendo que a demanda de água pelas plantas tende a aumentar sob altas temperaturas, com maiores perdas de água devido à evapotranspiração, reduzindo a água disponível para as plantas (Bergamaschi e Bergonci 2017).

Além disso, a sensibilidade aos estresses depende do estágio de desenvolvimento. Obter informações sobre esses aspectos pode fornecer uma linha de base para melhorar ainda mais a tolerância ao estresse abiótico no sorgo, principalmente em cultivares utilizadas em regiões áridas e semiáridas. Com isso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho produtivo e fisiológico de cultivares sorgo sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica em duas épocas de plantio.

Material e métodos

O experimento foi realizado na Embrapa Semiárido, localizado na cidade de Petrolina-PE (9º 8’ 8,9” S 40° 18’ 33,6” W). O estudo foi conduzido em duas épocas de cultivo, na primeira época, o plantio foi realizado no mês de junho de 2021 e na segunda época, o plantio foi em janeiro de 2022. Os dados climáticos obtidos estão dispostos na Figura 3.

Figura 3. (A) Temperatura máxima (Ta max (°C)), temperatura mínima (Ta min (°C)), umidade relativa média (Ur med (%)), **(B)** precipitação (Prec (mm)) e evapotranspiração de referência (ETo (mm)) em duas épocas de plantio de sorgo.



A temperatura máxima variou entre 26,6 e 34,2 ºC na primeira época, e entre 27,9 e 36,6 ºC na segunda época de cultivo.

experimento foi conduzido em blocos casualizados, no arranjo fatorial 2x6x4, sendo duas épocas de cultivo (Época 1: plantio no mês de junho e Época 2: plantio no mês de janeiro), seis cultivares de sorgo com potencial para biomassa (AGRI002E, BRS 716, BRS 506, SF 15, IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra) e quatro níveis de disponibilidade hídrica do solo (25; 50; 75 e 100% da capacidade máxima de água que o solo consegue reter, chamada de capacidade de campo - CC), com quatro repetições.

As cultivares foram plantadas em vasos de 26 litros, dispostos a céu aberto. O solo utilizado foi classificado como Argissolo eutrófico plíntico vermelho amarelo (EMBRAPA, 2006). A adubação de fundação foi realizada três dias antes do plantio, conforme os resultados das análises químicas do solo e das recomendações para a cultura (Cavalcanti, 2008).

Foram plantadas 10 sementes por vaso, em covas com cinco centímetros de profundidade, realizando o desbaste após 15 dias, mantendo-se apenas uma planta por vaso. A irrigação foi calculada com base na capacidade máxima de retenção de água do solo, e o manejo da irrigação foi realizado com auxílio da TDR (Time Domain Reflectometry), modelo TDR100 da Campbell. Foram utilizadas sondas de cabo coaxial com três hastes e a calibração da TDR conforme Batista (2016). As irrigações foram realizadas a cada dois dias por de balanço de água do solo, conforme os tratamentos previamente definidos.

A colheita foi realizada quando as plantas atingiram o início da etapa de crescimento três da planta do sorgo (EC3), caracterizada pelo amadurecimento dos grãos e pela maior lignificação dos tecidos vegetais. Nessa fase, a quantidade de biomassa acumulada é maior. As plantas foram cortadas rente ao solo, colocadas em sacos de papel, identificadas e enviadas para a secagem em estufa de aeração forçada, à temperatura de 60 ºC, até atingir peso constante. Após a secagem, o material vegetal foi pesado em balança digital, para a obtenção do peso da massa seca total (g).

A eficiência de uso da água (EUA) (g L^{-1}) foi calculada por meio da relação da massa seca total (g), com a quantidade de água utilizada na irrigação durante todo o ciclo.

As avaliações fisiológicas foram realizadas aos 60 dias após o plantio, entre às 8 h e 10 h da manhã, selecionando-se folhas completamente expandidas de cada planta, considerando características uniformes quanto à cor, maturidade e tamanho. A determinação das trocas gasosas foi realizada utilizando-se o Analisador Portátil de

Gás Infravermelho (Infra-red Gas Analizer – IRGA) modelo Li 6400 XT (LI-COR), sob radiação fotossinteticamente ativa mantida em 1.700 µmol m^{-2} s^{-1}. As variáveis avaliadas foram: fotossíntese (*A*), condutância estomática (*gs*), taxa de transpiração (*E*) e temperatura da superfície foliar (Tf).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott a 5% de significância para interação entre épocas e cultivares, utilizando-se o programa SISVAR 5.6. Na presença de significância, foi realizada a análise de regressão para avaliar a influência da disponibilidade hídrica.

Resultados

O plantio da Agri002E apresentou a maior massa seca total entre as demais cultivares plantadas no mês de janeiro, com um incremento de 30% do peso da massa seca total, quando irrigada sem restrição hídrica, com 100% da capacidade de campo (CC), em comparação ao plantio realizado em junho, produzindo cerca de 374,60g por planta (Tabela 2). As cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra apresentaram maior massa seca total no cultivo em época com as temperaturas mais baixas (Época 1) e 100% da CC. Quando plantadas em janeiro, estas cultivares apresentaram redução de 34 e 37% na sua massa seca total, respectivamente, do que quando cultivada no outro período (Tabela 2).

