



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS E QUALIDADE DE
GRÃOS EM CULTURAS COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM
SAFRINHA NO CERRADO**

ALBERTO DO NASCIMENTO SILVA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

DEZEMBRO/2020

000/1°20

A.N. SILVA – DOUTOR - 2020



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS E QUALIDADE DE GRÃOS
EM CULTURAS COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA
NO CERRADO**

ALBERTO DO NASCIMENTO SILVA

ORIENTADORA: MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS

CO-ORIENTADOR: WALTER QUADROS RIBEIRO JUNIOR

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 001/2020

BRASÍLIA/DF

DEZEMBRO/2020



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS E QUALIDADE DE GRÃOS
EM CULTURAS COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA
NO CERRADO**

ALBERTO DO NASCIMENTO SILVA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.**

APROVADA POR:

**Maria Lucrecia Gerosa Ramos, Dra (Orientadora) / Universidade de Brasília /
lucrecia@unb.br**

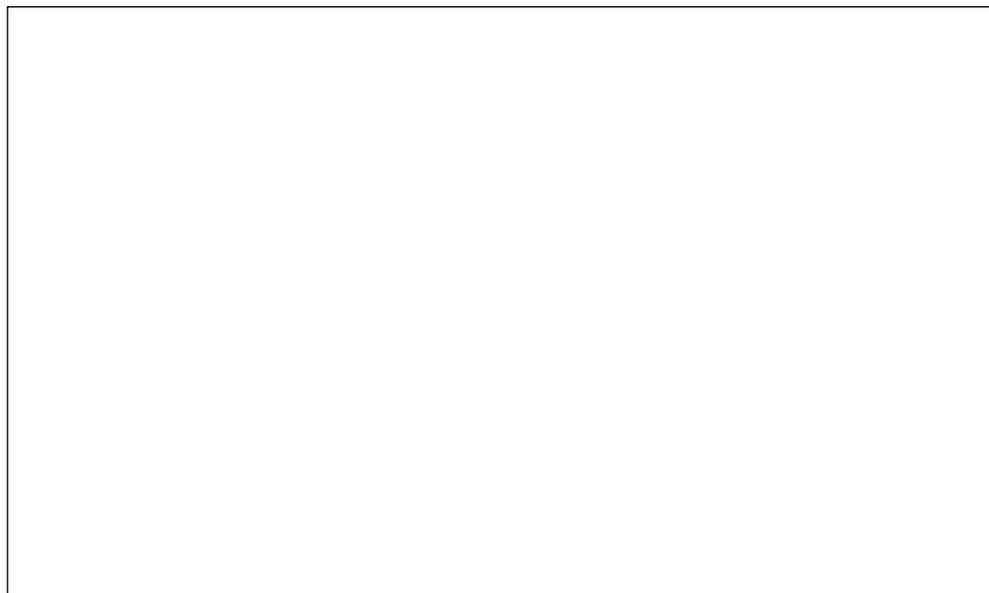
**Ernandes Rodrigues de Alencar, Dr. (Membro Interno) /Universidade de Brasília /
ernandesalencar@gmail.com**

**Marcos Antônio Vanderlei Silva, Dr. (Membro Externo) / Universidade do Estado da Bahia/
maavsilva@uneb.br**

**Christina Cleo Vinson Willians, Dra. – Pós Doc PNP/Universidade de Brasília
ccvinson@gmail.com**

BRASÍLIA, 14 de DEZEMBRO de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, A.N. **Alterações morfofisiológicas e qualidade de grãos em culturas com potencial para cultivo em safrinha no Cerrado.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2020, 131p. Tese de Doutorado.

NOME DO AUTOR: ALBERTO DO NASCIMENTO SILVA

TÍTULO DA TESE: Alterações morfofisiológicas e qualidade de grãos em culturas com potencial para cultivo em safrinha no Cerrado.

GRAU: Doutor **ANO:** 2020.

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Alberto do Nascimento Silva

CPF: 051470305-90. Cel: +55 77 999995294. E-mail: albertosilvaagro@gmail.com

Endereço: Barreiras - BA, rua Marechal Hermes, nº 505, apartamento 303, CEP 47802431.

*A minha esposa e meu
filho, pelo amor,
paciência e
companheirismo.*

DEDICO

*Aos meus pais, Naldir e
Silvio, e irmão André.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, por me conceder o dom da vida e por guiar meus passos durante minha caminhada.

À minha família: meus pais, Naldir Carvalho da Silva e Silvio do Nascimento Silva pelo amor dedicado à nossa família e pelo apoio incondicional que me deram para que esse momento se tornasse possível. Agradeço também ao meu irmão André Luiz e a minha cunhada Iara Maria, por estarem sempre ao meu lado.

À minha esposa Flaviana Ferreira Lustosa pelo amor, carinho, paciência, compreensão e pelo lindo presente que me deu, nosso filho Vinícius.

À minha orientadora, PhD Maria Lucrécia Gerosa Ramos, por ter acreditado em mim, pela orientação, dedicação, convivência e ensinamentos durante a execução dessa pesquisa.

Ao meu co-orientador PhD Walter Quadros Ribeiro Junior pelos ensinamentos e disponibilidade em esclarecer todas as dúvidas surgidas ao longo do trabalho.

À toda a equipe da Embrapa Cerrados, Alberto Pires, José Reis, Geraldo e todos os estagiários que contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos os meus amigos que torceram e contribuíram para que eu concluísse com êxito esse desafio. Em especial aos meus amigos do Programa de Pós-graduação, Patrícia Carvalho (prima e amiga), Guilherme Filgueiras, Lucas Felisberto, Jônatas Barros, Antônio Marcos, Stefany Braz, Daniel Fernandez, Lemerson Brasileiro.

À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília e aos seus professores, coordenadores e funcionários, pelas oportunidades.

Agradecimento especial ao professor e grande amigo Marcos Antônio Vanderlei Silva, professor da Universidade do Estado da Bahia (Campus IX - Barreiras), que, desde a graduação, contribuiu imensamente com suas orientações e conselhos. Sua ajuda foi fundamental para que eu pudesse estar aqui, defendendo meu título de Doutor.

À Embrapa Cerrados por disponibilizar a estrutura necessária para a realização desse trabalho.

À Capes pela concessão da bolsa de estudos.

Meu muito obrigado a todos!

ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS E QUALIDADE DE GRÃOS EM CULTURAS COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA NO CERRADO

RESUMO GERAL - No contexto das mudanças climáticas, as previsões apontam para uma diminuição das precipitações e uma extensão dos períodos de seca, com forte impacto na agricultura e, pelo fato da safrinha ser uma época com menor disponibilidade hídrica e com ocorrência frequente de veranicos, tem-se, atualmente, como um dos grandes desafios da agricultura no Cerrado, a obtenção de espécies tolerantes ao estresse hídrico e com elevado potencial de produção de grãos para o período de safrinha. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do estresse hídrico na morfologia, fisiologia, produtividade e qualidade física e química de grãos de culturas já utilizadas ou com potencial para cultivo na safrinha na região do Cerrado. O experimento foi conduzido na estação experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil, entre maio e outubro dos anos 2017 e 2018. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelas culturas do feijão (*Phaseolus vulgaris*) – cultivar BRS Realce; amaranto (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa* “Genótipo derivado do BRS Piabiru”), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), dois genótipos de trigo – CPAC 0544 e BRS 404 (*Triticum aestivum*); triticale (*Triticosecale wittmack*) e canola (*Brassica napus*) e as subparcelas por quatro regimes hídricos (187 mm; 304 mm; 410 mm; 535 mm no ano de 2017 e 196 mm; 320 mm; 424 mm; 576 mm no ano de 2018). No ano de 2017, foram avaliados a fisiologia, produtividade de grãos e de biomassa do feijão, amaranto, quinoa e trigo sarraceno e produtividade de grãos e qualidade física e química dos grãos de feijão, triticale e trigo (CPAC 0544 e BRS 404). No ano de 2018 foram avaliados a morfologia e a produtividade de grãos de todas as culturas. Em geral, o estresse hídrico afetou negativamente a produtividade de grãos e as variáveis fisiológicas, entretanto, em graus diferentes nas culturas estudadas. Todavia, o amaranto e a quinoa se destacaram, pois mantiveram alta produtividade em regimes iguais ou superiores a 304 mm, situação hídrica de ocorrência comum no período da

safrinha na maioria das regiões produtoras de grãos no Cerrado. Quanto a qualidade dos grãos, em geral, as condições de estresse hídrico afetaram negativamente a qualidade física, a composição química e a qualidade nutricional dos grãos, mas em graus diferentes nas espécies e genótipos estudados. No entanto, o genótipo do trigo BRS 404 se destacou, pois a qualidade física do grãos não foi afetada pelas condições de estresse. O feijão, apesar da redução no peso dos grãos, teve as concentrações macrominerais mantidas e a concentração de proteínas aumentada sob condições de estresse. O estresse hídrico impactou negativamente os atributos morfológicos de todas as culturas estudadas, com destaque para a drástica redução na área foliar nas culturas do feijão, amaranto, canola, trigo sarraceno e Trigo CPAC 0544. Entretanto, apesar da redução nos atributos morfológicos, o amaranto e o feijão apresentaram bons potenciais produtivos, tendo o feijão alcançado produtividade superior a média nacional, em condição hídrica semelhante a observada na safrinha. Assim, percebe-se que o amaranto e a quinoa apresentaram bom potencial para cultivo em safrinho, pois, mesmo tendo alguns dos seus atributos morfológicos (amaranto) e fisiológicos (quinoa) afetados significativamente pelo estresse hídrico, mantiveram produtividade de grãos superior as demais espécies. O feijão também apresentou bom potencial, pois, além de ter apresentado boa produtividade de grãos, houve melhoria na qualidade dos seus grãos em situação de estresse.

Palavras-chave: Déficit hídrico, segunda safra, culturas alternativas, trocas gasosas, área foliar.

MORPHOPHYSIOLOGICAL CHANGES AND GRAIN QUALITY IN CROPS WITH POTENTIAL FOR GROWING IN THE OFF-SEASON IN THE CERRADO

ABSTRACT. In the context of climate change, forecasts point to a decrease in rainfall and an extension of drought periods, with a strong impact on agriculture and, since the off-season is a time with less water availability and with a frequent occurrence of summer, there are Currently, as one of the great challenges of agriculture in the Cerrado, obtaining species tolerant to water stress and with high potential for grain production for the off-season. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of water stress on the morphology, physiology, productivity and physical and chemical quality of grains of crops already used or with potential for growth in the off-season in the Cerrado region. The experiment was carried out at the Embrapa Cerrados experimental station in Planaltina, DF, Brazil, between May and October of 2017 and 2018. The experimental design was in randomized blocks, in a split-plot scheme, with four replications. The plots were composed of beans (*Phaseolus vulgaris*) - BRS Realce cultivar; amaranth (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa* “Genotype derived from BRS Piabiru”), buckwheat (*Fagopyrum esculentum*), two wheat genotypes - CPAC 0544 and BRS 404 (*Triticum aestivum*); triticale (*Triticosecale wittmack*) and canola (*Brassica napus*) and the subplots by four water regimes (187 mm; 304 mm; 410 mm; 535 mm in 2017 and 196 mm; 320 mm; 424 mm; 576 mm in 2018). In 2017, the physiology, grain yield and biomass of common bean, amaranth, quinoa and buckwheat and grain yield and the physical and chemical quality of common bean, triticale and wheat (CPAC 0544 and BRS 404) were evaluated. In 2018, the morphology and grain yield of all crops were evaluated. In general, water stress negatively affected grain yield and physiological variables; however, to different degrees in the crops studied. However, amaranth and quinoa stood out, as they maintained high productivity in regimes equal to or greater than 304 mm, a common water situation during the off-season in most grain-producing regions in the Cerrado. As for the quality of the grains, in general, water stress conditions negatively affected the physical quality, chemical composition and nutritional quality of the grains, but to

different degrees in the species and genotypes studied. However, the BRS 404 wheat genotype stood out, as the physical qualities of the grain were not affected by stress conditions. The common bean, despite the reduction in grain weight, had their macromineral concentrations maintained, and the concentration of proteins increased under stress conditions. Water stress negatively impacted the morphological attributes of all the crops studied, emphasizing the drastic reduction in the leaf area in the cultures of beans, amaranth, canola, buckwheat, and wheat CPAC 0544. However, despite the reduction in morphological attributes, amaranth and beans had good productive potentials, with beans reaching higher productivity than the national average, in a water condition similar to that observed in the off-season. Thus, it is clear that amaranth and quinoa showed good potential for growth in the off-season . Even though some of their morphological (amaranth) and physiological (quinoa) attributes were significantly affected by water stress, they maintained grain yield higher than the other species. The common bean also showed good potential because, in addition to having good grain productivity, there was an improvement in the quality of its grains under stress.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

- Tabela 1** - Descrição do histórico de cultivo da área de estudo no período compreendido entre 2005 - 2016.....47
- Tabela 2** - Características morfológicas, produtivas e mecanismo fotossintético das espécies estudadas.....48
- Tabela 1** - Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (C_i), transpiração (E) e eficiência no uso da água (EUA) para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno cultivados sob diferentes regimes hídricos.....56
- Tabela 2** - Índice de clorofila (a, b e total) e prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno cultivados sob diferentes regimes hídricos.....58
- Tabela 3** - Produção de biomassa seca (kg ha^{-1}), produtividade de grãos (kg ha^{-1}) e produtividade por unidade de água aplicada (kg ha mm^{-1}) para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno cultivados sob diferentes regimes hídricos.....60
- Tabela 4** - Valores médios de temperatura do dossel do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, nos quatro regimes hídricos estudados.....61

CAPÍTULO II

- Tabela 1** - Rendimento de grãos (RG, kg ha^{-1}), peso de mil grãos (PG, g) e variáveis relacionadas à cor (L* - luminosidade, C* - croma, h* - ângulo de matiz) em feijão comum, triticale e dois genótipos de trigo (CPAC 0544 e BRS 404) sob diferentes regimes hídricos.....92
- Tabela 2** - Composição química dos grãos de feijão, triticale e dois genótipos de trigo (CPAC 0544 e BRS 404) submetidos a diferentes regimes hídricos.....94

Tabela 3- Valores médios de teores de macrominerais em grãos de feijão, triticales, genótipo de trigo CPAC 0544 e cultivar de trigo BRS 404 cultivados sob diferentes regimes hídricos.....95

Tabela 4 - Valores médios da concentração de microminerais em grãos de feijão, triticales, genótipo de trigo CPAC 0544 e cultivar de trigo BRS 404 cultivados sob diferentes regimes hídricos.....96

CAPÍTULO III

Tabela 1 - Descrição do histórico de cultivo da área de estudo no período compreendido entre 2005 - 2017.....119

Tabela 2 - Valores médios dos atributos morfológicos das culturas do feijão, amaranto, trigo sarraceno, trigo BRS 404, trigo CPAC 0544, triticales e canola cultivados sob diferentes regimes hídricos (RH).....125

Tabela 3 – Valores médios de produtividade de grãos das sete espécies estudadas, em função dos regimes hídricos.....129

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1** - Extensão do bioma Cerrado e localização da área experimental situada no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), Planaltina, DF, Brasil...46
- Figura 2** - Médias de precipitação pluviométrica e temperatura média do período compreendido entre (1997 e 2016) e do ano de 2017 (ano de condução do experimento). Dados obtidos de estação automática localizada ao lado do experimento.....47
- Figura 3** - Lâmina média aplicada durante o período de irrigação uniforme (lâmina média uniforme), com aspersores com vazões iguais, durante os 35 DAE e lâmina média aplicada utilizando-se aspersores com vazões decrescentes do início até a extremidade da lateral barra irrigadora (lâmina média variável), após os 35 DAE.....50
- Figura 4** - Mapa do comportamento da temperatura média do dossel das quatro culturas estudadas, nos diferentes regimes hídricos.....54
- Figura 5** - Correlograma das estimativas das correlações de Pearson entre as variáveis fisiológicas, produtivas e temperatura. A) Feijão; B) Quinoa; C) Amaranto; D) Trigo sarraceno.....64

CAPÍTULO II

- Figura 1** - Médias de Precipitação pluviométrica e temperatura média da área experimental entre maio e outubro de 2017 e dados de longo prazo dos últimos vinte anos (1997 - 2016). Dados obtidos de estação automática localizada ao lado do experimento.....86
- Figura 2** - Correlograma das estimativas das correlações de Pearson entre as variáveis que representam a qualidade física e química dos grãos. A) trigo BRS 404; B) trigo CPAC 0544; C) feijão; D) Triticale.....98

CAPÍTULO III

Figura 1 - Precipitação pluviométrica e temperatura média da área experimental nos meses de maio a novembro de 2018. Dados obtidos de estação automática localizada ao lado do experimento.....119

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	9
ABSTRACT.....	14
LISTA DE TABELAS.....	16
LISTA DE FIGURAS.....	18
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. O BIOMA CERRADO.....	4
2. 1.1 Caracterização e potencial agropecuário.....	4
2. 1. 2 Produção agrícola em período de safrinha no Cerrado.....	6
2. 1. 3 Culturas alternativas para produção em safrinha no Cerrado.....	7
2.2. EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA FISIOLOGIA DAS CULTURAS.....	12
2.2.1 Fotossíntese, clorofilas, condutância estomática, concentração interna de CO ₂ e transpiração.....	12
2.2.2 Prolina.....	14
2.2.3 Eficiência no uso da água.....	16
2.2.4 Temperatura do dossel e termografia.....	17
2.3. EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA QUALIDADE DE GRÃOS.....	18
2.4. MECANISMOS DE TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO.....	21
2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24
CAPÍTULO 1 - ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE EM PLANTAS COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA NA REGIÃO DO CERRADO SUBMETIDAS A ESTRESSE HÍDRICO.....	38
RESUMO.....	39
ABSTRACT.....	41
1.1. INTRODUÇÃO.....	43
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
1.2.1 Delineamento experimental e condução do experimento.....	45
1.2.2 Variáveis analisadas.....	51
em que:.....	53
1.2.3 Análise estatística.....	54
1.3. RESULTADOS.....	55
1.3.1 Variáveis fisiológicas.....	55
1. 3.2 Produtividade de biomassa seca e grãos.....	59
1.3.3 Temperatura média do dossel.....	61
1.3.4 Correlação de Pearson.....	62

1.4. DISCUSSÃO	66
1.4.1 Variáveis fisiológicas	66
1.4.2 Produtividade de biomassa seca e de grãos	69
1.4.3 Temperatura média do dossel	70
1.5. CONCLUSÕES	72
1.6. REFERÊNCIAS	72
CAPÍTULO 2 - EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE GRÃOS DE TRIGO, TRITICALE E FEIJÃO.	81
RESUMO	82
ABSTRACT	83
2.1 INTRODUÇÃO	84
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	86
2.2.1. Delineamento experimental e condução do experimento	86
2.2.2 Qualidade física dos grãos	88
2.2.3 Qualidade química dos grãos	89
2.2.4. Análise estatística.....	90
2.3 RESULTADOS	90
2.3.1 Produtividade e qualidade física dos grãos	90
2.3.2 Composição química dos grãos	92
2.3.4. Correlação de Pearson.....	97
2.4 DISCUSSÃO	99
2.4.1 Produtividade e qualidade física dos grãos	99
2.4.2 Qualidade química dos grãos	101
2.5 CONCLUSÕES	106
2.6 REFERÊNCIAS	106
CAPÍTULO 3 - EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA MORFOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ESPÉCIES COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA NO CERRADO.....	113
RESUMO	114
ABSTRACT	115
3.1 INTRODUÇÃO.....	116
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	118
3.2.1 Caracterização da área experimental	118
3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	120
3.2.3 Implantação e condução do experimento.....	120
3.2.4 Variáveis analisadas.....	122

3.2.5 Análise estatística.....	123
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	123
3.3.1 Morfologia	123
3.3.2 Produtividade de grãos.....	129
3.4 CONCLUSÃO.....	132
3.5 REFERÊNCIAS	132

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é um dos maiores e mais importantes biomas do Brasil, com uma área de pouco mais de 200 milhões de hectares, representando aproximadamente 24% do território nacional (IBGE, 2017). Considerada a principal região produtora de alimentos do Brasil, abriga 45% da área agrícola nacional, com produção de: 35% do rebanho bovino, 52% da soja, 52% da cana de açúcar, 54% do milho e 96% do algodão (Conab, 2018; IBGE, 2018).

Na região do Cerrado, a produção agrícola ocorre basicamente em três safras anuais: a primeira safra, semeada de outubro a dezembro; a segunda safra (conhecida como safrinha), com semeadura entre janeiro e março (Conab, 2018). Algumas culturas são cultivadas em uma terceira safra, no inverno, semeadas a partir da segunda quinzena de abril até o final de maio, sob condições irrigadas (Conab, 2019). Na segunda safra, as médias de precipitação são inferiores as observadas na primeira safra.

Tradicionalmente, o milho e o feijão são as espécies mais cultivadas no período da safrinha no Cerrado. Entretanto, alguns trabalhos evidenciam a alta susceptibilidade dessas duas espécies ao déficit hídrico, sendo esse um dos principais fatores que provocam a redução da produtividade destas culturas (Silva et al. 2020, Nilahyane et al. 2020). No contexto das mudanças climáticas, as previsões apontam para uma diminuição das precipitações e uma extensão dos períodos de seca, com forte impacto na agricultura (Bates et al. 2008) e, por a safrinha ser uma época com menor disponibilidade hídrica e com ocorrência frequente de veranicos, tem-se, atualmente, como um dos grandes desafios da agricultura no Cerrado, a obtenção de espécies tolerantes ao estresse hídrico e com elevado potencial de produção de grãos para o período de safrinha.

Para a avaliação do potencial dessas espécies, o estudo das respostas fisiológicas e morfológicas ao estresse hídrico é fundamental para se compreender os seus mecanismos de tolerância à seca. As plantas possuem vários mecanismos de proteção em resposta ao déficit hídrico. Uma das primeiras reações da planta é o fechamento estomático, que tem por consequência

a redução da absorção de CO₂, sendo que, quanto mais prolongado for o fechamento estomático, menor será a fotossíntese da planta (Androcioli et al. 2020). Outro mecanismo utilizado é a redução de área de transpiração, pela diminuição da expansão celular e, conseqüentemente, da sua área foliar (Choudhary et al. 2020), o que também diminuir a fotossíntese. Algumas espécies, para manter o potencial hídrico e a turgescência celular, acumulam substâncias osmoticamente ativas de baixo peso molecular no citosol, como a prolina (Ramos et al., 2003) permitindo que a abertura estomática e assimilação de CO₂ sejam mantidos, mesmo em condições de baixo potencial hídrico no solo (Nepomuceno et al. 2001).

O rendimento de grãos não é a única variável afetada pelo estresse hídrico, o seu impacto na qualidade dos produtos agrícolas também é importante (Halford et al., 2014). A maior parte das pesquisas está direcionada para avaliação do estresse hídrico nos atributos morfofisiológicos e produtivos das culturas agrícolas. Pouca atenção tem sido dada ao efeito do estresse hídrico na qualidade dos grãos. A qualidade dos grãos não está relacionada somente à sua composição nutricional, mas também às propriedades funcionais, além do sabor, cor e aroma do produto (Halford et al., 2014).

O conhecimento da variação da composição nutricional e demais componentes em função das condições de cultivo é necessário para várias áreas, como a nutrição e a indústria de alimentos. Além do mais tem-se o aumento da demanda por produtos com maiores teores de proteínas, de fibras e de minerais (Xiong et al., 2017). As proteínas, por exemplo, são nutrientes fundamentais porque são componentes chave das células, fluídos e tecidos corporais (Leser et al., 2013). Portanto, a determinação dos teores de proteínas, de carboidratos, de minerais e dos demais componentes qualitativos dos grãos, cultivados sob diferentes condições, é crucial para a nutrição e saúde humana (Lourenço et al., 2010).

Assim, conforme exposto acima, a avaliação morfofisiológica em condições de campo é fundamental para a fenotipagem e seleção de plantas tolerantes ao estresse hídrico. Entretanto,

esses métodos tradicionais apresentam limitações de tempo, mão de obra, equipamentos, custos, etc (Cendero et al., 2017). Para superar tais limitações, métodos modernos, como técnicas de imageamento não invasivo, foram desenvolvidos para complementar ou até mesmo substituir as tradicionais (Casari et al. 2019; Vitek et al. 2020). Dentre essas novas técnicas, o imageamento térmico tem sido amplamente utilizado em estudos de caracterização de plantas submetidas a estresse hídrico (Banerjee e Krishnan, 2020; Knipper et al. 2020).

Assim, os objetivos desse trabalho foram: 1 – avaliar o efeito do estresse hídrico na fisiologia e produtividade de grãos de feijão, amaranto, quinoa e trigo sarraceno, correlacionando tais resultados com a temperatura do dossel, obtidos por termografia; 2 – avaliar o efeito do estresse hídrico na produtividade e qualidade física e química de grãos de feijão, trigo e triticales; 3 – avaliar o efeito do estresse hídrico na morfologia e produtividade de grãos do feijão, amaranto, trigo, triticales, trigo sarraceno e canola, com a finalidade de verificação do potencial dessas espécies como alternativas ao cultivo do feijão em safrinha na região do Cerrado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O BIOMA CERRADO

2.1.1 Caracterização e potencial agropecuário

O Cerrado é um dos maiores e mais importantes biomas do Brasil, com uma área de pouco mais de 200 milhões de hectares, representando aproximadamente 24% do território nacional (IBGE, 2017). Deste total, 155 milhões de hectares estão no planalto Central e 38,8 milhões no Nordeste (Marouelli, 2003). Este bioma ocorre, total ou parcialmente em 1.389 municípios de 11 estados (Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins, Mato Grosso, Piauí, Bahia, São Paulo, Paraná e Rondônia), além do Distrito Federal (IBGE, 2017). É a segunda maior formação vegetal brasileira e a savana tropical mais rica do mundo em biodiversidade (IBGE, 2017). Além disso, é o centro de origem das nascentes de seis grandes bacias hidrográficas brasileiras: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico Norte-Nordeste, São Francisco, Atlântico-Leste e Paraná-Paraguai (Lima; Silva, 2007).

O Cerrado possui características únicas em relação aos aspectos físicos, bióticos, sociais e econômicos, sendo uma região de importância estratégica para os interesses do país em termos de segurança alimentar, agricultura ambientalmente sustentável e preservação da biodiversidade (Bolfe et al. 2020). Considerada a principal região produtora de alimentos do Brasil, aproximadamente 54,5% do bioma encontra-se sob vegetação nativa, 29,5% sob pastagens plantadas, 11,7% com agricultura anual e perene e 1,5 % com silvicultura (IBGE, 2017; Carneiro Filho e Costa, 2016). Abriga 45% da área agrícola nacional, com produção de 35% do rebanho bovino, 52% da soja, 52% da cana de açúcar, 54% do milho e 96% do algodão (Conab, 2018; IBGE, 2018).

Devido às suas dimensões continentais, o Cerrado abriga uma grande diversidade climática, de características equatoriais, tropicais e subtropicais (Nascimento e Novais, 2020). Segundo a classificação de Köppen, predomina no bioma a classificação Aw (clima tropical, com chuva de

verão e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C) e, nos extremos sudoeste e sudeste do bioma, a tipologia Cwa (clima subtropical, com chuva de verão e verão quente, sendo o mês mais frio com temperatura média entre -3°C e 18°C e o mês mais quente com temperatura média maior do que 22° C) (Silva et al. 2008). A característica climática mais marcante no bioma é a existência de duas estações bem definidas: uma estação fria e seca de inverno (de maio a setembro) e outra quente e úmida de verão (de outubro a abril) (Alvares et al. 2013).

A média espacial de precipitação no bioma é de 1.359 mm, havendo o predomínio de classe de valores de média anual variando entre 1.401 e 1.500 mm, em 37,4% do Cerrado, seguida pela classe de 1.201 a 1.400 mm em 30,3% do território (Silva et al. 2008; Nascimento e Novais, 2020). Os menores valores médios anuais de precipitação, abaixo de 800 mm, concentram-se numa faixa situada no limite leste do bioma (Nascimento e Novais, 2020). A marcante sazonalidade pluviométrica no bioma Cerrado é caracterizada por precipitações superiores a 900 mm no período chuvoso (primavera e verão) e precipitações inferiores a 600 mm no período de outono e inverno. Os meses de maio a agosto apresentam médias mensais de precipitação inferiores a 40 mm, podendo registrar nenhuma precipitação no mês de julho, e os meses de outubro a abril são os com os maiores valores médios mensais, superiores a 81 mm, sendo dezembro, janeiro e fevereiro, os meses mais chuvosos, predominando médias mensais superiores a 241 mm (Nascimento e Novais, 2020).

A média espacial de temperatura média é de 24° C, predominando a classe de temperatura média de 23,1 a 25°C, sob cerca de 32,9% da área do bioma, seguido pela classe de maiores temperaturas 26,1 a 28°C, em 22,5% do bioma (Silva et al. 2008; Nascimento e Novais, 2020). Os menores valores de temperatura são observados à Sudoeste de Mato Grosso, ao Sul de São Paulo e na porção Leste do Bioma em Minas Gerais, locais em que a média é em torno de 18,7°C e os maiores valores, na parte Norte do bioma, abrangendo principalmente os estados do Tocantins, Maranhão e Piauí, onde as médias alcançam 28° C (Nascimento e Novais, 2020).

No Cerrado podem ser encontradas a maioria das ordens de solo (Pinheiro et al. 2008). Entretanto, predomina a ordem dos Latossolos, a qual ocupa aproximadamente 40% da área (Reatto et al. 2005). Os Latossolos são, em geral, solos com alto grau de intemperização, sendo muito evoluídos pedogeneticamente (Marcolin e Calegari, 2020). São solos profundos, de coloração mais ou menos homogênea, com matizes avermelhadas e/ou amareladas e presença de horizonte diagnóstico B latossólico (Gaspari et al. 2020). O fato de serem solos responsivos às práticas agrícolas, situarem em relevos planos a suave ondulados e serem profundos, características estas que facilitam a mecanização, contribuíram significativamente para a expansão da agropecuária na região do Cerrado (Fontana et al. 2016).

2. 1. 2 Produção agrícola em período de safrinha no Cerrado

Na região do Cerrado, a produção agrícola ocorre basicamente em três safras anuais: a primeira safra, semeada de outubro a dezembro; a segunda safra (conhecida como safrinha), com semeadura entre janeiro e março e uma terceira safra no inverno, semeado da segunda quinzena de abril a junho, sob condições irrigadas (Conab, 2019). Na segunda safra, as médias de precipitação são inferiores as observadas na primeira safra. Na terceira safra, praticamente não há ocorrência de chuvas. Geralmente, na primeira safra, são cultivados: algodão, soja, milho, feijão, amendoim, girassol e sorgo. Na segunda safra, predomina o cultivo de feijão, milho e, em algumas áreas, amendoim, sorgo e milheto. Na terceira safra, há predominância de cultivo de feijão e milho (Conab, 2020).

Na safra 2019/2020, o feijão de safrinha ocupou uma área de aproximadamente 1,42 milhões de hectares, com uma produtividade média de 917 kg ha⁻¹ (Conab, 2020). O milho 2º safra ocupou uma área de aproximadamente 12,7 milhões de hectares, com produtividade média de 5.854 kg ha⁻¹. Entretanto, produtividades de até 9.900 kg ha⁻¹ foram observadas em milho cultivado em safrinha no estado de Mato Grosso (Barbieri et al. 2020; Daniel et al. 2020),

Em virtude da irregularidade na distribuição pluviométrica, da ocorrência de veranicos, e das

precipitações pluviométricas abaixo da quantidade satisfatória, o cultivo realizado na segunda safra apresenta maior risco, principalmente quando a semeadura não é realizada nos primeiros decêndios do ano (Barbieri et al. 2020). Para a cultura do feijão, por exemplo, na parte do Cerrado localizada na região norte e nordeste do bioma (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), o plantio ocorre entre 1º de fevereiro e 30 de abril e a colheita entre 1º de maio e 31 de agosto. Na região Centro-Oeste o plantio ocorre entre 15 de janeiro e 30 de abril e a colheita entre 1º de maio e 31 de julho. Na região Sudeste, o plantio ocorre entre 15 de janeiro e 31 de março e a colheita entre 1º de maio e 30 de julho (Conab, 2020). Destaca-se que, quanto mais tarde for o plantio, maiores os riscos de ocorrência de estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura. A época de plantio influencia inclusive o nível tecnológico adotado pelo produtor. Silva et al. (2016) observaram que para semeaduras realizadas mais cedo (a partir do segundo decêndio de janeiro) é utilizado nível tecnológico alto, e com atraso na época de semeadura (após o terceiro decêndio de fevereiro) reduz-se o nível tecnológico para médio ou baixo.

2. 1. 3 Culturas alternativas para produção em safrinha no Cerrado

Tradicionalmente, o milho e o feijão são as espécies mais cultivadas no período de safrinha no Cerrado. Entretanto, alguns trabalhos evidenciam a alta susceptibilidade dessas duas espécies ao déficit hídrico, sendo esse um dos principais fatores que provocam a redução da produtividade destas culturas (Silva et al. 2020, Nilahyane et al. 2020). No contexto das mudanças climáticas, as previsões apontam para uma diminuição das precipitações e uma extensão dos períodos de seca, com forte impacto na agricultura (Bates et al. 2008). Assim, a busca por novas culturas tolerantes a essas condições adversas é, portanto, importante para gerar estratégias de adaptação na agricultura (Georgakopoulos et al. 2016).

Os pseudocereais (quinoa - *Chenopodium quinoa*; amaranto - *Amaranthus cruentus* e trigo sarraceno - *Fagopyrum esculentum*), e as culturas da canola (*Brassica napus* L.) e triticale (*Triticosecale wittmack*), podem ser espécies com potencial para cultivo no período de safrinha,

devido ao destaque que vem ganhando na agricultura no cenário mundial e nacional. O trigo (*Triticum aestivum*), apesar de ser uma espécie amplamente cultivada e conhecida no mundo e no Brasil, ainda é pouco utilizado em período de safrinha, assim, também é uma espécie que pode apresentar potencial para cultivo nessa época.

Pseudocereais são sementes comestíveis pertencentes a espécies dicotiledôneas que são conhecidas como tal, devido à aparência física e o alto teor de amido semelhante aos cereais verdadeiros, pertencentes a família das monocotiledôneas (Alvarez-Jubete et al. 2010). São uma tendência atual na dieta humana por serem grãos sem glúten e apresentarem um excelente valor nutricional (Villaluenga et al. 2020). As espécies mais importantes são a quinoa, o amaranto e o trigo sarraceno (Villaluenga et al. 2020).

A quinoa é uma espécie pertencente à família Chenopodiaceae, originária da região dos Andes, sendo considerada uma cultura excepcional, com potencial para contribuir com a segurança alimentar em todo o mundo (Reguera et al. 2018). Essa espécie vem apresentando boa adaptação à região do Cerrado devido à quantidade de biomassa e grãos que produz, além de ser uma alternativa para a proteção do solo sob sistema plantio direto (Spehar et al. 2014). Na literatura têm sido observadas produtividades que variaram de 718 a 3.510 kg ha⁻¹ (Vasconcelos et al. 2012; Garrido et al., 2013; Silva, 2017). Seu cultivo tem aumentando, principalmente, nas regiões áridas e semiáridas da região andina da América do Sul, embora seja cultivada em todo o mundo (Choukr-Allah et al. 2016; Bazile et al. 2016). É uma espécie que está bem adaptada a estresses abióticos, como escassez hídrica, baixas temperaturas, salinidade e solos pobres em nutrientes (Adolf et al. 2013; Ruiz et al. 2014). Seus grãos contêm ácidos graxos insaturados, antioxidantes, aminoácidos essenciais, altos níveis de proteínas sem glúten e são ricos em Fe, Mg, fibras e vitaminas (Bastidas et al. 2016; Villaluenga et al. 2020). Os teores de carboidratos, proteínas e lipídeos em seus grãos podem variar de 48,5 a 77,0; 9,1 a 16,7 e 4,0 a 7,6%, respectivamente (Joshi et al. 2018; Shukla et al. 2018; Pereira et al. 2019).

O gênero *Amaranthus*, pertencente a família Chenopodiaceae, tem entre 60 a 70 espécies (Rodriguez et al. 2020). Tem ganhado destaque no cenário produtivo devido à quantidade de grãos que produz e, devido ao alto valor nutritivo, sabor e cor atraente, sendo suas folhas bastante utilizadas para a alimentação humana e animal (Olofyntoie et al. 2015; Sarker et al. 2020). Possui raiz pivotante com abundante ramificação, o que favorece a absorção de água e nutrientes, com adaptação a regiões áridas ou em locais com período de seca prolongado (Liu et al. 2003). Tem apresentado boa adaptação na região do Cerrado. Na literatura são relatadas produtividades que variam de 990 a 3.692 kg ha⁻¹ (Erasmus et al., 2004; Ferreira et al., 2014). Seus grãos, assim como a quinoa, são ricos em amido, fibras e proteínas de alta qualidade, com uma composição balanceada de aminoácidos essenciais, sendo também uma boa fonte de minerais (Villaluenga et al. 2020). Os teores de carboidratos, proteínas e lipídeos em seus grãos podem variar de 63,1 a 70,0; 13,1 a 21,5 e 5,6 a 10,9%, respectivamente (Joshi et al. 2018; Shukla et al. 2018; Pereira et al. 2019).

O trigo sarraceno é uma espécie pertencente à família Polygonaceae com os nomes comuns de trigo sarraceno, trigo mourisco, trigo mouro ou trigo preto. É uma espécie que vem ganhando interesse, mas ainda não é muito cultivada (Aubert et al. 2020). Seu uso tem três vantagens principais: primeiro, cresce bem em solos pobres, não precisa de fertilizantes ou defensivos (Small et al. 2017); segundo, é um pseudocereal com altas qualidades nutricionais, com sementes ricas em lisina, fibras dietéticas e minerais (Alvarez Jubete et al. 2010) e, por último, é reconhecido por suas qualidades medicinais, com altas concentrações antioxidantes, como rutina, taninos e catequina, além de outros compostos que auxiliam na prevenção a várias doenças como diabetes e hipertensão (Kreft 2016; Zhu, 2016). Tem potencial para ser usado como adubo verde, planta de cobertura e para a alimentação animal (Ponce et al. 2019). Na alimentação humana, recentemente tem sido consumido principalmente na forma de macarrão no Japão, Itália e China (Hossain et al. 2020). No entanto, historicamente, as sementes são amplamente utilizadas como farinha de trigo, pão, vinagre e chá (Li et al. 2020). Apresenta-se como uma alternativa de alimento para pessoas com doença

celíaca, devido a ausência de glúten na sua composição (Hornnyak et al. 2020). Os teores de carboidratos, proteínas e lipídeos em seus grãos podem variar de 63,1 a 82,1; 5,7 a 14,2 e 0,7 a 7,4%, respectivamente (Joshi et al. 2018; Shukla et al. 2018; Pereira et al. 2019).

