



UNIVERSIDADE FEDERAL DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**FENOTIPAGEM PARA TOLERÂNCIA À SECA E VALIDAÇÃO DE
SENSORES HIPERESPECTRAIS E DE FLUORESCÊNCIA EM
GENÓTIPOS DE TRIGO**

GUILHERME FILGUEIRAS SOARES

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

Brasília - DF
Junho 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**FENOTIPAGEM PARA TOLERÂNCIA À SECA E VALIDAÇÃO DE
SENSORES HIPERESPECTRAIS E DE FLUORESCÊNCIA EM
GENÓTIPOS DE TRIGO**

GUILHERME FILGUEIRAS SOARES

ORIENTADORA: MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS
CO-ORIENTADOR: WALTER QUADROS RIBEIRO JÚNIOR

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

Brasília - DF
Junho 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**FENOTIPAGEM PARA TOLERÂNCIA À SECA E
VALIDAÇÃO DE SENSORES HIPERESPECTRAIS E DE
FLUORESCÊNCIA EM GENÓTIPOS DE TRIGO**

GUILHERME FILGUEIRAS SOARES

**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 LUCRÉCIA GEROSA RAMOS, Dra. - UnB/FAV

MARCELO FAGIOLI, Dr. – UnB/FAV

CHRISTINA CLEO VINSON WILLIAMS, Dra. – Pós Doc PNP/UnB

EDUARDO ALANO VIEIRA, Dr. – Embrapa Cerrados

BRASÍLIA/DF, 15 de JUNHO de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Soares, Guilherme Filgueiras

Fenotipagem para tolerância à seca e validação de sensores hiperespectrais e de fluorescência em genótipos de trigo. / Guilherme Filgueiras Soares; orientação de Maria Lucrecia Gerosa Ramos. – Brasília, 2020.

137 p. : il.

Tese de doutorado – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2020.

1. *Triticum aestivum* L. 2. Sensoriamento remoto. 3. Seleção de plantas.
 - I. Ramos, M. L. G. II. Título.

CDD ou CDU

RESUMO

Métodos práticos e eficientes que fornecem identificação e seleção de indivíduos tolerantes à seca são ferramentas importantes para o melhoramento de plantas. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi realizar a fenotipagem de genótipos de trigo para tolerância à seca e validar sensores espectrais e de fluorescência. Esta pesquisa foi realizada na Embrapa Cerrados, onde foi desenvolvido um protocolo de fenotipagem de campo, utilizado na estação seca, quando é utilizada uma barra de irrigação linear utilizando uma bobina autopropulsada, que permite um gradiente de irrigação. Foram estudados dez genótipos de trigo em quatro regimes hídricos. Avaliou-se parâmetros biométricos, fisiológicos, componentes da produção e produtividade. Foram avaliados sensores de fluorescência e hiperespectral para validar seu uso para avaliação do desempenho fisiológico das plantas de trigo. Os resultados obtidos nessa pesquisa validam o uso dos sensores como ferramenta na seleção de genótipos de trigo tolerantes à seca. Os regimes com maior restrição hídrica reduziram consideravelmente a produtividade de todas os genótipos de trigo. Em cultivos irrigados a lâmina de água aplicada pode ser reduzida em 20% em relação a ideal, que a produtividade de trigo não é afetada. Para a condição de moderada disponibilidade hídrica, o BRS404 mostrou-se o mais interessante entre os demais. Na condição de severa restrição hídrica o Aliança foi o mais produtivo. A caracterização dos genótipos de trigo desempenha uma estratégia importante para o processo de seleção de genótipos mais produtivos.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L., sensoriamento remoto, seleção de plantas.

ABSTRACT

Practical and efficient methods that provide identification and selection of drought-tolerant individuals are important tools for plant breeding. Thus, the objective of this work was to perform the phenotyping of wheat genotypes for drought tolerance and to validate spectral and fluorescence sensors. This research was carried out at Embrapa Cerrados, where a field phenotyping protocol was developed, used in the dry season, when a linear irrigation bar is used using a self-propelled coil, which allows an irrigation gradient. Ten wheat genotypes were studied in four water regimes. Biometric, physiological parameters, components of production and productivity were evaluated. Fluorescence and hyperspectral sensors were evaluated to validate their use for assessing the physiological performance of wheat plants. The results obtained in this research validate the use of sensors as a tool in the selection of drought-tolerant wheat genotypes. The regimes with greater water restriction significantly reduced the yield of wheat grains. In irrigated crops the applied water depth can be reduced by 20% in relation to the ideal, that wheat productivity is not affected. For the condition of moderate water availability, BRS404 proved to be the most interesting among the others. In the condition of severe water restriction, Aliança was the most productive. The characterization of wheat genotypes plays an important strategy for the selection process of more productive genotypes.

Keywords: *Triticum aestivum* L., remote sensing, plant selection.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	08
1.1. JUSTIFICATIVA.....	10
1.2. OBJETIVO GERAL.....	12
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.4. HIPÓTESES.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Cultura do Trigo.....	13
2.2. Estresse hídrico.....	15
2.3. Mecanismos das Plantas para Tolerância à Seca.....	17
2.4. Uso de sensores remotos como uma nova ferramenta na fenotipagem de plantas.....	20
2.4.1. Sensores de reflectância.....	22
2.4.1.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	24
2.4.1.2. Índice de Reflectância Fotoquímico (PRI).....	26
2.4.2. Sensores de fluorescência da clorofila.....	28
2.4.2.1. Fluorescência da clorofila <i>a</i>	29
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
3. CAPÍTULO 1. Fenotipagem para tolerância à seca em diferentes genótipos trigo, na região do distrito federal, utilizando sensores espectrais e fluorescência.....	51
3.1. RESUMO.....	52
3.2. INTRODUÇÃO.....	54
3.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	57
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
3.5. CONCLUSÕES.....	79
3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
3.7. APÊNDICE.....	93
4. CAPÍTULO 2. Validação de sensores espectrais e de fluorescência na fenotipagem de trigo para tolerância à seca, na região do Distrito Federal.....	96
4.1. RESUMO.....	97
4.2. INTRODUÇÃO.....	99
4.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	101
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	105
4.5. CONCLUSÕES.....	119
4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
4.7. APÊNDICE.....	126
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134

1. INTRODUÇÃO GERAL

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos três cereais mais cultivados no mundo, juntamente com o milho e o arroz (TAKEITI, 2015), sendo o segundo maior cultivo responsável pela alimentação humana (FAO, 2019). É uma cultura que possui ampla adaptação edafoclimática, sendo cultivado desde regiões de clima desértico, em alguns países do Oriente Médio, até regiões com alto índice de precipitação, como na China e Índia (CONAB, 2017).

No Brasil, o trigo é cultivado desde a Região Sul até a região do Cerrado, no Brasil Central. Os principais estados brasileiros produtores de trigo são o Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Bahia, destacando-se a região Sul com 90% da produção do país (DE MORI; IGNACSAK, 2011). Segundo o 10º levantamento da safra 2019/2020 pela Conab, a área cultivada de trigo no Brasil em 2019 foi de 2.040.500 hectares, com produtividade de grãos de 2.526 kg ha⁻¹, totalizando uma produção total de grãos de 5.154.700 toneladas.

A região do Cerrado do Brasil Central apresenta-se como promissora para a expansão desta cultura, por apresentar condições de clima e solo favoráveis. O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, com uma área aproximada de 2.036.448 km², ocupando 23,9% do território nacional. Este bioma situa-se em sua maioria na região central do Brasil, ocupando grande parte dos estados de Minas Gerais, Tocantins, Goiás, Distrito Federal, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Bahia. Além disso, abrange áreas disjuntas no extremo norte do Pará, uma pequena porção do Amapá, Roraima e Rondônia, uma faixa central do estado de São Paulo e uma porção do Paraná (IBGE, 2017; MMA, 2017).

Nessa região do Cerrado o trigo pode ser cultivado em duas épocas, no inverno e no verão. O trigo semeado no inverno tem apresentado altas produtividades, porém requer maior amparo tecnológico para seu cultivo, pois necessita de sistemas de irrigação. Como consequência, o melhoramento do trigo irrigado fundamenta-se na constante busca de maior eficiência no uso de água (EUA) ao levar em consideração a limitação do recurso água. Diferentemente, no cultivo de verão, o trigo é semeado no final da estação chuvosa “safrinha”, período esse, que tem como principal limitação os períodos de chuva intermitente, conhecidos como veranicos, o que contribui para a redução do rendimento de grãos. Portanto, os programas de melhoramento para o trigo em sequeiro devem selecionar materiais tolerantes à seca, uma vez que pode ocorrer limitação hídrica neste período.

A seleção de genótipos de trigo tolerantes à seca para cultivo na safrinha e mais eficientes no uso da água no cultivo em inverno deve ser conduzida preferencialmente em condições de campo de uma maneira eficiente e não somente na fase de plântulas, como descrito por Avramova et al. (2016), podendo então identificar indivíduos superiores ou linhagens elites para este fim. Para que isto ocorra, protocolos de fenotipagem para tolerância à seca em condições de campo devem ser aperfeiçoados para uma seleção eficiente. Essa fenotipagem confiável, além do melhoramento convencional poderia tornar mais eficiente os processos de genotipagem para estudos de prospecção de genes e de mecanismos morfofisiológicos ligados a este caráter. Desta forma, a seleção para o aumento do potencial produtivo deve ser feita no ambiente representativo, como em condições de campo, considerando-se as principais características fisiológicas que influenciam o potencial produtivo destas espécies.

1.1.JUSTIFICATIVA

Os fortes impactos na restrição do desenvolvimento e produção das culturas, causados pela seca fazem com que, esse tema apareça como um dos estresses abióticos mais estudados atualmente (ZHANG et al., 2014). No entanto, em plantas, a tolerância ao déficit hídrico é uma característica complexa, pois a mesma é controlada por muitos genes com diferentes efeitos (BERNIER et al., 2008), sendo assim há certa dificuldade de avanços nos programas de melhoramento que buscam materiais tolerantes à seca.

A restrição hídrica é responsável por sérias disfunções morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nos vegetais causando diversas mudanças no seu metabolismo celular (MUNNS, 2011; FILIPPOU et al., 2014). Essas alterações morfológicas podem ser desde a redução da altura de plantas e área foliar, até ao momento em que há redução da produtividade. No entanto, essas alterações ocorrem, indiretamente, decorrentes de uma série de mudanças fisiológicas, como o ajustamento osmótico que consiste no aumento eficaz e rápido da concentração de solutos (MARIJUAN e BOSCH, 2013), fechamento estomático (PIRASTEH-ANOSHEH et al. 2016) e redução da fotossíntese (LIU e LI, 2005).

Diversos mecanismos específicos em resposta a ambientes desfavoráveis foram desenvolvidos pelas espécies vegetais ao longo do seu processo evolutivo, tais como a inibição do crescimento, a regulação osmótica e a desintoxicação (HARB et al., 2010; ZHU, 2002). Assim, métodos práticos e eficientes que proporcionem a identificação de indivíduos resistentes através da análise de sua atividade fisiológica em meio ao déficit hídrico tornam-se ferramentas de grande valia para o melhoramento de plantas (MIRANSARI et al., 2013).

Acevedo (1991) relata que a eficiência de seleção pode ser melhorada, se determinados atributos fisiológicos e/ou morfológicos que se relacionam ao rendimento da cultura em questão, por efeito da condição de estresse, podem ser identificados e empregados como critérios de seleção para complementar o melhoramento genético tradicional, uma vez que, na

seleção de materiais tolerantes à seca, há grandes desafios em consequência da natureza multigênica envolvida nos mecanismos de resposta ao estresse, à baixa herdabilidade e a elevada interação genótipo x ambiente (FLEURY et al., 2010).

Com base nisso, nota-se que o desenvolvimento e aperfeiçoamento de protocolos para avaliação de tolerância à seca e sua utilização na fenotipagem de plantas, poderá proporcionar um maior conhecimento sobre os caracteres relacionados com este fator. De posse desses conhecimentos, poder-se-á estabelecer critérios de seleção, bem como criar estratégias de utilização dessas fontes de resistência nos programas de melhoramento de plantas. Adicionalmente, uma seleção efetiva para tolerância à seca poderia viabilizar o entendimento das complexas relações genótipo/ambiente/fenótipo, auxiliando os programas de melhoramento.