Dentre as cultivares analisadas, a cultivar BRS 506 teve destaque na eficiência de uso da água (EUA) com 83,4 e 90,5%, nas épocas 1 e 2, respectivamente. As demais cultivares tiveram maior EUA com 100% da CC. As cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra obtiveram a maior EUA quando plantadas em junho, com redução de aproximadamente 22 e 24%, respectivamente, em comparação com o plantio realizado em janeiro. Já as cultivares AGRI002E e IAC Santa Elisa obtiveram maior EUA quando plantadas em janeiro, apresentando 4,45 e 2,99 g L^{-1} de massa seca na disponibilidade hídrica (DH) de 100% da CC, com uma EUA de 66 e 37%, respectivamente, superior ao plantio realizado em junho (Tabela 2).

A cultivar BRS 716 não apresentou diferença significativa entre as épocas de cultivo para a EUA sob 100% CC, apresentando média de 3,28 g L^{-1} (Tabela 2).

Tabela 2. Massa seca total (MST) e eficiência no uso (EUA) da água das cultivares de sorgo Agri002E; BRS 506; BRS 716; SF 15; IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra, em função da disponibilidade hídrica, com plantio em junho e janeiro.

		MST (g)						**EUA** (g L^{-1})					
Época de plantio	**Cultivar**	**Disponibilidade hídrica (% da CC)**						**Disponibilidade hídrica (% da CC)**					
		25	**50**	**75**	**100**	**Equação**	**R^2**	**25**	**50**	**75**	**100**	**Equação**	**R^2**
Junho (Época 1)	Agri002E	23,98aA	83,23dB	168,88dB	286,59cB	$0,023x^2 + 0,570x - 4,609$	1**	0,93bB	1,59dB	2,12dB	2,68dB	0,023x + 0,386	0,99**
	BRS 506	30,87aA	126,60bA	272,19bA	305,66cA	$-0,024x^2 + 6,992x – 136,47$	0,97**	1,21bB	2,49bA	3,57aA	3,03cA	$-0,0007x^2 + 0,1168x – 1,320$	0,96**
	BRS 716	33,28aB	118,19bA	199,59cB	346,98bA	$0,024x^2 + 0,966x - 3,011$	0,99**	1,29bB	2,32bA	2,43cB	3,25cA	0,024x + 0,8257	0,92**
	SF 15	29,72aA	104,70cA	315,52aA	458,92aA	$0,0273x^2 + 2,572x – 61,856$	0,98**	1,21bB	2,09cA	3,86aA	4,37aA	0,045x - 0,0756	0,95**
	IAC Santa Elisa	27,99aA	84,84dB	158,44dA	228,07dB	2,6953x – 43,622	0,99**	1,10bB	1,72dB	1,97dB	2,18eB	0,014x + 0,8693	0,92*
	BRS Ponta Negra	39,95aB	144,05aA	260,88bA	442,62aA	$0,031x^2 + 1,417x – 12,284$	0,99**	1,57aB	2,86aA	3,25bA	4,05bA	$-0,0001x^2 + 0,0551x + 0,3846$	0,97*
Janeiro (Época 2)	Agri002E	39,58bA	161,84aA	259,06aA	374,60aA	4,4092x - 66,8025	0,99**	1,88dA	3,46aA	3,74aA	4,45aA	$-0,0003x^2 + 0,0754x + 0,3033$	0,95**
	BRS 506	41,50bA	111,99bA	149,20dB	163,17dB	$-0,0226x^2 + 4,4348x – 54,7381$	0,99**	2,06cA	2,50cA	2,37cB	2,08dB	$-0,0002x^2 + 0,0362x + 1,3607$	0,94**
	BRS 716	66,72aA	113,15bA	228,65bA	297,80bB	3,2349x – 25,6	0,97**	2,93aA	2,42cA	3,24bA	3,31bA	$0,0002x^2 - 0,0209x + 3,2093$	0,55**
	SF 15	48,87bA	101,22bA	199,18cB	301,1bB	$0,0198x^2 + 0,9401 + 10,8968$	0,99**	2,38bA	2,23cA	2,98bB	3,39bB	$0,0002x^2 - 0,0126x + 2,496$	0,91**
	IAC Santa Elisa	30,85bA	123,73bA	168,77dA	258,55cA	2,9124x - 36,5512	0,98**	1,53eA	2,69cA	2,40cA	2,99cA	$-0,0002x^2 + 0,0448x + 0,6751$	0,77**
	BRS Ponta Negra	64,70aA	143,89aA	205,94cB	278,77cB	2,8171x – 2,7412	0,99**	3,07aA	3bA	3,04bA	3,12cB	y=3,06	----

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para mesma época de cultivo e maiúscula na coluna, entre as épocas de cultivo para mesma cultivar, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A interação das cultivares x época de plantio x DH afetaram a fotossíntese (*A*), a condutância estomática (*gs*), a transpiração foliar (*E*) e a temperatura foliar (*Tf*). As cultivares de sorgo apresentaram variabilidade quanto às respostas fisiológicas, nas duas épocas de cultivo, tanto em condições de estresse hídrico, quanto na capacidade máxima de disponibilidade hídrica. Além disso, independente da época de plantio, as cultivares de sorgo apresentaram redução na atividade fisiológica em função da restrição hídrica (Tabelas 3 e 4).