A canola é a segunda fonte de óleo comestível mais importante do mundo (FAO, 2017). O óleo produzido pode ser utilizado tanto na alimentação humana quanto na produção de biodiesel, e o farelo, usado como matéria prima de rações para animais (Tomm, 2007). Seus grãos possuem cerca de 40 a 45% de óleo e 34 a 38% de proteína no farelo (Fietz et al.,1993). Possui uma área cultivada de aproximadamente 35 milhões de hectares, com produtividade média de 2.194 kg ha⁻¹ (FAO, 2017). Contudo, em algumas áreas, dependendo das condições ambientais e da disponibilidade hídrica, foram observadas produtividades de até 4.000 kg ha⁻¹ (George et al. 2019; Mohtashami et al. 2020). Em alguns países, como o Irã, é cultivada com condições de disponibilidade hídrica inferior a 300 mm ao longo do ciclo (Mohtashami et al. 2020). Diversos estudos, em várias regiões do mundo, foram feitos para avaliar o efeito do estresse hídrico na cultura da canola (George et al. 2019; Mohtashami et al. 2020). De modo geral, os autores verificaram que a canola apresenta elevado potencial produtivo em condições de disponibilidade hídrica adequada, entretanto, sob condições de estresse, pode ter perdas significativas de produtividade. No Brasil, a área de cultivo de canola na safra 2019 foi de 34 mil hectares, com uma produtividade média de 1.416 kg ha⁻¹ (Conab, 2020). Destaca-se como importante espécie alternativa produtora de grãos no período de estação fria no Sul do Brasil (Kruger et al. 2011). Apesar de se desenvolver com maior facilidade em regiões que apresentam latitude de 35° a 55° sul, sob climas onde as temperaturas são mais amenas (Costa et al. 2020), alguns trabalhos tem evidenciado o potencial da cultura para cultivo no Cerrado (Pereira, 2019; Araújo, 2020; Lopes et al. 2020).

O triticale, cultura recentemente introduzida no cenário produtivo, está ganhando importância na alimentação humana e animal. É uma espécie de cereal produzida pelo homem,

resultante do cruzamento entre o trigo (*Triticum aestivum*) e o centeio (*Secale cereale*) (Makowska et al. 2020). Devido à alta atividade amilolítica, sistema de glúten fraco e a baixa estabilidade das propriedades tecnológicas do grão e da farinha, tentativas foram feitas para usar o triticale na produção de pães, biscoitos, tortilhas e massas, entretanto, seu uso na produção de alimentos ainda é baixo (Zhu, 2018; Makowska et al. 2020). Contudo, por ser uma fonte de amido, proteína, fibra alimentar e possuir ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas e vitaminas, tem potencial para contribuir com a expansão do mercado de alimentos saudáveis e na formulação de novos produtos cereais integrais (Makowska et al. 2014; Zhu, 2018). No Brasil, foi cultivado em uma área de aproximadamente 15,6 mil hectares na safra 2019/2020, com uma produtividade média de 2.904 kg ha⁻¹ (Conab, 2020). O triticale parece ser uma alternativa interessante a outros cereais, particularmente ao trigo, em ambientes onde as condições de cultivo são desfavoráveis (Bijanazadeh et al. 2020). Tem apresentado desempenho superior ao trigo, tanto em produtividade quanto nos atributos fisiológicos, em condições de estresse hídrico (Akbarian et al. 2011; Silva et al. 2020). No bioma Cerrado, Silva et al. (2020) observaram superioridade da produtividade de grãos do triticale em relação ao trigo e ao feijão, seja em condições de disponibilidade hídrica adequada ou em condições de estresse hídrico.

O trigo (*Triticum aestivum*) é a segunda cultura mais cultivada no mundo, com área de produção estimada em mais de 200 milhões de hectares (Zorb et al., 2018) e seu consumo é responsável por 19% das calorias na dieta humana global, pois o grão é rico em carboidratos e tem maior teor de proteínas que outros cereais importantes como o arroz, milho e centeio (Liu et al., 2018; Zorb et al., 2018). No Brasil, na safra 2019/2020, foi cultivado em uma área de 2,42 milhões de hectares, das quais aproximadamente 91% são localizadas na região sul, com uma produtividade média de 2.757 kg ha⁻¹ (CONAB, 2020). Entretanto, para suprir a demanda interna, o Brasil importou 605,7 milhões de toneladas em 2019 (CONAB, 2020). Apesar da grande dependência da importação de trigo, o Brasil possui um enorme potencial para aumentar a produção de grãos desta

cultura (Fioreze et al. 2020). O país pode até passar para a condição de exportador, caso a produção de trigo seja expandida na região do Cerrado (Pasinato et al. 2018). Soares et al. (2021) e Silva et al. (2020) encontraram produtividades de até 5.302 kg ha⁻¹ e 3.600 kg ha⁻¹, respectivamente, para a cultura do trigo no Cerrado sob diferentes condições hídricas.

2.2. EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA FISIOLOGIA DAS CULTURAS

2.2.1 Fotossíntese, clorofilas, condutância estomática, concentração interna de CO₂ e transpiração.

O termo fotossíntese significa, literalmente, “síntese usando a luz”. A fotossíntese, base das atividades biológicas das plantas, é o processo em que há captação e utilização de energia luminosa para oxidar H₂O, liberando O₂, e para reduzir CO₂, produzindo compostos orgânicos, como glicose, açúcares, amido (Lacerda et al. 2007; Peixoto, 2020).

O mesófilo foliar é o tecido mais ativo em termos de fotossíntese. As células desse tecido contêm muitos cloroplastos, local onde ocorre a fotossíntese, que são organelas circundadas por uma dupla membrana e que possuem um sistema de membranas internas conhecido como tilacóide (Smith et al. 1997; Peixoto, 2020). Os cloroplastos possuem três compartimentos distintos: o espaço intermembranar, o estroma (matriz) e o lúmen dos tilacóides (Lacerda et al. 2007). Nesse sistema de membranas dos cloroplastos é que se encontram os pigmentos verdes especializados, as clorofilas (Borsuk et al. 2019). As clorofilas são os pigmentos centrais que conduzem o processo fotossintético, absorvendo a energia luminosa nos comprimentos de onda na faixa do azul (430 nm) e vermelho (660 nm) e transformando-a em energia química (Agathokleous et al. 2020). Dividem-se, genericamente, em clorofilas *a* e *b*. A clorofila *a* é o pigmento principal, e a clorofila *b* é considerada como pigmento acessório. A clorofila *a* é utilizada para realizar o primeiro estágio do processo fotossintético (Fase fotoquímica), enquanto que os demais pigmentos, como a clorofila *b*, auxiliam na absorção de luz e na transferência de energia radiante, para os centros de reação (Streit et al. 2005).

Nos cloroplastos, a luz é absorvida pelas moléculas de clorofila. Após a absorção, essas

moléculas tornam-se eletronicamente excitadas, conferindo maior poder de oxirredução as mesmas (Garcia Molina e Leister, 2020). Assim, esta energia é passada para outra molécula oxidada, reduzindo-a, ou a molécula eletronicamente excitada retorna ao seu estado inicial, liberando sua energia re-emitindo um fóton (Ruhle et al. 2018). A energia da luz absorvida é utilizada para impulsionar a transferência de elétrons, na cadeia de transporte de elétrons, para reduzir Fosfato de Dinucleotídeo de Nicotinamida e Adenina (NADP^+) em NADPH e para formar um gradiente de prótons entre o estroma e o lúmen dos tilacóides, o qual é usado para síntese de ATP, sendo os dois (NADPH e ATP) utilizados como poder redutor, no estroma do cloroplasto, para a incorporação do CO_2 no ciclo de Calvin-Beanson, na segunda fase da fotossíntese, a fase bioquímica, produzindo compostos orgânicos ricos em energia (Rochaix et al. 2011).

Assim, conforme verificado acima, o processo fotossintético utiliza como substrato dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e luz (Bian et al. 2019; Stibert et al. 2020) e tem a clorofila como principal pigmento envolvido no processo de captação da luz. A ocorrência de déficit hídrico inviabiliza o processo fotossintético, uma vez que a água, além de ser componente básico da reação, também é responsável pela transpiração, essencial para a entrada de CO_2 no mesófilo foliar (Buchanan et al. 2000). A taxa fotossintética e a taxa de transpiração são alterados em vários graus quando as plantas são submetidas a condições de estresse hídrico (Wang et al. 2016). Adicionalmente, situações de déficit hídrico também afetam a concentração e a atividade das moléculas de clorofila.

Quanto à disponibilidade de CO_2 para o processo fotossintético, os estômatos são os órgãos vegetais responsáveis pelas trocas gasosas foliares, isto é, entrada e saída de água e CO_2 . A condutância estomática reflete, basicamente, o controle da abertura dos estômatos. Sob condições de estresse hídrico, o potencial hídrico das folhas decresce de forma gradual. Para evitar a perda de água, a abertura dos estômatos diminui, levando a um aumento da resistência; assim, o CO_2 que entra nos estômatos diminui, e ao mesmo tempo, a concentração intercelular de CO_2 também é

reduzida, provocando redução na fotossíntese das culturas (Martin, 2008; Cai et al. 2015; Bhushal et al. 2019). À medida que a severidade do estresse hídrico aumenta, a abertura dos estômatos continua diminuindo, podendo até fechar completamente, bloqueando a entrada de CO₂ nas folhas (Xyngyang et al. 2020). Conseqüentemente, devido à baixa concentração de CO₂ no mesófilo foliar, há acúmulo de NADP⁺ e redução no conteúdo de NADPH (Sairam et al. 2000). Sob tais condições, o O₂ passa a substituir o CO₂ como receptor de elétrons (Flexas et al. 2004). Com isso, aumenta-se a formação de espécies reativas de oxigênio, como super-óxidos e peróxidos de hidrogênio (H₂O₂) que são extremamente prejudiciais para a planta (Grassi et al. 2005; Farooq et al. 2009). A atividade dessas espécies reativas de oxigênio pode causar peroxidação lipídica e conseqüentemente injúrias na membrana celular, degradação de proteínas, inativação enzimática, degradação de pigmentos fotossintéticos e ruptura de fitas de DNA (Davies, 1987; Imlay, 1998). Grande parte dos danos causados às plantas submetidas a estresses, está relacionada a danos oxidativos no nível celular (Allem, 1995).

A eficiência na absorção de luz depende da concentração dos pigmentos fotossintéticos e da sua estrutura (Porcar-Castell et al. 2014). O estresse hídrico altera não apenas a atividade do aparelho fotoquímico, mas a concentração de clorofila na folha devido a distúrbios metabólicos (Carter et al. 2001). Pode inibir significativamente a síntese de clorofila ou acelerar a sua degradação, reduzindo as concentrações desses pigmentos, afetando diretamente o processo fotossintético (Ashraf et al. 2013). A degradação da clorofila inicia-se com a conversão da clorofila *b* em clorofila *a*. Tal processo constitui em um mecanismo de defesa da planta, porque a clorofila *a* tem um poder antioxidante maior do que a clorofila *b* e reage com espécies reativas de oxigênio, tóxicas à planta, produzidas em decorrência do estresse hídrico (Streit et al. 2005).

2.2.2 Prolina

À medida que o teor de água no solo é reduzido, o seu potencial matricial torna-se cada vez mais negativo, dificultando a absorção de água pelas plantas. As plantas só conseguem absorver

água, quando o seu potencial hídrico for mais negativo que o do solo. Para baixar o seu potencial hídrico, tornando-o mais negativo que o do solo, algumas espécies adotam um mecanismo denominado, ajuste osmótico (Hessini et al. 2019). O ajuste osmótico constitui-se um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, sob condições de baixo potencial hídrico no solo (Marin de La Rosa et al. 2019). Existe considerável variação, entre diferentes culturas, na capacidade de ajuste osmótico e isso deve ser considerado ao medir a habilidade da cultura em suportar a seca. Espécies como o milho e sorgo apresentam alta capacidade de ajuste osmótico enquanto o trigo e o feijão normalmente apresentam baixa capacidade de ajuste (Oosterhuis e Wullschleger, 1988).

Nesse mecanismo, em resposta ao estresse hídrico, as plantas acumulam, no vacúolo ou no citosol, grandes quantidades de diferentes tipos de compostos orgânicos altamente solúveis de baixo peso molecular, que geralmente não são tóxicos em altas concentrações celulares (Hayat et al. 2012; Russo et al. 2020; Silva et al. 2020). As moléculas dipolares da água são atraídas e retidas pelos solutos (cátions e ânions), induzindo um decréscimo na atividade da água, e conseqüentemente, redução no potencial hídrico. Esses solutos fornecem proteção às plantas contra o estresse, contribuindo para o ajuste osmótico celular, desintoxicação de espécies reativas de oxigênio, proteção da integridade da membrana e estabilização de enzimas/proteínas (Hayat et al. 2012; Rana et al. 2017; Pizolato Neto, 2019; Arteaga et al. 2020). Estes incluem prolina, sacarose, polióis, trealose e compostos de amônio quaternário, como glicina betaína, alinina betaína, prolina betaína (Rhodes et al. 1993; Ashraf et al. 2004).

A prolina é um osmólito comum em plantas, que se acumula em resposta a diferentes tipos de estresse abiótico, incluindo a seca, em uma variedade de espécies de plantas (Parvaiz et al. 2008; Szabados et al. 2010). O acúmulo deste aminoácido é resultado do aumento do fluxo de glutamato, que é metabolizado pela Pirrolina-5-Carboxilato Sintetase (P5CS), enzima que regula a taxa de biossíntese de prolina; bem como de um decréscimo de metabolismo desse aminoácido (Pizolato

Neto, 2019). A enzima P5CS, responsável pela transformação de Pirolina-5- Carboxilato (P5C) em prolina, tem sua expressão regulada por mudanças no potencial osmótico no citoplasma. Um decréscimo no potencial osmótico da célula leva a um aumento na síntese de P5C e, conseqüentemente, a um aumento na síntese de prolina (Hare e Cress, 1997).

Entretanto, ainda não está claro se o acúmulo de prolina está associado ao aumento da tolerância ao estresse hídrico em todas as espécies, uma vez que resultados contraditórios são encontrados na literatura (Arteaga et al. 2020). Na cultura do feijão, por exemplo, em alguns foram observadas correlação positiva entre os teores mais altos de prolina com regimes hídricos menores, indicando maior tolerância ao estresse hídrico (Kusvuran et al. 2017; Wang et al. 2019), enquanto que em outros trabalhos foram observadas concentrações mais altas de prolina em espécies mais sensíveis ao estresse hídrico (Al Hassan et al. 2016; Morosan et al. 2017). Na cultura do amaranto, Slabert e Kruger (2014) observaram que o estresse hídrico aumentou significativamente a produção de prolina livre nas folhas, entretanto, não encontraram correlação positiva entre a produção de prolina e a manutenção do turgor ou área foliar. Segundo os autores, tal resultado indicou que a prolina não desempenhou um papel de osmorregulação ou adaptação osmótica, mas apenas como reserva de carbono e nitrogênio durante o estresse hídrico. Gomes et al., (2010) também não obtiveram associação de prolina com osmoregulação, mas sim com preservação da membrana celular das plantas.

2.2.3 Eficiência no uso da água

A razão entre a taxa fotossintética e a taxa de transpiração resulta na eficiência de uso da água – EUA (Yasi et al. 2020). Basicamente, reflete a relação entre a fixação de carbono e a perda de água nas plantas, ou a quantidade de biomassa produzida por unidade de água transpirada (Tavera et al. 2018). Uma maneira de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir o consumo de água na agricultura é a seleção de espécies/cultivares com maior eficiência no uso da água (Ruiz Nieto et al. 2015; Yasi et al. 2020), principalmente em espécies com altas demandas

hídricas cultivadas em sequeiro (Tavera et al. 2018).

Diversos mecanismos são adotados pelas espécies para aumento na eficiência no uso da água. Tavera et al. (2018), ao avaliar os mecanismos para aumento da EUA em cultivares de feijão, verificaram que nas mais tolerantes, houve acréscimo na massa de raízes, o que lhes permitiu satisfazer as necessidades hídricas de uma área foliar maior. Espécies mais eficientes, de modo geral, também apresentam maior capacidade de modulação da atividade estomática. Essas espécies conseguem manter altas taxas fotossintéticas, com baixa transpiração, enquanto que, espécies menos eficientes, apesar de terem altas taxas fotossintéticas, tem alta condutância e transpiração, havendo, conseqüentemente, maior custo para produção (Tavera et al. 2018). Wang et al. (2016) observaram aumento na eficiência no uso da água em variedades de trigo à medida que foi reduzida a perda de água por transpiração, devido a limitação estomática.

2.2.4 Temperatura do dossel e termografia

Quando o suprimento de água é adequado, o aumento da temperatura ambiental resulta em aumento da condutância estomática e maior taxa de transpiração das culturas para resfriar as folhas (Tanner, 1963). Sob condições de estresse hídrico, a redução na transpiração ocasionada pelo fechamento dos estômatos provoca a diminuição da transpiração, o que causa o aumento da temperatura do dossel das plantas (Duan et al. 2018). Se o teor de água no solo for suficiente para o desenvolvimento da planta, a diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar é zero ou negativa, mas se as plantas estiverem sob condições de estresse hídrico, este valor é positivo (Nemeskeri et al. 2019). Um aumento de 1°C na temperatura do dossel está relacionado com a diminuição de 10% na transpiração (Helyes et al. 2010).

Devido a essa forte relação com as variáveis fisiológicas, o estudo da temperatura do dossel tem atraído muita atenção nas últimas décadas como meio de estimar o status hídrico das culturas (Gonzales-Dugo et al. 2020). É um dos parâmetros fisiológicos mais importantes relacionados à transpiração, potencial de água na folha e condutância estomática (Zhang et al. 2019). Alterações na

temperatura têm sido mensuradas para avaliar o efeito do estresse hídrico em diversas culturas, como feijão (Heyes et al. 2005); soja (Maimaitijiang et al. 2017; Bai e Purcell, 2018), milho (Casari et al. 2019; Zhang et al. 2019), algodão (Cohen et al. 2017; Bian et al. 2019).

O desenvolvimento de câmeras térmicas de alta resolução criou possibilidades de uso de imagens térmicas adquiridas de sistemas aerotransportados (veículos aéreos não tripulados e aeronaves tripuladas) para o monitoramento em larga escala de plantações (Khanal et al. 2017). Os veículos aéreos não tripulados tornaram-se uma plataforma de fenotipagem de campo avançada para fornecer dados com alta resolução espaço temporal (Zhang et al. 2019). O imageamento térmico com o uso de veículos aéreos não tripulados tem sido amplamente utilizado em estudos de caracterização de plantas submetidas a estresse hídrico (Blaya-Ros et al. 2020; Banerjee e Krishnan, 2020; Knipper et al. 2020). Casari et al. (2019), observaram que as imagens termográficas discriminaram genótipos de milho contrastantes para tolerância à seca, com resultados similares à fenotipagem tradicional da cultura.

Assim, a mensuração da temperatura do dossel apresenta uma série de vantagens em comparação com outros métodos de monitoramento hídrico na planta, como a bomba de pressão (bomba de Sholander), pois fornece uma abordagem prática para monitorar as condições hídricas remotamente e em larga escala (Gonzales-Dugo et al. 2020). Adicionalmente, é um método não destrutivo e que requer pouca mão de obra (Zhang et al. 2019).

2.3. EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA QUALIDADE DE GRÃOS

Geralmente, a maior parte das pesquisas está direcionada para a avaliação do efeito do estresse hídrico nos atributos morfofisiológicos e produtivos das culturas agrícolas. Pouca atenção tem sido dada ao efeito do estresse hídrico na qualidade dos grãos. O conhecimento da variação da composição nutricional e demais componentes em função das condições de cultivo é necessário para programas de desenvolvimento em várias áreas, como a nutrição e na indústria de alimentos. Além do mais tem-se o aumento da demanda por produtos com maiores teores de proteínas, fibras

e minerais (Xiong et al., 2017). Portanto, a determinação dos teores de proteínas, lipídeos, carboidratos, minerais e dos demais componentes qualitativos nos grãos, cultivados sob diferentes condições, é crucial para o manejo da nutrição e saúde humana (Lourenço et al., 2010).

As proteínas são um dos nutrientes mais importantes para a saúde humana por ser componente chave das células, fluídos e tecidos corporais (Leser et al, 2013). O trigo e o feijão são excelentes fontes de proteínas e de carboidratos. Entretanto, fatores edáficos e ambientais como a deficiência de nutrientes, acidez do solo e a seca reduzem a produtividade e a qualidade dos grãos dessas culturas (Amede et al., 2004). Gahanbari et al., (2014), observaram que as alterações no teor de proteína em feijão sob estresse hídrico dependem do cultivar. Ardakani et al. (2013) avaliaram o efeito do estresse hídrico sobre a produção de grãos e no teor de proteínas de feijão rajado e observaram que o maior teor de proteínas nos grãos (23.21%) ocorreu em condições de estresse hídrico e o menor teor (21.87%) foi observado no tratamento controle (irrigação adequada). Apesar do teor de proteínas em leguminosas ser uma característica genética, fatores ambientais como o estresse hídrico alteram seus teores, provocando aumento (Bayat et al., 2010) ou diminuição de seus teores (Khamssi, 2011). Aumento de proteínas no grão foi relatado no trigo quando ocorreu estresse hídrico durante o estágio de enchimento do grão (Flagella et al. 2010). Em quinoa, alguns trabalhos não encontraram efeitos significativos do estresse hídrico na maioria dos parâmetros de qualidade de grãos (Fischer et al. 2017; Games et al. 2019).

Quanto ao teor de lipídeos, observa-se na literatura que, em geral, reduções em condições de estresse hídrico. Segundo Labusch et al. (2013), o déficit hídrico causa processos degradativos, como a estimulação de atividades lipolíticas e peroxidativas, bem como a inibição da biossíntese de lipídios, que estão associados a um menor teor de lipídios na membrana. Para algumas famílias de plantas, como a Brassicaceae, a ocorrência de seca durante o período de maturação afeta o acúmulo de óleo nas sementes (Del Carmen Martínez-Ballesta et al., 2013). A seca também reduz a acumulação de lipídeos em ervilhas (Chaiyadee et al., 2013), em girassol (Esmailian et al., 2012),

em milho (Ali et al., 2013), em tremoço (Carvalho et al., 2004), e trigo (Zhao et al., 2009). No entanto, conforme Wang e Frei (2011), essas alterações são estritamente dependentes tanto das espécies de culturas e das cultivares. Noorka et al. (2012) relataram uma diminuição no teor de gordura em grãos de trigo de 2,11% para 1,73% com o aumento do estresse hídrico.

Os carboidratos são nutrientes alimentares muito importantes para o corpo humano, representando a principal fonte de energia para a manutenção do organismo. Segundo Thitisaksakul et al. (2012), uma das principais causas de redução na produtividade devido à seca é o menor teor de amido dos grãos, que é a principal forma de armazenamento de carboidratos nos cereais. Flagella et al. (2010) encontraram maiores teores de carboidratos em variedades de trigo cultivadas em ambientes com maior disponibilidade hídrica. A deficiência hídrica também atua na degradação de pigmentos fotossintéticos das folhas, diminuindo a assimilação de carbono (GAO et al., 2016).

Os minerais são elementos inorgânicos amplamente distribuídos na natureza e essenciais para o crescimento e desenvolvimento adequado do organismo (Paiva et al. 2017). As deficiências minerais nas dietas podem prejudicar o desenvolvimento físico e contribuir para o aparecimento de infecções (Hussain et al. 2010). O aumento dos minerais nos grãos em condições de maior disponibilidade hídrica pode ocorrer devido ao aumento da translocação desses elementos das raízes para os grãos, promovida pela maior disponibilidade de água durante o período vegetativo. Segundo Ferreira et al. (2008) quando há baixa disponibilidade de água no solo, todos os íons tornam-se menos móveis, devido à substituição de água por ar nos espaços de poros entre as partículas do solo, aumentando a tortuosidade e a força de retenção de íons pelos colóides do solo, diminuindo absorção. Segundo Ahanger et al. (2016), para o P, por exemplo, o estresse hídrico reduz a sua mobilidade e transferência do solo para a raiz e subsequente transporte para o caule, pois este move-se predominantemente por difusão. O potássio é outro nutriente que, apesar de apresentar maior mobilidade que o P no solo, em condições de estresse hídrico, sua absorção e translocação pelas raízes é reduzida (Wang et al. 2013).

2.4. MECANISMOS DE TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO

As plantas apresentam diferentes estratégias para adaptação e sobrevivência em situações de estresse hídrico. Os mecanismos desenvolvidos para resistirem à seca, são classificados em três categorias principais: a) fuga ao estresse hídrico; b) prevenção ao estresse hídrico; c) tolerância ao estresse hídrico (Chaves Filho et al. 2001; Izanloo et al. 2008; Sourour et al. 2017; Peixoto, 2020). As espécies que adotam o mecanismo de prevenção ao estresse hídrico são conhecidas como espécies que toleram a seca com alto potencial hídrico (adiam a desidratação) e as que adotam o mecanismo de tolerância ao estresse hídrico são conhecidas como espécies que toleram a seca com baixo potencial hídrico (toleram a desidratação) (Turner, 1986; Chaves Filho et al. 2001). Segundo Izanloo et al. (2008), a compreensão dos mecanismos de tolerância à seca, principalmente os fisiológicos, tem um grande potencial para melhorar e selecionar espécies tolerantes a seca.

No mecanismo de fuga, as plantas adotam a estratégia “escape” através da antecipação do seu ciclo, antes que seus tecidos atinjam um déficit hídrico de tal magnitude que possa afetar seu desenvolvimento normal (Leonardis et al. 2012; Nemeskeri et al. 2019; Peixoto, 2020). Sob condições extremas de estresse, as plantas antecipam seu ciclo, entram em senescência precoce, com o objetivo de tentar garantir a perpetuação da espécie, entretanto, tal mecanismo reduz o período fotossintético e conseqüentemente impede o enchimento completo dos grãos, resultando em um efeito negativo no peso dos grãos e na produtividade (Muchero et al., 2013 ; Chen et al. al., 2015; Chacon et al., 2017).

O mecanismo de prevenção visa manter o potencial de água elevado nos tecidos, mantendo-se a absorção de água ou diminuindo a perda de água por transpiração. Para manter a absorção de água, a planta pode: aprofundar o sistema radicular; aumentar a condutividade hidráulica; aumentar a relação raiz/parte aérea e realizar osmorregulação nas raízes (Kooyers, 2015; Nemeskeri et al. 2019; Peixoto, 2020). Para reduzir a perda de água (menor transpiração), a planta pode adotar as seguintes estratégias: redução da condutância da epiderme (espessamento da cutícula); redução da

superfície evaporativa (área foliar, estômatos) e osmorregulação nas folhas (Nemeskeri et al. 2019; Peixoto, 2020).

O mecanismo de tolerância à seca é caracterizado pela redução no teor de água das plantas sem, contudo, sofrerem injúrias. Esse mecanismo pode ser subdividido em duas estratégias: tolerância com a manutenção do turgor e tolerância à desidratação (Peixoto, 2020). Para manter o turgor as plantas podem promover ajuste osmótico, com o acúmulo de solutos orgânicos e inorgânicos no vacúolo celular (Hessini et al. 2019; Arteaga et al. 2020; Peixoto, 2020). O ajuste osmótico constitui-se um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, sob condições de baixo potencial hídrico no solo (Marin de La Rosa et al. 2019). Também podem manter o turgor com o aumento da elasticidade da parede celular (Ruy et al. 2019). Em situações de estresse hídrico, as plantas evitam o declínio do potencial hídrico reduzindo seu volume celular por meio do encolhimento, devido ao ajuste elástico de suas paredes celulares (Yasi et al. 2020). Na estratégia de tolerância a desidratação, não há manutenção da turgescência celular, mas sim uma tolerância real a dessecação. Nesse caso, suportam o abaixamento do potencial hídrico, conseguindo sobreviver mesmo quando seus tecidos são quase totalmente desidratados (Peixoto, 2020).

As plantas podem apresentar adaptações provenientes de diferentes estratégias, a depender da intensidade do estresse (Aubert et al. 2020). A cultura do feijão, por exemplo, apresenta dois principais mecanismos de adaptação ao estresse hídrico, para manutenção da hidratação da planta: controle estomático, diminuindo as perdas de água, e o desenvolvimento do sistema radicular, para manter a absorção de água (Kuruvadi et al. 1990; Kramer et al. 1995). Os dois são classificados como mecanismos de prevenção. Tavera et al. (2018), ao avaliarem os mecanismos para aumento da EUA em cultivares de feijão, verificaram que, nas mais tolerantes, houve acréscimo na massa de raízes, o que lhes permitiu satisfazer as necessidades hídricas de uma área foliar maior. Reynolds et al. (2010) observaram que no feijoeiro a redução na densidade

estomática foi o mecanismo utilizado para adaptação ao estresse hídrico.

A quinoa é uma espécie que está bem adaptada a estresses abióticos, como escassez hídrica, baixas temperaturas, salinidade e solos pobres em nutrientes (Adolf et al. 2013; Ruiz et al. 2014). A tolerância da quinoa ao estresse hídrico se deve a uma série de estratégias morfológicas, fisiológicas e metabólicas (Games et al. 2019), dentre as quais se destacam: aumento da biomassa da raiz (Games et al. 2019); capacidade para aumentar o crescimento e a profundidade do sistema radicular (Jacobsen et al. 2009; Jacobsen et al; 2013), maior fechamento estomático para reduzir a fotossíntese e transpiração.

A tolerância ao estresse hídrico em espécies de amaranto envolve a ativação diferencial de distintos mecanismos (Rodriguez et al. 2019). Rodriguez et al. (2019), ao avaliarem a respostas ao estresse hídrico em diferentes espécies de amaranto, observaram que, a maior tolerância à seca foi atribuída a duas estratégias principais: uma maior capacidade de ajuste osmótico e um sistema radicular mais vigoroso e eficiente. Assim, verifica-se que a cultura utiliza-se de dois mecanismos diferentes para tolerar o estresse: o mecanismo de tolerância (ajuste osmótico) e o mecanismo de prevenção (sistema radicular vigoroso). Outros trabalhos também relataram que o acúmulo de açúcares redutores e prolina foram os principais fatores que contribuíram para maior tolerância no amaranto (Huerta - Campo et al. 2011; Godoy et al. 2016).

Diferentes mecanismos adaptativos estão envolvidos para conferir maior tolerância à seca em genótipos de trigo, dentre os quais destacam-se: mecanismos que ajudam a manter um alto estado de água nos tecidos, reduzindo a perda de água na superfície foliar, por meio da redução da área foliar (Izanloo et al. 2008). Destaca-se também a produção de substâncias como superóxido dismutase, peroxidase, entre outras, como mecanismos endógenos de proteção celular e subcelular contra o efeito citotóxico de espécies reativas de oxigênio (Kraus et al. 1995; Sairam et al. 2000). O ajuste osmótico é outro mecanismo bastante utilizado nessa espécie. Genótipos de trigo que mantêm alto ajuste osmótico e, conseqüentemente, maior manutenção do turgor foliar, podem ficar menos

estressados e manter maior atividade estomática em um determinado nível de estresse hídrico, do que genótipos que tem menor potencial de ajuste osmótico (Izanloo et al. 2008).

Quanto ao trigo sarraceno, poucos trabalhos tem estudado o impacto do estresse hídrico nessa espécie, portanto, seus mecanismos de tolerância permanecem amplamente desconhecidos (Cawoy et al. 2006; Aubert et al. 2020). Aubert et al. 2020, ao avaliar o efeito do estresse hídrico em duas espécies de trigo sarraceno (*F. esculentun* e *F. tataricum*) observaram que *F. esculentun* adotou os mecanismos de evasão à seca e fechamento estomático, para manter o seu status hídrico e *F. tataricum* exibiu mais características de tolerância à seca pela produção de antioxidantes.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGATHOKLEOUS, E; FENG, Z.Z; PENUELAS, J. Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? **Science of the Total Environment**, v. 726, 2020.

AL HASSAN, M; MOROSAN, M; LÓPEZ-GRESA, M.P; PROHENS, J; VICENTE, O;

BOSCAIU, M. Salinity-induced variation in biochemical markers provides insight into the mechanisms of salt tolerance in common (*Phaseolus vulgaris*) and runner (*P. coccineus*) beans. **International Journal Molecular Science**. v. 17. 2016.

ALLEN, R.D. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants. **Plant Physiology**, v. 107, p. 1049 – 1054, 1995.

ALVARES, C.A; STAPE, J.L; SENTELHAS, P.C; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 407–427. 2013.

ALVAREZ-JUBETE, L; ARENDT, E.K; GALLAGHER, E. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. **Trends Food Science Technology**, v. 21, p. 106–113, 2010.

ANDROCIOLI, L.G; ZEFTA, D.M; ALVES, D.S; TOMAZ, J.P; CIRINO, V.M. Effect of water deficit on morphoagronomic and physiological traits of common bean genotypes with contrasting drought tolerance. **Water**, v. 12, 2020.

ARTEAGA, S; YABOR, L; DIEZ, M.J; PROHENS, J; BOSCAIU, M; VICENTE, O. The use of proline in Screening for tolerance to drought and salinity in Common Bean genotypes. **Agronomy**, v.10, 2020.

ASHARAF, M; HARRIS, P.J.C. Photosynthesis under stressful environments: an overview. **Photosynthetica**, v. 51, p. 163 – 190, 2013.

ASHRAF. M; HARRIS, P.J.C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. **Plant Science**. v.166, p. 3–16, 2004.

AUBERT, L; KONRADOVA, D; BARRIS, S; QUINET, M. Different drought resistance mechanisms between two buckwheat species *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum*. **Physiologia Plantarum**, 2020.

BAI, H; PURCELL, L. C. Aerial canopy temperature differences between fast- and slow-wilting soya bean genotypes. **Journal Agronomy of Crop Science**, v. 204, p. 243–251. 2018

BANERJEE, K; KRISHMAN, P. Normalized Sunlit Shaded Index (NSSI) for characterizing the moisture stress in wheat crop using classified thermal and visible images. **Ecological indicators**, v. 110, 2020.

BARBIERI, J.D; DALLACORT, R; DANIEL, D.F; DALCHIAVON, F.C; FREITAS, P.S.L. Cobertura do solo, evapotranspiração e produtividade do milho safrinha. **Cultura Agronômica**, v. 29, p. 76 – 91, 2020.

BASTIDAS, E.G; DÍAZ-RIZZOLO, D; ROURA, E; MASSANÉS, T; GOMIS, R. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), from Nutritional Value to Potential Health Benefits: An Integrative Review. **Journal of Nutrition & Food Sciences**, v. 6, p. 1–10. 2016.

BASTOS, E.A., NASCIMENTO, S.P., SILVA, E.M., FREIRE FILHO, F.R., GOMIDE, R.L. Identification of cowpea genotypes for drought tolerance. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 42. 2012.

BATES, B; KUNDZEWICZ, Z; WU, S; PALUTIKOF, J. **El Cambio Climático y el Agua;** Intergovernmental Panel on Climate Change: Ginebra, Switzerland, 2008.

BHUSAL, N; HAN, S.G; YOON, T.M. Impact of drought stress on photosynthetic response, leaf water potential, and stem sap flow in two cultivars of bi-leader apple trees. **Scientia Horticulturae**, v. 246, 2019.

BIAN, J; ZHANG, Z; CHEN, J; CHEN, H; CUI, C; LI, X. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery. **Remote Sensing**, v.11. 2019.

BIAN, Z; ZHANG, X; WANG, Y; LU, C. Improving drought tolerance by altering the photosynthetic rate and stomatal aperture via green light in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under drought conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 167, 2019.

BLAYA-ROS, P.J; BLANCO, V; DOMINGO, R; SOTO-VALLES, F; TORRES-SANCHEZ, R. Feasibility of Low-Cost Thermal Imaging for Monitoring Water Stress in Young and Mature Sweet Cherry Trees. **Applied Sciences**, v.10, 2020.

BOLFE, E.L; SANO, E.E; CAMPOS, S.K. **Dinâmica Agrícola no Cerrado: Análises e projeções.** Embrapa, Brasília, DF. 312 p.

BORSUK, A.M; BRODERSEN, C.R. The spatial distribution of Chlorophyll in leaves. **Plant Physiology**, v. 180, p. 1406 – 1417, 2019.

BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry & Molecular Biology of Plants.** 1. ed. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. 1367 p.

CAI, Y; WANG, J; LI, S; ZHANG, L; PENG, L; XIE, W; LIU, F. Photosynthetic Response of an Alpine Plant, *Rhododendron delavayi* Franch, to Water Stress and Recovery: The Role of Mesophyll Conductance. **Frontiers Plant Science**, 2015.

CASARI, R.A.C.N; PAIVA, D.S; SILVA, V.N.B; FERREIRA, T.M.M; SOUZA, M.T; OLIVEIRA, N.G; KOBAYASHI, A.; MOLINARI, H.B.C; SANTOS, T.T; GOMIDE, R.L; MAGALHAES, P.C; SOUZA, C.A.F. Using Thermography to Confirm Genotypic Variation for Drought Response in Maize. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, 2019.

CHAVES FILHO, J.T; SERAPHIN, E.S. Alteração no potencial osmótico e teor de carboidratos solúveis em plantas jovens de lobeira em resposta ao estresse hídrico. **Brazilian Journal of Botany**, v. 24, 2001.

CHOUDHARY, S; GUHA, A; KHOLOVA, J; PANDRAVADA, A; MESSINA, C.D; COOPER, M; VADEZ, V. Maize, sorghum and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. **Plant Science**, v. 295, 2020.