Em adição, a utilização de sensores pode tornar a seleção de genótipos tolerantes à seca mais eficiente e precisa. Além do mais, pode ser uma opção para recuperar preciosos indivíduos em gerações segregantes, o que não acontece em uma fenotipagem destrutiva. Ainda, nos permite fenotipar um grande número de indivíduos através de análises rápidas e automatizadas com altíssimo rendimento, o que viabiliza a expansão da escala e o alcance de avaliação de uma nova ferramenta fisiológica para o melhoramento de plantas a qual, ainda pode utilizada no sensoriamento remoto (KOLBER et al., 2005).

1.2. OBJETIVO GERAL

Realizar a fenotipagem de genótipos de trigo para tolerância à seca e validar sensores espectrais e de fluorescência.

1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar e classificar genótipos de trigo quanto à tolerância à seca;
- ✓ Avaliar o efeito do déficit hídrico nas características morfológicas, fisiológicas e produtividade em quatro genótipos de trigo;
- ✓ Validar sensores espectrais e de fluorescência para fenotipagem avançada, como potencial ferramenta de apoio ao programa de melhoramento vegetal;
- ✓ Identificar mecanismos ligados à tolerância à seca;

1.4.HIPÓTESES

- ✓ Hp1: os genótipos de trigo respondem diferentemente na condição de estresse hídrico em termos fisiológicos, que por consequência apresentam produtividades distintas.
- ✓ Hp2: os sensores espectrais e de fluorescência contribuem e podem ser utilizados com eficiência no processo de fenotipagem de trigo para tolerância à seca e eficiência no uso da água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cultura do Trigo

O trigo é um cereal amplamente cultivado no mundo, juntamente com o milho e o arroz. Segundo o USDA, o trigo ocupava uma área de 220,8 milhões de hectares em 2016/17, com produção de 743,4 milhões de toneladas, estabelecendo recorde histórico. É o cereal mais importante para a alimentação humana (WORLD WHEAT PRODUCTION, 2016), além de ser importante na economia agrícola global. Com o crescimento populacional mundial, o trigo é uma das culturas potenciais a fim de atender a essa elevada demanda alimentar (WILCOX; MAKOWSKI, 2014).

É um produto agrícola com diversas formas de utilização, tanto para a alimentação humana como animal. Entretanto, durante o último século, apesar do trigo ter apresentado um aumento espetacular de produção, o aumento do rendimento anual começou a desacelerar em 1995 e, atualmente, está estagnando em quase todos os países (REYNOLDS et al. 2009), devido principalmente à crescente frequência de fatores climáticos interferentes (BRISSON et al., 2010; LOBELL et al., 2011).

O melhoramento de plantas tem alcançado notáveis resultados no aumento do potencial produtivo das culturas e deve se preparar para enfrentar os novos desafios decorrentes das alterações climáticas globais previstas para as próximas décadas (BORLAUG; DOSWELL, 2005). Deve-se destacar nesse cenário que a cultura do trigo ocupa mais de 17% da área cultivada no mundo (DE MORI, 2015). Segundo Dixon et al. (2009), para atender a demanda de trigo frente ao crescimento populacional previsto, estima-se que será necessário um aumento de 60% até 2050, enquanto as mudanças climáticas deverão afetar negativamente em 29% das áreas sob cultivo de trigo.

Sabe-se que o agronegócio brasileiro é considerado referência mundial em muitos segmentos, no entanto a produção de trigo está abaixo da demanda nacional, o que torna necessária a importação deste cereal. Uma das principais matérias-primas da indústria alimentícia brasileira, o trigo é o segundo item de maior participação na pauta de importações, atrás apenas da cadeia de petróleo, o que conduz o país ao topo da escala dos maiores importadores mundiais de trigo (JESUS JUNIOR et al., 2011).

Um dos motivos que fazem com que o Brasil não seja autossuficiente em trigo são as condições de cultivo para esta cultura, uma vez que, mesmo não apresentando condições supraótimas, tem-se obtido avanços importantes, resultados de pesquisas. Apesar de ainda não registrar produtividade média por hectare no mesmo nível internacional, o Brasil demonstra que tem tecnologia para lidar com suas limitações, visto que tem alcançado ganhos de produtividade superiores aos principais produtores (JESUS JUNIOR et al., 2011).

A produção de trigo no Brasil, com base nos dados da Conab (2017) concentra-se na região sul do país, equivalendo a 90,6% da produção nacional. Esse cenário traz consequências acentuadas na estabilização da produção nacional, uma vez que a instabilidade climática, sobretudo a ocorrência de geadas no Paraná, tem proporcionado grande vulnerabilidade no abastecimento de trigo para o consumo brasileiro. Logo, para se aumentar a produção brasileira e garantir a autossuficiência de trigo é imprescindível, a busca de potenciais regiões agrícolas (RIBEIRO et al., 2012).

A região do Cerrado do Brasil Central apresenta-se como promissora para a expansão desta cultura, por apresentar condições de clima e solo favoráveis. Nessa região, o trigo pode ser cultivado em duas épocas, no inverno com auxílio de sistemas de irrigação e no verão em sistema de sequeiro. No cultivo de verão, o trigo é semeado na estação chuvosa, logo após a colheita da cultura principal, na safrinha, sendo que a principal limitação para essa época de cultivo são os períodos de chuva intermitente, conhecidos como veranicos. O trigo irrigado,

nessa região tem alcançado altas produtividades, acima de 7.000 kg ha^{-1} , no entanto em condições de sequeiro, em que há restrição hídrica, tem apresentado rendimentos superiores a 2.400 kg ha^{-1} (CONAB, 2017). Ainda, segundo a Conab (2017), por se tratar de cultivo de verão, promove as primeiras colheitas no Brasil, garantindo assim liquidez com melhores preços, além de apresentar grãos de qualidade, das classes trigo pão e trigo melhorador.

Neste cenário, fica evidente a necessidade de trabalhos de melhoramento que visam, sobretudo, a identificação de genótipos adaptados a diferentes condições edafoclimáticas, para que se obtenham bons resultados no cultivo do trigo no Brasil Central. Por essa razão há a necessidade de desenvolvimento de pesquisa em programas de melhoramento genético visando o desenvolvimento de genótipos que possuam mecanismos de tolerância à seca aliados a outras características de importância agrônômica (NOURI-GANBALANI et al., 2009). Além disso, há a necessidade de incorporar nesse processo, ferramentas confiáveis com técnicas não-destrutivas e de fácil e rápida aplicação, tais como parâmetros fisiológicos obtidos de equipamentos específicos (SILVA et al., 2007).

2.2. Estresse hídrico

A seca é um período em que a precipitação é pouco expressiva, durante o qual o conteúdo de água no solo é reduzido, de forma que as plantas sofrem com a disponibilidade insuficiente de água. Essa condição é o principal estresse ambiental, afetando diretamente a produtividade das culturas em todo o mundo (COELHO et al., 2010). O estresse equivale a qualquer fator externo que exerce influência desvantajosa sobre a planta, visto que o déficit hídrico representa todo conteúdo de água de um tecido (ou célula) situado abaixo do maior conteúdo de água exibido no estado de maior hidratação (TAIZ et al., 2017).

Quando a planta possui aptidão para enfrentar condições desfavoráveis do ambiente, esta é considerada como tolerante (TAIZ et al., 2017), sendo assim, em situações de baixa

umidade do solo, uma planta ou um grupo de plantas que apresentarem melhor crescimento e produtividade em relação a outras plantas, localizadas em ambientes similares, entende-se que são tolerantes à seca (KUMAR, 2005).

A tolerância à seca segundo Razmjoo et al. (2008) é uma característica muito complicada, pois envolve interações que ocorrem entre o fator de estresse e os vários fatores moleculares e mecanismos fisiobioquímicos que afetam o desenvolvimento das plantas. Ribeiro Júnior et al. (2006) também enfatizam que a resistência à seca é uma característica complexa para a qual o melhoramento sistemático é muito difícil, uma vez que naturalmente a cultura desenvolve sua plasticidade como resposta ao estresse.

Entretanto, a identificação de características importantes que frequentemente limitam a produtividade através de avaliações de parâmetros fisiológicos pode favorecer a seleção de materiais mais produtivos e com maior estabilidade produtiva, quando combinados com os métodos de melhoramento genético.

A intensidade dos danos causados pela deficiência hídrica é, geralmente, imprevisível e impulsionada por vários fatores, incluindo os padrões de precipitação, a capacidade de retenção de umidade do solo e perdas de água por evapotranspiração (FAHAD et al., 2017). Os impactos negativos do estresse hídrico são verificados desde a germinação e crescimento das plântulas (FAROOQ et al., 2009), promovendo efeitos prejudiciais no crescimento vegetativo (TAIZ et al., 2017), os quais afetam significativamente o potencial produtivo da planta. Esses efeitos causam alterações no crescimento, nutrição, relações hídricas e fotossíntese, que culminarão na redução significativa na produtividade das culturas (PRABA et al., 2009).

Fahad et al. (2017) descreveram que a produtividade de uma cultura é basicamente a integração complexa dos diferentes processos fisiológicos, sendo que a maioria desses são afetados negativamente pelo estresse hídrico. Qing et al. (2001) também relataram que o

estresse por déficit hídrico altera uma variedade de processos fisiológicos, tais como captura de radiação solar, temperatura, condutância estomática, transpiração, transporte de elétrons, fotossíntese e respiração, que em última análise, determinam o rendimento da cultura.

A resposta da planta a condição de seca varia de espécie para espécie, depende da fase de crescimento das plantas e de outros fatores ambientais (DEMIREVSKA et al., 2009), principalmente a temperatura (FAHAD et al., 2017). Para o trigo, considerável variação para a tolerância ao estresse hídrico, tem sido identificada entre cultivares, acessos e espécies relacionadas de trigo, bem como há variação sobre o efeito do estresse hídrico nos atributos fisiológicos e em diferentes ambientes (RIBEIRO JÚNIOR et al., 2006).

Estudos realizados por Durães et al. (2005) verificaram os efeitos do estresse hídrico nas diferentes fases fenológicas do trigo e indicaram que o estágio de pré-florescimento, florescimento e enchimento de grãos são os mais sensíveis e que, reduções na produção de grãos e no número de grãos por planta podem ser superiores a 50% quando a seca coincide com estes períodos. Em estudos recentes, Daryanto et al. (2016) analisaram os dados de trabalhos publicados entre 1980 e 2015, e encontraram reduções de 21% no rendimento médio de trigo em escala global, devido ao estresse hídrico.

2.3. Mecanismos das plantas para tolerância à seca

De acordo com Floss (2004), cerca de 90% da produção biológica das plantas ocorre em resposta à atividade fotossintética. Logo, a redução no crescimento e na produtividade das plantas, normalmente está relacionada à redução na atividade fotossintética, limitada por fatores abióticos intrínsecos ao local de cultivo (PEIXOTO et al. 2002, PAIVA et al. 2005).

A expressiva redução da eficiência fotossintética das plantas, causada por déficit hídrico, desencadeia uma sequência de efeitos fisiológicos e morfológicos. As alterações nos processos fisiológicos da planta ocorrem no início da restrição hídrica, provocando respostas

através dos mecanismos de adaptação para tolerar a condição de estresse, o que assegura maior eficiência no uso da água (PUGNAYRE et al., 1993). A eficiência de extração de água do solo e eficiência de uso de água pelas plantas são alguns dos vários mecanismos fisiológicos das plantas para tolerância à seca (DaMATTA e RAMALHO, 2006).

Segundo Taiz et al. (2017) a eficiência no uso da água é a habilidade das plantas em moderar a perda de água ao mesmo tempo em que permitem a absorção suficiente de CO₂ para realizar a fotossíntese. Sendo assim, em condições de estresse hídrico, a transpiração é drasticamente reduzida, enquanto que a fotossíntese declina progressivamente, ambos em decorrência da diminuição da condutância estomática (CHAVES et al., 2009).

Desta forma, a primeira defesa das plantas para manter a adequada condição hídrica foliar é melhorar a eficiência do uso da água através do fechamento estomático antecipado em plantas submetidas ao déficit hídrico (YORDANOV et al., 2000). O fechamento estomático das folhas geralmente resulta em menor perda de água por unidade de carbono assimilado, aumentando a eficiência do uso de água pelas plantas (KRAMER; BOYER, 1995).