Sob condições de maior DH (100% da CC) e durante cultivo com o plantio em junho, a cultivar AGRI002E apresentou a maior taxa de fotossíntese, condutância estomática e transpiração foliar que as demais cultivares. Já com o plantio em janeiro, a cultivar BRS 506 apresentou os menores valores para os mesmos parâmetros (Tabelas 3 e 4).

As cultivares de sorgo BRS 716, SF 15, Santa Elisa e Ponta Negra, sob disponibilidade hídrica em 100% da CC apresentaram maior atividade fotossintética quando plantadas em janeiro (Época 2) (Tabela 3), sendo que a cultivar SF 15 se destacou entre as demais nesta época com aumento de 47,6% na fotossíntese. Esse aumento na taxa fotossintética está relacionado ao aumento na condutância estomática (*gs*) desta cultivar, o que também proporcionou maior transpiração (*E*) e, consequentemente, a diminuição na temperatura foliar (*Tf*) (Tabelas 3 e 4). Respostas semelhantes de comportamento foram observadas na cultivar BRS Ponta Negra (Tabelas 3 e 4).

Sob disponibilidade hídrica de 100% da CC, as duas épocas de plantio não interferiram na condutância estomática (*gs*) da cultivar BRS 716 (0,15 mol H_2O m^{-2} s^{-1}). Porém sob DH de 75% da CC, maior valor de condutância (0,17 mol H_2O m^{-2} s^{-1}) desta cultivar foi observada no plantio em junho. Para o plantio em janeiro, a maior condutância estomática (*gs*) foi observada para as cultivares SF 15, IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra, que não diferenciaram entre si e apresentaram valor de 0,23 mol H_2O m^{-2} s^{-1} na disponibilidade hídrica de 100% da CC (Tabela 3).

O plantio realizado no mês de janeiro proporcionou maior taxa de transpiração foliar (*E*) para as cultivares SF 15 e Ponta Negra, com aumento de 32% quando comparadas com plantio realizado em junho, sob 100% da CC (Tabela 4).

Sob condições de maior restrição hídrica (25% da CC), as cultivares de sorgo aumentaram a temperatura foliar, nas duas épocas de plantio (Tabela 4). De modo

geral, a época de plantio 2 (janeiro) proporcionou maior temperatura foliar (*Tf*) para todas as cultivares. Na menor disponibilidade hídrica (25% da CC), a cultivar BRS Ponta Negra obteve a maior temperatura foliar (*Tf*) que as demais cultivares, com 34,67 ºC, com o plantio realizado em junho. Resultados semelhantes também foram observados durante a época 2 (janeiro), porém, a cultivar apresentou aumento de 4,29 ºC na temperatura foliar (*Tf*) com disponibilidade hídrica de 25% da CC.

Nas duas épocas de plantio, a cultivar IAC Santa Elisa obteve a menor temperatura foliar (*Tf*) entre as cultivares, apresentando 26,6 ºC quando plantada em junho, com DH em 100% da CC. Porém, quando plantada no mês de janeiro, a cultivar obteve um incremento de 3,45 ºC na temperatura foliar na DH de 100% da CC (Tabela 4). A temperatura foliar de todas as cultivares decresceu em função do aumento da DH, independentemente da época de cultivo (Tabela 4).

Tabela 3. Fotossíntese (µmol de CO_2 m^{-2} s^{-1}) e condutância estomática (mol H_2O m^{-2} s^{-1}) das cultivares de sorgo Agri002E; BRS 506; BRS 716; SF 15; IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra, em função da disponibilidade hídrica, com plantio em junho e janeiro.