COHEN, Y; ALCHANATIS, V; SARANGA, Y; ROSENBERG, O; SELA, E; BOSAK, A. Mapping water status based on aerial thermal imagery: comparison of methodologies for upscaling from a single leaf to commercial fields. **Precision Agriculture**. v. 18, p. 801–822. 2017.

CONAB (Brasil). **Safra Grãos**: série histórica. 2018. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 set. 2020.

CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**, v. 6 Safra 2018/19 - Sétimo levantamento, Brasília, p. 1-69, 2019.

DANIEL, D.F; DALLACORT, R; BARBIERI, J.D. Evapotranspiração e produtividade de milho safrinha cultivado com crotalária. **Research, Society and Development**, v. 9, 2020.

DAVIES, K.J.A. Protein damage and degradation by oxygen radicals. **Journal Biology and chemistry**, v. 262, p. 9895 – 9891, 1987.

FAROOQ, M; WAHID, A; KOBAYASHI, N; FUJITA, D; BASRA, S.M.A; PLANT, S.M.A.B. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy Sustainable Development**, v. 29, p. 185–212, 2009.

FISCHER, S; WILCKENS, R; JARA, J; ARANDA, M; VALDIVIA, W; BUSTAMENTE, L; GRAF, F.; OBAL, I. Protein and antioxidant composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) sprout from seeds submitted to water stress, salinity and light conditions. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 558–564. 2017.

FLAGELLA, Z; GIULIANI, M.M; GIUZIO, L; VOLPI, C; MASCI, S. Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. **European Journal Agronomy**. v. 33, p. 197–207. 2010

FLEXAS, J; BOTA, J; LORETO, F; GORNIC, G, SHARKEY, T.D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, v.6, p. 269 – 279, 2004.

FONTANA, A; TEIXEIRA, W.G; BALIEIRO, F.C; MOURA, T.P.A; MENEZES, A.R; SANTANA, C.I. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1457 – 1465, 2016.

GAMES, A.L; SOBA, D; ZAMARRENO, A.M; MINA, J.M.G; ARANJUELO, I; MORALES, F. Effect of Water Stress during Grain Filling on Yield, Quality and Physiological Traits of Illpa and Rainbow Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars. **Plants**, v.8, 2019.

GASPARI, M.C; PONTELLI, M.E; CORREIO, V.H.R.B. Natureza poligenética de latossolo Bruno em patamares extensos no meio Oeste Catarinense – Planalto das Araucárias. **Geografia Ensino e Pesquisa**, v. 24, 2020.

GEORGAKOPOULOS, P; TRAVLOS, I.S; KAKABOUKI, I; KONTOPOULOU, C.K; PANTELIA, A; BILALIS, D.J. Climate Change and Chances for the Cultivation of New Crops. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici**, v. 44, p. 347–353. 2016.

GODOY, L; REGUERA, M; ABDEL-TAWAB, YM; BLUMWALD, E. Water deficit stress-induced changes in carbon and nitrogen partitioning in *Chenopodium quinoa* Willd. **Plant**, v. 243, p. 591–603, 2016.

GONZALES-DUGO, V; TESTI, L; VILLALOBOS, F.J; BERNAL, A.L; ORGAZ, F; TEJADA, P.J.Z; FERERES, E. Empirical validation of the relationship between the crop water stress index and relative transpiration in almond trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 292, 2020.

GRASSI, G; MAGNANI, F. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. **Plant Cell Environmental**, v. 28, p. 834 – 849, 2005.

HALFORD, N.G; CURTIS, T.Y; CHEN, Z; HUANG, J. Effects of abiotic stress and crop management on cereal grain composition: implications for food quality and safety. **Journal of Experimental Botany**. v. 66, p. 1145-1156. 2014.

HARE, P.D; CRESS, W.A. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. **Plant growth regulation**, v. 21, p. 79-102. 1997.

HAYAT, S; HAYAT, Q; ALYEMENI, M.N; WANI, A.S; PICHTEL, J; AHMAD, A. Role of proline under changing environments: A review. **Plant Signaling & Behavior**. v. 7, p. 1456–1466. 2012.

HELYES, L; BÓCS, A; PÉK, Z. Effect of water supply on canopy temperature, stomatal conductance and yield quantity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **International Journal Horticultural Science and Technology**, v. 16, 13–15. 2010

HESSINI, K. ISSAOUI, S. FERCHICHI, T. SAIF, C. ABDELLY, K.H. SIDDIQUE, C. CRUZ. Interactive effects of salinity and nitrogen forms on plant growth, photosynthesis and osmotic adjustment in maize. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.139, p. 171-178, 2019.

HUERTA-OCAMPO, JA; LEON-GALVAN, MF; ORTEGA-CRUZ, LB; BARRERA-PACHECO, A; DE LEON-RODRIGUEZ, A; MENDOZA-HERNÁNDEZ, G; BARBA DE LA ROSA, AP. Water stress induces up-regulation of DOF1 and MIF1 transcription factors and down-regulation of proteins involved in secondary metabolism in amaranth roots (*Amaranthus hypochondriacus* L.). **Plant Biology**, v. 13, p. 472–482. 2011.

IBGE. **Brasil em Síntese: território**. Rio de Janeiro, (2017).

IBGE. **Brasil em Síntese: território**. Rio de Janeiro, (2018).

IBGE. **Produção agrícola e pecuária municipal**: censo agropecuário, produção e extração vegetal da silvicultura. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>> . Acesso em: 12 out. 2020..

IMLAY, J.A; LINN, S. DNA damage and oxygen radical toxicity. **Science**, v. 240, p. 1302 – 1309, 1988.

IZANLOO, A; CONDON, A.D; LANGRIDGE, P; TESTER, M; SCHNURBUSCH, T. Different mechanisms of adaptation to cyclic water stress in two South Australian bread wheat cultivars. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, p. 3327 – 3346, 2008.

JACOBSEN, S.E.; JENSEN, C.R.; LIU, F. Improving Crop Production in the Arid Mediterranean Climate. **Field Crops Research**, v. 128, p. 187–209, 2013.

JACOBSEN, S.E; LIU, F; JENSEN, C.R. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Scientia Horticulturae**. v. 122, p. 281–287, 2009.

KHANAL, J. FULTON, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 22-32. 2017.

KNIPPER, K.R; KUSTAS, W.P; ANDERSON, M.C; NIETO, H; ALFIERI, J.G; PRUEGER, J.H; HAIN, C.R; GAO, F; MCKEE, L.G; ALSINA, M.M; SANCHEZ, L. Using high-spatiotemporal thermal satellite ET retrievals to monitor water use over California vineyards of different climate, vine variety and trellis design. **Agricultural Water Management**, v. 241, 2020.

KRAUS, T.E; MCKERSIE, B.D; FLETCHER, R.A. Paclobutrazol induced tolerance of wheat leaves to paraquat may involve increased antioxidant enzyme activity. **Journal Plant Physiology**, v. 145, p. 570 – 576, 1985.

KREFT, M. Buckwheat phenolic metabolites in health and disease. **Nutrition Research Review** , v. 29, p. 30–39, 2016.

KUSVURAN, S; DASGAN, H.Y. Effects of drought stress on physiological and biochemical changes in *Phaseolus vulgaris* L. **Legume Research**. v. 40, p. 55–62. 2017.

LEONARDIS, A.M; PETRARULO, M; VITA, P.D; MASTRANGELO, A.M. Genetic and Molecular Aspects of Plant Response to Drought in Annual Crop Species. In **Advances in Selected Plant Physiology Aspects**; Giuseppe, M., Dichio, B., Eds.; InTech Publisher: Rijeka, Croatia, p. 45–74. 2012

LESER, S. The 2013 FAO report on dietary protein quality evaluation in human nutrition: recommendations and implications. **Nutrition Bulletin**. v. 38, p. 421-428. 2013.

LIMA, J. E. F. W; SILVA, E. M. Gestão de recursos e manejo da irrigação no Cerrado. In: FALEIRO, F. G; SOUSA, E. D. Pesquisa, desenvolvimento e inovação para o Cerrado. 2007, Planaltina, DF. **Anais...Planaltina: Embrapa Cerrados**, 2007. p. 33-44.

LOURENÇO, S.O; BARBARINO, E; DE-PAULA, J.C; PEREIRA, L.O.D.S; MARQUEZ, U.M.L. Amino acid composition, protein content and calculation of nitrogen-to-protein conversion factors for 19 tropical seaweeds. **Phycological Research**. v. 50, p. 233-241. 2010.

MAIMAITIJIANG, M; GHULAM, A; SIDIKE, P; HARTLING, S; MAIMAITIYIMING, M; PETERSON, K. Unmanned aerial system (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. **ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 134, p. 43–58. 2017.

MARCOLIN, L; CALEGARI, M.R. Atributos químicos, físicos e mineralogia de Latossolos e sua relação com a paisagem no Oeste do Paraná. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 39, 2020.

MARCONLIN, L; CALEGARI, M.R. Atributos químicos, físicos e mineralogia de latossolos e sua relação com a paisagem no Oeste do Paraná. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 39, 2020.

MARÍNDELAROSA, C.W; LIN, Y.J; KANG, S; DHONDT, N; GONZALEZ, D; INZÉ, P. FALTE

R-BRAUN. Drought resistance is mediated by divergent strategies in closely related Brassicaceae. **New Phytologist**, v. 223, p. 783-797, 2019.

MAROUELLI, P.R. O desenvolvimento sustentável da agricultura no Cerrado Brasileiro. 2003, 64 p. Monografia.

MARTIN, S.A. Ajustamento osmótico e energética celular em videiras submetidas a estresse hídrico. Centro de Ciências e tecnologias agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2008, 105 p. Tese de doutorado.

MOHTASHAMI, R; DEHNAVI, M.M; BALOUCHI, H; FARAJI, H. Improving Yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. **Agricultural Water Management**, v. 232, 2020.

MOROSAN, M; AL HASSAN, M; NARANJO, M; LOPEZ-GRESA, M.P; VICENTE, O. Comparative analysis of drought responses in *Phaseolus vulgaris* (common bean) and *P. coccineus* (runner bean) cultivar. **European Biotechnology Journal**. v. 1, p. 247–252. 2017.

NASCIMENTO, D.T.F; NOVAIS, G.T. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Revista de Geografia**, v.9, 2020.

NEMESKERI, E; HELYES, L. Physiological responses of selected vegetable crop species to water stress. **Agronomy**, v.9, 2019.

NEPOMUCENO, A. L. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Biociência, Ciência & Desenvolvimento**, v. 04, p. 12-18, 2001.

NILAHYANNE, A; ISLAM, M.A; MESBAH, A.O; HERBERT, S.K; GARCIA, A.G. Growth, water productivity, nutritive value, and physiology responses of silage corn to water stress. **Agronomy Journal**, v.112, p. 1625-1635, 2020.

PARVAIZ, A.S; SATYAWATI, S. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants - A review. **Plant Soil Environmental**. v. 54, p. 89–99, 2008.

PEIXOTO, C.P. **Princípios de fisiologia vegetal: teoria e prática**. 1 ed. Rio de Janeiro: PoD editora, 2020.

PINHEIRO, L.C.S.J; CASTRO, A.S; MARTINS, E.S. Levantamento das classes de solo existentes nas ecorregiões inseridas no limite do Cerrado contínuo. **Anais do IX Simpósio Nacional do Cerrado**, Brasília, 2018.

PIZOLATO NETO, A. Tolerância ao déficit hídrico em soja: respostas bioquímicas, fisiológicas e morfológicas. Jaboticabal: Faculdade de ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2019, 98 p. Tese de doutorado.

PORCAR CASTELL, E; TYYSTJARVI, J; ATHERTON, C; DER TOL, J; FLEXAS, E.E; PFUNDEL, J; MORENO, C; FRANKENBERG, J.A. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. **Journal Experimental of Botany**, v. 65, p. 4065 – 4095, 2014.

RAMOS, M. L. G., PARSONS, R., SPRENT, J. I., & JAMES, E. K. Effect of water stress on nitrogen fixation and nodule structure of common bean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, 339-347, 2003.

RANA, V; RAM, S; NEHRA, K. Proline biosynthesis and its role in abiotic stress. **International Journal of Agricultural Reseach, Innovation and Technology**. v. 6. 2017.

REATTO, A; MARTINS, E.S. Classes de solo em relação aos controles da paisagem do bioma Cerrado. In: SCARIOT, A; SILVA, J.C.S; FELFITI, J.M. (orgs.). **Cerrado: Ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília; Ministério do Meio Ambiente, 2005, p.57.

REYNOLDS-HENNE, C. E; LANGENEGGER, A; MANI, J; SCHENK, N; ZUMSTEG, A; FELLER, U. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. **Environmental and Experimental Botany**, v. 68, p. 37-43. 2010.

RHODES, D; HANSON A.D. Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher

plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. v.44, p. 357–84. 1993.

ROCHAIX, J.D. Regulation of photosynthetic electron transport. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1807, p.375–383, 2011.

RODRIGUEZ, T.G; HERNANDEZ, I.C; BAYONA, J.A; CHAVEZ, E.R; GALLARDO, N.M; MOJICA, E.M; PEREZ, M.G.L; TORRES, J.M; FRIER, J.D. Identification of Factors Linked to Higher Water-Deficit Stress Tolerance in *Amaranthus hypochondriacus* Compared to Other Grain Amaranths and *A. hybridus*, Their Shared Ancestor. **Plants**, v.8, 2019.

RÜHLE, T.; REITER, B.; LEISTER, D. Chlorophyll Fluorescence Video Imaging: A Versatile Tool for Identifying Factors Related to Photosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.1-13, 2018.

RUI, Y; DINNENY, J.R. A wall with integrity: surveillance and maintenance of the plant cell wall under stress. **New Phytologist**. 2019.

RUIZ-NIETO, J. E; AGUIRRE-MANCILLA, C. L; ACOSTAGALLEGOS, J. A; RAYA-PÉREZ, J. C; PIEDRA-IBARRA, E; VÁZQUEZ-MEDRANO, J; MONTERO-TAVERA, V. Photosynthesis and chloroplast genes are involved in water-use efficiency in common bean. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 86, p. 166-173, 2015.

RUSSO, G.R; TEIXEIRA, N.T; ARRUDA, A.C; TOMAZ JUNIOR, D.C. Prolina e polihidroxibutirato no cultivo do feijoeiro. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.3, p. 1807-1823, 2020.

SAIRAM, R.K; SAXENA, D.C. Oxidative Stress and Antioxidants in Wheat Genotypes Possible Mechanism of Water Stress Tolerance. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 184, p. 55 – 61, 2000.

SANO, E. E; ROSA, R; BRITO, J. L. S; FERREIRA, L. G; BEZERRA, H. D. S. Mapeamento da Cobertura vegetal natural e antrópica do bioma Cerrado por meio de imagens Landsat. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009,

p. 1199-1206.

SARKER, U; OBA, S; DARAMY, M.A. Nutrients, minerals, antioxidant pigments and phytochemicals, and antioxidant capacity of the leaves of stem amaranth. **Scientific Reports**, v.10, 2020.

SILVA, A.F; GONTIJO NETO, M.M; BORGHI, E; RESENDE, A.V; PITTA, R.M; COTTA, L.V. Caracterização dos sistemas de produção de milho safrinha no estado de Mato Grosso. **Anais do XIII seminário nacional de milho safrinha**, 2016.

SILVA, A.N; RAMOS, M.L.G.; RIBEIRO JUNIOR, W.Q; ALENCAR, E.R; SILVA, P.C; LIMA, C.A; VINSON, C.C; SILVA, M.A.V. Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. **Agricultural Water Management**, v.231, 2020.

SILVA, F. A. M; ASSAD, E. D; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do bioma cerrado. IN: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Orgs.). **Cerrado: ecologia e flora. Brasília**: Embrapa, 2008.

SILVA, F.A; PEREIRA, F.H.F; CAMPOS JUNIOR, J.E; NOBREGA, J.S; DIAS, M.S. Aplicação foliar de prolina no crescimento e fisiologia do milho verde cultivado em solo salinizado. **Colloquium agrariae**, v.16, 2020.

SLABBERT, M.M; KRUGER, G.H.J. Antioxidant enzyme activity, proline accumulation, leaf area and cell membrane stability in water stressed *Amaranthus* leaves. **South African Journal of Botany**, v.95, p. 123-128, 2014.

SMITH, W.K.; VOGELMANN, T.C.; DELUCIA, E.H.; BELL; D.T.; SHEPHERD, K.A. 1997.

Leaf form and photosynthesis. **Bioscience**, v. 47, p. 785-793. 1997.

SOUROUR, A; AFEF, O; MOUNIR, R; MONGI, B.Y. A review: Morphological, physiological, biochemical and molecular plant responses to water deficit stress. **The International Journal of Engineering and Science**, v.6, 2017.

STIRBET, A; LAZAR, D; GUO, Y; GOVINDJEE, G. Photosynthesis: basics, history and modeling. **Annals of Botany**, v. 126, 2020.

STREIT, N.M; CANTERLE, L.P; CANTO, M.W; HECKTHEUER, L.H.H. As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, p. 748 – 755, 2005.

SZABADOS, L; SAVOURÉ, A. Proline: A multifunctional amino acid. **Trends Plant Science**. v.15, p. 89–97, 2010.

TANNER, C. B. Plant temperatures. **Agronomy Journal**, v. 55, p. 210–211. 1963.

TAVERA, V.C; MANCILLA, C.L.A; GALLEGOS, J.A.C; PIMENTEL, J.G.R; ARRIAGA, A.I.M;

RUIZ NIETTO, J.E. Mechanisms for water use efficiency between bean cultivars tolerant to drought are different. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.40, 2018.

TURNER, N.C. Adaptation to water deficits: A changing perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 13, p.175-190, 1986.

VITEK, P; VESELÁ, B; KLEM, K. Spatial and Temporal Variability of Plant Leaf Responses Cascade after PSII Inhibition: Raman, Chlorophyll Fluorescence and Infrared Thermal Imaging. **Sensors**, v. 20, 2020.

WANG, Q; ANG, Q; LIN, F; WEI, S.H; MENG, X.X; YIN, Z.G; GUO, Y.F; YANG, G.D. Effects of drought stress on endogenous hormones and osmotic regulatory substances of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at seedling stage. **Applied Ecology Environmental Research**. v. 17, p. 4447–4457. 2019.

WU, X; ZUO, Q; SHI, J; WANG, L; XUE, X; BEN-GAL, A. Introducing water stress hysteresis to the Feddes empirical macroscopic root water uptake model. **Agricultural Water Management**, v.240, 2020.

XINGYANG, S; GUANGSHENG, Z; QIJING, H; HUAILIN, Z. Stomatal limitations to photosynthesis and their critical Water conditions in different growth stages of maize under water

stress. **Agricultural Water Management**, v. 241, 2020.

XIONG, L; ZHANG, B; NIU, M; ZHAO, S. Protein polymerization and water mobility in whole-wheat dough influenced by bran particle size distribution LWT-Food. **Science and Technology**. v. 82, p. 396-403. 2017.

YANG, A; AKHTAR, S.S; LI, L; FU, Q; LI, Q; NAEEM, M.A; HE, X; ZHANG, Z; JACOBSEN, S.E. Biochar Mitigates Combined Effects of Drought and Salinity Stress in Quinoa. **Agronomy**, v.10, 2020.

YASI, H; ATTIA, H; ALAMER, K; HASSAN, F; ALI, E; ELSHAZLY, S; SIDDIQUE, K.H.M; HESSINI, K. Impact of drought on growth, photosynthesis, osmotic adjustment, and cell wall elasticity in Damask rose. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 150, p. 133 – 139, 2020.

ZHANG, L; NIU, Y; ZHANG, H; HAN, W; LI, G; TANG, J; PENG, X. Maize canopy temperature extracted from USV thermal and RGB imagery and its application in water stress monitoring. **Frontiers in Plant Science**, 2019.

ZHU, F. Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat. **Food Chemistry**, v. 203, p. 231–245, 2016.

**CAPÍTULO 1 - ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE EM PLANTAS
COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA NA REGIÃO DO CERRADO
SUBMETIDAS A ESTRESSE HÍDRICO.**

ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE EM PLANTAS COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA NA REGIÃO DO CERRADO SUBMETIDAS A ESTRESSE HÍDRICO

RESUMO - No contexto das mudanças climáticas, as previsões apontam para uma diminuição das precipitações e uma extensão dos períodos de seca, com forte impacto na agricultura. Assim, a busca por novas culturas tolerantes a essas condições adversas é, portanto, importante para gerar estratégias de adaptação na agricultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do estresse hídrico na fisiologia e produtividade de grãos de culturas com potencial para cultivo em safrinha no Cerrado, e em uma espécie já consolidada na safrinha que é o feijão. O experimento foi conduzido na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelas culturas do feijão (*Phaseolus vulgaris*); amaranto (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa*) e trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*). As subparcelas foram compostas por quatro regimes hídricos - RH (535, 410, 304 e 187 mm). No florescimento das culturas foram avaliados: teor de prolina nas folhas (Pr), clorofila (*a*, *b*, total), trocas gasosas (fotossíntese – *A*; condutância estomática - *g_s*, concentração interna de CO₂ – *C_i*; transpiração – *E*), eficiência do uso da água (EUA), produtividade de grãos e biomassa seca (BS) e temperatura do dossel. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação de médias foi feita pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. De maneira geral, houve redução das trocas gasosas tanto em condições de estresse hídrico severo (187 mm), quanto em condições de cultivo no regime hídrico intermediário de 304 mm, condição hídrica de ocorrência comum no período da safrinha no Cerrado. O amaranto foi a espécie mais resiliente que, no RH 304 mm, apenas a *C_i* e a *A* do amaranto foram reduzidos em percentual inferior a 10%. O feijão e trigo sarraceno foram as espécies mais sensíveis ao estresse hídrico, com reduções superiores a 60% na *C_i* e superiores a 85% na *A*. O estresse hídrico não alterou a EUA em nenhuma das espécies estudadas. Ao comparar

as culturas, o amaranto, em todos os regimes hídricos foi a espécie mais eficiente. Houve redução de 69,53% na produtividade de grãos do feijão quando cultivado no regime hídrico de 304 mm, enquanto o amaranto, quinoa e o trigo sarraceno foram tiveram reduções de apenas 21,04 e 20,09 e 23,25%, respectivamente. A redução da disponibilidade hídrica aumentou a temperatura do dossel nas quatro culturas, e o feijão foi a espécie mais sensível, tanto em RH 187 e RH 304 mm enquanto a quinoa foi a espécie que, de modo geral, teve as menores temperaturas. Em geral, o estresse hídrico afetou negativamente a produtividade de grãos e as variáveis fisiológicas, entretanto, em graus diferentes nas quatro culturas estudadas. Todavia, o amaranto, e a quinoa se destacaram, pois mantiveram alta produtividade em regimes iguais ou superiores a 304 mm, situação hídrica de ocorrência comum no período da safrinha na maioria das regiões produtoras de grãos no Cerrado.

Palavras-chave: disponibilidade hídrica, segunda safra, culturas alternativas, trocas gasosas, termografia, eficiência no uso de água.

PHYSIOLOGICAL CHANGES AND PRODUCTIVITY IN PLANTS WITH POTENTIAL FOR CULTIVATION IN SAFRINHA IN THE CERRADO REGION SUBMITTED TO WATER STRESS

ABSTRACT - In the context of climate change, forecasts point to a decrease in rainfall and an extension of drought periods, with a strong impact on agriculture. Thus, the search for new crops tolerant to these adverse conditions is important to generate adaptation strategies in agriculture. The objective of this work was to evaluate the effect of water stress on the physiology and productivity of grains of crops with potential for cultivation during the off-season in the Cerrado and in a species already consolidated in the safrinha that is the bean. The experiment was conducted at Embrapa Cerrados, in Planaltina, DF, Brazil. The experimental design was in randomized blocks, in a split-plot scheme, with four replications. The plots were composed of the common bean (*Phaseolus vulgaris*), amaranth (*Amaranthus cruentus*), quinoa (*Chenopodium quinoa*), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). The subplots were composed of four water regimes - RH (535, 410, 304 and 187 mm). In the flowering of the cultures, the following were evaluated: proline content in the leaves (Pr), chlorophyll (a, b, total), gas exchange (photosynthesis - A; stomatal conductance - g_s , internal concentration of CO_2 - C_i ; transpiration - E), efficiency water use (USA), grain yield and dry biomass (BS) and canopy temperature. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and the comparison of means was done by the Tukey test, at 5% probability. In general, there was a reduction in gas exchange in conditions of severe water stress (187 mm) and in conditions of cultivation in the intermediate water regime of 304 mm, a water condition commonly found in the off-season in the Cerrado. Amaranth was the most resilient species that, in RH 304 mm, only C_i and A of amaranth were reduced to 10%. Common bean and buckwheat were the most sensitive, decreases above 60% in C_i and above 85% in A. Water stress did not alter the EUA in any studied species. When comparing cultures, amaranth, in all water regimes, was the most efficient species. There was a reduction of 69.53% in the grain yield of common bean when grown

in the water regime of 304 mm, while amaranth, quinoa, and buckwheat were reduced by only 21.04 and 20.04 and 23.25%, respectively. The reduction in water availability increased canopy's temperature in the four crops, and beans were the most sensitive species, both in RH 187 and RH 304 mm. At the same time, quinoa was the species that, in general, had the lowest temperatures. In general, water stress negatively affected grain yield and physiological variables; however, to different degrees in the four crops studied. However, amaranth and quinoa stood out, as they maintained high productivity in regimes equal to or greater than 304 mm, a common water situation in the off-season in most grain-producing regions in the Cerrado.

Keywords: water availability, second crop, alternative crops, gas exchange, thermography, water efficiency.

1.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a agropecuária é bem desenvolvida, principalmente na região do Cerrado, com três períodos de cultivo: uma safra principal (período com maior ocorrência de chuvas), de outubro a janeiro, e uma segunda safra, também conhecida como safrinha, de fevereiro a maio, com menor disponibilidade de chuvas e finalmente o cultivo de inverno, quase sem precipitação, irrigado de maio a setembro. Na segunda safra, predomina o cultivo de milho (*Zea mays*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*) (Conab, 2020). Na literatura há trabalhos que evidenciam a alta susceptibilidade dessas duas espécies ao déficit hídrico, sendo esse um dos principais fatores que provocam a redução da produtividade destas culturas (Silva et al. 2020; Nilahyane et al. 2020). Assim, o estudo de diferentes espécies, no intuito de se verificar aquelas mais tolerantes a períodos de deficiência hídrica, bem como o conhecimento de mecanismos que as plantas possuem para tolerar períodos prolongados de seca é essencial para a manutenção da produção agrícola no Cerrado no período da safrinha.

Dentre as espécies com potencial para serem culturas alternativas para cultivo no período de safrinha, destacam-se a quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranto (*Amaranthus cruentus*) e o trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*). A quinoa é um pseudocereal, originária da região dos Andes, que está bem adaptado a estresses abióticos, como escassez hídrica, baixas temperaturas, salinidade e solos pobres em nutrientes (Adolf et al. 2013; Ruiz et al. 2014). Seus grãos contêm ácidos graxos insaturados, antioxidantes, aminoácidos essenciais, altos níveis de proteínas sem glúten e são ricos em Fe, Mg, fibras e vitaminas (Bastidas et al. 2016; Reguera et al. 2018; Villaluenga et al. 2020; Yang et al. 2020). O amaranto é uma espécie amplamente cultivada nos Andes, que produz grãos e, devido ao alto valor nutritivo, sabor e cor atraente, suas folhas também têm sido bastante utilizadas para a alimentação humana e animal (Olofyntoie et al. 2015; Sarker et al. 2020). O trigo sarraceno é uma espécie pertencente à família Polygonaceae com os nomes comuns de trigo sarraceno, trigo mourisco, trigo mouro ou trigo preto. Tem potencial para ser usado como adubo verde, planta de

cobertura e para a alimentação animal (Ponce et al. 2019). Na alimentação humana, recentemente, tem sido consumido principalmente na forma de macarrão no Japão, Itália e China (Hossain et al. 2020). No entanto, historicamente, as sementes são amplamente utilizadas como farinha, na fabricação de pães e produção de vinagre e chá (Li et al. 2020). Assim como o amaranto e quinoa, apresenta-se como uma alternativa de alimento para pessoas com doença celíaca, devido a ausência de glúten na sua composição (Hornnyak et al. 2020). Para avaliação do potencial dessas espécies para cultivo na safrinha, o estudo das respostas fisiológicas ao estresse hídrico é fundamental para se compreender os seus mecanismos de tolerância à seca.

As plantas possuem vários mecanismos de proteção em resposta ao déficit hídrico. Uma das primeiras reações da planta é o fechamento estomático, que tem por consequência a redução da absorção de CO₂, sendo que, quanto mais prolongado for o fechamento estomático, menor será a fotossíntese da planta (Androcioli et al. 2020). Outro mecanismo utilizado é a redução de sua área de transpiração, pela diminuição da expansão celular e, conseqüentemente, da sua área foliar (Choudhary et al. 2020). Algumas espécies, para manter o potencial hídrico e a turgescência celular, acumulam substâncias osmoticamente ativas de baixo peso molecular no citosol, como a prolina (Ramos et al., 2003) permitindo que a abertura estomática e assimilação de CO₂, mesmo que sejam mantidos em condições de baixo potencial hídrico no solo (Nepomuceno et al. 2001). A prolina é um soluto amplamente estudado em culturas de interesse econômico, devido à sua elevada sensibilidade de resposta a condições de estresse (Filippol et al. 2013; Ashrah et al. 2011). Apresenta característica osmoreguladora e osmoprotetora, atuando na manutenção da integridade celular de proteínas, enzimas e membranas, além de possuir efeito antioxidante pela remoção de espécies reativas de oxigênio, e participar de eventos de sinalização molecular na manifestação de genes específicos para o estresse (Matysik et al. 2002).

É fundamental a avaliação morfofisiológica em condições de campo para a fenotipagem e seleção de plantas tolerantes ao estresse hídrico (Soares et al., 2021). Entretanto, os métodos

tradicionais apresentam limitações de tempo, mão de obra, equipamentos, custos, dentre outros (Cendero et al., 2017). Para superar tais limitações, métodos novos, como técnicas de imageamento não invasivo, foram desenvolvidos para complementar ou até mesmo substituir as tradicionais (Casari et al. 2019; Vitek et al. 2020). O imageamento térmico tem sido amplamente utilizado em estudos de caracterização de plantas submetidas a estresse hídrico (Blaya-Ros et al. 2020; Banerjee e Krishnan, 2020; Knipper et al. 2020).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do estresse hídrico na fisiologia e produtividade de grãos de culturas com potencial para cultivo em safrinha no Cerrado, em condições de campo, correlacionando tais resultados com a temperatura do dossel, obtida por meio de termografia.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil (latitude 15° 35 '30 "S, longitude 47° 42' 30" W) (Figura 1) entre junho e outubro de 2017. A escolha desse período para implantação do experimento, diferente do período tradicional de cultivo em safrinha, justifica-se pela baixa ocorrência de chuvas, conforme apresentado na Figura 2, facilitando assim a obtenção precisa dos regimes hídricos adotados.

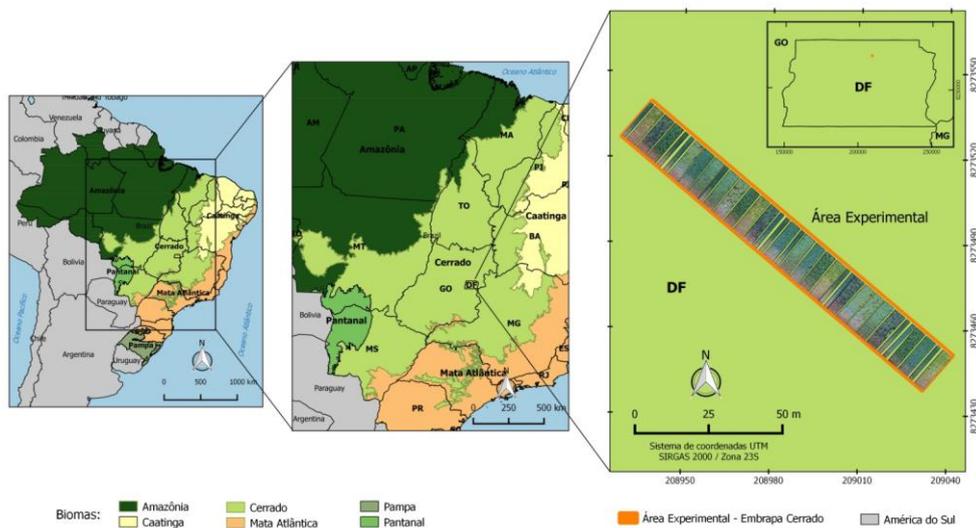


Figura 1: Extensão do bioma Cerrado e localização da área experimental situada no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), Planaltina, DF, Brasil.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (Alvares et al., 2013), com invernos secos e verões chuvosos. A média anual de precipitação é de 1400 mm, e a temperatura média anual de 21,3 °C. Os dados médios de precipitação e temperatura dos últimos 20 anos (1997-2016) e do ano de 2017 (ano de condução do experimento) estão apresentados na Figura 2.

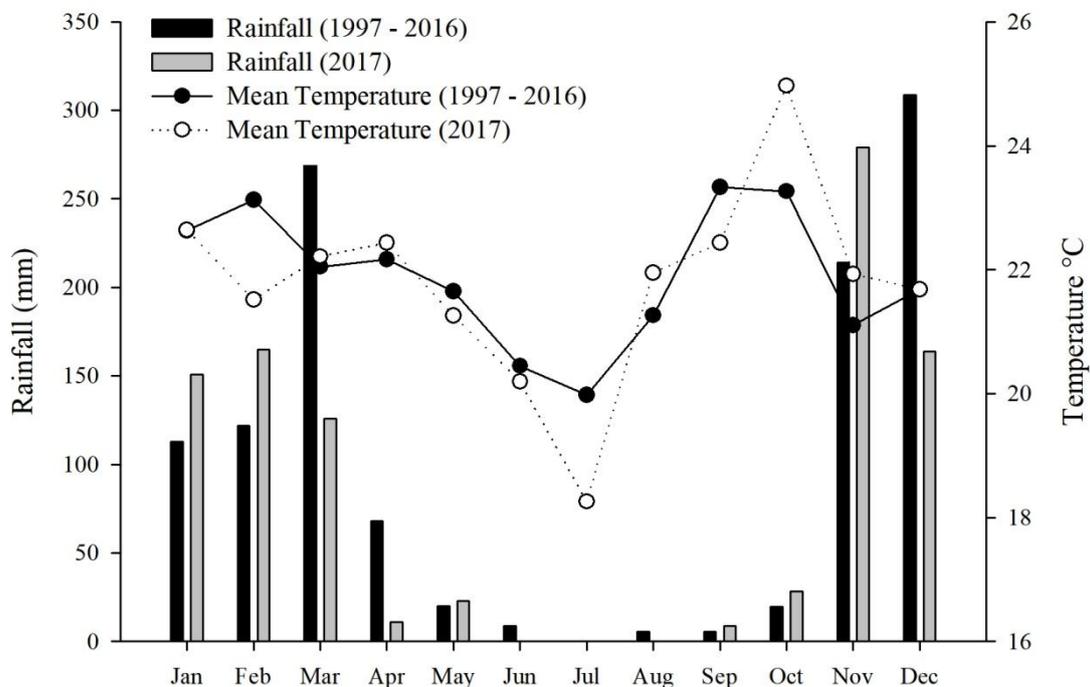


Figura 2. Médias de precipitação pluviométrica e temperatura média do período compreendido entre (1997 e 2016) e do ano de 2017 (ano de condução do experimento). Dados obtidos de estação automática localizada ao lado do experimento.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho (Santos et al., 2018) e apresenta as seguintes características na camada de 0-20 cm: pH (em água) = 5,77; Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) = 3,34; Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) = 1,41; K (mg dm^{-3}) = 207,55; H + Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) = 4,52; P (mg dm^{-3}) = 48,56; S (mg kg^{-1}) = 19,71; matéria orgânica (%) = 2,60.

O histórico dos últimos dez anos de cultivo da área experimental está apresentado na Tabela

1. Antes do cultivo da soja, na safra 2005/2006, a área estava sob pastagem por um longo período.

Tabela 5 - Descrição do histórico de cultivo da área de estudo no período compreendido entre 2005 - 2016.

Safra	Período	
	Inverno	Verão
2005/2006	Pousio	Soja
2006/2007	Pousio	Soja
2007/2008	Pousio	Soja
2008/2009	Pousio	Soja
2009/2010	Pousio	Soja
2010/2011	Pousio	Soja
2011/2012	Soja sob diferentes regimes hídricos	Pousio
2012/2013	Trigo sob diferentes regimes hídricos	Soja
2013/2014	<i>A. cruentus</i> , <i>P. glaucum</i> e <i>C. quinoa</i> sob diferentes regimes hídricos	<i>Crotalaria juncea</i>
2014/2015	<i>A. cruentus</i> , <i>P. glaucum</i> e <i>C. quinoa</i> sob diferentes regimes hídricos	<i>Zea mays</i>
2015/2016	<i>A. cruentus</i> , <i>P. glaucum</i> e <i>C. quinoa</i> sob diferentes regimes hídricos	<i>Crotalaria juncea</i>

Foi utilizado o delineamento de blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram compostas pelas culturas: feijão (*Phaseolus vulgaris*) – cultivar BRS Realce; amaranto (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa* “Genótipo derivado do BRS Piabiru”) e trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) e as subparcelas foram formadas por quatro regimes hídricos (535, 410, 304 e 187 mm). As características morfológicas, produtivas e o mecanismo fotossintético das espécies estudadas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 6 - Características morfológicas, produtivas e mecanismo fotossintético das espécies estudadas.