O fechamento estomático pode ser considerado um mecanismo de tolerância à seca, por reduzir a transpiração das plantas, o que conseqüentemente garante maior eficiência no uso da água. No entanto este mecanismo promove o aquecimento das folhas, pois ao fechar os estômatos, há redução no processo de resfriamento evaporativo. Esse mecanismo também afeta a difusão do dióxido de carbono atmosférico, o que provoca redução na fotossíntese (TAIZ et al., 2017).

Segundo Brunini e Cardoso (1998), apesar do fechamento estomático representar uma vantagem imediata em resposta ao estresse hídrico, através da redução de perda de água para prevenir a desidratação do tecido, pode restringir a difusão de CO₂ para dentro das folhas, levando a uma redução no metabolismo do carbono. Isso promove um impacto direto na eficiência fotossintética e conseqüentemente reduz o crescimento e a produtividade.

Desta forma, o monitoramento das trocas gasosas constitui-se em importante ferramenta na determinação de adaptação e estabilidade de plantas a determinados ecossistemas (PEIXOTO et al., 2002; PAIVA et al., 2005), pois auxiliam na compreensão dos mecanismos que regulam o processo do fechamento estomático e dos fenômenos fisiológicos que ocorrem na planta. As avaliações de trocas gasosas e de fluorescência da clorofila a podem ser utilizadas como ferramentas para diagnosticar a integridade do aparato fotossintético frente às adversidades ambientais, tendo em vista que são técnicas rápidas, precisas e não destrutivas (TORRES-NETTO et al., 2005).

O déficit hídrico caracteriza-se também como um dos estresses ambientais responsáveis pelas alterações dos pigmentos nas folhas, modificando a relação clorofila a e b, a qual pode ser usada em plantas terrestres como indicativo de respostas para diagnosticar plantas sob condições de estresse hídrico (HENDRY; GRIME, 1993). O aumento da razão clorofila a/b ocorre porque durante estresses há intensa degradação da clorofila b, que passa por um processo de conversão de clorofila b em a, sendo um mecanismo de defesa da planta para consumir espécies reativas de oxigênio. Neste contexto, plantas com relação clorofila a/b mais elevada tendem a ser mais tolerantes à seca (HÖRTENSTEINER; KRÄUTLER 2011). Assim, métodos de quantificação e de estimativa de tais pigmentos, também podem ser utilizados como ferramentas para a seleção de genótipos tolerantes à seca (SILVA et al., 2007; CARLIN; SANTOS, 2009).

As inúmeras mudanças ocorridas no metabolismo celular das plantas podem também estar relacionadas ao ajustamento osmótico, decorrentes do aumento de substâncias que possuem função osmoprotetora, como a trealose, a glicina betaína e a prolina (KISHOR et al., 2005). O aumento líquido na concentração dessas moléculas compatíveis auxilia na manutenção de sua turgescência e não são nocivas ao metabolismo celular. Esse processo eleva a pressão osmótica no interior das células e mantém o fluxo de água na planta, em

condições de baixo potencial hídrico do solo, permitindo assim a continuidade dos processos fisiológicos, mesmo que em baixos níveis (MARIJUAN; BOSCH, 2013).

Dentre essas substâncias, a prolina é considerada um osmólito-chave para as plantas sob estresses abióticos, pois atua no ajuste osmótico de folhas com baixo potencial hídrico e, principalmente, na estabilização de proteínas e na proteção das membranas contra os efeitos deletérios das espécies reativas de oxigênio (SHARMA; DUBEY, 2005; KISHOR et al., 2005; GIANNAKOULA et al., 2008). De modo geral, em muitas espécies, como arroz, sorgo, milho, trigo e cevada, a prolina livre está presente nas plantas em concentrações que variam entre 1 a 5 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de massa fresca de folha (NOGUEIRA et al., 2001). Além de ser o composto mais estudado em plantas sob estresses abióticos, devido à sua importância no ajustamento osmótico (KISHOR et al., 2005).

2.4. Uso de sensores remotos como uma nova ferramenta na fenotipagem de plantas

Nos últimos anos ficou evidente a necessidade de trabalhos que visam a obtenção de materiais tolerantes aos estresses abióticos, principalmente ao déficit hídrico. Novas abordagens de seleção de plantas são necessárias para mitigar o cenário das mudanças climáticas, garantindo a manutenção de altas produtividades (ABBERTON et al., 2016). Segundo os mesmos autores, as principais causas da perda do rendimento das culturas são consequentes das flutuações ambientais, que incluem altas temperaturas e alterações nos padrões de precipitação.

Os impactos do déficit hídrico na produção agrícola são reduzidos com auxílio da seleção de plantas tolerantes à seca (EDMEADES et al., 1999). Entretanto, é importante desenvolver novos caminhos para o melhoramento genético, pois conforme relatos de Ray et al. (2013), os avanços do melhoramento genético estão abaixo do necessário para atender as demandas alimentares das populações em crescimento. A fenotipagem realizada em campo é

reconhecida como um desses caminhos, a qual é capaz de fornecer o rendimento necessário e uma descrição precisa da expressão de características em sistemas de cultivo (CHAPMAN et al., 2014).

Neste sentido, torna-se fundamental a obtenção de ferramentas que facilitam o processo de fenotipagem a campo, através da identificação de características morfofisiológicas que frequentemente limitam a produtividade. As influências externas que afetam o metabolismo fotossintético podem ser detectadas através do uso de equipamentos para a avaliação de trocas gasosas através do infravermelho (CENDRERO et al., 2017). Porém, são ferramentas que trazem limitações quando se pretende realizar rápidos "screenings", pois possuem capacidade de avaliar algumas plantas ou ainda, uma ou duas folhas por planta, tornando uma prática onerosa.

Gimenez et al. (1992) também relataram que as avaliações da taxa de fotossíntese foliar demonstram ser confiáveis na distinção entre genótipos tolerantes à seca e suscetíveis em girassol, entretanto são avaliações trabalhosas (EARL; TOLLENAAR, 1999) e impraticáveis em programas de melhoramento devido ao grande número de indivíduos que devem ser avaliados.

As dificuldades encontradas na fenotipagem em condições de campo vêm motivando cada vez mais o uso de tecnologias de sensoriamento remoto de alto rendimento (FURBANK; TESTER, 2011). Para isso, métodos práticos e eficientes que proporcionem a identificação de indivíduos resistentes à seca, através da análise de seu desempenho fisiológico (NEZHADAHMADI et al., 2013), sob déficit hídrico tornam-se ferramentas de grande valia para o melhoramento de plantas.

Apesar disso, a seleção para o aumento do potencial produtivo deve ser feita em condições de campo, considerando-se as principais características fisiológicas que

influenciam o potencial produtivo destas espécies (RIBEIRO JÚNIOR et al., 2006). Logo, a utilização de sensores torna a seleção de genótipos tolerantes à seca mais eficiente e precisa.

Além do mais pode ser uma opção para recuperar indivíduos em gerações segregantes, o que não acontece em uma fenotipagem destrutiva. Inclusive, pode-se fazer a fenotipagem de um grande número de indivíduos através de análises rápidas e automatizadas com altíssimo rendimento, o que viabiliza a expansão da escala e o alcance de avaliação de uma nova ferramenta para o melhoramento de plantas a qual, ainda pode utilizada no sensoriamento remoto (KOLBER et al., 2005).

Visto que o sensoriamento remoto em nível terrestre está bem estabelecido como uma ferramenta de pesquisa na avaliação das variáveis ecofisiológicas das culturas, percebe-se que essa ferramenta tem atraído grande interesse de profissionais que trabalham com agricultura. Isso porque possibilita o melhor acompanhamento do desempenho das culturas e com maior resolução temporal e espacial, quando comparado aos dados obtidos no sensoriamento remoto aéreo e de satélite (MULLA, 2013), o que torna uma ferramenta de grande valia para auxiliar na tomada de decisão.

2.4.1. Sensores de reflectância

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a obtenção de imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pelos materiais terrestres (FLORENZANO, 2002). Para Rossato et al. (2012) os dados de sensoriamento remoto são amplamente utilizados para desenvolver índices de vegetação como indicadores de crescimento da cultura, estado nutricional e produtividade.

Dentre as várias técnicas de sensoriamento remoto, os sensores hiperespectrais são ferramentas que apresentam alta resolução espectral com bandas estreitas (BAPTISTA, 2006). Possibilitam a aquisição de imagens em centenas de bandas espectrais registradas e contíguas,

de forma a possibilitar que para cada pixel das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa (VAN DER MEER, 2000). Segundo Baptista (2006), esses sensores nos permitem avaliar o desenvolvimento das plantas, devido à interação da radiação eletromagnética com as partículas, átomos e moléculas em determinado comprimento de onda. Meneses (2001) também relatou que a diferenciação entre materiais ocorre por constituírem sistemas com diferentes arranjos de energia, e a reflectância seria uma resposta indireta das mudanças ocorridas nesses níveis de energia.

Com o surgimento dos sensores hiperespectrais, análises minuciosas sobre as propriedades dos alvos ou materiais podem ser estudadas com maior eficiência, o que representa atualmente uma nova abordagem com relação às técnicas de sensoriamento remoto (CARVALHO-JÚNIOR et al., 2002).

As imagens hiperespectrais permitem extrair várias informações, pois têm a capacidade de compor uma imagem adquirindo instantaneamente milhares de espectros, com um nível de resolução espectral mais próximo daquele verificado em espectrorradiômetros de campo ou de laboratório (RUDORFF et al., 2007). As imagens hiperespectrais fornecem uma diversidade de informações sobre a estrutura e propriedades bioquímicas e fisiológicas das plantas (ASNER et al., 2005).

Os índices espectrais, em sensoriamento remoto, são informações bastante úteis para o monitoramento de diferentes ambientes na superfície terrestre (SILVA; BAPTISTA, 2015) e vem sendo difundidos cada vez mais, proporcionando análises mais precisas do comportamento e da fisiologia das plantas. Além do mais, é eminente a possibilidade de estudos de propriedades específicas de plantas por meio da obtenção dos índices de vegetação.

Para Dalponte et al. (2009) os sensores hiperespectrais são instrumentos importantes e poderosos no estudo da vegetação. Em pesquisa realizados por Fontana et al. (1998) foi

observado que as mudanças estruturais na vegetação ocorridas no período de crescimento, resultam em diferenciação da sua reflectância. Esse comportamento possibilita o emprego de índices de vegetação, tais como o NDVI para o monitoramento da vegetação, bem como para distinguir diferentes tipos de vegetação e detectar possíveis problemas de crescimento das plantas.

Xavier et al. (2006), trabalhando com a cultura do trigo, encontraram boa estimativa de parâmetros biofísicos através dos índices hiperespectrais, sendo que os melhores períodos para a realização desta estimativa foram nos estádios de perfilhamento II e espigamento.

2.4.1.1. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

Os mais diversos índices de vegetação relacionam-se com diferentes características fisiológicas e biofísicas das plantas (ASRAR et al., 1985). O NDVI foi proposto por Rouse et al. (1973) e é um dos índices de vegetação mais utilizados. Este índice é muito empregado na estimativa de biomassa, cobertura vegetal e na detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura da terra (SHIMABUKURO et al., 1998). Ainda, é possível determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área, uma vez que quanto maior o NDVI, mais densa é a fitomassa verde (MELO et al., 2011).

O NDVI é um índice que apresenta simplicidade de cálculo e alta sensibilidade na detecção de alterações na vegetação (LOPES et al., 2010). A determinação do NDVI é mais sensível à presença de pigmentos, principalmente o teor de clorofila das folhas (GITELSON et al., 1996) e, portanto, está relacionado à fotossíntese das plantas (HUETE et al., 2002). Os valores desta variável variam em uma escala de -1 a 1 e são calculados através da diferença entre as duas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, dividido pela soma dos mesmos. Geralmente em vegetações saudáveis, o índice apresenta valores em torno de 0,2 a 0,8 (ROUSE et al., 1973). O NDVI é expresso pela Equação 1 abaixo.

$$NDVI = \left(\frac{IV - V}{IV + V} \right) \times 100$$

onde: IV é o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo (750 nm) e V o fluxo radiante refletido no vermelho da região do visível (550 nm).