		Fotossíntese (µmol de CO_2 m^{-2} s^{-1})						**Condutância estomática (mol H_2O m^{-2} s^{-1})**					
Época de plantio	**Cultivar**	**Disponibilidade hídrica (% da CC)**						**Disponibilidade hídrica (% da CC)**					
		25	**50**	**75**	**100**	**Equação**	**R^2**	**25**	**50**	**75**	**100**	**Equação**	**R^2**
Junho (época 1)	Agri002E	7,41dB	31,08aA	38,06aA	52,55aA	$-0,0037x^2 + 1,0285x - 14,794$	0,97**	0,04eB	0,14aA	0,18aA	0,24aA	$-2E\text{-}05x^2 + 0,0046x - 0,058$	0,97**
	BRS 506	8,14dB	17,01dA	20,13cA	28,58eA	$0,2578x + 2,3553$	0,97**	0,04eB	0,07eA	0,09cA	0,13eA	$0,0012x + 0,0106$	0,98**
	BRS 716	18,64aA	30,99aA	37,47aA	31,77dB	$-0,0072x^2 + 1,086x - 4,3102$	0,98**	0,08bA	0,14aA	0,17aA	0,15dA	$-4E\text{-}05x^2 + 0,0056x - 0,0379$	0,99**
	SF 15	11,58cB	20,43cA	20,79cB	35,00cB	$0,0021x^2 + 0,0141x + 11,006$	0,91**	0,06dB	0,08dA	0,09cB	0,16cB	$2E\text{-}05x^2 - 0,001x + 0,0808$	0,94**
	IAC Santa Elisa	15,17bB	24,43bA	29,93bB	41,27bB	$0,3352x + 6,7497$	0,98**	0,07cA	0,12bA	0,14bB	0,19bB	$0,0016x + 0,0349$	0,99**
	BRS Ponta Negra	17,07aA	24,35bA	29,01bA	29,93eB	$-0,0025x^2 + 0,4906x + 6,3383$	0,99**	0,09aA	0,11cA	0,14bA	0,15dB	$-5E\text{-}06x^2 + 0,0015x + 0,0533$	0,96**
Janeiro (época 2)	Agri002E	19,36aA	17,87bB	21,03dB	37,57dB	$0,0072x^2 - 0,6707x + 32,059$	0,98**	0,06bA	0,06cB	0,11cB	0,17bB	$3E\text{-}05x^2 - 0,0018x + 0,093$	0,99**
	BRS 506	15,36bA	16,44bA	19,50eA	21,82fB	$0,0898x + 12,669$	0,97**	0,05cA	0,06cB	0,06dB	0,11dB	$2E\text{-}05x^2 - 0,0015x + 0,0841$	0,94**
	BRS 716	11,98cB	16,77bB	21,33dB	34,03eA	$0,0032x^2 - 0,1124x + 13,229$	0,98**	0,04cB	0,06cB	0,11cB	0,15cA	$1E\text{-}05x^2 - 9E\text{-}05x + 0,0413$	0,98**
	SF 15	14,74bA	16,92bB	27,79bA	51,66aA	$0,0087x^2 - 0,5984x + 24,494$	0,99**	0,07aA	0,06cB	0,12bA	0,23aA	$5E\text{-}05x^2 - 0,004x + 0,141$	0,99**
	IAC Santa Elisa	18,27aA	13,69cB	36,59aA	47,42bA	$0,0062x^2 - 0,3288x + 20,663$	0,89**	0,06bA	0,07bB	0,16aA	0,23aA	$3E\text{-}05x^2 - 0,0009x + 0,0685$	0,98**
	BRS Ponta Negra	14,27bB	21,59aB	22,88cB	45,26cA	$0,006x^2 - 0,376x + 21,261$	0,93**	0,05cB	0,10aB	0,10cB	0,23aA	$3E\text{-}05x^2 - 0,0016x + 0,0827$	0,92**

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para mesma época de cultivo e maiúscula na coluna, entre as épocas de cultivo para mesma cultivar, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Transpiração (mmol H_2O m^{-2} s^{-1}) e temperatura foliar (°C) das cultivares de sorgo Agri002E; BRS 506; BRS 716; SF 15; IAC Santa Elisa e BRS Ponta Negra, em função da disponibilidade hídrica, com plantio em junho e janeiro.

		Transpiração (mmol H_2O m^{-2} s^{-1})						**Temperatura Foliar (°C)**					
Época de plantio	**Cultivar**	**Disponibilidade hídrica (% da CC)**						**Disponibilidade hídrica (% da CC)**					
		25	**50**	**75**	**100**	**Equação**	**R^2**	**25**	**50**	**75**	**100**	**Equação**	**R^2**
Junho (época 1)	Agri002E	1,34cB	4,05aA	6,07aA	8,06aA	$-0,0003x^2 + 0,1247x - 1,559$	0,99**	33,36bB	32,81aB	31,11bB	30,49aB	$-0,0413x + 34,53$	0,95**
	BRS 506	1,26cB	1,91dB	3,29cA	4,58cA	$0,0003x^2 + 0,0138x + 0,7217$	0,99**	33,67bB	32,46bB	31,68aB	30,46aB	$-0,0416x + 34,672$	0,99**
	BRS 716	2,59aA	3,80bA	3,21cA	4,76cA	$0,0001x^2 + 0,0061x + 2,5536$	0,69*	32,88cB	32,27cB	31,25bA	29,97aB	$-0,0391x + 34,039$	0,97**
	SF 15	1,29cB	2,33dB	2,82dB	4,28dB	$0,0002x^2 + 0,0165x + 0,8537$	0,97**	32,66cB	31,81cA	31,01bB	30,85aB	$-0,025x + 33,151$	0,93**
	IAC Santa Elisa	0,51dB	2,96cA	4,30bA	5,78bA	$-0,0004x^2 + 0,1167x - 2,0979$	0,99**	33,07cB	32,43bA	30,24cB	26,61bB	$-0,0012x^2 + 0,0627x + 32,262$	1**
	BRS Ponta Negra	2,10bB	3,09cA	3,35cA	4,42dB	$0,0288x + 1,4418$	0,95**	34,67aB	32,95aA	32,04aA	30,35aB	$-0,0555x + 35,975$	0,98**
Janeiro (época 2)	Agri002E	2,58cA	2,78bB	2,98cB	4,92bB	$0,0007x^2 - 0,0583x + 3,6976$	0,95**	38,69aA	37,22bA	32,94aA	32,65aA	$0,0005x^2 - 0,1482x + 42,443$	0,91**
	BRS 506	2,68bA	2,76bA	3,22bA	3,13eB	$0,0072x + 2,4987$	0,76**	37,98bA	38,53aA	33,31aA	33,19aA	$-0,0783x + 40,65$	0,76**
	BRS 716	2,39cA	3,05aB	3,39aA	3,88dB	$0,0192x + 1,9814$	0,98**	38,10bA	36,48cA	30,78cA	32,57aA	$0,0014x^2 - 0,2595x + 44,319$	0,80**
	SF 15	2,47cA	2,87bA	3,47aA	5,67aA	$0,0007x^2 - 0,0492x + 3,3283$	0,98**	34,14dA	32,00eA	33,31aA	32,80aA	$0,0006x^2 - 0,0919x + 35,769$	0,42**
	IAC Santa Elisa	3,36aA	2,17cB	3,29aB	4,25cB	$0,0009x^2 - 0,0924x + 5,0126$	0,86**	37,34cA	32,79dA	33,09aA	30,06bA	$0,0006x^2 - 0,1617x + 40,601$	0,87**
	BRS Ponta Negra	2,81bA	3,06aA	3,49aA	5,85aA	$0,0008x^2 - 0,0673x + 4,0509$	0,97**	38,96aA	33,18dA	32,36bA	32,98aA	$0,0026x^2 - 0,3949x + 47,063$	0,97**