Cultura	Características
Feijão (BRS Realce)	Hábito de crescimento determinado (Tipo I), porte ereto, ciclo da emergência a maturação fisiológica de aproximadamente 67 dias. Apresenta produtividade média de 1893 kg ha ⁻¹ na safra das águas, 2174 kg ha ⁻¹ na seca, 2269 kg ha ⁻¹ no inverno. Apresenta mecanismo fotossintético C3.
Amaranto (BRS Alegria)	Altura média de 1,8 m. Período entre a emergência e a maturação fisiológica é de 90 dias. O rendimento médio de grãos é de 2359 kg ha ⁻¹ . Pode ser cultivado em qualquer época do ano, em razão da finalidade, ou seja, para a produção de grãos, as sementeiras de safrinha e de entressafra (inverno) são as que apresentam melhor resultado. Para a produção de forragem, a sementeira de verão é a ideal. Apresenta mecanismo fotossintético C4
Quinoa (BRS Piabiru)	Altura média de 1,9 m; período entre emergência e a maturação fisiológica é de 110 dias; produtividade média de 2800 kg ha ⁻¹ . Pode ser semeada em qualquer época do ano a depender da finalidade. Quando se objetiva a produção de grãos, as sementeiras de safrinha e entressafra (inverno) são as mais indicadas. Para a produção de forragem, pode-se semear no início do período das chuvas. Apresenta mecanismo fotossintético C3.
Trigo sarraceno (IPR 91)	Hábito de crescimento arbustivo ereto; Altura média de 1,5 a 1,8 m; produção de 3 a 6 toneladas por hectare de biomassa seca e 15 a 25 toneladas por hectare biomassa fresca; Quando se objetiva a produção de grãos, pode ser semeado de outubro a dezembro (recomendado) ou em segunda safra (janeiro a março)

As culturas foram semeadas na segunda semana de junho de 2017, sob plantio direto. Foi utilizado espaçamento entre linhas de 0,5 m para todas as culturas e densidade de sementeira de 14 plantas m⁻¹ para o feijão; 10 plantas m⁻¹ para o amaranto; 20 plantas m⁻¹ para a quinoa e 70 plantas m⁻¹ para o trigo sarraceno. A adubação no plantio foi feita nos sulcos, na dose de 400 kg ha⁻¹ da fórmula 04-30-16, totalizando 16 kg ha⁻¹ de N; 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅; e 64 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação nitrogenada em cobertura foi feita a lanço, aos 30 dias após o plantio, na dose de 100 kg

ha⁻¹ N, na forma de ureia. Para evitar a competição das plantas invasoras foram realizadas capinas manuais.

Os diferentes regimes hídricos foram obtidos utilizando-se uma barra irrigadora de aspersão, com duas laterais, com 20 m de comprimento em cada lateral, ligada a um carretel autopropelido com velocidade regulável, na qual foram instalados dez aspersores. Nesse experimento, foi utilizada apenas uma das laterais da barra. Durante os primeiros 35 dias após a emergência (DAE), a irrigação foi uniforme (Figura 3), a fim de estabelecer o crescimento de todas as plantas. Nessa etapa, o acumulado das irrigações proporcionou uma lâmina uniforme de 135 mm. Após este período, foi adaptada a metodologia do line source (Hanks et al., 1976), utilizando-se aspersores com vazões decrescentes da área central até a extremidade da barra irrigadora (Jayme-Oliveira et al 2017), conforme Figura 3. A sobreposição entre os aspersores permitiu um gradiente de água do centro para a extremidade da barra de irrigação.

Durante essa fase sob diferentes lâminas de irrigação foram realizadas onze irrigações. Ao longo da lateral da barra irrigadora foram delimitadas quatro subparcelas, com quatro metros de comprimento, oito linhas de cultivo, espaçadas em 0,5 m, representando quatro regimes hídricos (535, 410, 304 e 187 mm), que estavam distanciados a 4, 8, 12 e 16 m do início da barra irrigadora para sua extremidade, respectivamente (Figura 3). O maior regime hídrico (535 mm) foi determinado conforme descrito no programa de monitoramento de irrigação no Cerrado (Embrapa, 2012), utilizando como referência a cultura do trigo, os indicadores agrometeorológicos da região, o tipo de solo e a data de germinação plena.

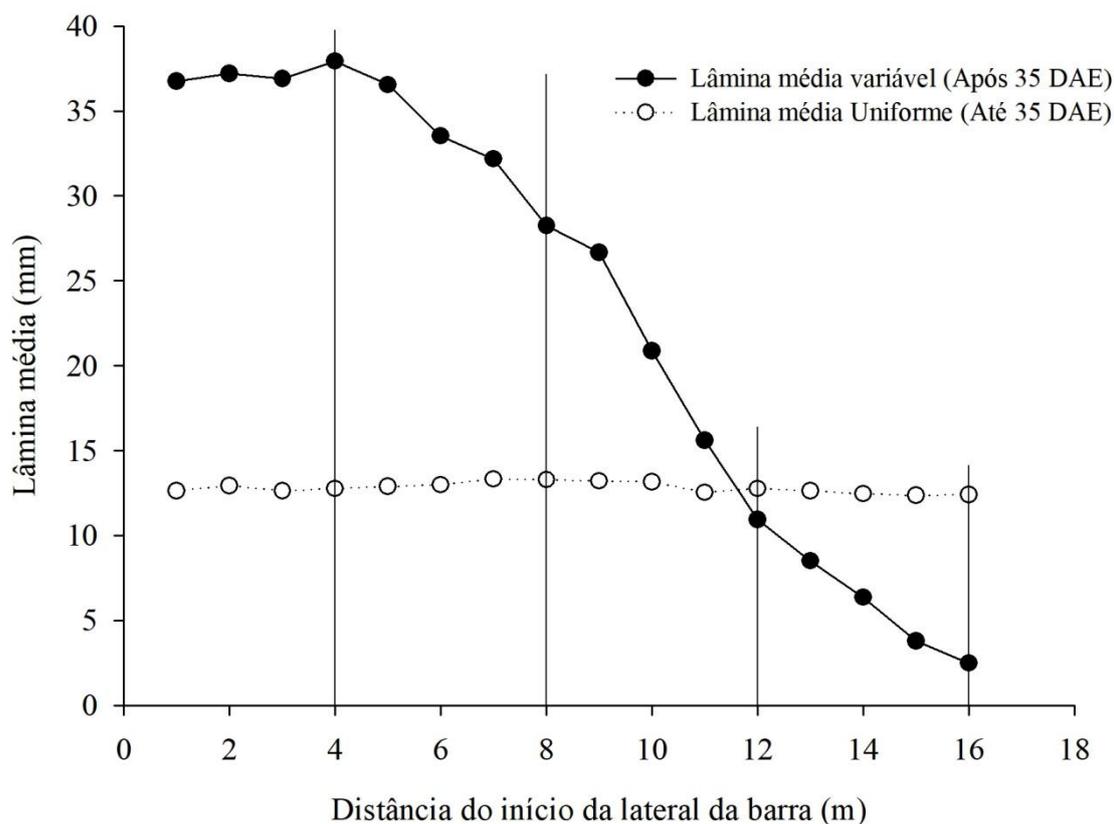


Figura 3 – Lâmina média aplicada durante cada período de irrigação uniforme (lâmina média uniforme), com aspersores com vazões iguais, durante os 35 DAE e lâmina média aplicada em cada irrigação, utilizando-se aspersores com vazões decrescentes do início até a extremidade da lateral barra irrigadora (lâmina média variável), após os 35 DAE.

Destaca-se, que, apesar de as avaliações terem sido feitas até o regime hídrico de 187 mm, é rara a ocorrência de precipitação com esse valor baixo durante todo o período da safreinha (Nascimento e Novais, 2020). Geralmente, observam-se valores iguais ou superiores a 300 mm nas mais diversas regiões produtivas no bioma Cerrado, o que se aproxima do segundo regime hídrico aplicado neste trabalho (304 mm) (Nascimento e Novais, 2020). Entretanto, foram feitas avaliações até o regime de 187 mm para verificar o comportamento das espécies em condições extremas de estresse hídrico. Embora esse experimento seja composto por espécies diferentes, cada uma com diferentes exigências hídricas, pela praticidade, usamos o trigo como referência, entendendo que o

feijão, trigo sarraceno, amaranto e quinoa têm um consumo hídrico semelhante ao do trigo. As irrigações foram realizadas com um turno de rega de aproximadamente cinco dias, de acordo com as condições climáticas e a fase fenológica da cultura. Para mensurar a quantidade de água aplicada em cada irrigação, foram instaladas duas fileiras de coletores paralelas à lateral da barra para medição do volume de água aplicado.

1.2.2 Variáveis analisadas

Na floração das culturas, aos 30 dias após o início da imposição dos regimes hídricos, foram avaliadas as seguintes variáveis: teor de prolina na folha (Pr), clorofila (*a*, *b*, total), trocas gasosas (fotossíntese – *A*; condutância estomática - *g_s*, concentração interna de CO₂ nas folhas– *C_i* e transpiração – *E*), e eficiência do uso da água (EUA). Foram avaliados, ainda, a produtividade de biomassa seca e de grãos e a temperatura do dossel. Todas as amostragens fisiológicas foram feitas nas folhas mais jovens totalmente expandidas.

Amostras de folhas de três plantas por subparcela foram coletadas no período da tarde, entre 13:30 e 15:00 horas, e colocadas imediatamente em nitrogênio líquido e mantidas em freezer a -80° C para avaliação dos teores de prolina. O teor de prolina foi determinado segundo metodologia de Bates (1973). O extrato bruto das amostras foi obtido através da maceração de 0,5 g de matéria fresca de folhas em 10 ml de ácido sulfosalicílico a 3%. O extrato foi utilizado para determinação de prolina. A densidade ótica foi avaliada a 515nm, em espectrofotômetro Pharmacia Ultrospect III. A absorvância obtida foi comparada com a curva padrão de prolina e os resultados expressos em μmol de prolina g^{-1} de matéria fresca.

O índice de clorofilas (*a*, *b*, e *a+b*) foi avaliado no período da manhã, com o auxílio de um ClorofiLOG digital, modelo CFL 1030, da Falker, com dez repetições para cada subparcela.

As trocas gasosas foram mensuradas utilizando um analisador de gás por infravermelho, IRGA modelo LI-6400XT (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA). Para determinar a saturação luminosa, foi feita uma curva de densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA)

de 0, 20, 60, 100, 250, 500, 1000, 2000, 2250, 2500, 3000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em concentração ambiente de CO_2 . As avaliações de trocas gasosas foram realizadas no período da manhã, entre 8:00 e 11:00 horas. A avaliação da fluorescência do escuro foi feita entre 20:00 e 23:00 horas. Durante as avaliações, a concentração de CO_2 na câmara foi mantida em $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

Para a determinação da produtividade de biomassa seca (BS), em cada subparcela foi coletada, na fase de florescimento das culturas, a parte aérea das plantas localizadas em uma área de 3 m^2 . Foi determinado o peso fresco dos resíduos vegetais em cada regime hídrico e em seguida foi determinado o peso fresco da subamostra, que foi mantida em estufa a 65°C , por 72 horas. Após esse período, foi determinado o peso seco da amostra. A biomassa seca total foi determinada pela equação:

$$PST = PFT \times PSA/PFA$$

Equação 1.

onde:

PST = biomassa seca total,

PFT = peso fresco total,

PSA= peso seco da amostra e

PFA= peso fresco da amostra.

Os resultados foram corrigidos para ton ha^{-1} .

A produtividade de grãos foi mensurada por meio da colheita mecânica de todas as plantas de uma área útil de $3 \text{ m}^2 \text{ parcela}^{-1}$. A colheita do feijão foi realizada aos 88 dias após o plantio (DAP), e demais culturas foram coletadas aos 105 DAP com uma colheitadeira mecânica. Após a colheita, a massa total de grãos foi pesada. Uma subamostra foi levada para estufa de circulação forçada para determinação do teor de umidade dos grãos. Adotou-se metodologia da ASAE (2000) para a determinação da umidade os grãos de feijão ($103^\circ \text{C}/72 \text{ h}$). Para os grãos de trigo sarraceno, quinoa e amaranto, a umidade foi determinada de acordo com IAL (2008), adotando-se a

temperatura de 105 °C, até peso constante. Após retirados da estufa, os grãos foram colocados em um dessecador até atingir a temperatura ambiente, em seguida, foram pesados em balança analítica de precisão. Posteriormente, corrigiu-se a produtividade para umidade padrão de 13% e os resultados foram expressos em kg ha⁻¹.

Foi avaliada também a produtividade por unidade de água aplicada (PUAA), calculada a partir da seguinte equação:

$$PUAP = \text{Prod}/\text{LTD}$$

Equação 2

em que:

PUAA: Produtividade por unidade de água aplicada (kg ha mm⁻¹)

Prod: Produtividade de grãos, em kg ha⁻¹

LTD: Lâmina total disponibilizada referente à quantidade de água aplicada durante o ciclo da cultura, em mm.

Foi determinada a temperatura do dossel por meio de avaliação de imagem termográfica (Figura 4) das plantas utilizando a câmera de infravermelho térmico (FLIR[®] T420, FLIR Systems, Oregon, EUA) com as seguintes características: resolução espacial térmica de 320 × 240 pixels, resposta espectral de 7,5 a 13 μm, sensibilidade térmica de pixels de 0,045 ° C a 30 ° C e precisão de temperatura de ± 2°C, acoplada a um veículo aéreo não tripulado (XFly, O X800, Bauru, SP, Brazil), a uma altura de aproximadamente 60 m. As imagens foram realizadas no mesmo horário e dia das variáveis fisiológicas. Para o processamento das imagens e obtenção dos dados de temperatura foi utilizado o software QGIS (QGIS Development Team, 2015). As imagens RGB (red, green and blue) e termais foram georreferenciadas para a geração de ortomosaico e posteriormente classificadas para selecionar somente as áreas de dossel de plantas na parcela útil, excluindo-se o solo.

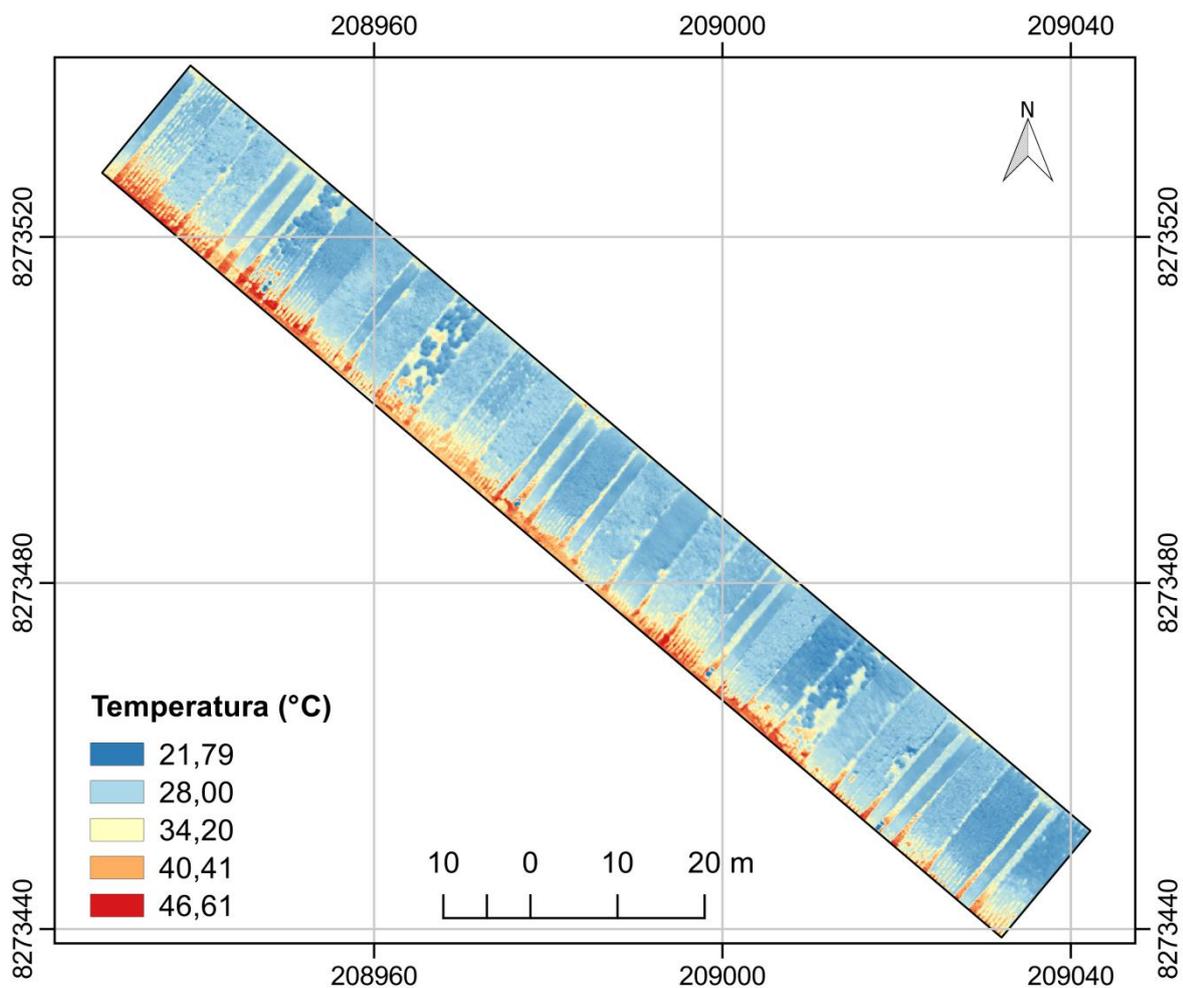


Figura 4. Mapa do comportamento da temperatura média do dossel das quatro culturas estudadas, nos diferentes regimes hídricos.

1.2.3 Análise estatística

Os dados foram inicialmente analisados quanto à distribuição normal com o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando-se o software estatístico SAS, versão 9 (SAS, 2001). O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o Proc Mixed do SAS por meio do método de máxima verossimilhança restrita (reml). Foi realizada análise de correlação de Pearson, utilizando o software R (version 3.4.0, R Core Team), e a apresentação dos dados foi feita por meio de correlograma.

1.3. RESULTADOS

1.3.1 Variáveis fisiológicas

Os resultados deste estudo demonstraram variáveis significativas para todas as culturas em função dos regimes hídricos aplicados taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (gs), e taxa de transpiração (E) (Tabela 3).

Ao se comparar o maior regime hídrico (535 mm) com o menor (187 mm) em cada espécie, foram observadas reduções de 41,75; 81,22; 69,71 e 81,90% na assimilação líquida de CO₂ (A); 40,0; 92,85; 90,04 e 92,5% na condutância estomática (gs) e 33,20; 86,90; 79,09 e 82,15% na transpiração (E) para amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, respectivamente. Já para as análises de concentração interna de CO₂ foram observadas reduções de 53,41; 56,13 e 40,90% ,para o feijão, quinoa e trigo sarraceno respectivamente, , Não foi observada redução na concentração interna de CO₂ (Ci) na cultura do amaranto nos diferentes regimes hídricos. Para a variável eficiência do uso da água (EUA), o estresse hídrico não influenciou nenhuma das quatro espécies.

Ao comparar o regime hídrico de 535 mm com o de 304 mm (precipitação de ocorrência comum no período da safrinha), foram observadas reduções de 8,00; 67,05; 12,89; 67,90% na assimilação líquida de CO₂ (A) e 10,00; 89,00; 46,57; 87,50% na condutância estomática (gs) para o amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno respectivamente (Tabela 3); 31,28 e 58,24% na Ci do feijão e trigo sarraceno; 77,54; 27,85; 71,88% da E do feijão, quinoa e trigo sarraceno, respectivamente. Destaca-se o fato de que, para essas duas últimas variáveis (Ci e E), a redução do regime hídrico de 535 mm para 304 mm não afetou a cultura do amaranto.

Na comparação entre espécies observou-se que em condições de maior disponibilidade hídrica o amaranto apresentou a maior taxa de fotossíntese líquida (em torno de 44 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para os regimes hídricos de 535 e 410 mm respectivamente, e a quinoa foi a espécie que apresentou a maior condutância estomática, com 0,73 e 0,74 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; maior concentração interna de CO₂, 283,64 e 280,72 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e maior taxa de transpiração, com valores de 12,10 e 11,89

$\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; para os regimes de 535 e 410 mm respectivamente (Tabela 3). Em condições de estresse hídrico severo (187 mm), o amaranto foi a espécie com maior taxa fotossintética ($25,45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), maior condutância estomática ($0,18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e maior transpiração ($5,35 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Quanto à eficiência de uso da água (EUA), o amaranto, tanto no regime de maior disponibilidade hídrica ($5,80 \mu\text{mol}$ de CO_2 para cada molécula de água) quanto no regime com estresse hídrico severo ($4,73 \mu\text{mol}$ de CO_2 para cada molécula de água) foi a espécie mais eficiente. No regime hídrico de 304 mm, a maior taxa fotossintética ($40,24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e de transpiração ($7,56 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram observadas no amaranto; a maior condutância estomática foi obtida no amaranto e quinoa ($0,27$ e $0,39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente).

Tabela 7 - Fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), transpiração (E) e eficiência no uso da água (EUA) para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno cultivados sob diferentes regimes hídricos.

Regime hídrico (mm)	Amaranto	Feijão	Quinoa	Trigo sarraceno
A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
535	43,86 Aba	25,71 Ca	35,53 Ba	23,87 Ca
410	43,80 Aba	21,98 Ca	35,13 Ba	12,57 Db
304	40,24 Aa	8,47 Bb	30,95 Aa	7,66 Bb
187	25,45 Ab	4,77 Bb	10,90 Bb	4,32 Bb
gs ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
535	0,30 Da	0,56 Ba	0,73 Aa	0,40 Ca
410	0,31 Ba	0,34 Bb	0,74 Aa	0,10 Cb
304	0,27 ABab	0,06 CDc	0,39 Ab	0,05 Db
187	0,18 Ab	0,04 Cc	0,07 Abc	0,03 Cb
Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
535	120,64 Ba	291,43 Aa	283,64 Aa	260,84 Aa
410	128,31 Ba	256,11 Aab	280,72 Aa	152,43 Bb
304	116,55 Ba	200,27 Bbc	223,37 Aa	108,91 Bb
187	142,26 Aa	135,76 Ac	124,42 Ab	154,15 Ab
E ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
535	8,01 Ca	9,93 Ba	12,10 Aa	10,03 Ba
410	7,58 Ba	7,50 Bb	11,89 Aa	4,09 Cb
304	7,56 Aba	2,23 Cc	8,73 Ab	2,82 Cbc
187	5,35 Ab	1,30 Bc	2,53 Bc	1,79 Bc
EUA				
535	5,80 Aa	2,67 Ba	4,30 Ba	2,39 Ba
410	5,43 Aa	2,92 Ba	3,58 Ba	3,08 Ba
304	5,31 Aba	4,17 BCa	2,94 Ca	2,58 Ca
187	4,73 Aba	3,80 BCa	2,92 BCa	2,64 Ca

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios dos índices de clorofila (*a*, *b* e total) e concentração de prolina livre nas folhas. Quanto à clorofila *a*, o menor regime hídrico (187 mm) provocou reduções 33,39 e 34,77, no amaranto e feijão, respectivamente, resultado semelhante foi observado nos índices de clorofila *b* e clorofila total,. Ao comparar o maior regime hídrico (535 mm) com o de 304 mm, não foram observadas reduções nos índices de clorofila *a*, clorofila *b* e

clorofila total em nenhuma das espécies. Ao comparar as espécies, de modo geral, a quinoa apresentou os maiores índices de clorofila *b* e total e, em geral, todas as espécies apresentaram índices semelhantes de clorofila *a*.

Em relação aos teores de prolina livre nas folhas, o estresse hídrico severo (187 mm) promoveu aumento nas folhas do amaranto, feijão e quinoa em percentuais equivalentes a 103,90; 53,65 e 196,22% nas três culturas, respectivamente (Tabela 4). No regime hídrico de 304 mm, foram observados aumentos de 53,12; 50,40 e 143,39% para o amaranto, feijão e quinoa, respectivamente. Ao se comparar as espécies, nos dois regimes hídricos superiores (535 e 410 mm) todas apresentaram concentrações semelhantes de prolina nas folhas. Tanto no regime de estresse hídrico severo (187 mm), quanto no regime de 304 mm, o amaranto (0,261 e 0,196 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) e a quinoa (0,314 e 0,258 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) foram as espécies com as maiores concentrações de prolina.

Tabela 8 - Índice de clorofila (a, b e total) e prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno cultivados sob diferentes regimes hídricos.

Regime hídrico (mm)	Amaranto	Feijão	Quinoa	Trigo sarraceno
Clorofila <i>a</i>				
535	42,01 Aa	39,47 Aa	40,39 Aa	39,77 Aa
410	41,90 Aa	39,90 Aa	43,43 Aa	40,89 Aa
304	40,04 Aa	39,21 Aa	42,94 Aa	41,69 Aa
187	33,39 Bb	34,77 Bb	43,62 Aa	44,18 Aa
Clorofila <i>b</i>				
535	9,76 Ba	9,63 Ba	20,20 Aab	12,91 Ba
410	10,61 Ba	9,67 Ba	19,99 Ab	10,91 Ba
304	9,39 Cab	9,20 Ca	23,06 Aab	15,75 Ba
187	4,43 Cb	6,40 Cb	25,18 Aa	13,78 Ba
Clorofila Total				
535	51,77 Ba	49,11 Ba	60,62 Ab	52,69 Ba
410	52,52 Ba	49,57 Ba	63,42 Aab	51,80 Ba
304	49,43 Ca	48,42 Ca	66,00 Aab	57,45 Ba
187	37,85 Cb	41,17 Cb	68,80 Aa	57,96 Ba
Prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF)				
535	0,128 Ab	0,123 Ab	0,106 Ab	0,084 Aa
410	0,155 Aab	0,129 Ab	0,116 Ab	0,064 Aa
304	0,196 ABab	0,185 Ba	0,258 Aa	0,058 Ca
187	0,261 Aba	0,189 Ba	0,314 Aa	0,097 Ca

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. MF: Massa fresca foliar.

1. 3.2 Produtividade de biomassa seca e grãos

Apresentaram-se na Tabela 5 os valores médios de produtividade de biomassa seca (BS), produtividade de grãos e a produtividade por unidade de água aplicada para as culturas estudadas, em função dos regimes hídricos. De modo geral, a quinoa e o trigo sarraceno apresentaram redução significativa de BS apenas no regime hídrico mais estressado, enquanto que o amaranto e o feijão reduziram a BS a partir do RH 304 mm.

O déficit hídrico reduziu a BS em todas as culturas. Ao se comparar o maior regime hídrico (535 mm) com o menor (187 mm). foram observadas reduções de 79,60; 82,52; 66,94 e 58,10% para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, respectivamente. Na comparação

entre o RH de 535 mm com o de 304 mm, foram observadas reduções de biomassa seca equivalentes a 43,31; 30,84 para o amaranto e feijão, respectivamente. Sob condições de estresse hídrico severo (187 mm), todas as espécies produziram biomassa seca similar (entre 3.490,91 e 4.878,83 kg ha⁻¹), com exceção do feijão que produziu somente 1.162,09 kg ha⁻¹. No regime hídrico de 304 mm a quinoa foi a espécie que produziu a maior quantidade de biomassa seca (15.881,52 kg ha⁻¹).

Foram observadas produtividades de grãos de até 3.545,57; 5.295,47; 3.622,80 e 2.387,43 kg ha⁻¹ para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, respectivamente (Tabela 5). Entretanto, o estresse hídrico reduziu a produtividade de grãos das quatro culturas estudadas. Ao comparar o maior regime hídrico (535 mm) com o menor (187 mm) verificaram-se reduções equivalentes a 83,56; 91,21; 86,75 e 69,62% para o amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno. Porém, uma observação deve ser feita: conforme já discutido em tópicos anteriores, é rara a ocorrência de apenas 187 mm de chuva durante o período de safrinha no Cerrado, que ocorre entre os meses de fevereiro e abril (Figura 2). Geralmente, são observados valores médios de precipitação próximos ou acima de 300 mm, a depender da região, o que corresponde ao RH de 304 mm (Tabela 5). Nesse regime hídrico (304 mm), as espécies que mais se destacaram, em relação a produtividade de grãos, foram o amaranto (2724,17 kg ha⁻¹) e a quinoa (3266,17 kg ha⁻¹). O feijão foi extremamente sensível, com perda de produtividade de 3685,0 kg ha⁻¹, quando comparado com o maior regime hídrico (535 mm).

Tabela 9 - Produção de biomassa seca (kg ha^{-1}), produtividade de grãos (kg ha^{-1}) e produtividade por unidade de água aplicada (PUAD em kg ha mm^{-1}) para as culturas do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno cultivados sob diferentes regimes hídricos.

Regime hídrico (mm)	Amaranto	Feijão	Quinoa	Trigo sarraceno
Produção de biomassa (kg ha^{-1})				
535	16669,85 Aa	6650,88 Ca	14756,53 Aa	8513,8 Ba
410	15592,47 Aa	6590,66 Ca	18289,1 Aa	10820,33 Ba
304	9449,5 Bb	4599,46 Bb	15881,52 Aa	8289,08 Ba
187	3490,91 Ac	1162,09 Bc	4878,83 Ab	4533,17 Ab
Produtividade de grãos (kg ha^{-1})				
535	3450,01 Ca	5295,47 Aa	4084,69 Ba	2387,43 Da
410	3575,01 Ba	4383,21 Aa	3622,80 Ba	2095,95 Ca
304	2724,17 Ba	1613,63 Cb	3266,17 Aa	1892,40 Cb
187	567,58 Bb	465,25 Bc	541,02 Bb	725,29 Ac
Produtividade por unidade de água aplicada (kg ha mm^{-1})				
535	6,51 BCa	9,89 Aab	7,90 ABb	4,46 Ca
410	8,68 Aa	10,69 Aa	8,42 Aab	5,11 Ba
304	9,00 Aba	7,83 BCb	10,88 Aa	6,22 Ca
187	2,92 Ab	3,99 Ac	3,14 Ac	3,87 Aa

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Com relação a produtividade por unidade de água disponibilizada (PUAD), de modo geral, o estresse hídrico reduziu a quantidade de grãos produzidos por milímetro de água aplicada (Tabela 5). Sob condições de estresse hídrico severo (187 mm), todas as espécies apresentaram valores semelhantes de PUAD. Em condições de disponibilidade hídrica adequada (535 mm), o feijão e a quinoa apresentaram os maiores PUAD (9,89 e 7,90 kg ha mm^{-1}). No RH de 304 mm, o amaranto e a quinoa foram as espécies com maior PUAD (9,00 kg ha mm^{-1} , 10,88 kg ha mm^{-1} , respectivamente).

1.3.3 Temperatura média do dossel

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios da temperatura média do dossel do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, nos quatro regimes hídricos estudados. Em geral, a

redução da disponibilidade hídrica aumentou a temperatura nas quatro culturas. Em condições de estresse hídrico severo (187 mm), houve aumentos de 17,50; 36,46; 19,54 e 15,66%, em relação ao maior regime hídrico para o amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, respectivamente. Sob o RH 304 mm, houve aumento de 11,76% da temperatura do dossel, apenas na cultura do feijão. Tanto em condições de estresse hídrico severo (187 mm), como no regime de 304 mm, o feijão foi a espécie com a maior temperatura do dossel (34,54 e 28,5⁰C, respectivamente). A quinoa foi a espécie que, em geral, apresentou as menores temperaturas, seja em condições de maior disponibilidade hídrica (535 mm) ou em condições de estresse (187 e 304 mm).

Tabela 10 - Valores médios de temperatura do dossel do amaranto, feijão, quinoa e trigo sarraceno, nos quatro regimes hídricos estudados.

Regime hídrico	Amaranto	Feijão	Quinoa	Trigo sarraceno
535	27,05 Ab	25,31 Abc	25,01 Cb	26,04 Bb
410	26,90 Ab	25,25 Bc	24,92 Bb	26,74 Ab
304	27,29 Bb	28,50 Ab	25,66 Cb	27,01 Bb
187	31,89 Ba	34,54 Aa	29,79 Ca	30,12 Ca

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

1.3.4 Correlação de Pearson

A correlação entre as variáveis fisiológicas, produtivas e da temperatura média do dossel para as culturas do feijão (5.A), quinoa (5.B), amaranto (5.C) e trigo sarraceno (5.D) é apresentada na Figura 5. Ressalta-se que se considera como fraca correlação se $0,00 < \rho < 0,30$; moderada correlação se $0,30 \leq \rho < 0,60$; forte correlação se $0,60 \leq \rho < 0,90$ e correlação linear muito forte se $0,90 \leq \rho < 1,00$ (Callegari-Jacques, 2003).

Para a cultura do feijão, a maior magnitude de correlação (correlação muito forte) foi observada entre fotossíntese e produtividade de grãos (0.98); fotossíntese e produtividade de biomassa (0.98); e produtividade de grãos e produtividade de biomassa (0.98). Correlações fortes e muito fortes também foram observadas entre produtividade de grãos e transpiração (0.91);

produtividade de grãos e gs (0.98); produtividade de grãos e clorofila *b* (0.75); produtividade de grãos e clorofila *a* (0.73) e produtividade de grãos e concentração interna de CO₂ (0.63) (Figura 5). A temperatura média do dossel correlacionou-se negativamente com quase todas as variáveis estudadas, exceto com a prolina (0.36). Destacam-se as correlações negativas fortes e muito fortes da temperatura do dossel com a clorofila *b* (-0,91), clorofila *a* (-0,9), fotossíntese (-0,89), produção de biomassa (-0,89) e produtividade de grãos (-0,89). A prolina se correlacionou negativamente com todas as variáveis, exceto com a temperatura do dossel. Entretanto, tais correlações foram consideradas moderadas e fracas (<0,6).

Na cultura da quinoa, as maiores magnitudes de correlação positiva (muito forte) para a produtividade de grãos foram observadas com a condutância (0.96) e com a transpiração (0.96). Também foi observada correção positiva muito forte entre produtividade de grãos e: concentração interna de CO₂ (0.91), produção de biomassa (0.9), fotossíntese (0.85). A temperatura média do dossel correlacionou-se negativamente com quase todas as variáveis estudadas, exceto com a prolina (0.76), de maneira similar que para a cultura do feijão. Destacam-se as fortes correlações negativas entre a temperatura do dossel e transpiração (-0.92), produção de biomassa (-0.91), concentração interna de CO₂ (0.90), condutância (-0.88), e produtividade de grãos (-0.87). A prolina se correlacionou negativamente com quase todas as variáveis, exceto com a temperatura do dossel e as clorofilas *a*, *b* e total. Entretanto, diferentemente do que ocorreu na cultura do feijão, essas correlações foram consideradas fortes e muito fortes (>0,6), com destaque para as correlações entre prolina e condutância estomática (- 0.92), produtividade de grãos (- 0.87), concentração interna de CO₂ (- 0.85) e transpiração (- 0.84).

Na cultura do amaranto, a produtividade de grãos se correlacionou positivamente com todas as variáveis, exceto com a temperatura do dossel. Foram observadas magnitudes de correlação da produtividade de grãos iguais a 0.91 com a produtividade de biomassa; 0.84 com a clorofila *a*; 0,79 com a clorofila *b*; 0.81 com a condutância estomática; 0.82 com a fotossíntese e 0.7 com a

transpiração. A temperatura média do dossel novamente correlacionou-se negativamente com todas as variáveis, exceto com a concentração interna de CO₂ (0.46) e com a prolina (0.68). Destacam-se correlações negativas entre a temperatura média do dossel e a clorofila total (- 0.91), clorofila a (- 0.9), produtividade de grãos (- 0.89), clorofila b (- 0.89), fotossíntese (- 0.82), condutância (- 0.81) e produtividade de bioamassa (- 0.81). A prolina também se correlacionou negativamente com todas as variáveis, exceto com a concentração interna de CO₂. Entretanto, tais correlações foram consideradas como moderadas e fracas (< 0.6).

Na cultura do trigo sarraceno, as maiores magnitudes de correlação positiva foram observadas entre condutância estomática e fotossíntese (0.95), condutância estomática e transpiração (0.96) e fotossíntese e transpiração (0.96). Foram observadas correlações positivas da produtividade de grãos com produtividade de biomassa (0.87), concentração interna de CO₂ (0.42), condutância estomática (0.7), fotossíntese (0.79) e a transpiração (0.75). A temperatura média do dossel se correlacionou negativamente com quase todas as variáveis, exceto com clorofila b (0.17), clorofila total (0.59) e prolina (0.33). Destacam-se as fortes correlações negativas dessa variável com a produtividade de grãos (- 0.87) e biomassa (0.85). Diferentemente do que aconteceu nas outras espécies, as clorofilas *a*, *b* e total, se correlacionaram negativamente com quase todas as variáveis estudadas e a prolina se correlacionou positivamente com quase todas, exceto com produtividade de grãos e biomassa.