Quanto maior o seu valor, maiores são as diferenças entre a reflectância do infravermelho próximo com o vermelho. Isso indica que as plantas possuem maior quantidade de clorofila e vigor de desenvolvimento, que como resultado apresentam maior potencial produtivo (RISSINI et al., 2015).

Segundo Woolley (1971) a normalização é produzida pela combinação da forte absorção pela clorofila na região do vermelho e a forte reflectância no infravermelho próximo, devido à dispersão no mesofilo da folha e ausência de absorção pelos pigmentos. Sendo assim, plantas submetidas a algum estresse apresentam decréscimo na absorção pela clorofila e redução na refletância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células, visto que esse decréscimo leva a um aumento na refletância no vermelho (AYALA-SILVA; BEYL, 2005).

Os índices de vegetação indicam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com o vigor da biomassa verde, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (EPIPHANIO et al., 1996). Deste modo, esta variável mostra-se vantajosa ao fornecer estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação.

A partir do NDVI, tem-se informações do estado da cobertura vegetal, das mudanças de padrão de uso e cobertura da terra, da densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área, conteúdo de água nas folhas e deficiências minerais (LIMA et al. 2013; MELO et al., 2011; JENSEN, 2007; LIANG, 2005; SHIMABUKURO et al., 1998;) e estas podem ser detectadas através dos padrões de NDVI. Neste contexto, torna-se possível a diferenciação de genótipos resistentes e sensíveis a determinado estresse, através da

determinação dos valores de NDVI, em avaliações ao longo do desenvolvimento da cultura (PIETRAGALLA; VEJA 2012).

Pires et al. (2014) trabalhando com a caracterização do perfil de NDVI em trigo, verificaram que essa ferramenta auxilia grandemente na fenotipagem da cultura, uma vez que foi possível diferenciar os genótipos estudados ao longo do ciclo da cultura através dos padrões de NDVI. Correlações entre NDVI e produtividade foram encontrados em trabalhos conduzidos na Alemanha por Ramos et al. (2015), ao utilizar genótipos de trigo desenvolvidos para a região do Cerrado do Brasil Central. Em trabalhos conduzidos por Crusiol et al. (2016), foi encontrada boa eficiência do NDVI na diferenciação do comportamento espectral de diferentes cultivares de soja sob déficit hídrico, em que foi demonstrado que plantas sob irrigação apresentaram NDVI superior às sob déficit hídrico.

Tucker et al. (1980) observaram relações lineares significativas entre os índices de vegetação NDVI e a produtividade de grãos, em trabalho com trigo de inverno. Os autores relataram que os dados espectrais apresentaram maiores correlações com o rendimento de grãos, quando as avaliações foram realizadas entre os estádios de alongamento ao florescimento. Relações menores foram encontradas em avaliações no início e no final do ciclo de crescimento do trigo. A relação dos valores de NDVI com o rendimento de grãos, segundo Raun et al. (2001) decai rapidamente conforme a cultura se aproxima da maturação fisiológica, desta forma para que se tenha boas estimativas de rendimento de grãos, os dados devem ser coletados no final do crescimento vegetativo.

2.4.1.2. Índice de Reflectância Fotoquímico - PRI

Ao utilizar as bandas de reflectância nos comprimentos de onda do azul e do verde, o Índice de Refletância Fotoquímico, PRI, é uma ferramenta útil na avaliação da eficiência fotossintética (GAMON et al., 1992). Segundo os mesmo autores, essa variável é sensível às

alterações nos pigmentos de carotenoides das folhas. Esses pigmentos são indicativos da eficiência do uso da luz fotossintética ou da taxa de dióxido de carbono armazenada pelas folhas por unidade de energia absorvida.

Os carotenóides desempenham papel essencial na fotoproteção, pois liberam o excesso de energia antes que possa danificar os componentes celulares do organismo. A reação de clorofilas excitadas e o oxigênio molecular geram oxigênio singlete, que são altamente reativos, podendo provocar danos celulares, principalmente aos lipídios. Os carotenóides não permitem formar o oxigênio singlete, provocando assim perda de energia na forma de calor (TAIZ et al., 2017).

O índice de vegetação PRI também pode ser empregado em estudos de estresse e de produtividade das culturas. Este índice de reflectância é baseado nas mudanças reversíveis de pigmento de xantofila de curto prazo que acompanham o estresse da planta (GAMON et al., 1990; PEÑUELAS et al., 1994). Essas mudanças estão ligadas à dissipação do excesso de energia absorvido que não pode ser processado através da fotossíntese e, portanto, ocasiona a redução da eficiência do uso da luz (DEMMIG-ADAMS, 1990). Os valores variam dentre -1 e 1 e os valores comuns para vegetação sem estresse ficam entre -0,2 a 0,2 (GAMON et al., 1992).

$$PRI = \frac{(R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)}$$

Onde: R_1 é a Reflectância relativa a 531 nm e R_2 é a Reflectância relativa a 570 nm.

O PRI tem sido muito utilizado para se estimar a eficiência no uso da luz, que por sua vez, reflete o desempenho fotossintético das plantas (GARBUSKY et al., 2011). Esses autores relataram uma relação considerável entre o PRI e a eficiência no uso da luz, em diversas espécies de plantas e em condições distintas. Ainda, Gamon et al. (1997) e Garbulsky

et al. (2011), sugeriram que o sistema fotossintético é regulado para manter relações consistentes entre o pigmento, mudanças morfológicas e fisiológicas, ligado ao PRI e às mudanças na fixação de CO₂.

Em uma revisão bibliográfica realizada por Garbulsky et al. (2011), com mais de 80 artigos que relacionam o PRI com variáveis ecofisiológicas, as maiores correlações foram entre o PRI e o rendimento quântico ou eficiência fotoquímica real ($\Delta F / F_m'$). Neste mesmo estudo, o PRI também foi associado a várias variáveis diferentes para escalas espaciais e temporais distintas, tais como a eficiência do uso da luz, absorção líquida de CO₂ e razão clorofila/carotenóides.

A temperatura do ar, condutância estomática e déficit de pressão de vapor são variáveis mecanicamente relacionadas entre si, as quais são empiricamente relacionadas ao PRI. Isso sugere que o PRI seja sensível para se estimar essas variáveis. Sendo assim, a interpretação do PRI pode ser uma ferramenta indicadora de estresse da planta. Além do mais, a utilização desse índice pode levar à detecção precoce do estresse, auxiliando a tomada de decisão em plantios comerciais e contribuindo na a seleção de materiais tolerantes ao estresse nos programas de melhoramento (MAGNEY et al., 2016).

2.4.2. Sensores de fluorescência da clorofila

Novas ferramentas que possibilitam análise de plantas em condições estressantes facilitam a seleção de materiais mais adaptados. Essas novas técnicas que utilizam a fluorescência da clorofila *a*, tais como a fluorescência transiente induzida a laser (LIFT), surgem para fornecer ao melhoramento de plantas, facilidade e análises seguras para a seleção de plantas (PIERUSCHKA et al., 2010). Essa técnica foi desenvolvida para preencher uma lacuna entre as avaliações realizadas em laboratório, daquelas conduzidas a campo. Pode ser

usada *in situ* para monitoramento automatizado e de longo prazo (PIERUSCHKA et al., 2014).

A técnica LIFT consiste na utilização de laser ou LEDs, os quais proporcionam a excitação dos centros de reação em tecidos vegetais, garantindo assim o estudo do desempenho fotossintético das plantas. Trata-se de uma ferramenta que possibilita a avaliação de aspectos estruturais e moleculares da fotossíntese em condições de campo, passando da avaliação de algumas folhas por planta, para avaliação do dossel das plantas (KOLBER et al., 2005; NICHOL et al. 2012; PIERUSCHKA et al., 2014).

Essa técnica permite maior conhecimento dos processos fotoquímicos e não-fotoquímicos que ocorrem na membrana dos tilacóides, além de possibilitar o estudo de características relacionadas à capacidade de absorção e transferência da energia luminosa na cadeia de transporte de elétrons (KRAUSE; WEIS, 1991). Com isso, a fluorescência da clorofila tem sido bastante difundida, principalmente no estudo da capacidade fotossintética das plantas. Essa técnica além de ser um método não destrutivo, permite analisar qualitativamente e quantitativamente a absorção e o aproveitamento da energia luminosa pelo aparelho fotossintético (OLIOSI et al., 2017)

Neste sentido, Rong-hua et al. (2006), trabalhando com cevada, mostraram que métodos mais rápidos de medir a atividade fotossintética, como a técnica de fluorescência da clorofila *a*, podem ser tão eficazes quanto as avaliações de trocas gasosas por infravermelho, que são mais demoradas para se obter diferenças entre genótipos tolerantes e suscetíveis à seca.

2.4.2.1. Fluorescência da clorofila *a*

A identificação de indivíduos resistentes ao déficit hídrico por meio de análise do seu comportamento fisiológico são ferramentas de grande importância para o melhoramento de plantas, por se tratar de métodos mais práticos e eficientes. (MIRANSARI et al., 2013). A

fotossíntese é um dos principais processos fisiológicos das plantas afetados pela falta de água (FAROOQ et al., 2009), entretanto, sua determinação pelos métodos de trocas gasosas ou análises químicas, tornam esse processo bastante demorado.

Uma alternativa a essas técnicas é a determinação da fluorescência da clorofila a, a qual estima a eficiência quântica da fotossíntese de maneira mais prática e rápida. Kalaji et al. (2016) também destacaram a fluorescência da clorofila a como um método eficaz para avaliação da performance fotossintética, fornecendo informações detalhadas sobre a integridade dos complexos coletores de luz quando em condições sob estresses. As análises da cinética da fluorescência da clorofila também têm fornecido consideráveis informações sobre a organização e o funcionamento do aparelho fotossintético (GENTY et al., 1989). Segundo Kalaji et al. (2016) essa análise constitui-se uma técnica não destrutiva, o que nos permite acompanhar o desempenho bioquímico ao longo do ciclo da cultura.

O princípio da fluorescência da clorofila a fundamenta-se nos três processos de dissipação da luz absorvida por moléculas de clorofila. O primeiro refere-se etapa fotoquímica, a qual é usada para direcionar a fotossíntese, o segundo e o terceiro pertencem à etapa não fotoquímica, correspondendo ao excesso de energia, o qual pode ser dissipado por calor ou ser reemitido como fluorescência de clorofila (MAXWELL; JOHNSON, 2000). Neste sentido, quando a planta alcança seu potencial máximo da fotossíntese, a emissão de calor e a fluorescência são mínimas. Isso ocorre devido à competição entre si destes três processos, de forma que o aumento em um provoca a redução no rendimento dos outros dois. Sendo assim, ao se determinar a fluorescência da clorofila tem-se informação de mudanças ocorridas na eficiência da etapa fotoquímica e na dissipação de calor (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

A fluorescência corresponde a uma pequena porção, 2 a 5%, relativa ao total do uso da luz absorvida (ROHÁČEK et al., 2008), e é sempre quantificada através da medição de ondas

de comprimento maior em relação daquelas que inicialmente atingem a planta. Entretanto, esse processo se restringe às moléculas de clorofila *a*, pois as moléculas de clorofila *b* não emitem fluorescência porque a energia de excitação é muito rápida e eficientemente transferida para clorofila *a*. Considera-se também que a fluorescência da clorofila é emitida predominantemente (cerca de 90%) dos complexos de clorofila do fotossistema II (ROBERT et al., 2011).

A reemissão de fótons provenientes da luz é um fenômeno que ocorre naturalmente nas plantas, em que, o elétron contido nos centros de reação dos fotossistemas, após receberem uma grande energia de excitação, retorna ao seu estado inicial. Ao retornar, esta energia é dissipada na forma de calor ou fluorescência, com isso é possível determinar a influência de qualquer fator no desempenho fotossintética de qualquer organismo fotossintetizante, através da determinação da dissipação por fluorescência (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

Essa relação competitiva entre fluorescência e atividade fotossintética foi primeiramente descrita por Kautsky et al. (1960) e pode ser utilizada para estudar a atividade fotossintética potencial das folhas e para detectar os efeitos de estresses em plantas. Tem permitido também o melhor entendimento dos processos fotoquímicos e não-fotoquímicos nas membranas dos tilacóides, além de proporcionar estudos mais detalhados sobre a capacidade de absorção e transferência de energia na cadeia de transporte de elétrons (KRAUSE; WEIS, 1991).