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para mesma época de cultivo e maiúscula na coluna, entre as épocas de cultivo para mesma cultivar, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Discussão

As cultivares de sorgo apresentaram respostas diferenciadas frente a época de cultivo e ao déficit hídrico. Destacando a seleção de cultivares tolerantes sob os estresses abióticos como uma medida de adaptação importante para a manutenção da produção (Nascimento 2022; Barros et al. 2023).

Neste estudo, as cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra, proporcionaram um melhor desempenho produtivo no ciclo com temperaturas máximas entre 26,6 e 34,2 °C, podendo ser recomendadas para plantio em épocas com temperaturas amenas. Segundo Chadalavada et al. (2021), o crescimento e os rendimentos podem ser afetados por temperaturas acima de 35 °C. Entretanto, a cultivar AGRI002E apresentou-se como destaque, com adaptação ao aumento da temperatura, sendo uma alternativa para o cultivo frente ao aumento de 2,1 °C na temperatura. Em estudo em condições controladas, essa mesma cultivar apresentou maior produção de massa seca em resposta ao aumento de 4,8 ºC da temperatura (Nascimento 2022).

O aumento da temperatura do ar de 2,1 ºC pode reduzir o rendimento do sorgo por meio dos impactos diretos sobre o metabolismo da planta (Magalhães et al. 2014). O efeito negativo do aumento na temperatura no desenvolvimento das cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra pode estar relacionado com a inibição da atividade da enzima responsável pela fixação do carbono (rubisco), que reduz a eficiência fotossintética, aumenta a taxa respiratória e a transpiração das plantas, levando à perda excessiva de água. Isso acarreta aumento da demanda de energia necessária para crescimento e desenvolvimento, com consequente diminuição da produção de biomassa (Santos et al. 2022, Zhang et al. 2022).

Por outro lado, as plantas apresentam necessidades térmicas para o seu desenvolvimento, e assim como outras espécies vegetais, o sorgo também tem uma faixa de temperatura ótima para o seu crescimento e desenvolvimento. O sorgo é uma planta que se adapta bem a diferentes condições climáticas, mas sua faixa de temperatura ótima para o crescimento é em torno de 25-30°C. O maior rendimento da cultivar AGRI002E na época com as temperaturas mais elevadas confirma a sua capacidade de se adaptar ao ambiente de alta temperatura, podendo estar relacionado à maior eficiência fotossintética. A

temperatura influencia vários processos fisiológicos da planta, incluindo a taxa de fotossíntese, a transpiração e a respiração que, por sua vez, afetam o crescimento e desenvolvimento do sorgo (Qaseem et al. 2019). Segundo os autores, a temperatura ideal ajuda a aumentar tanto a atividade metabólica quanto a síntese de clorofila da planta. A clorofila por sua vez, é responsável pela absorção de luz e pela produção de energia para a planta.

No entanto, temperaturas excessivamente altas ou baixas podem prejudicar o crescimento do sorgo. Temperaturas muito altas podem levar à desidratação e desnaturação das proteínas, causando danos às folhas e às raízes, enquanto temperaturas muito baixas podem retardar o crescimento e afetar a germinação das sementes (Chadalavada et al. 2021).