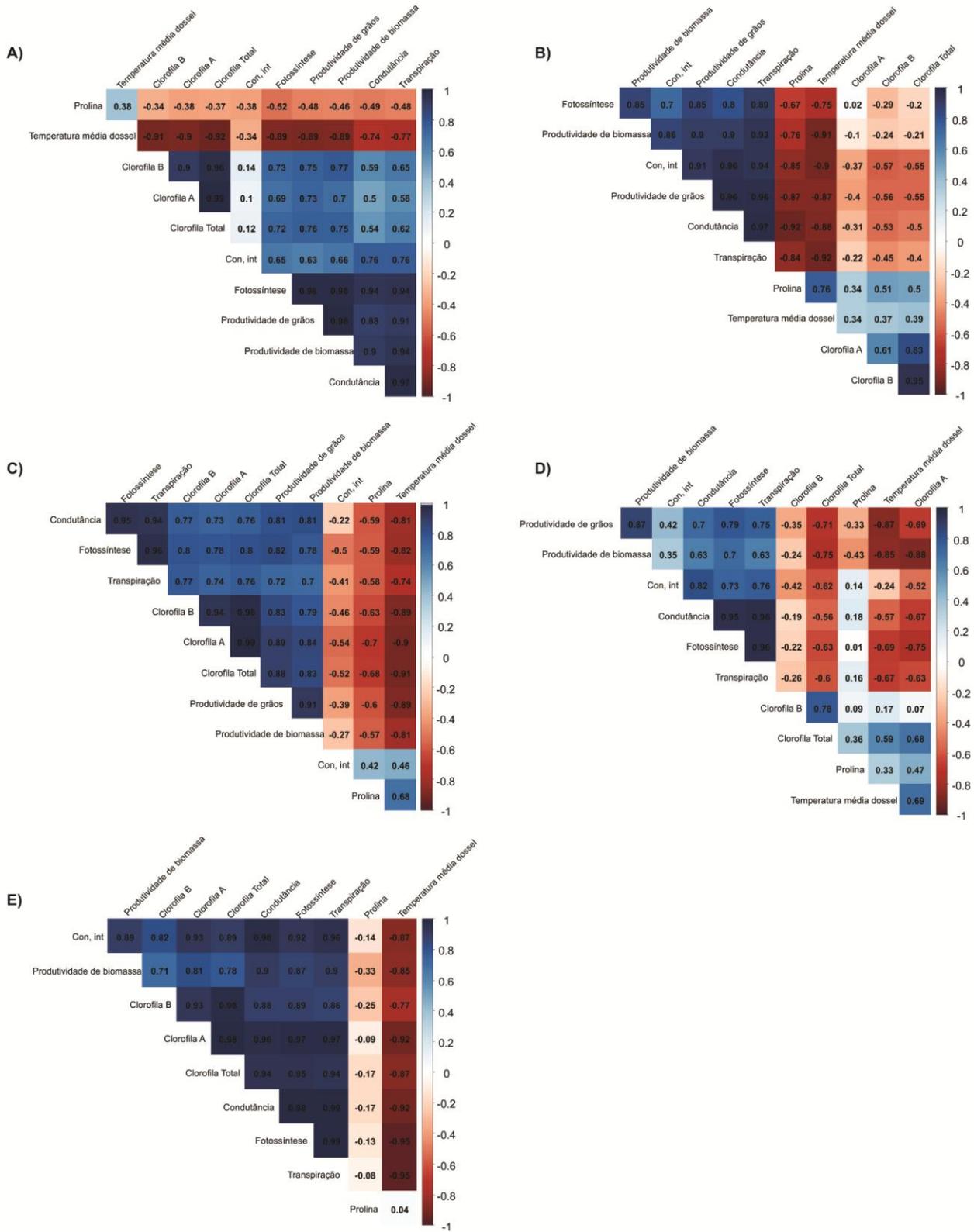


Figura 5. Correlograma das estimativas das correlações de Pearson entre as variáveis fisiológicas, produtivas e temperatura. A) Feijão; B) Quinoa; C) Amarantho; D) Trigo sarraceno.

1.4. DISCUSSÃO

1.4.1 Variáveis fisiológicas

Nossos resultados indicam que sob condições de estresse hídrico, alterações fisiológicas e morfológicas ocorrem para diminuir a perda de água e evitar a morte da planta (Ozkur et al. 2009; Gomes et al. 2010) e estas dependem da intensidade do estresse, da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta na incidência do estresse, entre outros fatores (Soureshjani et al. 2019). De maneira geral, houve redução das trocas gasosas (taxa de assimilação líquida de CO₂ – A; condutância estomática – gs; concentração interna de CO₂ – Ci; e taxa de transpiração - E) tanto em condições de estresse hídrico severo (187 mm), quanto em condições de cultivo no regime hídrico de 304 mm, condição hídrica de ocorrência comum no período da safrinha no Cerrado (Tabela 3).

Uma das primeiras respostas fisiológicas das plantas ao estresse hídrico é o fechamento estomático, que é uma tentativa de manter o conteúdo hídrico nos tecidos vegetais por mais tempo (Androcioli et al. 2020). Quando os estômatos estão abertos, há assimilação de CO₂ e ocorre a perda de H₂O por transpiração (Tardiel et al. 2018). Entretanto, quando o suprimento de água se torna inadequado, os estômatos se fecham, afetando a assimilação de CO₂ e a transpiração (Haldimann et al. 2008; Tardiel et al. 2018). Comparando estes dados fisiológicos (fotossíntese e condutância estomática) em geral, o amaranto foi a espécie com menor porcentagem de redução devido à seca, seguido da quinoa, enquanto que o feijão e o trigo sarraceno foram os que mais reduziram estes parâmetros.

O amaranto teve a maior taxa fotossintética sob condições de disponibilidade hídrica adequada (535 mm) até em condições de estresse hídrico (187 mm), (43,86 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ e 25,45 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectivamente) comparado as demais espécies. Tais resultados podem estar associados ao mecanismo fotossintético de cada espécie. Sabe-se que amaranto é uma planta C4 (Valdayskikh et al. 2019) e feijão, quinoa e trigo sarraceno são plantas C3. As plantas C4 apresentam taxa de fotossíntese líquida bem superior às espécies de plantas C3, pois, nestas

espécies, a fotorrespiração é praticamente nula e a grande afinidade da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase pelo substrato (CO₂) permite que a fotossíntese das plantas C4 ocorram com pequena abertura estomática e, conseqüentemente, com baixa perda de água (Jensen, 1983; Sage e Kubien, 2007).

O amaranto foi o menos sensível ao estresse hídrico, pois, em todas as condições hídricas percentuais de redução das variáveis de trocas gasosas nessa espécie foram bem inferiores aos observados nas outras três espécies (Tabela 3). A quinoa foi a segunda espécie menos sensível, enquanto o feijão e o trigo sarraceno foram os mais sensíveis. com reduções superiores a 80% na assimilação líquida de CO₂, condutância estomática e transpiração. Destaca-se, novamente, a alta susceptibilidade do feijão e trigo sarraceno ao estresse hídrico, pois houve reduções superiores a 60% na assimilação líquida de CO₂ e superiores a 85% na condutância estomática dessas duas espécies, além de sofrerem reduções na concentração interna de CO₂ e na transpiração.

Segundo Achigan-Dako et al (2014), o amaranto é tolerante à seca e ao calor, além de ser resistente a pragas e a doenças. O fato do amaranto ser uma planta C4, o torna altamente tolerante e eficiente em ambientes secos, sendo capaz de produzir elevada quantidade de biomassa com baixo consumo de água (Valdayskikh et al. 2019). Silva et al. (2019), ao avaliarem a resposta do amaranto ao estresse hídrico, observaram reduções de até 44,48% na taxa de assimilação líquida de CO₂, que variou de 15,10 a 27,06 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, resultados semelhantes aos observados nesse trabalho. O rápido desenvolvimento do sistema radicular para possibilitar a absorção de água em camadas mais profundas do solo, aliado ao fechamento parcial dos estômatos para manter o status hídrico interno na planta, são estratégias utilizadas pelo amaranto para aumentar a tolerância à seca (Valdayskikh et al. 2019). A cultura do feijão tem-se mostrado bastante sensível ao estresse hídrico (Ramos et al. 2003), apesar de ser tradicionalmente cultivada em safrinha no Cerrado (Fidelis et al., 2015), mas possui o sistema radicular pouco profundo (Back, 2001). A clorofila (*a*, *b* e total) é outro atributo fisiológico geralmente afetado em condições de estresse hídrico. Neste trabalho, houve redução nos

índices de clorofila (*a*, *b* e total) apenas nas culturas do amaranto e feijão, quando cultivadas em condições de estresse hídrico severo. Destaca-se que tais reduções podem ter influenciado diretamente na diminuição da taxa fotossintética na cultura do feijão, conforme discutido em tópicos anteriores. Reduções nas concentrações de clorofila *a*, *b* e total em genótipos de feijão submetidos a estresse hídrico também foram observados por Torabian et al. (2018). As reduções nos pigmentos das folhas induzidas pela seca são consideradas um indicador de estresse oxidativo, que pode ser atribuída à foto-oxidação do pigmento, degradação da clorofila e/ou deficiência de síntese (Sánchez-Rodríguez et al. 2012). Condições de estresse hídrico aumentam a produção de espécies reativas de oxigênio que podem levar a peroxidação lipídica e, conseqüentemente, destruição da clorofila (Foyer et al. 1994).

A prolina é um soluto amplamente estudado em culturas de interesse econômico, devido à sua elevada sensibilidade de resposta a condições de estresse (Filippol et al. 2014; Ashrah et al. 2011). Apresenta característica osmoreguladora e osmoprotetora, atuando na manutenção da integridade celular de proteínas, enzimas e membranas, também possui efeito antioxidante pela remoção de espécies reativas de oxigênio, e participa de eventos de sinalização molecular na expressão de genes específicos para o estresse (Matysik et al. 2002). O papel da prolina durante o estresse funciona como um osmorregulador que impede o estresse hiperosmótico, equilibrando as diferenças de concentração entre o citoplasma e o vacúolo central das células vegetais, além disso, está envolvida na estabilização de proteínas e enzimas e atua na conservação de energia e nitrogênio por um período pós-estresse (Huang et al. 2010; Gill e Tujera, 2010; Dawood et al. 2014).

O aumento do déficit hídrico promoveu incremento nos teores de prolina nas folhas de amaranto, feijão e quinoa. Tanto em condições de estresse hídrico severo, quanto no regime de 304 mm, os maiores percentuais de aumento foram encontrados nas culturas do amaranto e quinoa e os menores na cultura do feijão. Contudo, a prolina não teve um papel osmorregulador e de adaptação osmótica nessas três culturas, já que se correlacionou fraca e negativamente com quase todas as

variáveis fisiológicas e produtivas das três espécies (Figura 5). Resultados semelhantes foram encontrados por Slabert e Kruger (2014) os quais observaram que o estresse hídrico aumentou significativamente a produção de prolina livre em espécies de amaranto, entretanto, não encontraram correlação positiva entre a produção de prolina e a manutenção do turgor ou área foliar. Segundo os autores, tal resultado indicou que a prolina não desempenhou um papel de osmorregulação ou adaptação osmótica, mas apenas como reserva de carbono e nitrogênio durante o estresse hídrico. Gomes et al., (2010) também não obtiveram associação de prolina com osmoregulação, mas sim com preservação da membrana celular das plantas.

A razão entre a taxa fotossintética e a taxa de transpiração resulta na eficiência de uso da água - EUA, que é um parâmetro fisiológico que expressa o comportamento momentâneo das trocas gasosas na folha. No presente trabalho, o estresse hídrico não alterou a EUA em nenhuma das espécies estudadas. Entretanto, geralmente o que se observa é que plantas sob condições de estresse hídrico tendem a apresentaram menor EUA, devido a um aumento na resistência em relação a difusão de CO₂ no mesófilo diminuindo a eficiência da carboxilação (Lawlor 2002; Silva et al. 2019). Segundo Bertolino et al. (2019), plantas sem restrição hídrica apresentam aumento na EUA uma vez que a redução apenas parcial da abertura estomática limita mais fortemente a transpiração do que a entrada de CO₂, aumentando a EUA. Na comparação entre as culturas neste trabalho, observamos que o amaranto, tanto no regime de maior disponibilidade hídrica (5,80 μmol de CO₂ para cada molécula de água) quanto no regime com menor disponibilidade hídrica (4,73 μmol de CO₂ para cada molécula de água) foi a espécie mais eficiente na EUA. Maior eficiência no uso da água no amaranto em condições de estresse hídrico comparado ao controle, também foram encontradas por Valdayskikh et al. (2019) que, segundo os autores, indica propriedades adaptativas do amaranto ao estresse hídrico.

1.4.2 Produtividade de biomassa seca e de grãos

A produtividade de grãos e a de biomassa das quatro espécies apresentaram o mesmo

comportamento observado para as variáveis fisiológicas, justificando a alta correlação entre essas variáveis, apresentada na Figura 5. Ao avaliarmos a produtividade de grãos no regime de 304 mm, que é o regime hídrico que ocorre normalmente na safrinha, o amaranto e a quinoa foram as espécies com as maiores produtividades (2724,17 e 3266,17 kg ha⁻¹, respectivamente) e o feijão e trigo sarraceno apresentaram as menores produtividades (1613,63 e 1892,40 kg ha⁻¹, respectivamente). O feijão foi extremamente sensível ao estresse hídrico, pois houve redução de 69,53% da sua produtividade quando cultivado no regime hídrico de 304 mm, enquanto para o amaranto, quinoa e o trigo sarraceno, foi de 21,04 e 20,09 e 23,25% respectivamente. Outro fator que torna a quinoa e o amaranto excelentes alternativas ao feijão para o cultivo em safrinha é que, além de serem bem superiores em produtividade de grãos no regime de 304 mm, também produzem maior quantidade de biomassa seca. Tal fato é extremamente importante, pois, essa biomassa proporcionará maior proteção do solo durante o período de entressafra.

A redução da produtividade de grãos e da biomassa seca devido ao estresse hídrico em plantas de feijão foi relatada em vários estudos (Durigon et al. 2019; Soureshjani et al. 2019; Androcioli et al. 2020). Torabian et al. (2018) encontraram reduções de até 60% na produtividade de grãos de genótipos de feijão submetidos a estresse hídrico. O feijão necessita aproximadamente 100 mm de água para cada mês do ciclo da cultura (Carvalho et al. 2013). Como o ciclo da maioria das cultivares é de cerca de 100-120 dias, seriam necessários cerca de 350-400 mm de água em condições de cultivo adequadas (Durigon et al. 2019). Esse dado justifica ainda mais a alta susceptibilidade do feijão ao estresse hídrico nesse trabalho. Supondo-se que seriam necessários aproximadamente 400 mm de água para atender a demanda da cultura nesse experimento, a diminuição de apenas 96 mm (regime de 304 mm) provocou redução de aproximadamente 70% da produtividade desta cultura.

1.4.3 Temperatura média do dossel

Embora a redução na perda de água, ocasionada pelo fechamento estomático, possa

representar uma vantagem imediata para prevenir a desidratação do tecido, como consequência da diminuição da transpiração, a temperatura da folha aumenta, podendo diminuir a taxa fotossintética a níveis insuficientes para substituir o carbono usado como substrato no processo respiratório (Duan et al. 2018) e redução da produtividade das culturas. Foi justamente o resultado observado no presente trabalho. O estresse hídrico reduziu a condutância estomática, ocasionando aumentos na temperatura do dossel (Tabelas 5 e 6).

A temperatura do dossel expressou forte influencia na produtividade de grãos das quatro culturas. Como no amaranto, quinoa e o trigo sarraceno não houve aumento considerável de temperatura quando cultivados no regime de 304 mm, as reduções na produtividade de grãos dessas culturas foram inferiores às observadas na cultura do feijão, cuja amplitude na temperatura do dossel foi três vezes nesse regime hídrico. Esse aumento na temperatura do feijoeiro pode ser justificado pelas altas reduções na condutância estomática, transpiração e concentração interna de CO₂ (Tabela 3). Em condições de estresse hídrico severo (187 mm), houve aumentos significativos de temperatura do dossel nas quatro culturas. As plantas C3, como o feijão, são mais afetadas pelo aumento da temperatura foliar do que as plantas C4, pois, em tais condições, a fotorrespiração aumenta mais rapidamente que a fotossíntese (Sage e Kubien, 2007). Quando se aumenta a temperatura foliar, a taxa de fotorrespiração cresce consideravelmente nas plantas C₃, reduzindo a fotossíntese líquida. As plantas C4, devido ao mecanismo de concentração de CO₂, reduzem a taxa de fotorrespiração a níveis desprezíveis, mesmo em elevadas temperaturas (Sage e Kubien, 2007; Ghannoum, 2009). Não obstante, para além das características das quatro espécies de plantas estudadas, a termografia comprovou que a diminuição da transpiração foliar contribuiu para o acréscimo da temperatura do dossel, que se deu em função da maior concentração de energia em forma de calor latente, tornando a temperatura foliar maior que a temperatura do ar.

Neste sentido o uso da termografia na detecção do estado da água da cultura conseguiu determinar a ocorrência das reduções na produtividade de grãos, uma vez que a disponibilidade de

umidade no solo, por meio dos regimes diferenciados, afetou o crescimento das plantas (produção de biomassa), controlando a abertura dos estômatos (Tabela 3), pois as variações da condutância estomática decorrem, mormente, pela sensibilidade das folhas às variações de temperatura. Assim, no estado hídrico de 187 mm as plantas responderam fisiologicamente aumentando as suas temperaturas, o que torna esta resposta ao ambiente um excelente índice do status hídrico da cultura em determinado momento, podendo se dizer que a temperatura do dossel das plantas é uma variável de fundamental importância na avaliação e monitoramento do estresse hídrico (Wang et al., 2010). Através da imagem térmica oriunda do dossel, Phadi et al. (2012) identificaram diferentes intensidades de irrigação, conforme o presente estudo, tornando-a uma ferramenta promissora no monitoramento remoto da produtividade das culturas em termo de gestão de uso da água, com base no déficit hídrico.

1.5. CONCLUSÕES

Em geral, o estresse hídrico afetou negativamente a produtividade de grãos e as variáveis fisiológicas, entretanto, em graus diferentes nas quatro culturas estudadas. Todavia, o amaranto, cultura menos afetada fisiologicamente e a quinoa, mesmo tendo seus atributos fisiológicos afetados significativamente, destacaram-se, pois mantiveram alta produtividade em regimes iguais ou superiores a 304 mm, situação hídrica de ocorrência comum no período da safrinha na maioria das regiões produtoras de grãos no Cerrado.

O uso da termografia mostrou-se uma eficiente ferramenta para predição do comportamento fisiológico/produtivo das espécies estudadas, pois associou as respostas das variáveis fisiológicas e produtivas em déficit hídrico com o aumento da temperatura do dossel.

1.6. REFERÊNCIAS

ACHARYA, B. R; ASSMANN, S. M. Hormone interactions in stomatal function. – **Plant Molecular Biology**, v. 69, p. 451-462, 2009.

ACHIGAN-DAKO E.G; SOGBOHOSSOU, O.E.D; MAUNDU, P. Current knowledge on *Amaranthus* spp.: research avenues for improved nutritional value and yield in leafy amaranths in sub-Saharan Africa. **Euphytica**, v. 197, p. 303-317, 2014.

ANDROCIOLI, L.G; ZEFTA, D.M; ALVES, D.S; TOMAZ, J.P; CIRINO, V.M. Effect of water deficit on morphoagronomic and physiological traits of common bean genotypes with contrasting drought tolerance. **Water**, v. 12, 2020.

ALVARES C.A; STAPE, J.L; SENTELHAS, P.C; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 407–427, 2013.

ANJUM, S.A; XIE, X; WANG, L; SALEEM, M.F; MAN, C; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011.

ASAE – American Society of Agricultural Engineers., 2000. Moisture measurement – unground grain and seeds. In: Standards, 2000. St. Joseph: ASAE. 563p.

ASHRAF, M; AKRAM, N. A; AL-QURAINY, F; FOOLAD, M. R. Drought tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators and mineral nutrients. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 249- 296, 2011.

BACK, A.J. Irrigation of bean culture in the South of Santa Catarina state–Brazil. **Rev. Tec. Amb**, v. 7, p. 35–44, 2001.

BANERJEE, K; KRISHMAN, P. Normalized Sunlit Shaded Index (NSSI) for characterizing the moisture stress in wheat crop using classified thermal and visible images. **Ecological indicators**, v. 110, 2020.

BARRS, H. D; WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of Biological Science**, v.15, p.413-428, 1962.

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

BERTOLINO, LÍGIA. T; CAINE, ROBERT. S; GRAY, JULIE. E. Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 225,

2019.

BLAYA-ROS, P.J; BLANCO, V; DOMINGO, R; SOTO-VALLES, F; TORRES-SANCHEZ, R. Feasibility of Low-Cost Thermal Imaging for Monitoring Water Stress in Young and Mature Sweet Cherry Trees. **Applied Sciences**, v.10, 2020.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p

CARVALHO, I.R; KORCELSKI, C; PELISSARI, G; HANUS, A.D; ROSA, G.M. Water demand of crop agronomic interest. **Enciclopedia. Biosfera**, v.9, P. 969–985, 2013.

CASARI, R.A.C.N; PAIVA, D.S; SILVA, V.N.B; FERREIRA, T.M.M; SOUZA, M.T; OLIVEIRA, N.G; KOBAYASHI, A.; MOLINARI, H.B.C; SANTOS, T.T; GOMIDE, R.L; MAGALHAES, P.C; SOUZA, C.A.F. Using Thermography to Confirm Genotypic Variation for Drought Response in Maize. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, 2019.

CENDRERO, M.; PILAR, M.; MULLER, O.; ALBRECHT, H.; BURKART, A.; GATZKE, S.; JANSSEN, B.; KELLER, B.; KÖRBER, N.; KRASKA, T.; MATSUBARA, S.; LI, J.; MÜLLER-LINOW, M.; PIERUSCHKA, R.; PINTO, F.; RISCHBECK, P.; SCHICKLING, A.; STEIER, A.; WATT, M.; SCHURR, U.; RASCHER, U. Field Phenotyping: Concepts and Examples to Quantify Dynamic Plant Traits across Scales in the Field. In: CHABBI, A.; LOESCHER, H.W. (Ed.). **Terrestrial Ecosystem Research Infrastructures: Challenges and Opportunities**. CRC Pres, p. 53-79, 2017.

CHOUDHARY, S; GUHA, A; KHOLOVA, J; PANDRAVADA, A; MESSINA, C.D; COOPER, M; VADEZ, V. Maize, sorghum and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. **Plant Science**, v. 295, 2020.

DAWOOD, M.G; TAIE, H.A.A; NASSAR, M.R.A; ABDELHAMID, M.T; SCHMIDHALTER, U. The changes induced in the physiological, biochemical and anatomical characteristics of *Vicia faba* by the exogenous application of proline under seawater stress. **South African Journal of Botany**, v. 93, p. 54-63. 2014.

DUAN, H.; CHASZAR, B.; LEWIS, J.D.; SMITH, R.A.; HUXMAN, T.E.; TISSUE, D.T. CO₂ and

temperature effects on morphological and physiological traits affecting risk of drought-induced mortality. **Tree Physiology**, 38, 1138–1151, 2018.

DURIGON, A.; EVERS, J.; METSELAAR, K.; LIER, Q.J.V. Water stress permanently alters shoot architecture in common bean plants. **Agronomy**, v.9, 2019.

EMBRAPA. **Programa de Monitoramento da Irrigação**. Brasília: EMBRAPA. (2012).

FAROOQ, M., WAHID, A., KOBAYASHI, N., FUJITA, D., BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v.29, p. 185-212, 2009.

FIDELIS, R. R., DE SOUSA, S. A., MARTINEZ, R. A. S., DE OLIVEIRA, T. C., RAMOS, D. P., & TONELLO, L. P. (2015). Common beans genotypes behavior cultivated in cerrado soils (savannah) of southern Tocantins. **Bioscience Journal**, v.31, 2015.

FILIPPOU, P.; ANTONIOU, C.; FOTOPOULOS, V. The nitric oxide donor sodium nitroprusside regulates polyamine and proline metabolism in leaves of *Medicago truncatula* plants. **Free Radical Biology and medicine**, v.56, p.172-183, 2013.

FLEXAS, J.; DIAZ-ESPEJO, A.; GAGO, J.; GALLÉ, A.; GALMÉS, J.; GULÍAS, J.; MEDRANO, H. Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 103, p. 12-23, 2014

GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 990, p. 87-92, 1989.

GILL, S.S; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, p. 909-930. 2010

GOMES, P; OLIVA, M.A; MIELKE, M.S; ALMEIDA, A.F. Osmotic adjustment, proline accumulation and cell membrane stability in leaves of *Cocos nucifera* submitted to drought stress. **Scientia Horticulture**, v.126, p. 379-384, 2010.

GONÇALVES, F.M.F.; DEBIAGE, R.R.; SILVA, R.M.G.P. & PETRÔNIO, P. *Fagopyrum esculentum* Moench: A crop with many purposes in agriculture and human nutrition. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 983-989, 2016.

HALDIMANN, P; GALLE, A; FELLER, U. Impact of an exceptionally hot dry summer on photosynthetic traits in oak (*Quercus pubescens*) leaves. **Tree Physiology**. v. 28, p.785–795, 2008.

HANKS R.J; KELLER J; RASMUSSE V.P; WILSON GD. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, p. 426-429, 1976.

HOSSAIN, M.S; LI, J; SIKDAR, A; HASANUZZAMAN, M; UZIZERIMANA, F; MUHAMMAD, I; YUAN, Y; ZHANG, C; WAND, C; FENG, B. Exogenous melatonin modulates the physiological and biochemical mechanisms of drought tolerance in Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). **Molecules**, v.25, 2020.

HORNOYAK, M; PLAZEK, A; KOPEC, P; DZIURKA, M; PASTUSZAK, J; SZCZERBA, A; HURA, T. Photosynthetic activity of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) exposed to thermal stress. **Photosynthetica**, v. 58, p. 45-53, 2020.

HUANG, J;HIRJI, R;ADAM,ADAM, K.L. ROZWADOWSKI, J.K. HAMMERLINDL, W.A. KELLER, G. SELVARAJ. Genetic engineering of glycinebetaine production toward enhancing stress tolerance in plants: metabolic limitations. **Plant Physiology**, v. 122, p. 747-756. 2000.

JENSEN, R.G. Photosynthesis: c3, c4. Mechanisms, and cellular and environmental regulation, of photosynthesis. **Science**, v. 2, 1983.

KNIPPER, K.R; KUSTAS, W.P; ANDERSON, M.C; NIETO, H; ALFIERI, J.G; PRUEGER, J.H; HAIN, C.R; GAO, F; MCKEE, L.G; ALSINA, M.M; SANCHEZ, L. Using high-spatiotemporal thermal satellite ET retrievals to monitor water use over California vineyards of different climate, vine variety and trellis design. **Agricultural Water Management**, v. 241, 2020.

LAWLOR, D.W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to

understanding production systems. **Journal of Experimental Botany**, v.53, p.773- 787, 2002.

LI, J.; HOSSAIN, M.S.; MA, H.; YANG, Q.; GONG, X.; YANG, P.; FENG, B. Comparative metabolomics reveals differences in flavonoid metabolites among different coloured buckwheat flowers. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 85, 2020.

LI, L; WANG, L. F; WU, J; JING, R. L; WANG, S. M. Physiological characteristics of drought resistance in common bean (L.). – **Acta Agronomica Sinica**, v. 40, p. 702-710, 2014.

MATYSIK, J; BHALU, B; MOHANTY, P. Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants. *Current Science*,bv. 82, p. 525–532, 2002.

MUNEMASA, S. et al. Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 28, p. 154-162, 2015.

NEPOMUCENO, A. L. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 04, p. 12-18, 2001.

NILAHYANNE, A; ISLAM, M.A; MESBAH, A.O; HERBERT, S.K; GARCIA, A.G. Growth, water productivity, nutritive value, and physiology responses of silage corn to water stress. **Agronomy Journal**, v.112, p. 1625-1635, 2020.

OZKUR, O; OZDENIR, F; BOR, M; TURKAN, I. Physiochemical and antioxidant responses of the perennial xerophytes capparidaceae ovate desf. To drought. **Environmental and Experimental Botany**, v.66, p. 487-492, 2009.

OLOFINTOYE, J.A.T; ABAYOMI, Y.A; OLUGBEMI, O. Yeld responses of grain Amaranth (*Amaranthus Cruentus* L.) varieties to varying planting density and soil amendment. **Academic Journals**, v. 10, p. 2218-2225, 2015.

PONCE, R.M; LIMA, L.H.S; COSTA, D.S; ZUCARELI, C; TAKAHASHI, L.S.A. Potencial fisiológico de sementes de trigo sarraceno avaliado por diferentes testes de vigor. **Revista de ciências agrárias**, v.42, 676-683, 2019.

PADHI, J.; MISRA, R. K.; PAYERO, J. O. Estimation Of Soil Water Deficit In An Irrigated Cotton Field With Infrared Thermography. **Field Crops Research**, n.126, p.45–55, 2012.

RAMOS, M. L. G., PARSONS, R., SPRENT, J. I., & JAMES, E. K. Effect of water stress on nitrogen fixation and nodule structure of common bean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, 339-347, 2003.

REGUERA, M; CONESA, C.M; GIL-GOMEZ, A; HAROS, C.M; PEREZ-CASAS, M.A; BRIONES-LABARCA, V; BOLANOS, L; BONILLA, L; ALVAREZ, R; PINTO, K; MUJINA, A; BASCUNAN-GODOY, L. The impact of different agroecological conditions on the nutritional composition of *C. quinoa* seeds. **Peer journal**, v. 6, 2018.

R CORE TEAM., 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available at . Accessed in 17 September 2018. <https://www.R-project.org/>.

SAS/STAT Guide for personal computers, version 8.2.' (SAS Institute: Cary, NC). (2001)

SAGE, R.F; KUBIEN, D.S. The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. **Plant, Cell & environment**. v. 30, p. 1086-1106, 2007.

SANTOS, H. G; JACOMINE, P. K. T; DOS ANJOS, L. H. C; DE OLIVEIRA, V. A; LUMBRERAS, J. F; COELHO, M. R; ALMEIDA, J.A DE; FILHO, J.C.A; OLIVEIRA, J.B; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SARKER, U; OBA, S; DARAMY, M.A. Nutrients, minerals, antioxidant pigments and phytochemicals, and antioxidant capacity of the leaves of stem amaranth. **Scientific Reports**, v.10, 2020.

SILVA, A.N; RAMOS, L.M.G; RIBEIRO JUNIOR, W.Q; ALENCAR, E.R; SILVA, P.C; LIMA, C.A; VINSON, C.C; SILVA, M.A.V. Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. **Agricultural Water Management**, v.231, 2020.

SILVA, J.G; BIANCHINI, A; COSTA, P.M.C; LOBO, F.A; ALMEIDA, J.P.M; MORAES, M.F. Amaranth responses to water stress. **Journal of experimental agriculture international**. v. 40, p.

1-9, 2019.

SLABBERT, M.M; KRUGER, G.H.J. Antioxidant enzyme activity, proline accumulation, leaf area and cell membrane stability in water stressed *Amaranthus* leaves. **South African Journal of Botany**, v.95, p. 123-128, 2014.

SOIL SURVEY STAFF. Soil survey field and laboratory methods manual. Soil survey investigations report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2014.

SOURESHHJANI, H.K; NEZAMI, A; KAFI, M; TADAYON, M. Responses of two common bean genotypes to deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.213, p. 270-279, 2019.

TANG, L. S; LI, Y; ZHANG, J. H. Physiological and yield responses of cotton under partial rootzone irrigation. – **Field Crops Research**, v.94, p. 214-223, 2005.

TARDIEU, F; SIMONNEAU, T; MULLER, B. The physiological basis of drought tolerance in crop plants: A scenario-dependent probabilistic approach. **Annual Review Plant Biology**, v. 69, p. 733–759. 2018.

TIME, A; GARRIDO, M; ACEVEDO, E. Water relations and growth response to water stress of *Prosopis tamarugo* Phil. A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 18, p. 329-343, 2018.

TORABIAN, S; SHAKIBA, M.R; NASAB, A.D.M; TOORCHI, M. Leaf gas exchange and grain yield of common bean exposed to spermidine under water stress. **Photosynthetica**, v.56, p. 1387-1397, 2018.

VALDAYSKIKH, V.V; VORONIN, P.Y; ARTEMYEVA, .E.P; RYMAR, V.P. Amaranth responses to experimental soil drought. AIP conference proceedings, 2063, 2019.

VITEK, P; VESELÁ, B; KLEM, K. Spatial and Temporal Variability of Plant Leaf Responses Cascade after PSII Inhibition: Raman, Chlorophyll Fluorescence and Infrared Thermal Imaging. **Sensors**, v. 20, 2020.

ZEEVAART, J. A. D; CREELMAN, R. A. Metabolism and physiology of abscisic acid. Annual Review of Plant Physiology. **Plant Molecular Biology**, v. 39, p. 439-473, 1988.

WANG, Q; LIN, F; WEI, SH; MENG, XX; YIN ZG; GUO YF; YANG, GD. Effects of drought stress on endogenous hormones and osmotic regulatory substances of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) At seedling stage. **Applied ecology and environmental research**, v.17, p. 4447-4457, 2019.

WANG, X; YANG, W; WHEATON, A; COOLEY, N; MORAN, B. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: a first step towards automated plant water stress monitoring. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.73, n.1, p.74-83, 2010.

WU, X; ZUO, Q; SHI, J; WANG, L; XUE, X; BEN-GAL, A. Introducing water stress hysteresis to the Feddes empirical macroscopic root water uptake model. **Agricultural Water Management**, v.240, 2020.

YANG, A; AKHTAR, S.S; LI, L; FU, Q; LI, Q; NAEEM, M.A; HE, X; ZHANG, Z; JACOBSEN, S.E. Biochar Mitigates Combined Effects of Drought and Salinity Stress in Quinoa. **Agronomy**, v.10, 2020.

CAPÍTULO 2 - EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE GRÃOS DE TRIGO, TRITICALE E FEIJÃO.

EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE GRÃOS DE TRIGO, TRITICALE E FEIJÃO.

RESUMO - O trigo, o triticale e o feijão são plantados em regime de irrigação e de sequeiro e podem sofrer os efeitos do estresse hídrico em ambas as situações. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do estresse hídrico sobre as qualidades físicas e químicas de grãos de trigo (*Triticum aestivum*), triticale (*Triticosecale wittmack*) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L). O experimento foi conduzido na estação experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por quatro regimes hídricos (187 mm, 304 mm, 410 mm, 535 mm) aplicados ao feijoeiro (BRS Realce), dois genótipos de trigo (CPAC 0544 e BRS 404) e triticale (BRS Ulisses). A qualidade física dos grãos foi avaliada pelo peso de mil grãos (PMG) e cor dos grãos (representada pela luminosidade (L *), croma (C *) e ângulo de matiz (h *)); a qualidade química foi determinada pelo conteúdo de proteínas, carboidratos, lipídios, cinzas e teores de macro e microminerais. O estresse hídrico reduziu a produtividade de grãos de todas as espécies, porém não reduziu o peso de mil grãos do genótipo de trigo BRS 404, mostrando o potencial desta cultivar, embora tenha levado à redução do PMG no feijão comum, triticale e no genótipo de trigo CPAC 0544. Houve também uma redução da luminosidade (L *) nos grãos para ambos os genótipos de trigo estudados, croma (C *) e ângulo de matiz (h *) para o triticale. O déficit hídrico também afetou os teores de proteínas, carboidratos, lipídios e cinzas, com aumento do teor de proteínas e redução dos teores de carboidratos e cinzas do feijoeiro. Em geral, o estresse hídrico reduziu os teores macro e microminerais nos grãos, causou uma alteração indesejável na qualidade física e afetou a qualidade química dos grãos.

Palavras-chave: Qualidade do grão; *Phaseolus vulgaris*; *Triticum aestivum*; *Triticosecale wittmack*; déficit hídrico.

EFFECT OF WATER STRESS ON THE PRODUCTIVITY AND QUALITY OF WHEAT, TRITICALE AND BEAN GRAINS.

ABSTRACT - Wheat, triticale and common bean are planted in both irrigated and rainfed conditions and may suffer the effects of water stress in both situations. The objective of this work was to evaluate the effect of water stress on the physical and chemical qualities of wheat (*Triticum aestivum*), triticale (*Triticosecale wittmack*) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grains. The experiment was conducted at the Embrapa Cerrados experimental station, in Planaltina, DF, Brazil. The experimental design was in randomized blocks with four replications. The treatments were composed of four water regimes (187 mm, 304 mm, 410 mm, 535 mm) applied to common bean (BRS Realce), two wheat genotypes (CPAC 0544 and BRS 404) and triticale (BRS Ulisses). The physical quality of grains was evaluated by the weight of a thousand grains (WTG) and color of the grains (represented by the luminosity (L*), chroma (C*) and hue angle (h*)); the chemical quality was determined by protein, carbohydrate, lipid, ash, macro and microminerals contents. Water stress reduced grain yield of all species, however it did not reduce the weight of one thousand grains of the wheat genotype BRS 404, showing the potential of this cultivar, though it did lead to reduced WTG in common bean, triticale and the wheat genotype CPAC 0544. There was also a reduction of luminosity (L*) in the grains for both studied wheat genotypes, and chroma (C*) and hue angle (h*) for triticale. Water deficit also affected protein, carbohydrate, lipid and ash contents, with an increase in the protein content and a reduction in the carbohydrate and ash contents in common bean. In general, water stress reduced macro and micromineral contents in the grains, caused an undesirable change in the physical quality of the grains, and affected the chemical quality of the grains.

Keywords: Grain quality; *Phaseolus vulgaris*; *Triticum aestivum*; *Triticosecale wittmack*; water deficit.

2.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve uma redução significativa da precipitação e aumento da temperatura devido a mudanças climáticas, com efeito direto nas características e componentes de produtividade e qualidade de grãos em culturas agrícolas em todo o mundo (Alexander, 2016). Dentre os fatores que comprometem a produção de grãos e contribuem para o baixo rendimento, destaca-se a ausência de culturas mais tolerantes ao déficit hídrico e a não uniformidade das precipitações, com a ocorrência de estiagens prolongadas, conhecidas como “veranicos” na região do Cerrado, na fase crítica de desenvolvimento das culturas (Sousa et al., 2015). Portanto, deve-se buscar espécies/culturas que, mesmo em condições de reduzida disponibilidade hídrica, mantenham elevado potencial produtivo sem perder sua qualidade nutricional.

Entre as espécies com destaque no cenário produtivo mundial estão o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e o trigo (*Triticum aestivum*). O feijão é uma leguminosa consumida mundialmente como importante fonte de proteínas, fibras, amido e minerais, como o nitrogênio e o potássio, e tem alto potencial para reduzir a desnutrição em populações pobres (Chekanai et al., 2018). O trigo (*Triticum aestivum*) é a segunda cultura mais cultivada no mundo, com uma área de produção estimada em mais de 200 milhões de hectares (Zorb et al., 2018). O consumo de trigo é responsável por 19% das calorias na dieta humana global, uma vez que o grão é rico em carboidratos, embora também tenha teor de proteínas maior que outros cereais como o arroz, milho e centeio (Liu et al., 2018; Zorb et al., 2018). Tem-se ainda o triticale (*Triticosecale wittmack*), que é um cereal sintético, resultante do cruzamento entre o trigo e o centeio, que vem ganhando importância na alimentação humana e animal.

Espécies e genótipos tolerantes ao déficit hídrico podem ser identificados usando uma combinação de parâmetros, incluindo rendimento de grãos, eficiência no uso da água (razão entre a produtividade e a quantidade de água aplicada ao longo do ciclo da cultura) e componentes de produtividade (número de grãos por metro quadrado, número de espigas por metro quadrado, peso

de grãos) que podem ser positiva ou negativamente correlacionados com o rendimento da cultura (Bastos et al., 2012; Fried et al. 2019; Mahajan et al. 2018; Meena et al. 2019; Souza et al. 2018).