Segundo Maxwell e Johnson (2000) são utilizados vários sinais para os cálculos dos parâmetros de fluorescência, sendo que alguns destes são obtidos através da medição direta e os outros são resultantes da relação entre eles. Esses sinais são melhores explicados por referência a um traço experimental típico demonstrado na Figura 1.

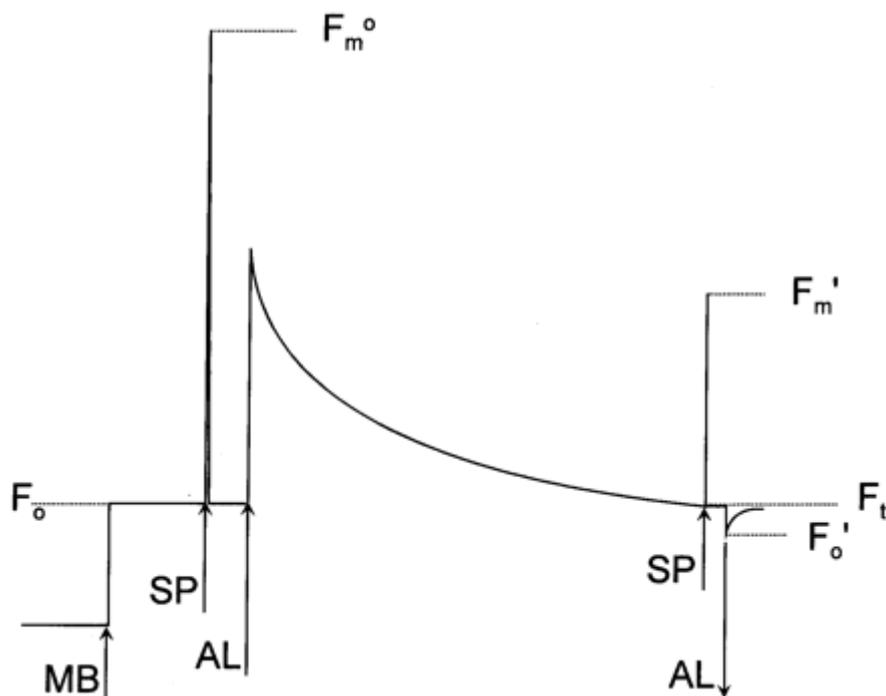


Figura 1. Sequência de um traço típico de fluorescência. Uma luz de medição é ligada (↑ MB) e o nível de fluorescência zero é medido (F_0). A aplicação de um flash de luz saturante (↑ SP) permite a medição do nível máximo de fluorescência F_{m^0} . Uma luz para dirigir fotossíntese (↑ AL) é então aplicada. Após um período de tempo, outro flash de luz de saturação (↑ SP) permite a máxima fluorescência na luz (F_m') a ser medido. O nível de fluorescência imediatamente antes do flash de saturação é denominado F_t . Desligar a luz actínica (AL), geralmente na presença de luz muito vermelha, permite estimar a fluorescência de nível zero "na luz".

O primeiro sinal refere-se a F_0 , que corresponde à fluorescência mínima inicial, obtida após início da iluminação (MAXWELL; JOHNSON, 2000). Segundo Mathis e Paillotin (1981) esse parâmetro representa a emissão da luz pelas moléculas de clorofilas *a* excitadas, antes da migração da energia para o centro de reação do fotossistema II, ou seja, induz a emissão de fluorescência sem induzir a fotossíntese, determinando assim a proporção de centros de reação que estão fechados. Posteriormente, com um flash de luz saturante é possível medir o F_m , em amostras adaptadas ao escuro (MAXWELL; JOHNSON, 2000) que corresponde a intensidade de fluorescência máxima em que todos os centros de reação do fotossistema II estão abertos. Neste ponto a extinção fotoquímica é igual à zero (VAN KOOTEN; SNEL, 1990). Ainda, ao se aplicar uma luz actínica e, em intervalos apropriados,

aplicar outros flashes de saturação, obtém-se o rendimento quântico efetivo (F'_m). Por último, tem-se o valor da fluorescência terminal (F_t) referente aos valores estacionários das reações fotossintéticas (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

A fluorescência variável (F_v), segundo Georgieva e Yordanov (1993), é obtida através da diferença entre F_m e F_0 , que corresponde ao incremento da fluorescência a partir de F_0 até F_m . A partir daí pode-se estabelecer uma relação F_v/F_m , que expressa a eficiência intrínseca (F'_v/F'_m) ou máxima (F_v/F_m) (MAXWELL; JOHNSON, 2000) da captura de energia de excitação pelos centros de reação abertos do fotossistema II (KRAUSE; WEIS, 1991). A relação F_v/F_m fornece informações sobre a eficiência da extinção não fotoquímica, sendo assim qualquer alteração nos valores dessa relação causa efeito na eficiência desse processo (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

Os valores de F_v/F_m refletem a eficiência quântica potencial de fotossistema II e são usados como um indicador sensível do desempenho fotossintético da planta. Isso visto que o fotossistema II é aceito como a parte vulnerável do aparelho fotossintético ao dano induzido pela luz, sendo assim, o dano ao fotossistema II será frequentemente a primeira manifestação do estresse em uma folha (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

O rendimento quântico efetivo, F'_v/F'_m , representa a eficiência de captura da excitação pelos centros de reação abertos do fotossistema II (GENTY et al., 1989). O mesmo autor evidencia que esta variável representa melhor as variações no rendimento quântico da fotossíntese quando comparado à relação F_v/F_m .

Com base nessas informações, pode-se afirmar que a utilização da fluorescência da clorofila a pode ser uma poderosa ferramenta no processo de fenotipagem de plantas, pois além de ser uma técnica não invasiva, fornece informações da performance fotossintética, o que é indispensável para seleção de indivíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBERTON, M.; BATLEY, J.; BENTLEY, A.; BRYANT, J.; CAI, H.; COCKRAM, J.; OLIVEIRA, A. C. de; CSEKE, L. J.; DEMPEWOLF, H.; PACE, C. D.; EDWARDS, D.; GEPTS, P.; GREENLAND, A.; HALL, A. E.; HENRY, R.; HORI, K.; HOWE, G. T.; HUGHES, S.; HUMPHREYS, M.; LIGHTFOO, D.; MARSHALL, A.; MAYES, S.; NGUYEN, H. T.; OGBONNAYA, F. C.; ORTIZ, R.; PATERSON, A. H.; TUBEROSA, R.; VALLIYODAN, B.; K. VARSHNEY, R. K.; YANO, M. Global agricultural intensification during climate change: a role for genomics. **Plant Biotechnology Journal**, n. 14, v.1, p. 1095-1098, 2016.

ACEVEDO, E. Improvement of winter cereal crops in Mediterranean environments: use of yield, morphological and physiological traits. In: ACEVEDO, E.; CONESA, A. P.; MONNEVEUX, P.; SRIVASTAVA, J. P. (Eds.). **Physiology-Breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments**, Montpellier. INRA, 1991. p. 273-305.

ARAÚJO, S.A.C.; DEMINICIS, B.B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v.7, n.4, p.463-472, 2009.

ASNER, G. P.; CARLSON, K. M.; MARTIN, R. E. Substrate age and precipitation effects on Hawaiian forest canopies from spaceborne imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 1, p. 457-467, 2005.

ASRAR, G.; KANEMASU, E. T.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J. Estimation of total aboveground phytomass production using remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 3, p. 211-220, 1985.

AVRAMOVA, V.; NAGEL, K. A.; ABDELGAVAD, H.; BUSTOA, D.; DUPLESSIS, M. FIORANI, F. E BEEMSTER, G. T. S. Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage. **Journal of Experimental Botany**. v. 67, n. 8, p. 2453–2466, 2016.

AYALA-SILVA T, BEYL C. A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 2, p. 305-317, 2005.

BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento remoto hiperespectral: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais**. Brasília: Universa, 2006. 212 p.

BERNIER, J.; ATLIN, G. N.; SERRA, J. R.; KUMAR, A.; SPANER, D. Breeding upland rice for drought resistance. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 88, n. 6, p. 927-939, 2008.

BORLAUG, N. E.; DOSWELL, C. R. Feeding a world of ten billion people: a 21st century challenge. In: TUBEROSA, R.; PHILLIPS, R. L.; GALE, M. (Eds.). **Proceedings of the international congress in the wake of the double helix: from the green revolution to the gene revolution**, 27-31 May 2003, Bologna, Italy. Avenue Media, Bologna, Italy. p. 3-23.

BRASIL - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **O bioma cerrado**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 22 Jan. 2017.

BRISSON, N.; GATE, P.; GOUACHE, D.; CHARMET, G.; OURY, F. X.; HUARD, F. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. **Field Crops Research**. v. 119, n. 1, 2010, p. 201-212.

BRUNINI, O.; CARDOSO, M. Efeito do déficit hídrico do solo sobre o comportamento estomático e potencial da água em mudas de seringueira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.7, p.1053-1060, 1998.

CALVIN, M. Forty years of photosynthesis and related activities. **Photosynthesis Research** 1989, 21, 3-16 p.

CARLIN, S. D.; SANTOS, D. M. M. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.9, p.1106-1113, 2009.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 31-41, 2002.

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. (Eds.). **Terrestrial ecosystem research infrastructures: challenges and opportunities**. CRC Pres, 2017. p. 53-79

CHAPMAN, SC; MERZ, T; CHAN, A .; JACKWAY, P; HRABAR, S .; DRECCER, MF; HOLLAND, E .; ZHENG, B; LING, TJ; JIMENEZ-BERNI, J. Pheno-Copter: a low-altitude, autonomous remote-sensing robotic helicopter for high-throughput field-based phenotyping. **Agronomy**, n. 4, v. 2, p. 279-301, 2014.

CHAVES, M.M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v.103, n. 1, p.551-560, 2009.

COELHO, M.A. de O.; CONDÉ, A.B.T.; YAMANAKA, C.H.; CORTE, H.R. Evaluated oh wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in rainfed conditions in Minas Gerais state. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 5, p. 717-723, 2010.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do trigo**. Brasília, 2017. Disponível em: < www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 Fev. 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Décimo levantamento|JULHO 2020**. Brasília, 2017. Disponível em: < www.conab.gov.br>. Acesso em: 04 Julho 2020.

CRUSIOL, L. G. T.; CARVALHO, J. de F. C.; SIBALDELLI, R. N. R.; NEIVERTH, W.; RIO, A. do; FERREIRA, L. C.; PROCÓPIO, S. de O.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. NDVI variation according to the time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. **Precision Agriculture**. v. 18, n. 4, p. 470-490, 2016.

DALPONTE, M.; BRUZZONE, L.; VESCOVO, L.; GIANELLE, D. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2345-2355, 2009.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 18, n.1, p, 55-81, 2006.

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P. A. Global Synthesis of Drought Effects on Maize and Wheat Production. **PLoS ONE**, v. 11, n. 5, 2016. 16 p.

DE MORI, C. Aspectos econômicos da produção e utilização. **Trigo do plantio a colheita**. Viçosa: Eds. UFV, 2015. p.11-34

DE MORI, C.; IGNACSAK, J. C. Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. da. (Eds.). **Trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p.41-76

DEMIREVSKA, K.; ZASHEVA, D.; DIMITROV, R.; STOILOVA, L. S.; STAMENOVA, M.; FELLER, U. Drought stress effects on Rubisco in wheat: changes in the Rubisco large subunit. **Acta Physiologiae Plantarum**. v. 31, n. 1, p. 1129-1138, 2009.

DEMMIG-ADAMS, B. Carotenoids and photoprotection in plants: a role for the Xanthophyll zeaxanthin. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 1020, n.1, p. 1-24, 1990.

DIXON, J.; BRAUN, H.; KOSINA, P.; CROUCH, J. **Wheat facts and futures 2009**. CIMMYT, Mexico DF, Mexico, 95 p.