Sob condições de estresse hídrico, o sorgo possui propriedades fisiológicas que permitem interromper o crescimento ou reduzir seu metabolismo. O fechamento dos estômatos, o acúmulo de açúcares solúveis, a acumulação de prolina e o desenvolvimento de sistemas radiculares profundos são algumas das estratégias utilizadas pela planta para se adaptar às condições de limitação hídrica (Tingting et al. 2010). Assim, a redução da condutância estomática na cultivar AGRI002E na época 2 (Tabela 2), pode ser vista como uma forma de adaptação da cultivar frente ao estresse hídrico e ao aumento da temperatura. Dessa forma, monitorar as respostas das trocas gasosas ajuda a entender as estratégias que as plantas utilizam no manejo da água e dos nutrientes, uma vez que esses fatores afetam diretamente os processos fisiológicos da planta (Lima 2018).

Segundo Santos et al. (2022), a falta de água resulta na redução da taxa fotossintética, com o fechamento dos estômatos e perda substancial de produtividade. Os resultados obtidos no presente estudo (Tabelas 2 e 3) confirma o papel do estresse hídrico em afetar similarmente a função à medida que o status hídrico da planta diminui. Assim, o estresse causado pela deficiência hídrica aumenta a fotorrespiração e a concentração interna de oxigênio, resultando na formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) que levam a morte celular, reduzindo assim, a produção da matéria seca total (Perry et al. 1983, Terbea et al. 1995).

Segundo Zhang et al. (2022), as repostas das plantas a essas condições de estresse podem determinar a capacidade de tolerância e de adaptação da

cultura diante das limitações impostas pelo ambiente. Taiz et al. (2017) afirmam que a produtividade das plantas é limitada pela disponibilidade de água no ambiente e pela eficiência que a planta tem no seu uso. Logo, uma planta com maior disponibilidade de água ou que tenha maior eficiência no seu uso terá maior adaptação e produção.

A variação da produtividade obtida nos diferentes níveis de disponibilidade hídrica para ambas as épocas de cultivo, e a maior produção observada na maior disponibilidade hídrica (100% da CC) caracterizam a irrigação como uma alternativa fundamental para aumentar a produtividade do sorgo. Entretanto, além das características referentes à produtividade, o uso eficiente da água precisará ser levado em conta, visto que a determinação da EUA visa à economia financeira, e o uso racional dos recursos hídricos, evitando que ocorra a perda de água e de outros danos ambientais, como lixiviação de nutrientes e maior compactação do solo (Kirchner et al. 2019). A EUA obtida pela cultivar AGRI002E na época com as temperaturas mais altas na DH de 50 e 75% da CC, surge como uma alternativa para o cultivo em ambientes com limitações hídricas. A EUA da cultivar SF 15 com 75% da CC, também aparece como alternativa frente às restrições hídricas, em época com temperaturas mais baixas (Tabela 2)

O estresse hídrico afetou significativamente as trocas gasosas (Tabelas 3 e 4), como visto na fotossíntese das cultivares AGRI002E e BRS 506 na época 1, que apresentaram 7,41 e 8,14 µmol de CO_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente, na menor DH (25% da CC). Tal diminuição se deve à assimilação de dióxido de carbono (Reichgelt e Andrea 2019), por meio da redução da condutância estomática, onde as cultivares AGRI002E e BRS 506 apresentaram queda de 83,3 e 69,2%, respectivamente, da condutância na menor DH (25% da CC), quando comparadas com a DH em 100% da CC (Tabela 2). Isso ocorreu, pois, a necessidade de regular a perda de água leva à diminuição da fotossíntese. Essa redução geralmente ocorre nas condições hídricas mais estressantes, onde o metabolismo fotossintético é enfraquecido, limitando a assimilação de CO_2, afetando assim o desenvolvimento e produtividade da cultura (Taiz et al. 2017, Santos et al. 2022).

A exposição contínua ao déficit hídrico também atua sobre a transpiração foliar. À medida que a água disponível no solo diminui, a transpiração é reduzida,

evitando a perda de água e mantendo assim o ajuste osmótico (Taiz et al. 2017). Contudo, com a redução da transpiração, para manter níveis adequados de água em seu interior ocorre um aumento na temperatura das folhas (Vieira Junior 2007). Resultados semelhantes foram observados no presente estudo (Tabela 4). É possível que essa resposta seja o resultado da alteração na estrutura das enzimas envolvidas no processo de carboxilação causada pelo aumento da temperatura foliar, acarretando aumento da fluidez das membranas do cloroplasto e diminuição das trocas gasosas, afetando diretamente a fotossíntese (Tribuzy 2005; Chaves et al. 2016).

Quando cultivadas sob estresses abióticos as plantas são afetadas por danos fisiológicos que prejudicam o seu crescimento e desenvolvimento (Raza et al. 2019). Diante disso, avanços na pesquisa precisam incluir estudos que avaliem os mecanismos de adaptação das plantas a ambientes adversos, como, por exemplo, a avaliação das respostas a nível celular e molecular (expressão gênica, osmoprotetores e processos bioquímicos), que atuam sobre a capacidade de tolerância das culturas sobre os estresses abióticos (Kumar et al. 2012, Pandey 2015, Suzuki et al. 2016, Ahmad et al. 2020).

Os cenários climáticos reforçam a necessidade da seleção de cultivares tolerantes aos estresses abióticos. Assim, as pesquisas para aumentar/manter a produção do sorgo precisarão avançar com testes de validação dos materiais selecionados.