O estresse hídrico afeta não apenas o rendimento, mas também a qualidade dos grãos. A qualidade, por sua vez, está relacionada tanto à composição nutricional quanto às suas propriedades funcionais, incluindo sabor, cor e aroma do produto (Halford et al., 2014). A cor, em particular, que é quantificada nas sementes, através do cromatismo, matiz e luminosidade (Garg et al. 2016), representa um parâmetro importante para os consumidores e a indústria e também pode refletir alterações subjacentes na composição do grão causadas pelo déficit de água (Clydesdale, 1991; DeMan, 1999; Jha, 2010).

A variação na composição nutricional dos grãos devido às diferentes condições de cultivo é uma informação importante que é exigida em programas como os de nutrição humana e a indústria de alimentos. Além disso, há um aumento da demanda por produtos com maiores teores de proteínas, fibras e minerais (Xiong et al., 2017). Embora o trigo e o feijão sejam excelentes fontes de proteínas e carboidratos, fatores edáficos e ambientais, como deficiência de nutrientes, acidez do solo e seca, podem reduzir a produtividade e a qualidade dos seus grãos (Beebe et al., 2014 ; Gooding et al., 2003). Portanto, a determinação de proteínas, carboidratos, minerais e outros componentes qualitativos em grãos cultivados em diferentes condições hídricas é fundamental para o manejo da nutrição e da saúde humana (Lourenço et al., 2010).

A hipótese do trabalho é que a redução da disponibilidade hídrica, além de levar à redução da produtividade, afeta negativamente a qualidade física dos grãos e os teores de elementos minerais, além de impactar na quantidade de lipídios, proteínas, carboidratos e cinzas. Dada a suscetibilidade diferencial ao déficit hídrico, acredita-se também que há diferenças no impacto dos regimes hídricos nas diferentes espécies e genótipos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes regimes hídricos aplicados em condições de campo sobre a qualidade física e química de grãos de feijão, triticale e trigo.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento foi conduzido na estação experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil (latitude 15° 35 '30 "S, longitude 47° 42' 30" W), entre junho e outubro de 2017. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo AW (Alvares et al., 2013), com invernos secos e verões chuvosos. A média anual de precipitação é de 1400 mm, e a temperatura média anual de 21,3 °C. Os dados de temperatura e precipitação dos últimos vinte anos (1997-2016) são mostrados na Figura 1 e ilustram a estação seca anual durante os meses de maio a setembro. Os dados de temperatura e precipitação do período de estudo estão de acordo com os padrões que ocorrem no cerrado.

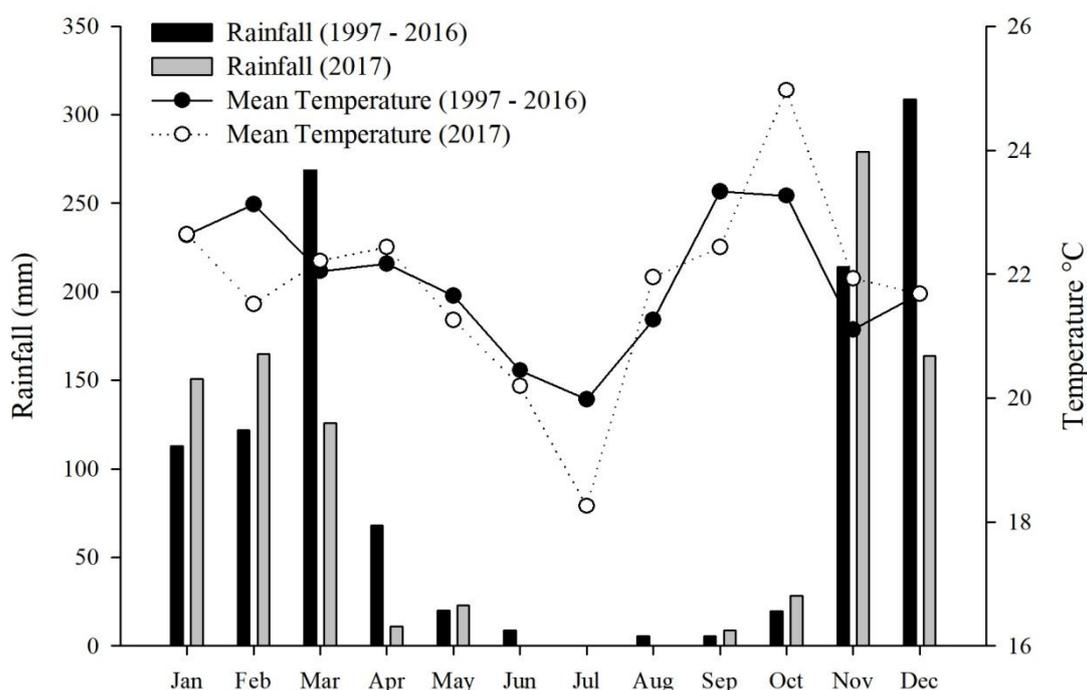


Figura 1. Médias de precipitação pluviométrica e temperatura média da área experimental entre maio e outubro de 2017 e dados médios dos últimos vinte anos (1997 - 2016). Dados obtidos de estação automática localizada ao lado do experimento.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho de acordo com a classificação brasileira de solo (Santos et al., 2013) e possui as seguintes características na camada de 0-20 cm: pH (em

água)= 5,77; Ca ($\text{cmo}_c\text{dm}^{-3}$)= 3,34; Mg ($\text{cmo}_c\text{dm}^{-3}$)=1,41; K (mg dm^{-3})= 207,55; H + Al ($\text{cmo}_c\text{dm}^{-3}$)= 4,52; P (mg dm^{-3})= 48,56; S (Mg kg^{-1}) = 19,71; matéria orgânica (%)= 2,60.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por quatro regimes hídricos - RH (187 mm; 304 mm; 410 mm; 535 mm) aplicados às culturas do feijão (*Phaseolus vulgaris*) – cultivar BRS Realce; genótipos de trigo – CPAC 0544, cultivar de trigo BRS 404 (*Triticum aestivum*); e triticale (*Triticosecale wittmack*) – cultivar BRS Ulisses. O genótipo CPAC 0544 é recomendado para cultivo em condições irrigadas e a cultivar BRS 404 para condições de cultivo em sequeiro.

As culturas foram semeadas manualmente na segunda semana de junho de 2017, em sistema plantio direto. O espaçamento entre linha e a densidade de semeadura utilizadas foram 0,5 m e 5 sementes m^{-1} para o feijão; 0,20 m entre linhas e densidade de 90 sementes m^{-1} para os dois genótipos de trigo e para o triticale. A adubação foi feita nos sulcos, na dose de 400 kg ha^{-1} da fórmula 04-30-16, totalizando 16 kg ha^{-1} de N; 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 ; e 64 kg ha^{-1} de K_2O . A adubação nitrogenada em cobertura foi feita a lanço, aos 30 dias após o plantio, na dose de 100 kg ha^{-1} N, na forma de ureia. Para evitar a competição das plantas invasoras foi realizada capina manual.

Os diferentes regimes hídricos foram obtidos utilizando-se uma barra irrigadora de aspersão com 40 m de largura, ligada ao carretel com velocidade ajustável. Em cada lateral da barra irrigadora foram instalados dez aspersores. Durante os primeiros 35 dias após a emergência (DAE), a irrigação foi uniforme. Após este período foi adaptada a metodologia do line source (Hanks et al., 1976), utilizando-se bocais de orifícios decrescentes da área central até a extremidade. Para cada lateral da barra irrigadora foram delimitadas 4 parcelas e 1 metro de distância entre as parcelas, representando os regimes hídricos. Nessa fase, foram realizadas treze irrigações e as lâminas acumuladas das irrigações uniformes e variáveis foram de 187, 304, 410, 535 mm para os quatro regimes hídricos.

As irrigações em nível mais alto foram realizadas conforme descrito no programa de monitoramento da irrigação no Cerrado (EMBRAPA, 2011), por meio da reposição da evapotranspiração, utilizando indicadores agrometeorológicos da região, o tipo de solo e a data de plena emergência das plantas. Embora nosso experimento tivesse três espécies diferentes, cada uma com demandas diferentes de água, usamos o trigo como cultura de referência, entendendo que o feijão e o triticale têm um consumo de água semelhante ao do trigo. A frequência de irrigação foi realizada aproximadamente a cada 5 dias, de acordo com as condições climáticas e a fase fenológica da cultura. Para calcular o montante da lâmina de água aplicada, em cada irrigação, foram montadas duas filas de coletores paralelos à linha de irrigação para medir o volume de água aplicado.

A colheita do feijão foi realizada aos 88 dias após o plantio (DAP), de forma manual, e o trigo e triticale aos 105 DAP com uma colheitadeira mecânica. A produtividade de grãos foi avaliada por meio de amostragem em quatro linhas centrais da parcela, com 1,0 m de comprimento. Os dados foram transformados em kg ha^{-1} e o teor de umidade dos grãos corrigido para 13,0%.

2.2.2 Qualidade física dos grãos

Após a colheita, os grãos foram armazenados à temperatura ambiente por 10 dias. A qualidade física foi avaliada quantificando o peso de mil grãos (PMG) e analisando a cor, representada pelas variáveis luminosidade (L^*), índice de cromaticidade (C) e ângulo hue (h^*). Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Alimentos da Universidade de Brasília e no Laboratório de Química Analítica de Plantas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados).

O peso de mil grãos (PMG) foi determinado conforme o método descrito por Brasil (1992). De cada parcela, 100 grãos foram contados manualmente e, a seguir, pesados em balança semi-analítica. O resultado foi multiplicado por 10.

A avaliação da cor dos grãos foi realizada em colorímetro triestímulo Color Quest XE

(HunterLab, Reston, Estados Unidos), obtendo-se o valor das coordenadas L^* , em termos de intensidade de branco a preto; a^* , em termos de intensidade de vermelho e verde, e b^* , em termos de intensidade de amarelo e azul. Com os valores das coordenadas a e b foi possível obter o ângulo de matiz h^* (Equação 1) e a índice de cromaticidade ou croma C^* (Equação 2) (Francis, 1975, Mclellan et al. 1995).

$$h^* = \arctang(b/a) \quad \text{(Equação 1)}$$

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

2.2.3 Qualidade química dos grãos

O teor de umidade dos grãos foi determinado de acordo com ASAE (2000). Os grãos de trigo e triticales foram levados para estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 130°C por 19 h e os de feijão a 103°C por 72 h. Os grãos foram retirados da estufa e colocados em um dessecador até atingir a temperatura ambiente; em seguida, foram pesados em balança analítica de precisão. A umidade foi utilizada para expressar a porcentagem dos outros constituintes em base seca. A qualidade química dos grãos foi avaliada através dos teores das macromoléculas: proteínas, lipídeos, carboidratos e cinzas. Além disso, o conteúdo dos macro e microminerais foi determinado.

A determinação do teor de proteínas dos grãos foi realizada de acordo com AOAC (2005), method 991.22, pelo método de Kjeldahl. No cálculo do teor de proteínas, foram utilizados fatores de conversão equivalentes a 6,25 para o feijão e 5,6 para trigo e triticales. O teor de lipídeos totais foi determinado pelo método de extração Am 5-04, utilizando-se Extrator XT15 da *Ankom Technology* (AOCS, 2005). A determinação do teor de cinzas das amostras foi realizada pelo método 945.45 (AOAC, 2005), por calcinação à temperatura de 600 °C, por aproximadamente 4 h. O teor total de carboidratos foi determinado subtraindo-se de 100, dos valores encontrados para proteínas, lipídeos, cinzas, de acordo com o método 986.25 (AOAC, 2005). Os teores de proteínas, lipídeos, cinzas e de

carboidratos foram expressos em base seca.

Os macrominerais analisados foram Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), Fósforo (P) e Enxofre (S). Os microminerais analisados foram: Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Boro (B). Para a determinação dos teores de macrominerais (Ca, Mg, K, P e S) e microminerais (Fe, Mn, Cu, Zn e B), as amostras de grãos foram secas e moídas. Posteriormente, 20 mg de cada amostra foram pesados, digeridos em solução de ácido perclórico e hidratados na proporção de 2:1 a 250 °C e diluídos em 50 mL com água deionizada de alta pureza, segundo Ficco et al. (2009). O conteúdo de nutrientes foi então determinado usando-se um espectrofotômetro de emissão óptica de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES; Thermo Cientific, 7000). Os elementos foram analisados em plasma óptico (ICP-OES), que possui um sistema de detecção de radiação que permite determinar em uma única amostra um grande número de elementos, utilizando as seguintes linhas (nm): Ca 422,6, Mg 285,2, K 769,8, P 178,2, S 180,7, Fe 238,2, Mn 257,6, Cu 324,7, Zn 213,8 e B 208,8.

2.2.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação das médias realizada pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando o software estatístico SAS versão 9 (SAS 'SAS / STAT., 2001). Foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as variáveis que representam as qualidades químicas e físicas dos grãos e a produtividade individualmente para cada espécie ou cultivar, pelo software R (versão 3.4.0, R Core Team, 2018), e os dados apresentados por meio de correlogramas.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Produtividade e qualidade física dos grãos

2.3.1.1 Rendimento de grãos

A produtividade sob diferentes regimes hídricos é apresentado na Tabela 1. Produtividades de até 5.295 kg ha⁻¹ foram observadas para feijão, 6.343 kg ha⁻¹ para triticales e 3.979 e 3.360 kg

ha⁻¹ para os genótipos de trigo CPAC 0544 e BRS 404, respectivamente. No entanto, o estresse hídrico reduziu a produtividade de todas as espécies. Reduções de 92,14, 92,87; 92,05 e 89,40% foram observadas para os genótipos de feijão, triticale e trigo CPAC 0544 e BRS 404, respectivamente, quando comparados os valores médios obtidos no maior e no menor regime hídrico. É importante ressaltar que não houve diferença significativa ($p > 0,05$) na produtividade dos genótipos de trigo CPAC 0544 e BRS 404 quando comparados os regimes hídricos de 410 e 535 mm.

2.3.1.2 Peso de grãos

O estresse hídrico afetou significativamente o peso de mil grãos (PG) do feijão, triticale e do genótipo de trigo CPAC 0544 e, mais importante, para o genótipo de trigo BRS 404, não houve diferenças significativas entre os regimes hídricos (Tabela 1). Reduções significativas no PG foram observadas ao se comparar o maior e o menor regime hídrico, de 38,2%, 31,1% e 26,5% no feijão, triticale e no genótipo de trigo CPAC 0544, respectivamente, enquanto que para o genótipo de trigo BRS 404, a redução observada foi de apenas 18,3% (Tabela 1).

2.3.1.3 Cor do grão

Em relação às variáveis relacionadas à cor dos grãos, o estresse hídrico afetou significativamente ($p < 0,05$) a luminosidade (L^*) nos dois genótipos de trigo; enquanto o croma (C^*) e o ângulo de matiz (h^*) foram afetados apenas significativamente no triticale (Tabela 1). Os maiores valores de luminosidade foram observados para ambos os genótipos de trigo estudados no RH 535 mm, porém, no genótipo de trigo CPAC 0544 a luminosidade diferiu nos RHs entre 304 mm e 187 mm e no genótipo de trigo BRS 404 a luminosidade diferiu entre 535 mm e 187 mm (Tabela 1). Além disso, quanto mais claros os grãos, maior a sua luminosidade, fazendo com que em condições de estresse hídrico os grãos de ambos os genótipos de trigo estudados tornem-se mais escuros.

Tabela 1 – Produtividade (PR, kg ha⁻¹), peso de mil grãos (PG, g) e variáveis relacionadas à cor (L* - luminosidade, C* - croma, h* - ângulo de matiz) em feijão comum, triticale e dois genótipos de trigo (CPAC 0544 e BRS 404) sob diferentes regimes hídricos.

Variáveis	Regimes Hídricos (mm)				CV (%)
	187	304	410	535	
Feijão					
PR (kg ha ⁻¹)	416,25 d ± 134,77	1.613,63 c ± 115,34	4.383,81 b ± 310,55	5.295,47 a ± 253,54	14,91
PMG (g)	205,44 c ± 6,75	263,72 b ± 4,41	331,41 a ± 9,77	332,80 a ± 8,34	5,05
L*	62,79 a ± 0,60	63,50 a ± 0,47	64,20 a ± 0,57	64,36 a ± 0,82	2,03
c*	13,40 a ± 0,43	13,85 a ± 0,22	14,54 a ± 0,66	14,59 a ± 0,11	4,59
h*	54,45 a ± 1,04	54,54 a ± 0,51	55,86 a ± 1,66	56,07 a ± 0,89	3,76
Triticale					
PR (kg ha ⁻¹)	452,44 d ± 64,39	1.801,83 c ± 175,79	5.485,11 b ± 366,13	6.343,49 a ± 496,01	18,3
PMG (g)	31,11 c ± 1,17	38,81 b ± 1,68	45,16 a ± 0,53	43,17 a ± 0,30	4,21
L*	57,18 a ± 0,23	56,79 a ± 0,56	56,87 a ± 0,21	56,02 a ± 0,31	0,99
c*	15,08 b ± 0,11	15,81 ab ± 0,11	16,14 ab ± 0,16	16,32 a ± 0,58	3,14
h*	63,30 b ± 0,21	63,50 b ± 0,34	64,42 a ± 0,23	65,11 a ± 0,29	0,56
CPAC 0544					
PR (kg ha ⁻¹)	316,16 c ± 53,38	1.456,43 b ± 157,52	4.026,30 a ± 323,43	3979,4 a ± 51,48	15,03
PMG (g)	26,30 b ± 1,44	29,36 b ± 0,99	35,79 a ± 1,91	35,80 a ± 1,42	8,81
L*	59,84 b ± 0,23	60,10 b ± 0,31	60,41 ab ± 0,23	61,10 a ± 0,29	0,63
c*	18,00 a ± 0,36	18,08 a ± 0,13	18,50 a ± 0,16	18,66 a ± 0,25	1,87
h*	66,35 a ± 0,24	66,38 a ± 0,34	66,82 a ± 0,27	66,87 a ± 0,18	3,03
BRS 404					
PR (kg ha ⁻¹)	356,43 c ± 149,74	1.186,83 b ± 125,62	3.639,22 a ± 200,46	3.360,64 a ± 347,33	20,89
PMG (g)	28,25 a ± 1,52	30,19 a ± 0,82	32,50 a ± 1,94	34,61 a ± 2,15	10,8
L*	58,56 b ± 0,10	59,19 ab ± 0,52	59,25 ab ± 0,12	60,06 a ± 0,30	0,95
c*	18,69 a ± 0,12	18,85 a ± 0,35	18,96 a ± 0,15	18,99 a ± 0,28	1,72
h*	64,42 a ± 0,33	65,47 a ± 0,37	65,60 a ± 0,12	65,65 a ± 0,30	0,6

* Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, para cada espécie. CV = coeficiente de variação. Valores expressos em base seca.

2.3.2 Composição química dos grãos

2.3.2.1 Teor de proteínas e carboidratos

O teor de proteína variou entre 23,51% a 29,60% para os grãos de feijão; 13,76% – 15,77% para o triticale; 14,04% -16,23% para o genótipo de trigo CPAC 0544 e de 15,20% a 16,91% para o

genótipo de trigo BRS 404 (Tabela 2). A redução na disponibilidade de água teve um impacto significativo para o genótipo de feijão comum e trigo CPAC 0544, enquanto que não houve diferenças significativas no teor de proteína dos grãos para triticale e genótipo de trigo BRS 404. Especificamente, houve um aumento no teor de proteína no feijão comum no regime hídrico mais severo (187 mm), enquanto que para o genótipo de trigo CPAC 0544, os maiores teores de proteína foram observados nos regimes hídricos intermediários (304 e 410 mm).

O teor de carboidratos representou a maior fração dos grãos nas quatro culturas estudadas (Tabela 2). A redução na disponibilidade de água teve um efeito significativo no feijão comum e genótipo de trigo CPAC 0544, enquanto não houve diferenças significativas para triticale e genótipo de trigo BRS 404 (Tabela 2). O padrão oposto ocorreu para o teor de carboidratos quando comparado aos resultados do teor de proteína, pois houve diminuição do teor de carboidratos à medida que o regime hídrico diminuiu para o feijão, e para o genótipo de trigo CPAC 0544 no RH intermediário (304 mm e 410 mm tiveram menor teor de carboidratos).

2.3.2.2 Conteúdo de lipídios e cinzas

Os resultados para o teor de lipídios não mostraram diferenças significativas para o feijão comum e o genótipo de trigo CPAC 0544 e diferenças significativas foram observadas para o triticale e o genótipo de trigo BRS 404 nos diferentes RHs. Para o triticale, a redução na disponibilidade de água (de 410 mm para 187 mm) diminuiu o teor de lipídios nos grãos desta cultura em 43%, e o aumento no RH de 410 mm para 535 mm diminuiu o conteúdo de lipídios em 38%, e o O RHs intermediários apresentaram o maior teor de lipídeos: 3,26% para o RH de 304 mm e 3,36% para o RH de 410 mm. Para a cultivar de trigo BRS 404, o estresse hídrico promoveu aumento no teor de lipídios, em que os maiores valores foram observados nos dois menores RHs: 3,03% para 187 mm RH e 3,46% para 304 mm RH.

Os regimes hídricos influenciaram significativamente o teor de cinzas apenas nos grãos de feijão (Tabela 2). O maior teor de cinzas (3,56%) foi observado para o maior regime hídrico (535 mm) e a redução da disponibilidade hídrica de 535 mm para 187 mm diminuiu o teor de cinzas em até 24,15% (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição química dos grãos de feijão, triticale e dois genótipos de trigo (CPAC 0544 e BRS 404) submetidos a diferentes regimes hídricos.

Cultura	Regime hídrico (mm)	Proteínas	Lipídios	Carboidratos	Cinzas
		%			
Feijão comum	187	29,60 a ± 0,77	1,56 a ± 0,26	65,60 b ± 0,86	2,70 b ± 0,19
	304	27,76 ab ± 1,12	1,82 a ± 0,12	67,70 ab ± 1,09	3,27 ab ± 0,23
	410	24,34 bc ± 0,70	1,86 a ± 0,28	70,45 a ± 1,00	3,33 ab ± 0,24
	535	23,51 c ± 1,54	1,93 a ± 0,14	70,99 a ± 0,60	3,56 a ± 0,15
	CV (%)	6,5	17,68	2,74	10,19
Triticale	187	15,77 a ± 0,57	1,91 b ± 0,13	81,17 a ± 0,85	2,13 a ± 0,38
	304	15,54 a ± 0,71	3,28 a ± 0,49	79,58 a ± 1,07	1,59 a ± 0,13
	410	13,98 a ± 0,44	3,36 a ± 0,33	80,98 a ± 0,55	1,67 a ± 0,16
	535	13,76 a ± 1,44	2,05 b ± 0,47	82,32 a ± 1,35	1,85 a ± 0,19
	CV (%)	11,15	20,6	2,19	14,26
CPAC 0544	187	14,82 ab ± 0,22	2,00 a ± 0,14	81,88 ab ± 0,31	1,29 a ± 0,19
	304	15,93 a ± 0,78	3,02 a ± 0,49	80,12 b ± 0,77	1,24 a ± 0,16
	410	16,23 a ± 0,19	2,35 a ± 0,11	79,80 b ± 0,27	1,30 a ± 0,14
	535	14,04 b ± 0,79	2,16 a ± 0,12	82,61 a ± 0,72	1,17 a ± 0,26
	CV (%)	5,48	20,35	1,2	17,2
BRS 404	187	16,36 a ± 0,23	3,03 ab ± 0,15	79,00 a ± 0,29	1,60 a ± 0,13
	304	16,91 a ± 0,84	3,46 a ± 0,20	78,34 a ± 0,74	1,28 a ± 0,27
	410	15,61 a ± 0,65	2,81 b ± 0,12	80,43 a ± 0,70	1,13 a ± 0,35
	535	15,20 a ± 0,79	2,63 b ± 0,27	79,72 a ± 0,53	1,44 a ± 0,11
	CV (%)	8,56	9,44	1,65	22,31

* Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, para cada espécie. CV = coeficiente de variação. Valores expressos em base seca.

2.3.2.3 Conteúdo macro e microminerais

Os resultados dos efeitos dos diferentes regimes de água nos conteúdos macro e microminerais nos grãos são mostrados nas Tabelas 3 e 4. O feijoeiro, em geral, apresentou os

maiores valores dos cinco macronutrientes analisados neste estudo (P, Ca, Mg, K e S) em relação às demais espécies estudadas, indicando ser uma cultivar de maior valor nutricional. Além disso, para os micronutrientes o feijão e o genótipo de trigo BRS 404, apresentaram os maiores valores para B, Cu, Fe, mas apresentou valores muito baixos para Mn em relação às demais cultivares estudadas, sendo o Zn o único micronutriente que apresentou valores semelhantes para todas cultivares. De maneira geral, observou-se redução dos teores de macronutrientes e micronutrientes nos grãos, à medida que as plantas foram submetidas aos menores regimes hídricos.

Tabela 3- Valores médios de teores de macrominerais em grãos de feijão, triticale, genótipo de trigo CPAC 0544 e cultivar de trigo BRS 404 cultivados sob diferentes regimes hídricos.

Cultura	Regime hídrico	P	Ca	Mg g kg ⁻¹	K	S
Feijão	187	3,03 a ± 0,15	0,72 a ± 0,07	1,24 a ± 0,01	11,01 a ± 0,49	1,40 a ± 0,16
	304	3,10 a ± 0,13	0,79 a ± 0,09	1,25 a ± 0,16	10,82 a ± 0,78	1,40 a ± 0,03
	410	3,11 a ± 0,09	0,82 a ± 0,05	1,34 a ± 0,04	11,50 a ± 0,34	1,53 a ± 0,19
	535	3,19 a ± 0,20	0,78 a ± 0,06	1,30 a ± 0,02	11,26 a ± 0,22	1,45 a ± 0,16
	CV (%)	5,74	9,52	6,68	4,96	5,55
Triticale	187	2,00 b ± 0,30	0,22 b ± 0,02	0,54 b ± 0,28	3,56 a ± 0,32	1,00 a ± 0,02
	304	2,29 ab ± 0,34	0,24 b ± 0,03	0,79 ab ± 0,02	3,21 a ± 0,18	1,04 a ± 0,16
	410	2,52 ab ± 0,19	0,28 ab ± 0,02	0,92 ab ± 0,15	3,27 a ± 0,24	1,08 a ± 0,03
	535	2,76 a ± 0,06	0,30 a ± 0,01	1,04 a ± 0,05	3,39 a ± 0,17	1,13 a ± 0,03
	CV (%)	11,71	9,42	23,80	12,88	5,60
Trigo - CPAC 0544	187	2,16 b ± 0,19	0,27 a ± 0,02	0,73 a ± 0,17	2,74 a ± 0,05	1,10 b ± 0,17
	304	2,60 ab ± 0,22	0,35 a ± 0,05	0,92 a ± 0,12	3,09 a ± 0,46	1,25 ab ± 0,17
	410	2,87 a ± 0,13	0,38 a ± 0,04	0,99 a ± 0,13	3,46 a ± 0,17	1,26 ab ± 0,04
	535	3,17 a ± 0,26	0,40 a ± 0,02	1,13 a ± 0,18	3,40 a ± 0,21	1,38 a ± 0,18
	CV	11,29	16,71	20,63	12,74	9,84
Trigo BRS 404	187	2,43 b ± 0,26	0,30 a ± 0,01	0,85 b ± 0,02	2,79 a ± 0,20	1,26 b ± 0,22
	304	2,53 b ± 0,28	0,33 a ± 0,01	0,99 ab ± 0,04	2,25 b ± 0,11	1,42 a ± 0,21
	410	2,99 ab ± 0,15	0,34 a ± 0,01	1,00 ab ± 0,02	2,23 b ± 0,15	1,46 a ± 0,15
	535	3,30 a ± 0,23	0,36 a ± 0,02	1,13 a ± 0,01	2,45 ab ± 0,14	1,49 a ± 0,22
	CV	9,87	11,10	10,02	10,36	4,15

* Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = coeficiente de variação. Valores expressos em base seca.

Tabela 4 - Valores médios da concentração de microminerais em grãos de feijão, triticale, genótipo de trigo CPAC 0544 e cultivar de trigo BRS 404 cultivados sob diferentes regimes hídricos.

Cultura	Regime hídrico	B	Cu	Fe	Mn	Zn
mg kg ⁻¹						
Feijão	187	10,84 c ± 1,83	3,04 c ± 0,41	48,39 c ± 1,66	7,55 a ± 0,58	29,25 b ± 0,33
	304	13,45 c ± 0,55	4,46 bc ± 0,49	54,01 bc ± 4,76	7,72 a ± 0,66	32,17 ab ± 1,09
	410	34,48 b ± 1,50	6,34 a ± 0,57	66,81 b ± 2,45	8,83 a ± 0,82	34,75 a ± 1,53
	535	54,80 a ± 0,74	5,47 ab ± 0,50	86,49 a ± 3,02	8,35 a ± 0,86	33,69 a ± 2,15
	CV (%)	11,80	13,77	11,09	12,31	5,34
Triticale	187	ND	2,05 a ± 0,29	32,78 a ± 4,58	22,37 a ± 1,91	26,42 b ± 2,89
	304	ND	2,27 a ± 0,21	35,58 a ± 2,50	20,68 ab ± 1,69	29,46 b ± 1,40
	410	ND	3,15 a ± 0,27	38,71 a ± 3,53	17,56 ab ± 0,91	39,64 a ± 1,99
	535	ND	3,09 a ± 0,44	37,93 a ± 1,47	16,74 b ± 1,26	41,97 a ± 1,98
	CV (%)		15,76	17,63	12,02	9,51
Trigo - CPAC 0544	187	ND	2,40 a ± 0,38	41,61 a ± 4,59	33,64 a ± 5,48	24,65 b ± 2,47
	304	ND	2,09 a ± 0,38	40,17 a ± 6,25	23,93 a ± 3,02	34,49 a ± 2,68
	410	ND	2,44 a ± 0,26	40,25 a ± 6,37	19,97 a ± 3,04	40,01 a ± 1,20
	535	ND	2,49 a ± 0,28	38,24 a ± 5,26	19,00 a ± 1,51	38,62 a ± 0,69
	CV		21,52	23,30	30,03	12,31
Trigo BRS 404	187	ND	1,97 a ± 0,48	49,80 a ± 2,28	31,01 a ± 3,97	25,74 b ± 3,15
	304	ND	2,21 a ± 0,17	49,05 a ± 3,63	24,92 a ± 1,22	31,00 b ± 1,30
	410	ND	2,78 a ± 0,26	42,49 a ± 4,08	24,55 a ± 3,20	35,91 ab ± 1,72
	535	ND	3,14 a ± 0,18	44,68 a ± 3,95	18,87 a ± 2,12	42,81 a ± 1,91
	CV		22,69	13,83	31,21	14,64

* Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ND = abaixo do limite de detecção; CV = coeficiente de variação. Valores expressos em base seca.

Para a cultura do feijão, o RH não afetou significativamente os macronutrientes (Tabela 3), mas reduziu significativamente as concentrações dos micronutrientes, exceto Mn (Tabela 4). As concentrações foram reduzidas de 54,80 para 10,84 mg kg⁻¹ para B; 5,47 a 3,04 mg kg⁻¹ para Cu; 86,49 a 48,39 mg kg⁻¹ para Fe; e 33,69 a 29,25 mg kg⁻¹ para Zn. Em conclusão, essas reduções correspondem a 80,2%, 44,4%, 44,1% e 13,17% para B, Cu, Fe e Zn, respectivamente.

No triticale, o RH influenciou significativamente os teores dos macronutrientes P, Ca, Mg (Tabela 3) e dos micronutrientes Mn e Zn (Tabela 4). Houve redução nos macronutrientes à

medida que as plantas foram submetidas a regimes hídricos menores: 2,76 a 2,00 g kg⁻¹ de P; 0,30 a 0,22 g kg⁻¹ para Ca e 1,04 a 0,54 g kg⁻¹ para Mg. Na análise de micronutrientes, o estresse hídrico aumentou os teores de Mn de 16,74 para 22,37 mg kg⁻¹ e reduziu o Zn de 41,97 para 26,42 mg kg⁻¹.

No genótipo de trigo CPAC 0544, o regime hídrico não afetou a maioria dos macro e micronutrientes. A diminuição no regime hídrico reduziu apenas dois dos macronutrientes analisados, P e S (Tabela 3), e entre os micronutrientes apenas os teores de Zn diminuíram significativamente no regime hídrico inferior (RH 187 mm, Tabela 4).

No genótipo de trigo BRS 404, o RH influenciou significativamente ($p < 0,05$) a maioria dos macronutrientes analisados (teores de P, Mg, K e S, Tabela 3). Para os micronutrientes, apenas o Zn foi influenciado de forma significativa ($p < 0,05$) (Tabela 4). Os teores de P, Mg, K, S e Zn foram reduzidos conforme o regime hídrico foi reduzido, de 3,30 para 2,43 g kg⁻¹, 1,13 para 0,85 g kg⁻¹, 2,45 para 2,29 g kg⁻¹, 1,49 para 1,26 g kg⁻¹ e 42,81 a 25,74 mg kg⁻¹, respectivamente. Ressalta-se que os teores de B ficaram abaixo do nível de detecção no triticale e nos genótipos de trigo (BRS 404 e CPAC 0544), em todos os RHs estudados.

2.3.4. Correlação de Pearson

As correlações de Pearson para as variáveis que representam a qualidade física e química e o rendimento de grãos são apresentadas nos correlogramas da Figura 2 (trigo BRS 404 - Figura 2 A; trigo CPAC 0544 - Figura 2 B; feijão comum - Figura 2 C; e triticale - Figura 2 D). Para o trigo BRS 404 a maior correlação ocorreu entre Ca e Mg (0,89, $p < 0,01$), seguido de P e Zn (0,83, $p < 0,01$), Zn e Cu (0,82, $p < 0,01$), S e Zn (0,77, $p < 0,01$), S e P (0,73, $p < 0,01$), S e ângulo de matiz (0,72, $p < 0,01$) e rendimento de grãos e Cu (0,7, $p < 0,01$). A concentração de proteína foi negativamente correlacionada com quase todas as variáveis com exceção de S, Zn, Fe e Mn. Em geral, os lipídios e as cinzas foram correlacionados negativamente com quase todas as outras variáveis, enquanto os carboidratos mostraram tendência oposta.

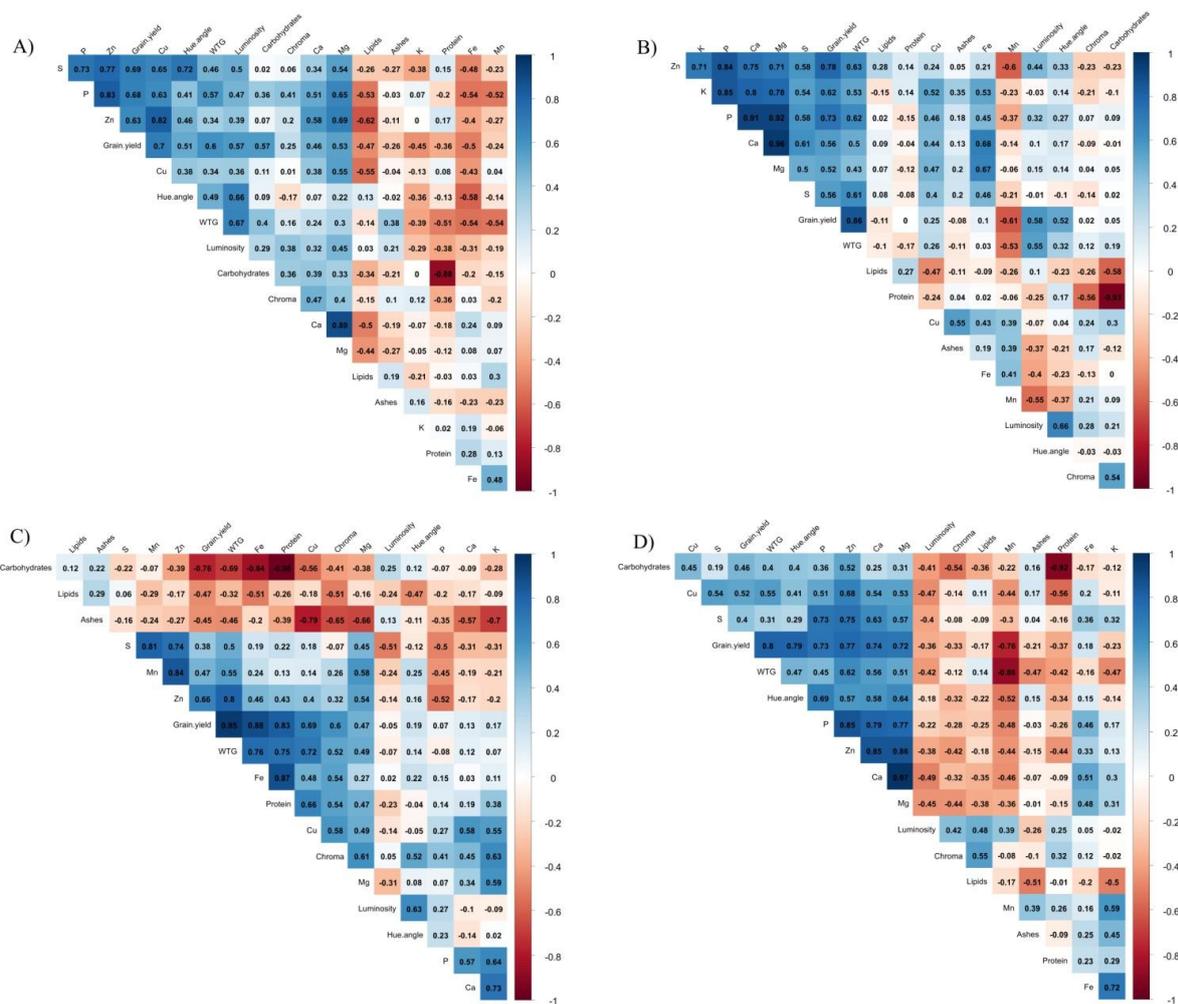


Figura 2. Correlograma das estimativas das correlações de Pearson entre as variáveis que representam a qualidade física e química dos grãos. A) trigo BRS 404; B) trigo CPAC 0544; C) feijão; D) Triticale.