DURÃES, F. O. M.; GAMA, E. E. G.; GOMIDE, R. L.; ANDRADE, C. L. T.; GUIMARÃES, C. T., MAGALHÃES, J. V. (2005) Phenotyping maize for drought response in Brazilian tropical lands: approaches to breeding programs and genomics studies. Pp. 7-9 In: INTERDROUGHT II – The 2nd International Conference on Integrated Approaches to Sustain and Improve Plant Production under Drought Stress, 2. 2005, Rome, Italy. **Annals ...** Rome: Interdrought-II Committee; University of Rome, 2005. (Rome, Italy, from 24th to 28th September 2005 at University of Rome “La Sapienza”).

EARL, H. J.; TOLLENAAR, M. Using chlorophyll fluorometry to compare photosynthetic performance of commercial maize (*Zea mays* L.) hybrids in the field. **Field Crops Research**, n. 61, v. 1, p. 201-210, 1999.

EDMEADES, G.O., BOLAÑOS, J., CHAMPAN, S.C., LAFITTE, H.R., BÄNZIGER, M. Selection improvements drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, and harvest index. **Crop Science**, n. 39, v. 5, p. 1306-1315, 1999.

EIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; WU, C.; WANG, D.; HUANG, J. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options, **Frontiers in Plant Science**. v. 8, n. 1147, 2017. 16 p.

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, n. 1, p. 185-212, 2009.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Faostat**, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 20 Jan. 2018.

FILIPPOU, P.; BOUCHAGIER, P.; SKOTTI, E.; FOTOPOULOS, V. Proline and reactive oxygen/nitrogen species metabolism is involved in the tolerant response of the invasive plant species *Ailanthus altissima* to drought and salinity. **Environmental and Experimental Botany**, v.97, n. 1, p.1-10, 2014.

FLEURY, D.; JEFFERIES, S.; KUCHEL, H.; LANGRIDGE P. Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 12, p. 3211–3222, 2010.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. Oficina de textos. São Paulo, 2002. 97p.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: Ed. UPF, 2004. 733 p.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 1399-1405, 1998.

FURBANK, R. T.; TESTER, M. Phenomics: technologies to relieve the phenotyping bottleneck. **Trends in Plant Science**, v. 16, n. 12, p. 635-644, 2011.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; BILGER, W.; BJÖRKMAN, O.; FREDEEN. A.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. **Oecologia**, v. 85, n. 1, p. 1-7, 1990.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 1, p. 35-44, 1991.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation-use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492-501, 1997.

GARBULSKY, M. F.; PEÑUELAS, J.; GAMON, J.; INOUE, Y.; FILELLA, I. The Photochemical Reflectance Index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies; a review and meta-analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 281-297, 2011.

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, n. 1, p. 87-92, 1989.

GEORGIEVA, K.; YORDANOV, I. Temperature dependence of chlorophyll fluorescence in pea thylakoid membranes. **Journal of Plant Physiology**, v. 142, n. 2, p. 151-155, 1993.

GIANNAKOULA, A.; MOUSTAKAS, M.; MYLONA, P.; PAPADAKIS, I.; YUPSANIS, T. Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. **Journal of Plant Physiology**, v.165, p.385-396, 2008.

GIMENEZ, C.; MITCHELL, V. J.; LAWLOR, D. W. Regulation of Photosynthetic Rate of Two Sunflower Hybrids under Water Stress. **Plant Physiology**. v. 98, n. 1, p. 516-524, 1992.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS - MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996.

HARB, A.; KRISHNAN, A.; AMBAVARAM, M. M.; PEREIRA, A. Molecular and physiological analysis of drought stress in Arabidopsis reveals early responses leading to acclimation in plant growth. **Plant Physiology**, v. 154, n. 3, p. 1254–1271, 2010.

HELDT, H. W. **Plant biochemistry**. 3. ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005. 522 p.

HENDRY, G. A., F.; GRIME, J. P. (Eds.). **Methods in comparative plant ecology**. New York: Marcel Dekker, 1993. 282 p.

HÖRTENSTEINER, S.; KRÄUTLER, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, v. 1807, p. 977-988, 2011.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n.1-2, p.195-213, 2002.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 22 Jan. 2017.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment. 2.** Ed. Pearson Prentice Hall, 2007. 46 p.

JESUS-JUNIOR, C.; SIDONIO, L; MORAES, V. E. G. Panorama das importações de trigo no Brasil. *BNDES Setorial*, v. 34, 2011, p.389-420.

KALAJI, H. M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R. J. Chlorophyll *a* fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 38, n. 4, p.1-11, 2016.

KAUTSKY, H.; APPEL, W.; AMANN, H. Chlorophyll fluoreszenz und kohlenaure-assimilation XII. Die fluoreszenzkurve und die photochemie der pflanze. *Biochem Zeit*, v. 332, n.1, p. 227-292, 1960.

KISHOR, P. B. K.; SANGAM, S.; AMRUTHA, R.N.; LAXMI, P. S.; NAIDU, K. R.; RAO, K. R. S. S.; RAO, S.; REDDY, K. J.; THERIAPPAN, P.; SREENIVASULU, N. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*, Bangalore, v.88, n.3, p.424-438, 2005.

KOLBER, Z.; KLIMOV, D.; ANANYEV, G.; RASCHER, U.; BERRY, J.; OSMOND, B. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient

(LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. **Photosynthesis Research**, v. 84, n. 1-3, p. 121-129, 2005.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water and relations of plants soils**. San Diego: Academic Press; 1995. 495 p.

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 42, n. 1, p. 313- 349, 1991.

KUMAR, D. Breeding for drought resistance. In: ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C.; (Eds.), **Abiotic stresses: plant resistance through breeding and molecular approaches**. Food Products Press/The Haworth Press, Inc; New York, NY: 2005. p. 145–175.

LIANG, S. **Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces**. Wiley series in remote sensing, 2005. 534 p.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A. da; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p.204-214, 2013.

LIU, H. S.; LI, F. M. Root respiration, photosynthesis and grain yield of two spring wheat in response to soil drying. **Plant Growth Regulation**, v. 46, n. 3, p. 233-240, 2005.

LOBELL, D. B.; SCHLENKER, W.; COSTA-ROBERTS, J. Climate trends and global crop production since 1980. **Science**, v. 333, n. 1, 2011, p. 616 – 620.

LOPES, H.; CANDEIAS, A. L. B.; ACCIOLY, L. J. O.; SOBRAL, M. do C. M.; PACHECO, A. P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1210–1219, 2010.

MAGNEY, T. S.; VIERLING, L. A.; EITEL, J. U. H.; HUGGINS, D. R.; GARRITY, S. R. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to

environmental conditions in wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 173, n. 1, p. 84-97, 2016.

MARDER, J. B.; BARBER, J. The molecular anatomy and function of thylakoid proteins. **Plant, Cell and Environment**, v. 12, n. 1, p. 595-614, 1989.

MARIJUAN, M. P.; BOSCH, S. M. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v.18, n. 12, p. 660-666, 2013.

MATHIS, P.; PAILLOTIN, G. Primary process of photosynthesis. In: HATCH, M. D. 7 Boardman, N. K. eds. **The biochemistry of plants**. New York, Academic Press, 1981. p. 97-161.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da Microbacia Hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **RA'E GA**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 520-533, 2011.

MENESES, P. R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Eds.) **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**, Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001, p.15 - 40.

MIRANSARI, M.; RIAHI, H.; EFTEKHAR F.; MINAIE, A.; SMITH, D. L. Improving soybean (*Glycine max* L.) n_2 fixation under stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, n. 4, p. 909-921, 2013.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 1, p. 358-371, 2013.

MUNNS, R. Plant adaptations to salt and water stress: differences and commonalities. In: TURKAN, I. (Ed.). **Plant responses to drought and salinity stress: developments in a postgenomic Era**. London: Elsevier, 2011. p.132. (Advances in botanical research, 57).

NEZHADAHMADI, A.; PRODHAN, Z. H.; FARUQ, G. Drought tolerance in wheat. **The Scientific World Journal**, v. 2013, n. 1, p. 1-12, 2013.

NICHOL, C. J.; PIERUSCHKA, R.; TAKAYAMA, K.; FÖRSTER, B.; KOLBER, Z.; RASCHER, U.; GRACE, J.; ROBINSON, S. A.; POGSON, B.; OSMOND, B. Canopy conundrums: building on the Biosphere 2 experience to scale measurements of inner and outer canopy photoprotection from the leaf to the landscape. **Functional Plant Biology**, v. 39, n.1, p.1-24, 2012.

NOGUEIRA, R. J. M. C. MORAES, J. A. P. V.; BURITY, H. A.; BEZERRA NETO, E. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v 13, n.1, p.75-5-87, 2001.

NOURI-GANBALANI, A.; NOURI-GANBALANI, G.; HASSANPANAH, D. Effects of drought stress condition on the yield and yield components of advanced wheat genotypes in Ardabil, Iran. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 7, n. 3/4, 2009. p. 228–234.

OLIOSI, G.; RODRIGUES, J. de O.; FALQUETO, A. R.; PIRES, F. R.; MONTE, J. A.; PARTELLI, F. L. Fluorescência transiente da clorofila *a* e crescimento vegetativo em cafeeiro conilon sob diferentes fontes nitrogenadas. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 248-259, 2017.

PAIVA, A. S.; Fernandes, E. J.; Rodrigues, T. J. D.; Turco, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 25, n. 1, p. 161-169, 2005.

PASSIOURA, J. B. Fenotipagem para tolerância à seca em culturas de grãos: quando é útil para criadores? **Functional Plant Biology**, n. 39, v. 1, p. 851-859, 2012.

PEIXOTO, P. H. P.; MATTA, F. M. da; CAMBRAIA, J. Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, n. 4, p. 821-832, 2002.

PEÑUELAS, J.; GAMON, J.; FREDEEN, A.; MERINO, J.; FIELD, C. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and waterlimited sunflower leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p. 135-146, 1994.

PIERUSCHKA, R.; ALBRECHT, H.; MULLER, O.; BERRY, J. A.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z. S.; MALENOVSKÝ, Z.; RASCHER, U. Daily and seasonal dynamics of remotely sensed photosynthetic efficiency in tree canopies. **Tree Physiology**, v. 34, n. 7, p. 674-685, 2014.

PIERUSCHKA, R.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z. S.; BERRY, J. A. Monitoring of cold and light stress impact on photosynthesis by using the laser induced fluorescence transient (LIFT) approach. **Functional Plant Biology**, v.37, n. 5, p. 395-402, 2010.

PIETRAGALLA, J.; VEJA, A. M. Normalized difference vegetation index. In: PASK, A.; PIETRAGALLA, J.; MULLAN, D.; REYNOLDS, M. H. (Eds.). **Physiological Breeding II: a field guide to wheat phenotyping**. Mexico: CIMMYT, 2012. p. 37- 40.

PIRASTEH-ANOSHEH, H.; SAED-MOUCHESHI, A.; PAKNIYAT, H. PESSARAKLI, M. Stomatal responses to drought stress In: PARVAIZ, A. (Ed). **Water stress and crop plants: a sustainable approach**, v. 2, Wiley, Chichester, 2016. p. 24-40.

PIRES, J.L.F.; COROSSA, G.M.; STRIEDE, M.L.; DALMAGO, G.A.; CUNHA, G.R.; SANTI, A.; SILVA JÚNIOR, J.P.; SANTI, A.L.; SANTOS, H.P.; PASINATO, A.; REMOR, C. Uso de sensor óptico ativo para caracterização do perfil de NDVI em dosséis de trigo submetidos a diferentes estratégias de manejo. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y. (Eds.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. p.279 – 286.

PRABA, M. L.; CAIRNS, J. E.; BABU, R. C.; LAFITTE, H. R. Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 195, n. 1, p. 30-46, 2009.

PUGNAIRE, F. I.; ENDOLZ, L. S.; PARDOS, J. Constraints by water stress on plant growth. In: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of plant and crop Stress**. New York: Dekker, 1994. p. 247-259.

QING, Z. M.; JING, L. G.; KAI, C. R. Photosynthesis characteristics in eleven cultivars of sugarcane and their responses to water stress during the elongation stage. **Proceedings - International Society of Sugar Cane Technologists**. v. 24, n. 1, p. 642-643, 2001.