Conclusão

As cultivares de sorgo apresentaram respostas produtivas e fisiológicas diferenciadas em função da disponibilidade hídrica e da época de plantio. A restrição hídrica afeta negativamente as respostas fisiológicas das plantas de sorgo, o que reduziu a desenvolvimento das plantas e, consequentemente o rendimento final. As cultivares SF 15 e BRS Ponta Negra apresentam maior produção de matéria seca em épocas com temperaturas entre 26,6 e 34,2 ºC. O desempenho produtivo da cultivar AGRI002E foi maior com plantio na época que a temperatura teve aumento de 2,1 ºC.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo fomento (IBPG-1042-5.01/21).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Referências

Ahmad F, Singh A, Kamal A (2020). Osmoprotective Role of Sugar in Mitigating Abiotic Stress in Plants. In: Roychoudhury A, Tripathi AK (2020). Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress: Biochemical and Molecular Perspectives, 53-70.

Araújo Filho JC, Correia RC, Cunha TJF, Oliveira Neto MB, Araújo JLP, Silva MML (2019). Ambientes e solos do semiárido: potencialidades, limitações e aspectos socioeconômicos. In: Ximenes LF, Silva MSL, Brito LTL (Org.). Tecnologias de Convivência com o Semiárido Brasileiro. 1ed.Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019, 17-84.

Ashoub A, Baeumlisberger M, Neupaertl M, Karas M e Brüggemann W (2015). Characterization of common and distinctive adjustments of wild barley leaf proteome under drought acclimation, heat stress and their combination. Plant Mol. Biol. 87:459–471.

Barros J.R.A., Guimarães M.J.M., Simões W.L., Melo N.F. Angelotti F. (2023). Temperature: A major climatic determinant of cowpea production. Acta Scientiarum Agronomy. 45(1):e56812. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56812.

Batista LS, Coelho EF, Carvalho FAP, Silva MG, Gomes Filho RR, Gonçalves AA (2016). Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 10:522-532.

Bergamaschi, H., Bergonci, J. I. 2017. As plantas e o clima: princípios e aplicações. Agrolivros, Guaíba. 351p.

Carcedo AJP e Gambin B (2019). Sorghum drought and heat stress patterns across the Argentinean temperate central region. Field Crops Res. 241:107552. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.009

Cavalcanti, FJA (2008). Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. Recife: IPA, 212p.

Chadalavada K, Kumari BDR, Kumar TS (2021). Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. Planta, 253:113. https://doi.org/10.1007/s00425-021-03631-2

Chaves MM et al. (2016). Controlling stomatal aperture in semi-arid regions—The dilemma of saving water or being cool? Plant Sci. 251:54–64.

Eggen M et al. (2019). Vulnerability of sorghum production to extreme, subseasonal weather under climate change. Environ. Res. Lett. 14:045005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafe19.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro Nacional de Pesquisa de Solos (2006). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 412p.

FAO. FAOSTAT (2022). Disponível em: http://faostat.fao.org.

Jumrani K, Bhatia VS (2018). Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. Physiology and Molecular Biology of Plants, 24:37–50.

Hussain HA et al. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morphophysiological attributes, yield, nutrient uptake and in maize oxidative status hybrids. Sci. Rep. 9:3890. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. International Panel on Climate Change.

Meena K, Visarada KBRS, Meena DK (2022). Sorghum bicolor (L.) Moench a multifarious crop-fodder to therapeutic potential and biotechnological applications: A future food for the millennium. Future Foods, 6:100188.

Kaur R, Bains Ts, Bindumadhava H, Nayyar H (2015). Responses of mungbean (Vigna radiata L.) genotypes to heat stress Effects on reproductive biology, leaf function and yield traits. Scientia Horticulturae, 197:527-541.

Kranner I, Minibayeva FV, Beckett RP, Seal CE (2010). What is stress? Concepts, definitions ad applications in seed Science. New Phytologist, 188(3):655-673.

Keren N, Paltiel Y (1997). Photosynthetic Energy Transfer at the Quantum/Classical Border. Trends in Plant Science, 23:1-10.

Kirchner JH, Robaina, AD, Peiter MX, Torres RR, Mezzomo W, Ben LHB, Pereira AC (2019). Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 14(2):1-9.

Kumar RR et al. (2012). Protection against heat stress in wheat involves change in cell membrane stability, antioxidante enzymes, osmolyte, H_2O_2 and transcript of heat Shock protein. International Journal of Plant Physiology and Biochemistry, 4(4):83-91.

Lima BLC (2018). Cultivo do algodoeiro BRS Rubi com água de esgoto doméstico tratado e doses de potássio no semiárido pernambucano. 2018. 141p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 141p.

Magalhães PC, Durães FOM, Rodrigues JAS (2010). Fisiologia da planta de sorgo.Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Comunicado técnico, 86. 4p.

Magalhães PC, Souza TC, May A, Lima Filho OF, Santos FC, Moreira JAA, Leite CEP, Albuquerque CJB, Freitas RS (2014). Exigências edafoclimáticas e fisiologia da produção. In: Borém A, Pimentel LD, Parrela R (2014). Sorgo: do plantio à colheita. Editora UFV, 275p.