Para o trigo CPAC 0544 (Figura 2B), a maior correlação também foi entre Ca e Mg (0,96, $p < 0,01$), enquanto outras correlações positivas significativas (maiores que 0,7) foram entre P e Mg (0,92, $p < 0,01$), P e Ca (0,91, $p < 0,01$), P e K (0,85, $p < 0,01$), P e Zn (0,84, $p < 0,01$) e entre rendimento de grãos e peso de mil grãos (0,86, $p < 0,01$). Quanto ao BRS 404 (Figura 2A), observamos uma forte correlação negativa entre carboidratos e proteínas (-0,93, $p < 0,01$). Novamente, a concentração de proteína foi negativamente correlacionada com quase todas as variáveis estudadas.

Um padrão diferente foi observado para o feijão comum (Figura 2C) quando comparado ao trigo BRS 404 e CPAC 0544. Neste caso, carboidratos, lipídios e cinzas foram negativamente correlacionados com quase todas as outras variáveis. A concentração de proteína foi positivamente correlacionada com quase todas as outras variáveis, exceto para carboidratos, (-0,98, $p < 0,01$), lipídios (-0,26, não significativo) e cinzas (-0,39, não significativo). A maior correlação foi entre rendimento de grãos e massa de mil grãos (0,95, $p < 0,01$).

O triticale apresentou correlações semelhantes às detectadas para o trigo (Figura 2D). A maior correlação foi entre Ca e Mg (0,97, $p < 0,01$) e a concentração de proteína foi novamente correlacionada negativamente com a maioria das outras variáveis. Correlações positivas significativas (maiores que 0,7) foram observadas entre Zn e Mg (0,86, $p < 0,01$), P e Zn (0,85, $p < 0,01$) e rendimento de grãos e peso de mil grãos (0,8, $p < 0,01$) enquanto que fortes correlações negativas foram observados entre proteína e carboidratos (-0,92, $p < 0,01$), peso de mil grãos e Mn (-0,88, $p < 0,01$) e rendimento de grãos e Mn (-0,76, $p < 0,01$).

2.4 DISCUSSÃO

2.4.1 Produtividade e qualidade física dos grãos

2.4.1.1 Produtividade

Sob condições extremas de estresse, as plantas antecipam seu ciclo, entram em senescência precoce, reduzem o período fotossintético e conseqüentemente impedem o enchimento completo dos grãos, resultando em um efeito negativo na produtividade e no peso dos grãos (Muchero et al., 2013 ; Chen et al. al., 2015 ; Chacon et al., 2017). No presente estudo, observamos que o estresse hídrico reduziu significativamente a produtividade de grãos, com reduções em torno de 90% para todas as espécies sob o menor regime hídrico. Uma redução no RH de 535 mm para 410 mm também reduziu significativamente a produtividade no feijão comum e triticale, mas não nos genótipos de trigo, sugerindo maior tolerância à menor disponibilidade de água para esta cultivar.

O estresse hídrico também afetou significativamente o peso dos grãos no feijão comum, triticale e genótipo de trigo CPAC 0544 (Tabela 1), com o feijão comum tendo a maior redução de 38,2%. Nossos resultados concordam com experimentos semelhantes também realizados em condições de Cerrado, onde quinoa, amaranto e milho tiveram produtividade de grãos e / ou biomassa afetada por diferentes regimes hídricos (Jayme-Oliveira et al., 2017). No entanto, e mais importante, o peso do grão de uma das cultivares de nosso estudo, o genótipo de trigo BRS 404, não foi afetado. Este genótipo foi submetido a um processo de melhoramento genético para o cultivo em condições secas e nossos resultados confirmam que esse genótipo pode ser utilizado para o cultivo em condições de reduzida disponibilidade de água.

2.4.1.2 Cor do grão

Para muitas culturas, a cor dos grãos, boa estabilidade genética, excelente resistência ao estresse e alto rendimento são características importantes e necessárias. Em geral, existem quatro fatores principais que causam diferentes taxas de segregação de cores de grãos: 1- efeito da dose do gene; 2- interação gênica; 3- fundo genético; e 4- desenvolvimento de grãos e condições ambientais (Guo et al., 2012). Atualmente, a consistência da qualidade dos grãos durante os períodos de seca é um grande desafio para o desenvolvimento de cultivares devido às perspectivas das mudanças climáticas e às demandas de crescimento populacional (Ignjatovic-Micic et al., 2015). Até onde sabemos, este é o primeiro trabalho que avalia o efeito do estresse hídrico na mudança de cor de grãos de culturas com importância econômica. É importante notar que nossos resultados não mostraram diferenças na cor dos grãos, redução no (croma) e h^* (ângulo de tonalidade) nos genótipos de trigo estudados e no feijão comum, porém houve uma redução significativa no triticale. Os grãos de triticale eram acinzentados, conforme indicado pelos baixos valores de C^* , e avermelhados, conforme indicado pela redução dos valores de h^* no baixo regime hídrico (Jacomino et al., 2003). Além disso, recomendamos estudos futuros para avaliar se as mudanças na

cor dos grãos devido ao estresse hídrico afetarão a qualidade dos produtos processados.

2.4.2 Qualidade química dos grãos

2.4.2.1. Teor de proteínas e carboidratos

A proteína contida nos grãos é um dos nutrientes mais importantes para a saúde humana, como um componente chave das células, fluidos e tecidos corporais (Leser, 2013). Embora o teor de proteína em leguminosas seja uma característica genética, fatores ambientais como estresse hídrico podem aumentar (Bayat et al., 2010) ou diminuir seus conteúdos (Khamssi, 2011), devido à redução da partição e fixação de N (Singh, 2007). Em condições de estresse hídrico, a fixação de carbono diminui pelo fechamento parcial dos estômatos, enquanto que a remobilização do nitrogênio das folhas para os grãos não diminui, promovendo a diminuição do peso dos grãos, mas aumentando a porcentagem de proteína (Souza et al., 2004). No entanto, este efeito de diluição é dependente da cultivar estudada (Ghanbari et al., 2014).

Nossos resultados mostraram que sob estresse hídrico houve menor produtividade, mas também promoveu um aumento considerável no teor de proteína nos grãos de feijão nos menores RHs (23,51% – 29,60%, Tabela 2), e também no genótipo de trigo CPAC 0544 no RH intermediário (14,04% – 16,23%, Tabela 2), enquanto que os diferentes RHs não resultaram em diferenças significativas no conteúdo de proteína dos grãos para o triticale e genótipo de trigo BRS 404 (Tabela 2). Na literatura, diferenças entre os genótipos são observadas; por exemplo, um estudo de Noorka et al. (2009) ao avaliar dez genótipos de trigo observaram que a redução da disponibilidade de água no trigo aumentou o teor de proteína nos grãos, variando de 12,47 a 13,92%, dependendo do genótipo, embora nenhum dos genótipos de trigo aqui estudados tenha sido analisado. Além disso, o feijão preto apresentou o maior teor de proteína nos grãos (23,21%) em condições de estresse hídrico e o menor teor (21,87%) no tratamento controle (Ardakani et al., 2013).

Os carboidratos são nutrientes importantes para o corpo humano, representando a principal fonte de energia para manutenção, portanto é importante manter o valor nutricional do grão independente do estresse biótico ou abiótico que a planta sofreu durante seu ciclo de vida. Uma das principais causas da redução da produtividade devido à seca é o menor teor de amido nos grãos, que é a principal forma de armazenamento de carboidratos nos cereais (Thitisaksakul et al., 2012). Como a disponibilidade de água é necessária para a fotossíntese, a diminuição de carboidratos é frequentemente encontrada durante o estresse hídrico (Flagella et al., 2010), em parte porque a deficiência de água também estimula a degradação dos pigmentos fotossintéticos nas folhas, que por sua vez reduz a assimilação de carbono (Gao et al., 2016).

O aumento do teor de proteína nos grãos sob condições de estresse hídrico está associado a uma diminuição no teor de amido dos grãos devido à diminuição na síntese de amido (Jalilian et al., 2005 ; Mohammadzadeh et al., 2011). Nosso estudo mostrou que o teor de carboidratos nas culturas avaliadas apresentou resultados diferentes em relação ao regime hídrico e variaram de forma inversa ao teor de proteína. Além disso, as análises de correlação revelaram uma forte relação negativa entre carboidratos e proteínas, em todas as quatro cultivares (Figura 2), semelhante à observada em genótipos de trigo submetidos a estresse térmico onde também foi observada redução de carboidratos e aumento de proteína (Gare et al., 2018).

No feijão, o estresse hídrico causou um aumento no teor de proteína (ver acima) e uma redução no teor de carboidratos, sob o menor RH (Tabela 2). No genótipo de trigo CPAC 0544, tanto o estresse (187 mm) quanto o excesso de água (535 mm) aumentaram a concentração de carboidratos, enquanto que ocorreu uma diminuição significativa no conteúdo de carboidratos no RH intermediário (304 e 410 mm), o oposto ao observado para o conteúdo de proteína (Tabela 2). No triticale e no genótipo BRS 404 de trigo, nem os carboidratos nem a fração protéica variaram com os diferentes RH.

2.4.2.2. Teor de lipídios e cinzas

O déficit hídrico acarreta alterações metabólicas nas plantas, como estimulação das atividades lipolíticas e peroxidativas, além da inibição da biossíntese lipídica, que está associada a um menor teor de lipídeos da membrana (Labusch et al., 2013). Para algumas famílias de plantas, como Brassicaceae, a ocorrência de seca durante o período de maturação afeta o acúmulo de óleo nas sementes (Martínez - Ballesta et al., 2013). A seca também reduz o acúmulo de lipídios em ervilhas (Chaiyadee et al., 2013), girassol (Esmailian et al., 2012), milho (Ali et al., 2013), tremoço (Carvalho et al., 2004) e em trigo (Zhao et al., 2009; Noorka et al., 2012). No entanto, essas mudanças são estritamente dependentes das espécies de plantas e dos genótipos (Wang e Frei, 2011). Nossos resultados não mostraram diferenças significativas para o conteúdo de lipídios no feijão e no genótipo de trigo CPAC 0544, enquanto que diferenças significativas foram observadas para triticale e para o genótipo de trigo BRS 404 sob diferentes RHs. Em contraste com a literatura, nossos resultados indicam um aumento no teor de lipídios na diminuição do regime hídrico de 535 mm para 304 mm.

Dentre os componentes químicos analisados neste estudo, o teor de cinzas foi menos influenciado pelos regimes hídricos, sendo que apenas nos grãos de feijão foram observadas diferenças significativas. De acordo com a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (NEPA / UNICAMP, 2011), o teor médio de cinzas do feijão comum cru é de 3,71 g 100 g⁻¹. Observamos que apenas nos regimes hídricos mais elevados os valores ficaram próximos a esta referência. O aumento do resíduo inorgânico em condições de maior disponibilidade hídrica pode ocorrer devido ao aumento da translocação de nutrientes minerais das raízes para os grãos, ao contrário, quando há baixa disponibilidade hídrica no solo, todos os íons tornam-se menos móveis devido à substituição da água pelo ar nos poros entre as partículas do solo, aumentando a tortuosidade e a retenção de íons pelos colóides do solo e reduzindo a absorção radicular (Ferreira et al., 2008).

2.4.2.3 Macro e microminerais

Os minerais necessários à dieta humana são divididos em macro e microminerais (Gharibzahedi e Jafari, 2017). Macro e microminerais são elementos inorgânicos amplamente distribuídos na natureza e são essenciais para o crescimento e desenvolvimento adequado do organismo (Paiva et al., 2017). Deficiências minerais nas dietas podem prejudicar o desenvolvimento físico e contribuir para o aparecimento de infecções (Hussain et al., 2010). Fontes vegetais, como grãos, podem fornecer quantidades suficientes de minerais em dietas, embora seja importante que os grãos produzidos em condições desfavoráveis, como baixos níveis de nutrientes no solo ou outros estresses ambientais, como baixa disponibilidade de água, possam conter níveis mais baixos destes elementos. Nossos resultados indicam que, em geral, houve uma redução nos macronutrientes e micronutrientes nos grãos sob baixa disponibilidade hídrica, que é provavelmente devido à diminuição da absorção de nutrientes do solo (Bista et al., 2018; Tadayyon et al., 2018; Waraich et al., 2011). A disponibilidade reduzida de água pode diminuir a absorção de nutrientes pelas raízes por meio de vários mecanismos. Em primeiro lugar, o fornecimento do nutriente no solo pode ser reduzido pela sua mineralização (Bista et al., 2018; Sanaullah et al., 2012). Em segundo lugar, o fluxo de massa e a difusão de nutrientes no solo podem ser diminuídos nessas condições (Bista et al., 2018). Finalmente, a cinética de absorção das raízes pode ser diretamente afetada (Bista et al., 2018; Bassirirad, 2000). Embora a remobilização de certos elementos das folhas possa ocorrer durante a deficiência de nutrientes (K, S, P, Mg, Cu, Mo, Fe e Zn), outros elementos não podem ser prontamente remobilizados e transportados para os grãos (Ca, Mn, Ni e B).

Os macrominerais que foram significativamente afetados foram Ca, Mg e P para o triticale; Mg, K, P e S para o genótipo de trigo BRS 404; P e S para o genótipo de trigo CPAC 0544. A seca não afetou o teor dos macrominerais do feijoeiro, sendo que esta cultura apresentou os maiores valores de macrominerais analisados neste estudo (P, Ca, Mg, K e S) em relação às

demais culturas estudadas, indicando uma variedade com maior valor nutricional. Por outro lado, quatro macrominerais, Ca, P, Mg e K, que foram reduzidos pela seca em três das cultivares de estudo são importantes para a função nervosa e muscular (Goff, 2004).

Os microminerais que foram significativamente afetados foram B, Cu, Fe e Zn para o feijão, Mn e Zn para o triticales e Zn para os dois genótipos de trigo estudados (Tabela 4). Zn e Fe são dois minerais fortemente influenciados pelas condições ambientais de cultivo das plantas e são os mais deficientes na dieta humana (Paiva et al., 2017 ; Beleggia et al., 2018). O Fe é um micronutriente necessário ao corpo humano por ser um importante componente da hemoglobina, de muitas enzimas e do sistema imunológico (Tian et al., 2018) e o Zn desempenha um papel importante na estrutura de muitas enzimas (Gharibzahedi e Jafari , 2017). Tanto o Zn quanto o Fe foram afetados pela seca no feijoeiro e o Zn em todas as culturas estudadas. Esses nutrientes são tipicamente os mais ausentes da dieta humana e, portanto, o cultivo dessas culturas em condições de estresse hídrico tenderá a agravar a situação.

Além disso, concentrações aumentadas de Mn no BRS 404, CPAC 0544 e triticales foram associadas a reduções em quase todas as outras variáveis, enquanto que correlações positivas foram observadas no caso do feijão. Embora o Mn seja um micronutriente essencial, altas concentrações podem resultar em toxicidade, e concentrações reduzidas de N, P e K no trigo foram relatadas anteriormente em resposta ao aumento da aplicação de Mn (Rengel, 2015 ; Dinkpa et al., 2018), potencialmente explicando as correlações negativas entre a concentração deste elemento e outras variáveis.

Estudos futuros com o objetivo de avaliar o efeito do estresse hídrico sobre outras variáveis qualitativas dos grãos como dureza e tempo de cocção e, no caso do feijão, uma análise sensorial de produtos processados, são fundamentais para complementar as informações obtidas no presente trabalho.

2.5 CONCLUSÕES

Em geral, as condições de estresse hídrico afetaram negativamente o rendimento, a qualidade física, a composição química e a qualidade nutricional dos grãos, mas em graus diferentes nas espécies e genótipos estudados. No entanto, o genótipo do trigo BRS 404 se destacou, pois as qualidades físicas do grão não foram afetadas pelas condições de estresse hídrico. O feijão também parece ser bem adequado para o plantio em condições de baixa disponibilidade de água, pois, apesar da redução no peso dos grãos, as concentrações macrominerais foram mantidas e a concentração de proteínas aumentada. No geral, o estudo destaca o impacto potencial da disponibilidade reduzida de água em características importantes para produtores e consumidores, mas também indica espécies e genótipos que são minimamente afetados por essas condições.

2.6 REFERÊNCIAS

- ALI, Q; ANWAR, F; ASHRAF, M; SAARI, N; PERVEEN, R. Ameliorating effects of exogenously applied proline on seed composition, seed oil quality and oil antioxidant activity of maize (*Zea mays* L.) under drought stress. **International Journal Molecular Science**. v. 14, p. 818–835, 2013.
- ALVARES, C.A; STAPE, J.L; SENTELHAS, P.C; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 113, p. 407–427, 2013.
- AMEDE, T; KIMANI, P; RONNO, W; LUNZE, L; MB IKAY, N. Coping With Drought: Strategies to Improve Genetic Adaptation of Common Bean to Drought Prone Regions of Africa. CIAT Occasional Publications Series. No 38. 2004.
- AHANGER, M.A; MORAD-TALAB, N; ABD-ALLAH, E.F; AHMAD, P; HAJIBOLAND, R. Plant growth under drouth stress: significance of mineral nutrients. In: Ahmad P (Ed). Water stress and crop plants. **A Sustainable Approach**. p. 649-668. 2016.
- ARDAKANI, G; HOOSHANG, F; ABDOLSAMAD, K. The effect of water stress on grain yield and protein of spotted bean (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Talash. **International Journal of**

Advanced Biological and Biochemical. v.1, p. 940-949. 2013.

ASAE – American Society of Agricultural Engineers. **Moisture measurement – unground grain and seeds.** In: Standards, 2000. St. Joseph: ASAE. 563p. 2000.

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International (18th edition).** AOAC International. 2005.

AOCS. **Approved Procedure Am 5-04 Rapid Determination of Oil/Fat Utilizing High Temperature Solvent Extraction.** Retrieved from <http://www.academia.edu/30938058/AOCS-Approved-Procedure-Am-5-04-Rapid-Determination-of-Oil-Fat-Utilizing-High-Temperature-Solvent-Extraction>. 2005.

BASTOS, E.A., NASCIMENTO, S.P., SILVA, E.M., FREIRE FILHO, F.R., GOMIDE, R.L. Identification of cowpea genotypes for drought tolerance. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 42. 2011.

BELEGGIA, R; FRAGASSO, M; MIGLIETTA, F; CATTIVELLI, L; MENGA, V; NIGRO, F; PECHIONNI, N; FARES, C. Mineral composition of durum wheat grain and pasta under increasing atmospheric CO₂ concentrations. **Food Chemistry**. v. 242. p. 53-61. 2018.

BRASIL., 1992. Ministério da Agricultura. Regras para análise de sementes. Brasília, DF: SNDA/DNDV/CLAV. 365p

CARVALHO, I, S; RICARDO, C.P; CHAVES, M. Quality and distribution of assimilates within the whole plant of lupines (*L-albus* and *L-mutabilis*) influenced by water stress. **Journal Agronomy of Crop Science**. v. 190, p. 205–210. 2004.

CHACON, D.P; BARAJAS, E.M; ESTEVA, A.G; DELGADO, R.L; SHIBATA, J.K; VALDIVIA, C.B.P. Biomassa remobilization in two common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars under water restriction. **South African Journal of Botany**. v. 112, p. 79-88. 2017.

CHAIYADEE, S; JOGLOY, S; SONGSRI, P; SINGKHAN, N; VORASOOT, N; SAWATSITANG, P; HOLBROOK, C.C; PATANOTHAI, A. Soil moisture affects fatty acids and

oil quality parameters in peanut. **International Journal of Plant Production**. v. 7, p. 81–96. 2013.

CHEKANAI, V; CHIKOWO, R; VANLAUWE, B. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 266, p. 167-173. 2018.

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. 2015.

DEL CARMEN MARTÍNEZ-BALLESTA, M., MORENO, D.A., CARVAJAL, M. The physiological importance of glucosinolates on plant response to abiotic stress in Brassica. **International Journal Molecular Science**. v. 14, p. 11607–11625. 2013.

Embrapa., 2011. **Programa de Monitoramento da Irrigação**. Brasília: EMBRAPA.

ESMAEILIAN, Y; SIROUSMEHR, A.R; ASGHRIPOUR, M.R; AMIRI, E. Comparison of sole and combined nutrient application on yield and biochemical composition of sunflower under water stress. **International Journal of Applied Science and Technology**. v. 2, p. 131–137. 2012.

FERREIRA, V.M; MAGALHÃES, P.C; DURAES, F.O.M; VASCONCELOS, C.A; DE ARAÚJO NETO, J.C. Acúmulo e Distribuição de macronutrientes em dois híbridos duplos de milho, em função da disponibilidade de água no solo. **Revista Brasileira de Milho e sorgo**. v. 7, p. 1 – 17. **2008**.

FICCO, D.B.M; RIEFOLO, C; NICASTRO, G.V; SIMONE, A.M; BELEGGIA, R. Phytate and mineral elements concentration in a collection of Italian durum wheat cultivars. **Field Crops Research**. v. 111, p. 235-242. 2009.

FLAGELLA, Z; GIULIANE, M.M; GIUZIO, L; VOLPI, C; MASCI, S. Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. **European Journal of Agronomy**. v. 33, p. 197-207. 2010.

FRANCIS, F.J. The Origin of $\tan^{-1} a/b$. **Journal Food Science**. v.40, p. 412–412, 1975.

GAO, S; GAO, J; ZHUI, X; SONG, Y; LI, Z; REN, G; ZHOU, X; KUAI, B. ABF2, ABF3, and ABF4 promote ABA-mediated chlorophyll degradation and leaf senescence by transcriptional activation of chlorophyll catabolic genes and senescence-associated genes in *Arabidopsis*. **Molecular Plant**. v. 9, p. 1272–1285. 2016.

GHANBARI, A.A; MOUSAVI, S.H; PESSARAKLI, M. Accumulation of Reserve Compounds in Common Bean Seeds under Drought Stress. **Journal of Plant Nutrition**. v.38, p. 609–623. 2014.

GHARIBZAHEDI, S.M.T; JAFARI, S.M. The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. **Trends in Food Science e Technology**. v. 62, p. 119-132. 2017.

HANKS, R.J; KELLER, J; RASMUSSE, V.P; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**. v. 40, p. 426-429. 1976.

HALFORD, N.G; CURTIS, T.Y; CHEN, Z; HUANG, J. Effects of abiotic stress and crop management on cereal grain composition: implications for food quality and safety. **Journal of Experimental Botany**. v. 66, p. 1145-1156. 2014.

HOU, J; HUANG, X; WAN, S; DU, C; WANG, C; XIE, Y; MA, Y; MA, D. Accumulation of water-soluble carbohydrates and gene expression in wheat stems correlates with drought resistance. **Journal of plant Physiology**. v. 231, p. 182-191. 2018.

HUSSAIN, S; MAQSOOD, M.A; RAHMATULLAH. Increasing grain zinc and yield of wheat for the developing world: A review. **Emirates Journal of Food and Agriculture**. v.22, p. 326-339. 2010.

JACOMINO, A. P; MENDONÇA, K; KLUGE, R. A. Armazenamento refrigerado de limões “Siciliano” tratados com etileno. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v. 25, p. 45–48. 2003.

JALILIAN, J; MODARRES, S.A.M; SABAGGPOUR, S.H. Effect of plant density and supplemental irrigation on yield, yield components and protein content of four chickpea (*Cicer arietinum*) cultivars under dry land condition. **Journal of Agricultural Science and Natural**

Resources. v. 12, p. 1-9. 2005.

KHAMSSI, N.N. Grain Yield and Protein of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Cultivars under Gradual Water Deficit Conditions. **Research Journal of Environmental Sciences.** v. 5, p. 611-616. 2011.

LABUSCH, C; SHISHOVA, M; EFFENDI, Y; LI, M; WANG, X; SCHERER, G.F. Patterns and timing in expression of early auxin- induced genes imply involvement of phospholipases A (pPLAs) in the regulation of auxin responses. **Molecular Plant.** v. 6, p. 1473–1486.

LESER, S. The 2013 FAO report on dietary protein quality evaluation in human nutrition: recommendations and implications. **Nutrition Bulletin.** v. 38, p. 421-428. 2013.

LIU, J; FENG, H; HE, J; CHEN, H; DING, D. The effects of nitrogen and water stress on the nitrogen-to-protein conversion factor of winter wheat. **Agricultural Water Management.** v. 210, p. 217-223. 2018.

LOURENÇO, S.O; BARBARINO, E; DE-PAULA, J.C; PEREIRA, L.O.D.S; MARQUEZ, U.M.L. Amino acid composition, protein content and calculation of nitrogen-to-protein conversion factors for 19 tropical seaweeds. **Phycological. Resarch.** v. 50, p. 233-241. 2010.

MCLELLAN, M.R; LIND, L.R; KIME, R.W. Hue angle determinations and statistical analysis for multiquadrant hunter L,a,b data. **Journal of Food Quality.** v. 18, p. 235–240. 1995.

MOHAMMADZADEH, A; MAJNOONHOSEINI, N; MOGHADDAM, H; AKBARI, M. The effect of various water stress and nitrogen levels on the yield and yield components in red beans genotype. **Journal of Agricultural sciences of Iran.** 43, 29-38. 2011.

MUCHERO, W; ROBERTS, P.A; DIOP, N.N; DRABO, I; CISSE, N; CLOSE, T.J. Genetic architecture of delayed senescence, biomass, and grain yield under drought stress in cowpea. **PLoS One.** 8. 2013.

NAKURTE, I; KLAVINS, K; NAMNIECE, J; ADLERE, L; MATVEJEVES, J; KROMBERGA, A; KOKARE, A; STRAZDINA, V; LEGZDINA, L; MUCENIECE, R. Discovery of lunasin

peptide in triticale. **Journal of Cereal Science**. 56, 510-514. 2012.

NOORKA, R.I; REHMAN, S.U; HAIDRY, J.D; KHALIQ, I; TABASSUM, S. Effect of water stress on physico-chemical properties of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Pakistan of Journal Botany**. v. 41, p. 2917-2924. 2009.

PAIVA, C.L; QUEIROZ, V.A.V; SIMEONE, M.L.F; SCHAFFERT, R.E; OLIVEIRA, A.C; SILVA, C.S. Mineral content of sorghum genotypes and the influence of water stress. **Food Chemistry**. v. 214, p. 400-405. 2017.

R Core Team., 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available at . Accessed in 17 September 2018. <https://www.R-project.org/>.

SANTOS, L.L; LACERDA, J.J.J; ZIINN, Y.L. Partição de substâncias húmicas em solos Brasileiros. **Revista Brasileira de ciências do solo**. v. 37, p. 955-968. 2013.

SOUZA, E.J; MARTIN, J.M; GUTTIERI, M.J; O'BRIEN, K.M; HABERNICHT, D.K; LANNING, S.P; MCLEAN, R; CARLSON, G.R; TALBERT, L.E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. **Crop Science**. v. 44, p. 425-432. 2004.

SABAGH, A; BARUTÇULAR, C; SANEOKA, H. Assessment of drought tolerance maize hybrids at grain growth stage in Mediterranean area. **International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering**. v. 9, p. 962-965. 2015.

SAS 'SAS/STAT., 2001. Guide for personal computers, version 8.2.' (SAS Institute: Cary, NC).

SINGH, S.P. Drought Resistance in the Race Durango Dry Bean Landraces and Cultivars. **Agronomy Journal**. v. 99, p. 1219-1225. 2007.

Soil Survey Staff. In: Burt, R., Soil Survey Staff (Eds.), **Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report** No. 51, Version 2.0. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2014.

SOUSA, C.C.M; PEDROSA, E.M.R; ROLIM, M.M; OLIVEIRA FILHO, R.A; SOUZA, M.A.L.M; PEREIRA FILHO, J.V. Crescimento e respostas enzimáticas do feijoeiro caupi sob estresse hídrico e nematoide das galhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 19, p. 113-118. 2015.

Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TBCA-USP. Qualidade em informações sobre alimentos brasileiros. 2008.

TIAN, S; CHEN, Z.C; WEI, Y.C. Measurement of colour-grained wheat nutrient compounds and the application of combination technology in dough. **Journal of Cereal Science**. v. 83, p. 63-67. 2018.

THITISAKSAKUL, M; JIMENEZ, R.C; ARIAS, M.A; BECKLES, D.M. Effects of environmental factors on starch synthesis and composition. **Journal of Cereal Science**. v. 56, p. 67 – 80. 2012.

WANG, M., ZHENG, Q., SHEN, Q., GUO, S. The critical role of Potassium in Plant Stress Response. **International Journal of Molecular Science**. v. 14, p. 7370-7390. 2013.

WANG, Y; FREI, M. Stressed food. The impact of abiotic environmental stresses on crop quality. **Agriculture Ecosystem Environmental**. v.141, p. 271–286. 2011.

XIONG, L; ZHANG, B; NIU, M; ZHAO, S. Protein polymerization and water mobility in whole-wheat dough influenced by bran particle size distribution LWT-Food. **Science and Technology**. v. 82, p. 396-403. 2017.

ZHAO, C.X; HE, M.R; WANG, Z.L; WANG, Y.F; LIN, Q. Effects of different water availability at postanthesis stage on grain nutrition and quality in strong-gluten winter wheat. **Comptes Rendes Biologies**. v. 332, p. 759–764. 2009.

ZORB, C; LUDEWIG, U; HAWKESFORD, M.J. Perspective on wheat yield and Quality with reduced nitrogen supply. **Trends in Plant Science**. v. 23, p. 1029-1037. 2018.

**CAPÍTULO 3 - EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA MORFOLOGIA E
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ESPÉCIES COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM
SAFRINHA NO CERRADO**

EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO NA MORFOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ESPÉCIES COM POTENCIAL PARA CULTIVO EM SAFRINHA NO CERRADO

RESUMO - O trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do estresse hídrico na morfologia e produtividade de grãos de culturas com potencial para cultivo na safrinha. O experimento foi conduzido na estação experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil. Foi utilizado o delineamento de blocos ao acaso em esquema de parcela subdividida. As parcelas foram compostas pelas culturas do feijão (*Phaseolus vulgaris*) – cultivar BRS Realce; amaranto (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa* “Genótipo derivado do BRS Piabiru”), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), dois genótipos de trigo – CPAC 0544 e BRS404 (*Triticum aestivum*); triticale (*Triticosecale wittmack*) e canola (*Brassica napus*) e as subparcelas por quatro regimes hídricos (196 mm; 320 mm; 424 mm; 576 mm). Foram avaliados os seguintes componentes morfológicos: altura de plantas (AP), diâmetro do colmo (DC), comprimento do entre nó (CEN), número de folhas (NF), área foliar (AF) e comprimento (CF) e largura da folha (LF). Também foi avaliada a produtividade de grãos (PG). O estresse hídrico afetou negativamente os atributos morfológicos de todas as culturas estudadas, com destaque para a drástica redução na área foliar nas culturas do feijão, amaranto, canola, trigo sarraceno e Trigo CPAC 0544. Entretanto, apesar da redução nos atributos morfológicos, o amaranto e o feijão apresentaram bons potenciais produtivos, tendo o feijão obtido produtividade acima da média nacional, em condição hídrica semelhante a observada na safrinha.

Palavras chave: déficit hídrico, segunda safra, culturas alternativas, rendimento de grãos, biometria, área foliar.

EFFECT OF WATER STRESS ON THE MORPHOLOGY AND PRODUCTIVITY OF GRAINS OF SPECIES WITH POTENTIAL FOR CULTIVATION IN SAFRINHA IN THE CERRADO

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate the effect of water stress on the morphology and grain production of crops with the potential for growth in the off-season. The experiment was carried out at the Embrapa Cerrados experimental station in Planaltina, DF, Brazil. It was used for randomized block design in a split-plot scheme. The plots were composed of beans (*Phaseolus vulgaris*) - BRS Realce cultivar; amaranth (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa* “Genotype derived from BRS Piabiru”), buckwheat (*Fagopyrum esculentum*), two wheat genotypes - CPAC 0544 and BRS404 (*Triticum aestivum*); triticale (*Triticosecale wittmack*) and canola (*Brassica napus*) and the subplots by four water regimes (196 mm; 320 mm; 424 mm; 576 mm). The following morphological components were evaluated: plant height (AP), stem diameter (DC), node length (CEN), number of leaves (NF), leaf area (AF) and length (CF), and leaf width (LF). Grain productivity (PG) was also evaluated. Water stress negatively impacted the morphological attributes of all the cultures studied, emphasizing the drastic reduction in the leaf area in the cultures of beans, amaranth, canola, buckwheat, and wheat CPAC 0544. However, despite the reduction in morphological attributes, amaranth and common bean yield, producing above the national average, in water condition similar to that observed in the off-season.

Keywords: water deficit, second crop, alternative crops, grain yield, biometry, leaf area.

3.1 INTRODUÇÃO

A segunda safra, também conhecida como safrinha, praticada na região do Cerrado no período compreendido entre fevereiro e maio, ocupa cada vez mais espaço no planejamento dos produtores e cresce a procura por novas tecnologias no campo que tragam eficiência em produtividade e aumento da rentabilidade. Entretanto, é um período caracterizado por baixas e irregulares precipitações pluviométricas, sendo este o principal fator que torna a produção agrícola nessa época uma atividade com grande risco e incertezas. Assim, um grande desafio para a manutenção e sustentabilidade da produção na segunda safra, é a obtenção de espécies com elevado potencial de produção de grãos já que a disponibilidade hídrica para as plantas nessa época é reduzida (Castro et al. 2015).

O feijão é uma espécie amplamente cultivada no período da safrinha, a que apresenta importância significativa tanto em área cultivada quanto em produção. O feijão é uma leguminosa consumida por milhões de pessoas como principal fonte de proteínas, fibras, amido e minerais, como o nitrogênio e o potássio, e apresenta elevado potencial para reduzir a desnutrição em populações pobres (Chekanai et al., 2018). Foi cultivado em uma área de aproximadamente 1,42 milhões de hectares, em segunda safra (safrinha), nos anos 2019/2020, com uma produtividade média de 917 kg ha⁻¹ (Conab, 2020).

Entretanto, o feijão é sensível ao estresse hídrico e, sob condições de precipitação pluviométrica abaixo da média e com distribuição irregular, pode diminuir significativamente sua produtividade. Assim, torna-se necessária a obtenção de espécies que apresentem elevado potencial de produção de grãos, mesmo quando submetidas a condições de estresse hídrico, para que sejam introduzidas e cultivadas em safrinha, poderá contribuir, ainda, para a diversificação e sustentabilidade do sistema de produção.

Algumas espécies têm apresentado crescente interesse econômico nos últimos anos, mas

ainda apresentam poucos estudos que avaliam o seu potencial de produção em condições de baixa disponibilidade hídrica no Cerrado. Entre essas, destacam-se amaranto (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa*), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*); triticale (*Triticosecale wittmack*) e canola (*Brassica napus*) e trigo (*Triticum aestivum*). O amaranto, quinoa e o trigo sarraceno são espécies classificadas como pseudocereais, pois possuem um alto valor nutricional, com teores proteicos superiores aos do milho (*Zea mays*) e do arroz (*Oryza sativa*). O valor nutricional dessas espécies é semelhante ao do trigo (*Triticum spp.*), além de serem recomendados para dietas de doentes celíacos pela World Gastroenterology Organization, por serem isentos de glúten (Alvarez et al. 2010; Wgo, 2012; Nascimento et al. 2014). Devido aos seus atributos, apresentam uma demanda crescente, com aumento de áreas cultivadas (Ferreira, 2014).

Para a avaliação do potencial dessas espécies para cultivo na safrinha, o estudo das respostas morfológicas das plantas ao estresse hídrico é fundamental para explicar a atuação do déficit hídrico no crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, a fim de compreender os mecanismos utilizados pelas espécies que apresentam maior tolerância à seca, o que contribui para a busca de soluções para reduzir e neutralizar os efeitos prejudiciais da seca na produção agrícola.

O estresse hídrico exerce efeito negativo sobre as plantas e, na maioria dos casos, seus danos são mensurados mediante o acompanhamento dos processos que, em geral, estão relacionados ao crescimento, como as alterações que ocorrem a nível morfológico. As respostas morfológicas mais proeminentes das plantas ao estresse hídrico consistem no decréscimo da produção da área foliar, pois a expansão depende da pressão de turgescência que por sua vez é dependente do potencial hídrico, do fechamento dos estômatos, da aceleração da senescência e da abscisão das folhas (Anjum et al. 2011). Consequentemente, se há menor área foliar, há menor produção de fotoassimilados e consequentemente há redução no crescimento e desenvolvimento das plantas.

Entretanto, algumas espécies apresentam maior tolerância ao estresse hídrico. A tolerância à seca implica na capacidade da planta de suportar a restrição hídrica sem danos ou com o menor

dano possível; assim uma cultura tolerante à seca teria a capacidade de resistir ao déficit hídrico sem decréscimo da produtividade (Lower, 2012). Algumas plantas podem suportar a falta de água através de diferentes mecanismos, envolvendo adaptações morfológicas que permitem a sua sobrevivência e uma produtividade satisfatória (Xoconostle-Cazares et al., 2010). Assim, a partir dos dados morfológicos, pode-se deduzir, ainda, inferências, acerca de eventuais causas de alterações nos padrões morfológicos entre as plantas cultivadas sob diferentes condições de manejo.

Diante deste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do estresse hídrico na morfologia e produtividade de grãos do feijão, amaranto, trigo, canola, triticale e trigo sarraceno, com a finalidade de determinação do seu potencial para o cultivo na safrinha.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, Brasil (latitude 15° 35 '30 "S, longitude 47° 42' 30" W), no período de maio a outubro de 2018. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (Alvares et al., 2013), com invernos secos e verões chuvosos. A média anual de precipitação é de 1400 mm, e a temperatura média anual de 21,3 °C. Os dados de precipitação e temperatura durante a condução do experimento são apresentados na Figura 1.