RAMOS, M.L.G., RIBEIRO JUNIOR, W.Q., SCHICKLING, A., MULLER, O., RASCHER, U., CENDERO, M.P., HERRMANN, P. Phenotyping of Brazilian genotypes under field conditions. **European Plant Phenotyping Symposium**, Barcelona, 11-12, 2015. 48 p.

RAUN, W. R.; SOLIE, J. B.; JOHNSON, G. V.; STONE, M. L.; LUKINA, E. V.; THOMASON, W. E.; SCHEPERS, J. S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n.1, p. 131-138, 2001.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E.; **Biologia vegetal**, 8. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014. 1637 p.

RAZMJOO, K.; HEYDARIZADEH, P.; SABZALIAN, M.R. Effect of salinity and drought stresses on growth parameters and essential oil content of *Matricaria chamomile*. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v. 10, n. 4, p.451-454, 2008.

REYNOLDS, M.; FOULKES, M. J.; SLAFER, G. A.; BERRY, P.; PARRY, M. A. J.; JOHN W. SNAPE, J. W.; ANGUS, W. J. Raising yield potential in wheat. **Journal of Experimental Botany**. v. 1, n. 1, p. 1-20, 2009.

RIBEIRO JÚNIOR, W.Q.; RAMOS, M.L.G.; REBOUÇAS, U.V.; TRINDADE, M. da G.; FERREIRA, F.M.; SIQUEIRA, M.M.H.; SILVA, H.L.M.; RODRIGUES, G.C.; GUERRA,

A.F; ROCHA, O.C.; AMÁBILE, R.F.; ALBUQUERQUE, N.C.; SÓ E SILVA, M.; ALBRECHT, J.C.; DURÃES, F.O.M. **Fenotipagem para tolerância à seca visando o melhoramento do trigo no Cerrado**. Passo Fundo: Circular Técnica on-line, v. 1, 2006. 17 p.

RIBEIRO, G.; PIMENTE, A. J. B.; SOUZA, M. A. de; ROCHA, J. R. do A. S. de C.; FONSECA, W. B. da. Estresse por altas temperaturas em trigo: impacto no desenvolvimento e mecanismos de tolerância. **Revista Brasileira de Agrociência**. Pelotas, v.18 n. 2-4, p.133-142, 2012.

RIDGE, I.; **Plant physiology**, London: Hodder and Stoughton, 1991. 372 p.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 1703-1713, 2015.

ROHÁČEK K.; SOUKUPOVÁ J.; BARTÁK M. Chlorophyll fluorescence: a wonderful tool to study plant physiology and plant stress. In: SCHOEFS, B. **Plant cell compartments: selected topics**. Research Signpost, Kerala, India, 2008. p. 41-104.

RONG-HUA, L.; PEI-GUO, G.; BAUM, M.; GRANDO, S.; CECCARELLI, S. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. **Agricultural Sciences in China**, v. 5, n. 10, p. 751-757, 2006.

ROSSATO, O. B.; SANCHEZ, P. A.; GUERRA, S. P. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Sensores de reflectância e fluorescência na avaliação de teores de nitrogênio, produção de biomassa e produtividade do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.8, p.1133-1141, 2012.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3; 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973, v. 1, p. 309-317.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M., GALVÃO, L. S.; PEREIRA FILHO, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, n.2, p. 269-280, 2007.

SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminium toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. **Journal of Plant Physiology**, v.162, p.854-864, 2005.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 33, n.1, p. 1729-1737, 1998.

SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v.19, n.3, p.193-201, 2007.

SILVA, M. de A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G. da.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, 2007. p. 193-201.

SILVA, S. C. P. da; BAPTISTA, G. M. de M. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.21, n. 2, p. 354-370, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAKEITI, C. Y. **Trigo**. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2015. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000girlwnqt02wx5ok05vadr1qrnof0m.html>. Acesso em: 20 Jan. 2018.

TORRES-NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G. de; BRESSAN-SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v.104, n. 1, p.199-209, 2005.

TUCKER, C. J.; HOLBEN, B. N.; ELGIN, J. H. J. R; MCMURTREY, J. E., III. Relationship of spectral data to grain yield variation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, n. 5, p. 657-666, 1980.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, PRODUCTION, SUPPLY AND DISTRIBUTION. Foreign Agricultural Service. 2017. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data>>. Acesso em: 20 Fev. 2018.

VAN DER MEER, F. Imaging spectrometry for geological applications. In: MEYERS R. A. (Ed.). **The encyclopedia of analytical chemistry**, Sussex, John Wiley e Sons Ltd., p. 8601-8638.

VAN KOOTEN, O.; SNEL, J. F. H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. **Photosynthesis Research**, Hague, v. 25, n. 1, p. 47-50, 1990.

WILCOX, J. e MAKOWSKI, D. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. **Field Crops Research**. v. 156, 2014. p. 180-190.

WOOLLEY, J. T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v. 47, n. 5, p. 656–662, 1971.

WORLD WHEAT PRODUCTION. 2016. Disponível em: <<https://www.worldwheatproduction.com/>>. Acesso em: 20 Fev. 2018.

XAVIER, A. C.; RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A.; ALVARENGA, B. S.; FREITAS, J. G. de; SALOMON, M. V. Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 130-138, 2006.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant response to drought, acclimation, and stress tolerance. **Photosynthetica**, Prague, v.38, n.1, p.171-186, 2000.

ZHANG, M.; LV, D.; GE, P.; BIAN, Y.; CHEN, G.; ZHU, G.; LI, X.; YAN, Y. Phosphoproteome analysis reveals new drought response and defense mechanisms of seedling leaves in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Proteomics**, v. 109, n. 23, p. 290-308, 2014.

ZHU, J. K. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 53, n. 1, p. 247–273, 2002.

3. CAPÍTULO 1

FENOTIPAGEM PARA TOLERÂNCIA À SECA EM DIFERENTES GENÓTIPOS TRIGO, UTILIZANDO SENSORES ESPECTRAIS E FLUORESCÊNCIA

Guilherme Filgueiras Soares¹, Walter Ribeiro Quadros Junior³, Maria Lucrecia Gerosa Ramos, Lucas Felisberto Pereira^{1,2}, Beat Keller⁴, Cristiane Andrea de Lima¹, Onno Muller⁴, Uwe Rascher⁴

¹Universidade de Brasília- Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Campus Darcy Ribeiro – ICC Sul – 70910-900 – Brasília, DF - Brasil

²Instituto Federal Goiano – Faculdade de Agronomia, Campus de Posse- Fazenda Vereda do Canto, GO 453, Km 2,5, 73,900-900 – Posse, GO, Brasil

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Cerrados, Rodovia BR 020 Km18, 73310-970 - Planaltina - DF, Brasil

⁴Forschungszentrum, Jülich - Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich – Germany

RESUMO

Métodos práticos e eficientes que identificam e selecionam indivíduos tolerantes à seca, analisando seu desempenho fisiológico, são ferramentas importantes para o melhoramento de plantas. O objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de trigo para tolerância à seca e inserir sensores de fluorescência e hiperespectrais nesse processo, como uma ferramenta potencial para apoiar o programa de melhoramento. Com esse objetivo, na Embrapa Cerrados, foi desenvolvido um protocolo de fenotipagem de campo, utilizado na estação seca, quando é utilizada uma barra de irrigação linear utilizando uma bobina autopropulsada, que permite um gradiente de irrigação. Quatro genótipos (Brilhante, BRS404, PF080492 e PF020037) foram utilizados e submetidos a quatro regimes hídricos decrescentes (601mm, 501 mm, 301 mm e 184 mm, denominados: WR1, WR2, WR3 e WR4). Foram avaliadas variáveis biométricas (altura da planta e área foliar) e fisiológicas (teor de prolina e clorofila nas folhas, teor de clorofila, taxa líquida de assimilação de CO₂, condutância estomática, concentração de CO₂ nas cavidades subestomáticas e taxa de transpiração). Além disso, os dados foram obtidos com sensores de fluorescência ou LIFT (fluorescência transiente induzida por laser), F_v'/F_m' e sensores hiperespectrais usando-se os índices NDVI e PRI. Após a colheita, foram determinados o comprimento do pedúnculo, comprimento e número de espigas, peso do hectolitro, peso de mil grãos e produtividade. A correlação entre os dados obtidos pelos sensores (NDVI, PRI e LIFT) e as avaliações fisiológicas e de rendimento das culturas validaram o uso de sensores como ferramenta na seleção de genótipos de trigo tolerantes à seca, utilizando-se uma metodologia não invasiva. Brilhante, BRS404, PF080492 e PF020037 apresentaram comportamento semelhante nos regimes hídricos mais severos, WR3 e WR4 para quase todas as variáveis estudadas. WR1 (601 mm) e WR2 (501 mm) apresentaram comportamento semelhante em quase todas as variáveis. Em WR3 (301 mm) e WR4 (184 mm) não houve diferença significativa na produtividade dos genótipos.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L., sensoriamento remoto, déficit hídrico, Cerrado.

ABSTRACT

Practical and efficient methods that provide identification and selection of drought tolerant individuals by analyzing their physiological performance are important tools for plant breeding. The objective of this work was to characterize wheat genotypes for drought tolerance and to insert fluorescence and hyperspectral sensors in this process, as a potential tool to support the breeding program. With this purpose, a field-based phenotyping protocol was developed at Embrapa Cerrados, used in the dry season when a linear irrigation bar using a self-propelled spool is used, which enables an irrigation gradient. Four genotypes (Brilhante, BRS404, PF080492 and PF020037) were used and submitted to four decreasing water regimes (601mm, 501 mm, 301 mm and 184 mm, named: WR1, WR2, WR3 e WR4).. Biometric (plant height and leaf area) and physiological parameters (proline and chlorophyll content, net rate of CO₂ assimilation, stomatal conductance, CO₂ concentration in the substomatic cavities and transpiration rate) were evaluated. In addition, data were obtained with fluorescence or LIFT (laser-induced transient fluorescence) sensors, Fv'/Fm', and hyperspectral sensors using the NDVI and PRI indices. After harvesting, the length of the last node, length and number of ears, hectoliter weight (HW), one thousand grain weight and yield were determined. The correlation between data obtained by sensors (NDVI, PRI and LIFT) and physiological and crop yield evaluations validated the use of sensors as a tool in the selection of drought tolerant wheat genotypes using a non-invasive methodology. Brilhante, BRS404, PF080492 and PF020037 showed similar behavior in the most severe water regimes, WR3 and WR4 for almost all studied variables. WR1 (601 mm) and WR2 (501 mm) showed similar behavior in almost all variables. In WR3 (301 mm) and WR4 (184 mm) there was no significant difference in yield between genotypes.

Key words: *Triticum aestivum*, remote sensing, water deficit, Cerrado.

INTRODUÇÃO

Os fortes impactos na restrição do desenvolvimento e produção agrícola, causados pela seca fazem com que esse tema seja um dos estresses abióticos mais estudados atualmente (ZHANG et al., 2014). No entanto, nas plantas, a tolerância ao déficit hídrico é uma característica complexa, pois muitos genes com efeitos diferentes (BERNIER et al., 2008) a controlam. Vários mecanismos específicos em resposta a ambientes desfavoráveis foram desenvolvidos por espécies vegetais ao longo de seu processo evolutivo, como inibição do crescimento, regulação osmótica e desintoxicação (HARB et al., 2010; ZHU, 2002).

A restrição hídrica é responsável por graves disfunções morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas, causando várias alterações no metabolismo celular (MUNNS, 2011; FILIPPOU et al., 2014). As alterações morfológicas ocorrem indiretamente devido a uma série de alterações fisiológicas, como o ajuste osmótico, que consiste no aumento rápido e eficaz da concentração de soluto (MARIJUAN e BOSCH, 2013), fechamento estomático (PIRASTEH-ANOSHEH et al., 2016) e redução da fotossíntese (LIU e LI, 2005).

A resposta das plantas às condições de seca varia de espécie para espécie, dependendo da fase de crescimento da planta e de outros fatores ambientais (DEMIREVSKA et al., 2009), principalmente a temperatura (FAHAD et al., 2017). Para o trigo, variações consideráveis na tolerância ao estresse hídrico foram identificadas entre cultivares, acessos e espécies relacionadas ao trigo, bem como variações no efeito do estresse hídrico sobre atributos fisiológicos e em diferentes regiões (RIBEIRO JÚNIOR et al., 2006, LIMA et al., 2015 e LIMA et al., 2015a).