Nascimento GSG (2022). Tolerância de cultivares de sorgo à alta temperatura para o polo gesseiro do Araripe. 90p. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade de Pernambuco, Petrolina, p 90.

Pandey Gk. (Ed.) (2015). Elucidation of abiotic stress signaling in plants: Functional Genomics Perspectives. Springer.

Parry MAJ, Andralojc PJ, Khan S, Lea PJ, Keys AJ (2002). Rubisco Activity: Effects of Drought Stress. Annals of Botany, 89:833–839.

Pimentel LD et al. (2017). Caracterização química e bioenergética de grupos agronômicos de sorgo. Pesquisa Agropecuária Tropical, 47(4):424-431.

Prasad PVV e Djanaguiraman M (2011). High night temperature decreases leaf photosynthesis and pollen function in grain sorghum. Funct. Plant Biol. 38:993–1003.

Prasad, VBR et al. (2021). Drought and high temperature stress in sorghum: physiological, genetic and molecular insights, and breeding approaches. Int. J. Mol. Sci. 22(18):9826. https://doi.org/10.3390/ijms22189826

Perry SW, Krieg DR, Hutmacher RB (1983). Photosynthetic rate control in cotton: photorespiration. Plant Physiol, 73:662–665.

Qaseem MF, Qureshi R, Shaheen H (2019). Effects of pre-anthesis drought, heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat (Triticum aestivum L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress. Sci. Rep. 9:6955. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43477-z.

Queiroz MS et al. (2019). Drought stresses on seed germination and early growth of maize and sorghum. J. Agric. Sci. 11(2):310–318.

Raza A, Razzaq A, Mehmood SS, Zou X, Zhang X, Lv Y, Xu J (2019) Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: a review. Plants 8(2):34.

Reichgelt T, Andrea WJD (2019). Plant carbon assimilation rates in atmospheric CO2 reconstructions. New Phytologist, 223:1844-1855.

Ribas PM (2003). Sorgo: introdução e importância, Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas MG, 16p.

Santos TB, Ribas AF, Souza SGH, Budzinski IGF, Domingues DS (2022). Physiological Responses to Drought, Salinity, and Heat Stress in Plants: A Review. Stresses 2:113-135. https://doi.org/10.3390/stresses2010009

Silva, MJ et al. (2018). Evaluation of the potential of lines and hybrids of biomass sorghum. Industrial Crops and Products, 125:379-385.

Suzuki, N.; Basil, E.; Hamilton, J. S.; Inupakutika, M. A.; Zandalinas, S. I.; et al. (2016). ABA is required for plant acclimation to a combination of salt and heat stress. PLoS One, 11.

Tabosa JN, Brito ARMB, Lima LE, França JGE, Carvalho EX, Simplício JB (2020). Histórico e importância do sorgo. In: Tabosa, JN (2020). Sorgo: Cadernos do Semiárido – riquezas e oportunidades v. 15 n.2. Recife: CREA-PE: Editora UFRPE. 84p

Taiz L, Zeiger E, Moller EZIM, Murphy A (2017). Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: Artmed.

Terbea M, Vranceanu AV, Petcu E, Craiciu DS, Micut G (1995). Physiological response of sunflower plants to drought. Romanian Agriculture Research, 3:61–67.

Tingting X, Peixi S, Lishan S (2010). Photosynthetic characteristics and water use efficiency of sweet sorghum under different watering regimes. Pakistan. Journal of Botany, 42:3981-3994.

Theodoro GF, Ribeiro MM, Pacheco FBS, Miyake AWA (2021). Forage sorghum yield as a function of nitrogen rates and cut management. Research, Society and Development, 10(11):e109101119401. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19401

Tribuzy ES (2005). Variações da temperatura foliar do dossel e o seu efeito na taxa assimilatória de CO2 na Amazônia Central. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Vieira Júnior PA, Dourado Neto D, Oliveira RF, Peres LEP, Martin TN, Manfron PA, Bonnecarrére RAG (2007). Relações entre o potencial e a temperatura da folha de plantas de milho e sorgo submetidas a estresse hídrico. Acta Scientiarum Agronomy, 29:555-561.

Vital RG, Müller C, Freire FBS et al. (2022). Metabolic, physiological and anatomical responses of soybean plants under water deficit and high temperature condition. Sci Rep, 12:16467. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21035-4.

Zandalinas SI, Mittler R, Balfagón D, Arbona V e Gómez-Cadenas A (2018). Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. Physiol. Plantarum 162:2–12.

Zhang H, Zhu J, Gong Z. et al (2022). Abiotic stress responses in plants. Nat Rev Genet, 23:104–119. https://doi.org/10.1038/s41576-021-00413-0

Zilli M, Scarabello M, Soterroni AC, Valin H, Mosnier A, Leclere D, Ramos FM (2020). The impact of climate change on Brazil's agriculture. Science of the Total Environment, 740: 139384. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139384

ANEXO

A formatação do Capítulo 1 seguiu as normas da Revista escolhida para submissão do artigo:

- Physiology and Molecular Biology of Plants – A3