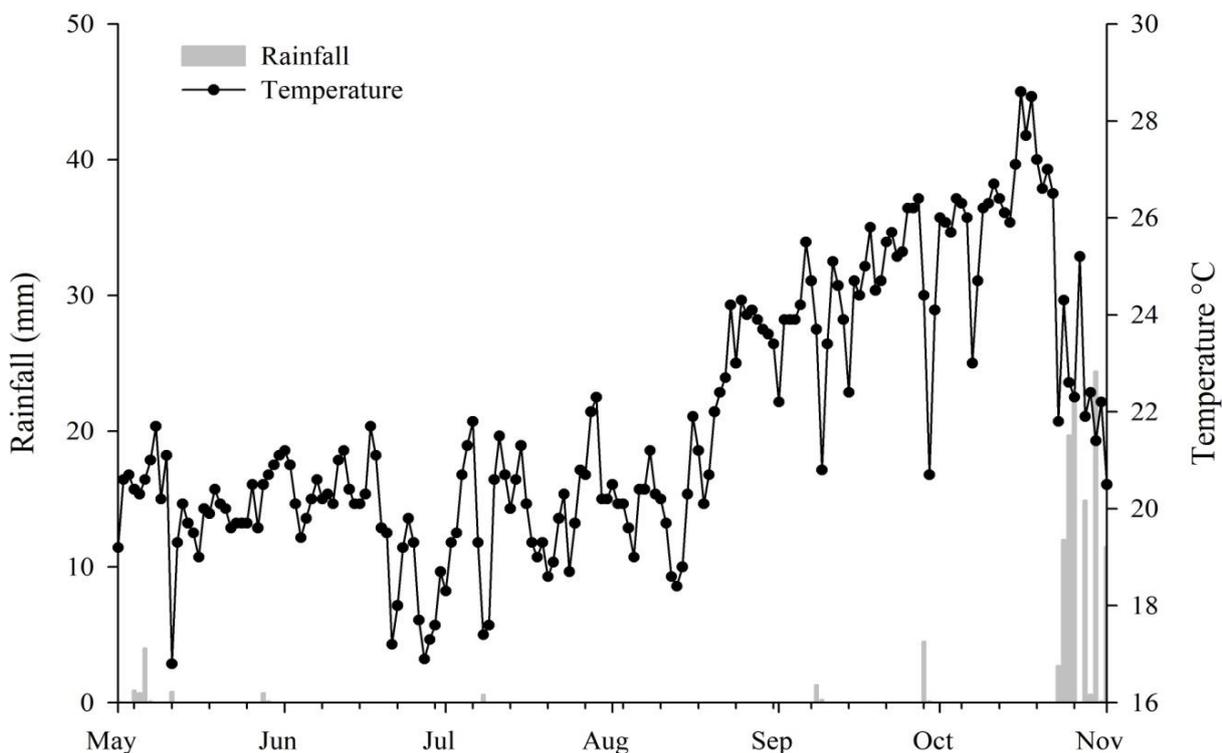


Figura 1. Precipitação pluviométrica e temperatura média da área experimental nos meses de maio a novembro de 2018. Dados obtidos de estação automática localizada ao lado do experimento.

O solo é classificado como Latossolo vermelho de acordo com o sistema brasileiro de classificação do solo (Santos et al., 2013) e apresenta as seguintes características na camada de 0-20 cm: pH (em água)= 5,77; Ca ($\text{cmo}_c \text{ dm}^{-3}$)= 3,34; Mg ($\text{cmo}_c \text{ dm}^{-3}$)=1,41; K (mg dm^{-3})= 207,55; H + Al ($\text{cmo}_c \text{ dm}^{-3}$)= 4,52; P (mg dm^{-3})= 48,56; S (mg kg^{-1})= 19,71; matéria orgânica (%)= 2,60.

O histórico dos últimos dez anos de cultivo da área experimental está apresentado na Tabela 1. Antes do cultivo da soja, na safra 2005/2006, a área estava sob vegetação nativa.

Tabela 1 - Descrição do histórico de cultivo da área de estudo no período compreendido entre 2005 - 2017.

Safr	Período	
	Inverno	Verão
2005/2006	Pousio	Soja
2006/2007	Pousio	Soja
2007/2008	Pousio	Soja
2008/2009	Pousio	Soja
2009/2010	Pousio	Soja
2010/2011	Pousio	Soja
2011/2012	Soja sob diferentes regimes hídricos	Pousio
2012/2013	Trigo sob diferentes regimes hídricos	Soja
2013/2014	Amaranto, milho e quinoa sob diferentes regimes hídricos	<i>Crotalaria juncea</i>
2014/2015	Amaranto, milho e quinoa sob diferentes regimes hídricos	Milho
2015/2016	Amaranto, milho e quinoa sob diferentes regimes hídricos	<i>Crotalaria juncea</i>
2016/2017	Feijão, milho, quinoa, amaranto, canola, trigo, trigo sarraceno e triticale sob diferentes regimes hídricos	Milho

3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Foi utilizado o delineamento de blocos ao acaso em esquema de parcela subdividida. As parcelas foram compostas pelas culturas do feijão (*Phaseolus vulgaris*) – cultivar BRS Realce; amaranto (*Amaranthus cruentus*); quinoa (*Chenopodium quinoa* “Genótipo derivado do BRS Piabiru”), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), canola (*Brassica napus*) e dois genótipos de trigo – CPAC 0544 e BRS 404 (*Triticum aestivum*); triticale - BRS Ulisses (*Triticosecale wittmack*) e as subparcelas por quatro regimes hídricos (196 mm; 320 mm; 424 mm; 576 mm). O genótipo CPAC 0544 é recomendado para cultivo em condições irrigadas e a cultivar BRS 404 para condições de cultivo em sequeiro.

3.2.3 Implantação e condução do experimento

As culturas foram semeadas manualmente em maio de 2018. Foi utilizado o espaçamento

entre linhas de 0,5 m e densidade de semeadura de 14 plantas m^{-1} para o feijão, 10 plantas m^{-1} para o amaranto, 15 plantas m^{-1} para canola e 70 plantas m^{-1} para o trigo sarraceno; 0,20 m entre linhas e densidade de 90 plantas m^{-1} para os dois genótipos de trigo e o triticale. A adubação no plantio foi feita nos sulcos, na dose de 400 kg ha^{-1} da fórmula 04-30-16, totalizando 16 kg ha^{-1} de N; 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , e 64 kg ha^{-1} de K_2O . A adubação nitrogenada em cobertura foi feita a lanço, aos 30 dias após o plantio, na dose de 100 kg ha^{-1} N, na forma de ureia. Para evitar a competição das plantas invasoras foram realizadas capinas manuais, em virtude da dificuldade de se fazer controle químico com espécies diferentes em um mesmo experimento, onde pode ocorrer fitotoxidez.

Os diferentes regimes hídricos foram obtidos utilizando-se uma barra irrigadora de aspersão, com duas laterais, sendo 20 m de comprimento em cada lateral, ligada a um carretel autopropelido com velocidade regulável, na qual foram instalados dez aspersores. Nesse experimento, foi utilizada apenas uma das laterais da barra. Durante os primeiros 33 dias após a emergência (DAE), a irrigação foi uniforme, a fim de estabelecer o crescimento de todas as plantas. Nessa etapa, o acumulado das irrigações proporcionou uma lâmina uniforme de 144 mm. Após este período, foi adaptada a metodologia do line source (Hanks et al., 1976), utilizando-se aspersores com vazões decrescentes do início até a extremidade da lateral da barra irrigadora (Jayme-Oliveira et al 2017).

Durante essa fase de estresse foram realizadas onze irrigações. Ao longo da barra irrigadora foram delimitadas quatro subparcelas, com quatro metros de comprimento e oito linhas de cultivo, representando quatro regimes hídricos (576 mm, 424 mm, 320 mm, 196 mm). Os regimes hídricos estavam distanciados a 4, 8, 12 e 16 m do início da barra irrigadora, respectivamente (Figura 3).

Destaca-se, que, apesar de as avaliações terem sido feitas até o regime hídrico de 196 mm, é rara a ocorrência de precipitação com esse valor baixo durante todo o período da safreinha. Geralmente observam-se valores iguais ou superiores a 300 mm nas mais diversas regiões produtivas no bioma Cerrado, o que se aproxima do segundo regime hídrico aplicado neste trabalho (320 mm). Entretanto, foram feitas avaliações até o regime de 196 mm para verificar o

comportamento das espécies em condições extremas de estresse hídrico. Embora esse experimento seja composto por espécies diferentes, cada uma com diferentes exigências hídricas, pela praticidade, usamos o trigo como referência, entendendo que as demais culturas todas anuais e com ciclo semelhante têm um consumo hídrico não muito diferente ao do trigo. As irrigações foram realizadas com um turno de rega de aproximadamente cinco dias, de acordo com as condições climáticas e a fase fenológica da cultura. Para mensurar a quantidade de água aplicada em cada irrigação, foram instaladas duas fileiras de coletores paralelas à lateral da barra para medição do volume de água aplicado.

3.2.4 Variáveis analisadas

3.2.4.1 Morfologia

Para a avaliação do efeito do estresse hídrico na morfologia das culturas foram avaliadas: altura de plantas (AP), diâmetro do colmo (DC), comprimento do entre nó (CEN), número de folhas (NF), comprimento da folha (CF) e largura da folha (LF) e área foliar (AF). As avaliações foram realizadas aos trinta dias após o início da imposição do estresse, utilizando-se três plantas por parcela.

A altura da planta foi medida do solo até o ápice da planta com o uso de uma trena. O diâmetro do caule foi determinado com o uso de paquímetro digital, à altura de 10 cm do solo. O número de folhas foi determinado pela contagem do total de folhas por planta. As medidas de comprimento e largura foliar foram determinadas utilizando-se uma régua. O comprimento foi definido como a distância entre o ponto de inserção do pecíolo no limbo foliar e o ápice da folha e a largura como a maior dimensão perpendicular ao eixo do comprimento. Foram coletadas três plantas ao acaso, em cada subparcela, para determinação da área foliar específica, por meio de um medidor de área foliar modelo CI-202 (CID, Inc, EUA).

3.2.4.2 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos foi mensurada por meio da colheita mecânica de todas as plantas de

uma área de 3 m²/parcela. Após a colheita, a massa total de grãos foi pesada. Uma subamostra foi levada para estufa de circulação forçada a 65° C, até peso constante, para determinação do teor de umidade dos grãos. Posteriormente, corrigiu-se a produtividade para umidade padrão de 13% e os resultados foram expressos em kg ha⁻¹.

3.2.5 Análise estatística

Os dados foram inicialmente analisados quanto à distribuição normal com o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando-se o software estatístico SAS, versão 9 (SAS, 2001). O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o Proc Mixed do SAS por meio do método de máximaverossimilhança restrita (reml).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Morfologia

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de altura de plantas (AP), diâmetro de colmo (DC), comprimento do entre nó (CEN), número de folhas (NF), comprimento da folha (CF), largura da folha (LF) e área foliar (AF) das culturas estudadas.

Ao analisar os resultados na cultura do feijão, observou-se que o estresse hídrico influenciou significativamente ($p < 0,05$) a altura de plantas (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), comprimento da folha (CF), largura da folha (LF) e a área foliar (AF) (Tabela 2). Apenas o comprimento do entre nó (CEN), não foi influenciado significativamente. Sob condições de estresse hídrico severo, observou-se reduções de 39,05%, 34,78%, 56,10%, 39,26%, 40,12% e 64,91% na AP, DC, NF, CF, LF e AF, respectivamente. Quando cultivado no regime de 320 mm, que é o regime hídrico que ocorre normalmente na safrinha, as reduções foram iguais a 22,60; 20,54; 16,57; 15,65 e 41,36% para AP, DC, CF, LF e AF respectivamente.

Melo et al. (2018), ao avaliarem o efeito do estresse hídrico em genótipos de feijão,

observaram drásticas reduções no porte e área foliar das plantas. A diminuição da área foliar ocorre devido à redução do tamanho das células do parênquima paliçádico. Esse fenômeno é explicado pela inibição da expansão celular em condições de estresse hídrico, tendo em vista que à medida que o conteúdo de água na célula diminui, esta se contrai e as paredes se tornam flácidas, assim como os solutos ficam cada vez mais concentrados e a membrana plasmática torna-se mais espessa (Melo et al. 2018). Segundo Ferraz et al (2011) e Souza et al (2016) a redução da área foliar também ocorre devido à redução da fotossíntese em função do fechamento estomático, ocasionado pela redução do potencial hídrico do solo, pois o suprimento de carboidratos das plantas é reduzido, muitas vezes sendo suficiente apenas para manter suas atividades vitais.

Nas culturas do amaranto e canola o estresse hídrico afetou negativamente todas as variáveis (Tabela 2). No amaranto foram observadas reduções equivalentes a 68,17; 64,63; 57,45; 45,22; 38,85; 39,13 e 78,62% para AP, DC, CEN, NF, LF e AF, respectivamente, sob condições de estresse hídrico severo (196 mm). Quando cultivado no regime hídrico de 320 mm, as reduções foram equivalentes a 32,93; 37,47; 17,79; 16,44; 16,57; 15,65 e 41,36% para AP, DC, CEN, NF, LF e AF, respectivamente. Na cultura da canola sob condições de estresse hídrico severo, foram observadas reduções de 61,67; 78,35; 48,02; 58,94 e 91,25% para AP, NF, CF, LF e AF. Quando cultivada no regime hídrico de 320 mm, as reduções foram de 22,73; 52,5; 28,84; 40,82 e 82,39% na AP, NF, CF, LF e AF, respectivamente.

Silva (2015) observou acentuada redução no diâmetro do caule, altura e área foliar de plantas de amaranto cultivadas em condições de estresse hídrico. Domingos et al (2005) observaram, na variedade BRS Alegria, alturas de plantas entre 100 e 103 cm, dependendo da quantidade de nutrientes aplicada. Neste trabalho, foram observadas alturas de até 204,77 cm e 213,89, nos RHs de 576 e 213,89 mm. Tal fato pode ser justificado, possivelmente, pelo elevado volume de água aplicado nestes regimes hídricos. Os autores ainda destacam que, a altura de plantas e diâmetro de caule são características importantes a serem observadas nessa cultura, pois estão

diretamente relacionadas ao tombamento de plantas no campo, pois a panícula é dominante no seu ápice. Essa panícula é relativamente grande para o tamanho da planta tornando-a susceptível ao tombamento. Ferreira et al. (2014) encontraram peso de panícula de até 4297 kg ha⁻¹ para o amaranto cultivado sob diferentes doses de N.

Tabela 2: Valores médios dos atributos morfológicos das culturas do feijão, amaranto, trigo sarraceno, trigo BRS 404, trigo CPAC 0544, triticale e canola cultivados sob diferentes regimes hídricos (RH).

RH (mm)	AP (cm)	DC (mm)	CEN (cm)	NF	CF (cm)	LF (cm)	AF (cm ²)
Feijão							
576	69,06 a	7,35 a	2,79 a	42,66 a	14,23 a	9,20 ab	1692,98 ab
424	64,80 ab	6,76 a	2,44 a	38,00 ab	13,83 a	9,50 a	1910,20 a
320	53,45 bc	5,84 ab	2,47 a	41,00 ab	11,90 ab	8,50 ab	1169,59 ab
196	42,04 c	4,84 b	2,07 a	18,66 b	8,63 b	5,50 b	617,11 b
CV (%)	8,14	9,56	13,41	23,92	11,39	16,44	34,41
Amaranto							
576	204,77 a	23,02 a	9,05 a	24,33 ab	20,33 ab	11,50 a	1871,64 a
424	213,89 a	21,45 ab	10,41 a	28,33 a	21,13 a	11,66 a	2222,53 a
320	137,33 b	14,40 bc	7,44 ab	20,33 ab	16,96 b	9,70 b	1097,99 ab
196	65,16 c	8,14 c	3,85 b	13,33 b	12,43 c	7,00 c	400,31 b
CV (%)	11,65	15,42	21,28	18,58	8,29	4,33	29,98
Trigo Sarraceno							
576	157,22 a	9,79 a	12,26 a	80,00 a	11,63 a	10,50 a	1199,44 a
424	147,22 a	8,95 a	12,02 a	77,66 a	10,26 a	10,46 a	1107,28 ab
320	126,66 ab	7,98 ab	10,64 a	44,33 b	9,43 a	9,16 a	577,74 b
196	96,61 b	6,00 b	9,44 a	35,55 b	7,50 a	7,03 a	562,57 b
CV (%)	10,94	10,27	11,09	36,4	15,14	15,58	25,33
Trigo CPAC 0544							
576	92,83 a	2,64 a	15,90 a	33,16 a	28,60 a	1,73 a	559,30 a
424	85,06 a	2,73 a	11,53 a	19,66 b	27,43 a	1,50 a	293,62 b
320	63,80 ab	2,66 a	9,86 a	14,33 b	24,76 a	1,43 a	197,47 b
196	48,63 b	2,54 a	9,03 a	9,66 b	20,01 a	1,13 a	62,48 b
CV (%)	7,03	8,28	26,02	22,3	17,33	18,57	35,9
Trigo BRS 404							
576	99,50 a	2,78 a	22,00 a	22,66 a	27,03 a	1,63 a	359,56 a
424	111,66 a	2,60 a	18,56 ab	23,33 a	23,43 a	1,46 ab	260,59 ab
320	73,96 ab	2,55 a	14,43 ab	22,00 a	22,70 a	1,26 ab	238,58 ab
196	53,66 b	2,23 b	10,30 b	9,33 b	15,00 b	1,03 b	48,91 b
CV (%)	18,3	10,12	20,72	27,73	11,56	13,09	37,65
Triticale							
535	86,16 a	3,01 a	16,46 a	33,00 a	30,10 a	1,26 a	496,23 a
410	86,33 a	2,97 a	15,66 a	29,66 a	26,86 a	1,23 a	486,65 a
304	76,36 ab	2,89 a	12,96 a	28,45 a	26,00 a	1,16 a	324,59 a
187	58,06 b	2,92 a	12,53 a	15,00 b	20,81 b	1,00 a	90,55 b
CV (%)	10,8	7,56	23,3	37,51	13,91	10,5	32,43
Canola							

535	139,33 a	-	-	40,00 a	23,33 a	18,83 a	2187,49 a
410	131,66 a	-	-	34,00 a	23,23 a	18,76 a	2117,14 a
304	107,66 a	-	-	19,00 ab	16,60 ab	11,13 ab	385,53 b
187	53,40 b	-	-	8,66 b	12,13 b	7,73 b	197,80 b
CV (%)	12,67	-	-	19,76	22,35	21,24	36,14

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Altura de plantas (AP); diâmetro de colmo (DC); comprimento do entre nó (CEN); número de folhas (NF); comprimento da folha (CF); largura da folha (LF); e área foliar (AF).

Quanto aos genótipos de trigo (CPAC 0544 e BRS 404), sob condições de estresse hídrico severo (196 mm), o genótipo BRS 404 sofreu redução na AP (46,07%), DC (19,78%), CEN (53,18%), NF (58,82%), CF (44,50%) LF (36,80%) AF (86,39%). No genótipo CPAC 0544, apenas a AP (47,61%), DC (NF (70,86%) e AF (88,82%) foram reduzidos pelo estresse hídrico. Quando cultivados no regime de 320 mm, nenhum dos atributos morfológicas do BRS 404 foram afetados. No genótipo CPAC 0544 houve reduções no NF (56,78) e na AF (64,75). Assim, ao comparar os percentuais nos dois genótipos, percebe-se que, no regime hídrico de 320 mm, situação hídrica comum na região do Cerrado, o genótipo BRS 404 foi superior ao genótipo CPAC 0544, (como era de se esperar de um material indicado para cultivo em sequeiro em relação a outro material indicado para cultivo irrigado) pois nenhum dos seus parâmetros morfológicos foi afetado pelo estresse hídrico (320 mm). Entretanto, em condições de estresse hídrico severo (196 mm), o genótipo CPAC 0544 foi menos afetado que o genótipo BRS 404. Santos et al. (2012), ao avaliarem o efeito do estresse hídrico em três genótipos de trigo, observaram reduções na altura de plantas e área foliar dos três genótipos. Segundo os autores, tal fato se deve devido à redução da turgescência das células e de outros fatores envolvidos nos processos fisiológicos, uma vez que para haver alongamento celular são necessários níveis mínimos de turgescência. Soares et al. (2021), ao comparar os dois genótipos (CPAC 0544 e BRS 404) no bioma Cerrado, observaram maior índice de resistência à seca no genótipo BRS 404, corroborando com dos dados obtidos no presente trabalho no nível de água semelhante à safrinha.

No triticale, o estresse hídrico severo (196 mm) reduziu a AP (32,61%), NF (54,55%), CF

(30,86%) e AF (81,25%). No regime hídrico de 320 mm, nenhuma das variáveis foi afetada. Assim, sugere-se que essa espécie é tolerante aos estresse hídrico. No trigo sarraceno, o estresse hídrico severo provocou reduções iguais a 38,70; 38,30; 55,08; e 53,25 na AP, DC, NF e AF, respectivamente (Tabela 2). Quando cultivado no regime de 320 mm, foram observadas reduções apenas no número de folhas (45,02) e área foliar (53,12).

Assim, observa-se que, em geral, quando cultivadas com regimes hídricos semelhantes aos de ocorrência no período de safrinha (≥ 320 mm), as espécies apresentam comportamentos diferentes para os atributos morfológicos, algumas mais tolerantes (BRS 404, CPAC 0544, triticales e trigo sarraceno), sofrendo reduções menos expressivas no porte e estrutura enquanto que outras são mais susceptíveis (canola, feijão e amaranto) pois sofreram alterações mais acentuadas. Sabe-se que uma das principais causas de perda de produtividade sob estresse hídrico é a redução da área foliar, consequência da redução do número e tamanho das folhas, produzindo menores taxas fotossintéticas por unidade de área (Lawlor e Uprety, 1993; Santos et al. 2012). Ao comparar os percentuais de redução desta variável (AF) nas espécies estudadas, observa-se que apenas o BRS 404 e o triticales não sofreram redução. As demais espécies perderam quantidade significativa de área foliar (feijão - 41,36%; amaranto - 41,40%; canola - 82,39%; trigo sarraceno - 53,12% e o trigo CPAC 0544 - 64,75%).

Tais resultados podem ser indicativos de maior tolerância ao estresse hídrico do BRS 404 e triticales para cultivo em condições de safrinha. Destaca-se também a alta susceptibilidade da canola, a qual perdeu aproximadamente 82,30% da sua área foliar. Diversos estudos, em várias regiões do mundo, foram feitos para avaliar o efeito do estresse hídrico na cultura da canola (Gu et al. 2017; George et al. 2019; Mohtashami et al. 2020). De modo geral, os autores verificaram que a canola apresenta elevado potencial produtivo em condições de disponibilidade hídrica adequada. Entretanto, sob condições de estresse, pode ter perdas significativas de produtividade, que pode estar associada à drástica diminuição da área foliar.

3.3.2 Produtividade de grãos

Em geral, tanto o estresse hídrico severo (196 mm), quanto o regime hídrico de 320 mm, reduziram significativamente ($p < 0,05$) a produtividade de grãos das culturas estudadas, exceto para o amaranto e trigo sarraceno, que tiveram perdas apenas quando cultivados sob estresse hídrico severo (Tabela 3).

Na cultura do feijão, foi observada produtividade de grãos de até 5126,63 kg ha⁻¹. Entretanto, sob condições de estresse hídrico severo (196 mm), houve redução de 83,15%, com produção de 863,93 kg ha⁻¹ e, quando cultivado no regime hídrico de 320 mm, a redução foi de 59,88%, produzindo 2.057,15 kg ha⁻¹ nesse regime hídrico (Tabela 3). Resultados semelhantes foram obtidos para essa mesma cultivar de feijão por Silva et al. (2020), com produtividade de até 5.295 kg ha⁻¹ sob irrigação (535mm). A produtividade média do feijão de segunda safra no Brasil é de aproximadamente 917 kg ha⁻¹ (Conab, 2020). Em todos os regimes hídricos estudados nesse trabalho, exceto no regime de estresse hídrico severo (196 mm), a produtividade foi superior à produtividade média nacional. Mesmo produzindo acima da média nacional, o feijão foi uma das culturas mais sensíveis, perdendo quase 60% de produtividade no regime hídrico de ocorrência comum no período de safrinha (320 mm). Silva et al. (2020) observaram reduções de aproximadamente 70% para essa mesma cultivar, cultivada com 304 mm de disponibilidade hídrica, semelhante ao regime hídrico de 320 mm desse estudo.

Para o amaranto, foram observadas produtividades de até 3.784,70 kg ha⁻¹. O regime hídrico de estresse hídrico severo (196 mm), reduziu a produtividade de grãos em 75,73% (876,93 kg ha⁻¹). Quando cultivado no regime hídrico de 320 mm, produziu a mesma quantidade de quando cultivado no regime hídrico de 576 mm. Na literatura são relatadas produtividades que variam de 990 a 3.866,89 kg ha⁻¹ (Erasmus et al., 2004; Ferreira et al., 2014; Silva, 2017). Nesse trabalho, o amaranto foi uma das espécies mais tolerantes ao estresse hídrico, pois não houve redução na sua produtividade quando cultivado no regime de 320 mm, condição hídrica muito comum no período

de safrinha, tornando-o uma cultura interessante para cultivo nessa época. Apesar de ter diminuído a sua área foliar (41,40%), similar ao feijão (41,36%), apresentou maior tolerância à seca. Tal fato indica o amaranto adota outras estratégias para compensar a redução da área foliar e manutenção da produtividade. A maior tolerância no amaranto geralmente é atribuída a uma maior capacidade de ajuste osmótico e um sistema radicular mais vigoroso e eficiente (Rodriguez et al. 2019).

Tabela 3 – Valores médios de produtividade de grãos das sete espécies estudadas, em função dos regimes hídricos.

Cultura	Regime hídrico (mm)			
	576	424	320	196
	kg ha ⁻¹			
Feijão	5126,63 a	4839,25 a	2057,15 b	863,93 c
Amaranto	3610,45 a	3784,70 a	2948,32 a	876,15 b
Trigo sarraceno	2523,89 a	2176,04 a	1810,51 a	915,9 b
CPAC 0544	4221,91 a	4456,34 a	1976,04 b	517,12 c
BRS 404	3546,87 a	3908,87 a	1408,43 b	474,97 c
Canola	2909,65 a	2587,42 a	930,17 b	201,75 c
Triticale	5649,6 a	4920,52 a	1696,13 b	408,71 c

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Quanto aos genótipos de trigo, para o CPAC 0544 foram observadas produtividades de até 4.456 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Quando cultivado nos regimes de 196 e 320 mm foram observadas reduções de 87,75 e 53,18%, com produtividades de 517,12 e 1.976,04 kg ha⁻¹ para os dois regimes hídricos, respectivamente. No BRS 404, houve redução de 86,63 e 60,29% quando cultivado em estresse hídrico severo (196 mm) e no regime hídrico de 320 mm, com produtividades de 1.408,43 kg ha⁻¹ e 474,97 kg ha⁻¹ nesses dois regimes, respectivamente. No Brasil, a produtividade média da cultura do trigo é de aproximadamente 2.757 kg ha⁻¹ (Conab, 2020). Nesse trabalho, os dois genótipos (CPAC 0544 e BRS 404) tiveram produtividades superiores à média nacional, quando cultivados em disponibilidade hídrica adequada (576 e 424 mm). Entretanto, sob condições de estresse (320 e 196 mm), produziram abaixo da média nacional.

Na cultura da canola foram observadas produtividades de até 2.909,65 kg ha⁻¹ (Tabela 3).

Entretanto, sob condições de estresse hídrico severo, sofreu redução de 93,06%, produzindo apenas 201,75 kg ha⁻¹. No regime de 320 mm, houve redução de 68,03%, com produtividade de 930,17 kg ha⁻¹. A canola possui uma produtividade média de 2.194 kg ha⁻¹ no mundo (FAO, 2017) e 1.416 kg ha⁻¹ no Brasil (CONAB, 2020). Contudo, em algumas áreas experimentais, dependendo das condições ambientais e da disponibilidade hídrica, foram observadas produtividades de até 4.000 kg ha⁻¹ (George et al. 2019; Mohtashami et al. 2020). Nesse trabalho, a canola teve um desempenho superior às médias mundiais e nacionais, quando cultivada em condições de boa disponibilidade hídrica (576 e 424 mm). Entretanto, sob condições de estresse (320 e 196 mm) a produtividade ficou bem abaixo dessas médias, demonstrando uma alta sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. Diversos estudos, em várias regiões do mundo, foram feitos para avaliar o efeito do estresse hídrico na cultura da canola (George et al. 2019; Mohtashami et al. 2020). De modo geral verificou-se que a canola apresenta elevado potencial produtivo em condições de disponibilidade hídrica adequada, entretanto, sob condições de estresse, houve perdas significativas de produtividade, corroborando com os resultados desse trabalho.

Na cultura do triticale, foram observadas produtividades de até 5.659 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Entretanto, foram observadas reduções de 92,70 e 69,90% quando cultivadas nos RHs de 196 e 320 mm respectivamente. No Brasil, a produtividade média de grãos da cultura do triticale é de aproximadamente de 2.904 kg ha⁻¹ (CONAB, 2020). Assim, semelhante ao trigo, teve produtividade superior à média nacional, quando cultivados em disponibilidade hídrica adequada (576 e 424 mm). Entretanto, sob condições de estresse, produziu abaixo da média nacional. Produtividades de até 6.300 kg ha⁻¹ foram observadas para o triticale no Cerrado (Silva et al. 2020).

Na cultura do trigo sarraceno foram observadas produtividades de até 2.523 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Sob condições de estresse hídrico severo, houve reduções de 64,71%, com uma produção de 915,90 kg ha⁻¹. Quando cultivado no regime hídrico de 320 mm, teve produtividade de grão semelhante ao regime hídrico de 576 mm.

Um fato que merece destaque é que, apesar de o trigo BRS 404 e o triticale não terem sofrido redução na sua área foliar, diferente das demais espécies estudadas nesse trabalho, a produtividade de grãos dessas duas espécies foi significativamente reduzida, tendo desempenho inferior ao amaranto e ao feijão, por exemplo, que perderam quase a metade da área foliar. Assim, fica evidenciado que a perda de área foliar, nem sempre é uma desvantagem, podendo ser um mecanismo de tolerância ao estresse. Para reduzir a perda de água (menor transpiração), as plantas podem adotar a estratégia de redução da superfície evaporativa (área foliar, estômatos) (Nemeskeri et al. 2019; Peixoto, 2020).

3.4 CONCLUSÃO

O estresse hídrico afetou negativamente os atributos morfológicos de todas as culturas estudadas, com destaque para a drástica redução na área foliar nas culturas do feijão, amaranto, canola, trigo sarraceno e trigo CPAC 0544. Entretanto, apesar da redução nos atributos morfológicos, o amaranto e o feijão apresentaram bons potenciais produtivos, produzindo acima da média nacional, em condição hídrica semelhante à observada na safrinha.

3.5 REFERÊNCIAS

ALVAREZ, J. L.; ARENDT, E. K.; GALLAGHER, E. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. **Trends in Food, Science & Technology**, 21(2), 106–113, 2010.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. 113, 407–427, 2013.

ANJUM, S.A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M.F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 373-399, 2004

BONFIM, F. P. G.; CASALI, V. W. D.; MENDONÇA, E. G.; MARTINS, E. R. Estresse hídrico em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tratado com preparados homeopáticos de *Arnica montana*. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.8, n.14; p. 530-539, 2012.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, A.C.; CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. *Vadose Zone Journal*. v. 14, p. 1-8. 2015.

CHEKANAI, V., CHIKOWO, R., VANLAUWE, B. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. 266, 167-173, 2018.

CHRISTA, K.; SORAL, M. Buckwheat grains and buckwheat products—nutritional and prophylactic value of their components—a review. **Czech Journal of Food Sciences**, 26 (3), 153–162, 2008.

CONAB. Acompanhamento safra brasileira de grãos, v. 6 Safra 2019/20 - Sétimo levantamento, Brasília, p. 1-69 fevereiro 2020.

DOMINGOS, V.D.; ERASMO, E.A.L.; SILVA, J.I.C.; CAVALCANTE, G.D.; SPEHAR, C.R. Crescimento, produção de grãos e biomassa de variedades de amaranto (*Amaranthus cruentus*) em função de adubação com NPK. **Bioscience Journal**, v.21, p.29-39, 2005

EMBRAPA. Programa de Monitoramento da Irrigação. Brasília: EMBRAPA, 2012.

ERASMO EAL; DOMINGOS VD; SPEHAR CR; DIDONET J; SARMENTO RA; CUNHA AM. Avaliação de cultivares de *A. cruentus* em sistema plantio direto no sul do Tocantins. *Bioscience Journal*, v. 20, p.171-176, 2004.

FAO. The future of food and agriculture trends and challenges: food and agriculture. 2017. Disponível em:<<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

FAROOQ, M. et al. Plant drought Stress: Effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable and Development**, v. 29, n. 01, p. 185-212, 2009

FERRAZ, R. L. de S; MELO, A.S; FERREIRA, R.S; DUTRA, A.F; FIGUEREDO, L. F. Aspectos morfofisiológicos, rendimento e eficiência no uso da água do meloeiro 'Gália' em ambiente protegido. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 4, p. 957-964, 2011.

FERREIRA CC; RIBEIRO JUNIOR WQ; RAMOS MLG; SPEHAR CR; FARIAS TRR. Efeito da densidade de sementeira e doses de nitrogênio sobre a produtividade e biometria de *A. cruentus*, no Cerrado do planalto central. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 534-546. 2014

HANKS, R.J., KELLER, J., RASMUSSE, V.P., WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**. 40, 426-429, 1976.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatística da Produção Agrícola Setembro de 2017**. 2017.

JALEEL, C.A.; MANIVANNAN, P.; SANKAR, B.; KISHOREKUMAR, A.; GOPI, R.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. *Pseudomonas fluorescens* enhances biomass yield and ajmalicine production in *Catharanthus roseus* under water deficit stress. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 60, p. 7-11, 2007.

JAYME-OLIVEIRA A, RIBEIRO JUNIOR WQ, RAMOS MLG, ZIVIANI AC, JAKELAITIS A. Amaranth, C. quinoa and Millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 52, p. 561-571. 2017.

LAWLOR, D.W; UPRETY, D.C. Effects of water stress on photosynthesis of crops and the biochemical mechanism. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 275– 294. 1993.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531p.

MELO, A.S; SILVA, A.R.F; DUTRA, A.F; DUTRA, W.F; SA, S.V.F; ROCHA, M.R. Crescimento e pigmentos cloroplásticos de genótipos e de feijão *vigna* sob déficit hídrico. **Revista Brasileira**

de Agricultura Irrigada. v. 12, p. 2579 – 2591, 2018.

MOHTASHAMI, R; DEHNAVI, M.M; BALOUCHI, H; FARAJI, H. Improving Yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. **Agricultural Water Management**, v. 232, 2020.

MØLLER, I. M.; JENSEN, P. E.; HANSSON, A. Oxidative modifications to cellular components in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 58, p. 459-481, 2007.

NASCIMENTO, A. C.; MOTA, C.; COELHO, I.; GUEFÃO, S.; SANTOS, M.; MATOS, A. S. Characterisation of nutrient profile of quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*), and purple corn (*Zea mays* L.) consumed in the North of Argentina: Proximates, minerals and trace elements. **Food Chemistry**, 148, 420–426, 2014.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available at . Accessed in 17 September 2018. <https://www.R-project.org/>. 2018.

RODRIGUEZ, T.G; HERNANDEZ, I.C; BAYONA, J.A; CHAVEZ, E.R; GALLARDO, N.M; MOJICA, E.M; PEREZ, M.G.L; TORRES, J.M; FRIER, J.D. Identification of Factors Linked to Higher Water-Deficit Stress Tolerance in *Amaranthus hypochondriacus* Compared to Other Grain Amaranths and *A. hybridus*, Their Shared Ancestor. **Plants**, v.8, 2019.

SANTOS, L.L., LACERDA, J.J.J., ZIINN, Y.L. Partição de substâncias húmicas em solos Brasileiros. **Revista Brasileira de ciências do solo**. 37, 955-968, 2013.

SAS 'SAS/STAT Guide for personal computers, version 8.2.' (SAS Institute: Cary, NC). (2001)

SANTOS, D; GUIMARAES, V.F; KLEIN, J; FIOREZE, S.L; MACEDO JUNIOR, E.K. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 836 – 842, 2012.

SILVA, J. G. **Aspectos fisiológicos e produtivos do amaranto submetido a diferentes períodos de estresse hídrico**. Dissertação (Mestrado em agricultura tropical). Faculdade de Agronomia,

Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal do Mato Grosso. p. 72, 2015.

SILVA, A.N; RAMOS, L.M.G; RIBEIRO JUNIOR, W.Q; ALENCAR, E.R; SILVA, P.C; LIMA, C.A; VINSON, C.C; SILVA, M.A.V. Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. **Agricultural Water Management**, v.231, 2020.

SHAO, H.B.; CHEN, X.Y.; CHU, L.Y.; ZHAO, X.N.; WU, G.; YUAN, Y.B.; ZHAO, C.X.; HU, Z.M. Investigation on the relationship of Proline with wheat anti-drought under soil water deficits, Colloids and Surfaces. **Biointerfaces**, v. 53, p. 113- 119, 2006.

SOARES, G.F; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q; PEREIRA, L. F; LIMA, C. A; SOARES, D. S; MULLER, O; RASCHER, U; RAMOS, M. L. G. Characterization of wheat genotypes for drought tolerance and water use efficiency. **Scientia Agrícola**, v. 78, p. 1-11, 2021.

SOUZA, T.M.A; SOUZA, T.A; SOUTO, L.A; AS, F.V.S; PAIVA, E.P; BRITO, M.E.B; MESQUITA, E.F. Crescimento e trocas gasosas do feijão caupi cv. BRS pujante sob níveis de água disponíveis no solo e cobertura morta. **Irriga**, v. 21, p. 796 – 805, 2016.

SOUSA, C.C.M., PEDROSA, E.M.R., ROLIM, M.M., OLIVEIRA FILHO, R.A., SOUZA, M.A.L.M., PEREIRA FILHO, J.V. Crescimento e respostas enzimáticas do feijoeiro caupi sob estresse hídrico e nematoide das galhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 19 (2), 113-118. 2015.

WGO. **Celiac disease. World gastroenterology organisation global guidelines** (pp. 1–25). 2012.

XOCONOSTLE-CÁZARES, B; RAMIREZ-ORTEGA, F.A; FLORES-ELENES, L. RUIZ-MEDRANO R. Drought tolerance in crop plants. **American Journal of Plant Physiology**. v. 5, p. 1–16. 2010.