Assim, a identificação de características fisiológicas responsáveis pela tolerância à seca deve ser considerada no programa de melhoramento, uma vez que a produtividade e a

resistência à seca são controladas em locus genético independente (MIRANSARI et al., 2013). Este autor afirma que métodos práticos e eficientes que permitem a identificação de indivíduos resistentes, analisando sua atividade fisiológica sob déficit hídrico, tornam-se ferramentas valiosas para o melhoramento de plantas.

Com base nisso, nota-se que o desenvolvimento e aprimoramento de protocolos para avaliação da tolerância à seca e seu uso na fenotipagem vegetal podem proporcionar uma melhor compreensão das características relacionadas a esse fator. Com esse conhecimento, podem ser estabelecidos critérios de seleção e estratégias para o uso dessas fontes de resistência em programas de melhoramento de plantas. Além disso, a seleção eficaz poderia possibilitar o entendimento das complexas relações genotípicas, ambientais e fenotípicas, auxiliando os programas de melhoramento.

O uso de sensores pode tornar a seleção de genótipos tolerantes à seca mais eficiente e precisa. Além disso, pode ser uma opção para recuperar indivíduos preciosos em gerações segregantes, o que não é o caso da fenotipagem destrutiva. Também permite fenotipar um grande número de indivíduos através de análises rápidas e automatizadas com rendimentos muito altos, o que permite a expansão da escala e a faixa de avaliação de uma nova ferramenta fisiológica para o melhoramento de plantas que ainda pode ser usada para a detecção através de sensoriamento remoto (KOLBER et al., 2005).

Novas técnicas que avaliam a fluorescência da clorofila *a*, como a fluorescência transiente induzida por laser (LIFT), estão surgindo para proporcionar ao melhoramento de plantas análises seguras e eficientes na seleção de plantas (PIERUSCHKA et al., 2010). Essa técnica permite uma melhor compreensão dos processos fotoquímicos e não fotoquímicos que ocorrem na membrana tilacóide, além de permitir o estudo de características relacionadas à absorção e transferência de energia luminosa na cadeia de transporte de elétrons (KRAUSE e WEIS, 1991).

Os índices espectrais também forneceram informações úteis para monitorar diferentes ambientes da superfície terrestre (SILVA e BAPTISTA, 2015) e tem sido utilizado cada vez mais para avaliar a fisiologia das plantas. Entre os vários índices espectrais, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) fornece informações sobre o status da cobertura vegetal; mudanças no uso e padrão de cobertura da terra, densidade foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área, teor de água nas folhas e deficiência de minerais (LIMA et al., 2013; SHIMABUKURO et al., 1998; MELO et al., 2011; JENSEN, 2007; LIANG, 2005) e estes podem ser detectados pelos padrões de NDVI. O índice de reflectância fotoquímico (PRI), outro índice de reflectância, tem sido amplamente utilizado para estimar a eficiência da luz, o que reflete o desempenho fotossintético das plantas (GARBUSKY et al., 2011).

Nesse contexto, pode ser possível diferenciar genótipos resistentes e sensíveis ao estresse, através da avaliação da fluorescência da clorofila *a*, NDVI e PRI ao longo do ciclo da cultura. Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de trigo para tolerância à seca e avaliar a eficiência de sensores de fluorescência e hiperespectrais, como uma ferramenta potencial para apoiar o programa de melhoramento.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em sistema plantio direto, entre junho e setembro de 2016, na área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina DF, Brasil, cujas coordenadas geográficas são 15°35'30" S e 47°42'30" W e altitude de 1000 m. O clima predominante na região é o tipo Awa, típico de savanas com duas estações bem definidas: uma seca e fria (outono e inverno) e outra quente e úmida (primavera e verão), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013).

O solo é classificado como Latossolo típico (SANTOS et al., 2018). Antes da instalação do experimento, a área foi cultivada com trigo no inverno por dez anos, com as mesmas cultivares selecionadas para o presente estudo. A caracterização química do solo na camada de 0-20 cm, amostrada antes da instalação do experimento, apresentou os seguintes resultados: pH (H₂O) = 6,36; M.O. = 21,6 g dm⁻³; P (Melich⁻¹) = 7,23 mg dm⁻³; K, Ca, Mg, H+Al e CTC: 0,35; 3,01; 1,72; 3,47 e 8,55 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, composto por 16 tratamentos, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas foram compostas por quatro genótipos de trigo (Brilhante, BRS404, PF080492 e PF020037). As subparcelas foram os regimes hídricos (WR) (601 mm, 501 mm, 301 mm e 184 mm, denominados WR1, WR2, WR3 e WR4, respectivamente).

As características dos genótipos são: Brilhante, material biótipo de sequeiro tolerante à seca; BRS404, cultivar de trigo lançado em 2015, adequado para cultivo de sequeiro no Brasil Central; PF080492 é classificado como material de sequeiro no Sul do Brasil, mas na região Centro-Oeste demonstrou adequação para sequeiro; PF020037, esta linha é desenvolvida para sequeiro e tem como característica relevante a presença de cera nas folhas e caule, mecanismo

natural de tolerância à seca (RIBEIRO JÚNIOR et al., 2006), embora tenha tendência ao acamamento.

Os genótipos de trigo foram semeados em 01 de junho de 2016, com semeadora de parcelas. Foram plantadas 8 linhas, com espaçamento entre linhas 0,17 m. A quantidade de sementes foi calculada para se obter 90 plantas por metro, que foi corrigido de acordo com o teste de germinação realizado previamente.

A irrigação foi homogênea em todos os genótipos até 30 dias após a emergência. Após esse período de estabelecimento da cultura, foi adaptada a metodologia “line source” (HANKS et al., 1976), que foi modificada pela introdução de uma barra de irrigação, utilizando-se aspersores com diferentes lâminas de água. A sobreposição entre os diferentes aspersores promoveu um gradiente de água da área central da barra (considerada a lâmina ideal) em direção à borda do experimento, o que permitiu criar os regimes hídricos. Cada unidade experimental representou uma área de 1,02 m².

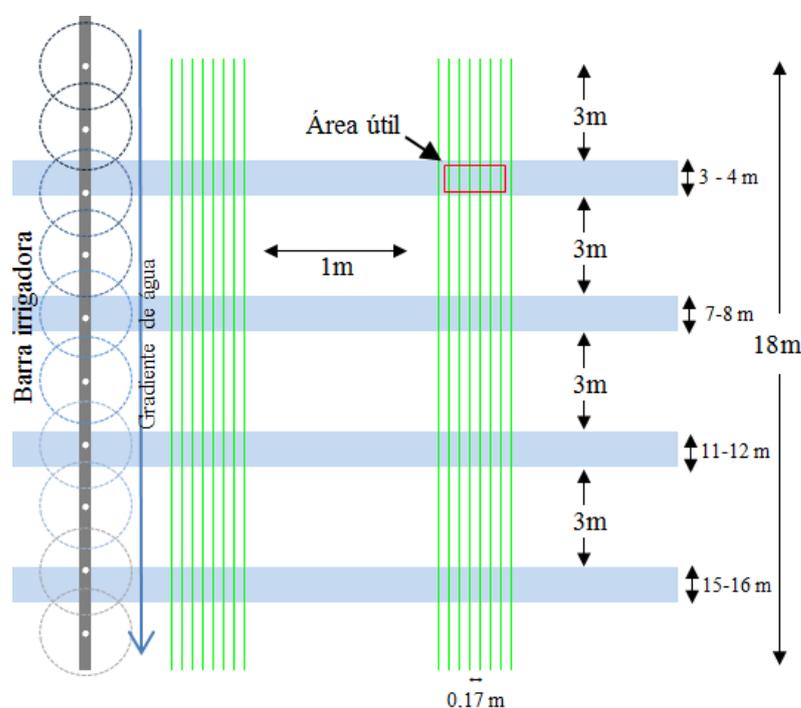


Figura 1. Representação esquemática da área experimental com o cultivo de genótipos de trigo sob quatro regimes hídricos (3-4m, 7-8 m, 11-12 m e 15-16 m, indicam os WR1, WR2, WR3 e WR 4, respectivamente e, conseqüentemente, as subparcelas da área experimental).

Os regimes hídricos foram aplicados com uma barra de irrigação por aspersão modelo 36/42 (IrrigaBrasil, Pinhais, PR, Brasil) com 20 m de largura de cada lado, conectada ao carretel TurboMaq 75 / GB com velocidade ajustável.

Durante a fase de irrigação uniforme, foram aplicados 134 mm de água, entre 1 a 30 de junho de 2016 (incluindo chuvas de 7,5 mm). Os regimes hídricos acumulados durante os 105 dias do ciclo do trigo foram de 601 mm, 501 mm, 301 mm e 184 mm, correspondendo a 3, 7, 11 e 15 metros a partir do início da barra, respectivamente (Figura 1). O maior regime hídrico foi realizado de acordo com o programa de Monitoramento de Irrigação no Cerrado para trigo (EMBRAPA, 2016).

Em 6 de agosto de 2016, no florescimento pleno dos genótipos de trigo, foram realizadas as avaliações morfofisiológicas na área útil das subparcelas, considerada 1 metro em cada regime hídrico e nas 4 linhas centrais. A altura e a área foliar das plantas foram avaliadas em 10 plantas por tratamento. A área foliar da bandeira (FLA) foi medida pelo medidor fotoelétrico LAI-2000, LICOR.. As análises fisiológicas foram: concentração de prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$) na folha de bandeira (Pro), pelo método de Bates et al. (1973) e parâmetros de troca gasosa foram avaliados com um sistema portátil de troca gasosa de fluxo aberto (IRGA - LAI-6400XT; LI-COR Inc., Lincoln, NE), entre 9:00 e 13:00 h, sob irradiância de $1200 \mu\text{mol de f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e uma concentração interna de CO_2 de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Foram avaliadas a taxa líquida de assimilação de CO_2 (A), a condutância estomática (gs), a concentração de CO_2 nas cavidades subestomáticas (Ci) e a taxa de transpiração (E).

O rendimento quântico máximo do fotossistema II (Fv/Fm) foi calculado usando a fórmula $Fv/Fm = (Fm-F0)/Fm$ de acordo com Maxwell e Johnson (2000). O rendimento quântico efetivo do fotossistema II é dado por, $Fv'/Fm' = (Fm'-F0')/Fm'$, de acordo com Genty et al. (1989). A determinação da fluorescência máxima (Fm) e da fluorescência basal (F0)

foram avaliadas com a folha adaptada ao escuro, e os mesmos parâmetros foram coletados com a folha adaptada à luz, a saber, F_m' e F_0' . Essas variáveis foram obtidas no IRGA (analisador de gás infravermelho).

Uma plataforma terrestre com rodas contendo um protótipo produzido nos Estados Unidos da América (EUA) foi usada com dois sensores: fluorescência induzida por luz (LIFT) e hiperespectral. Deste protótipo foram obtidos os dados de $F_v'/F_m'_L$, Índice de Refletância Fotoquímico (PRI) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Com o sensor de fluorescência LIFT, o rendimento quântico efetivo do Fotossistema II (F_v'/F_m') foi obtido através da mesma fórmula mostrada para F_v'/F_m' obtida pelo IRGA.

O NDVI foi calculado como a razão e a normalização dos índices, assim determinados pela diferença entre as duas bandas de vermelho e infravermelho próximo, divididas pela soma dessas bandas. IV corresponde ao fluxo radiante no infravermelho próximo (750 nm) e V ao fluxo radiante vermelho refletido na região visível (550 nm).

$$NDVI = \left(\frac{IV - V}{IV + V} \right) \times 100$$

Para o cálculo do PRI, a refletância espectral na faixa visível foi usada nos comprimentos de onda 531 nm e 570 nm, R_1 e R_2 , respectivamente.

$$PRI = \frac{(R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)}$$

O comprimento do pedúnculo (PL) foi determinado com uma fita métrica graduada em cm, em 10 plantas por tratamento e foi avaliado na colheita dos genótipos.

O experimento foi colhido manualmente em 13 de setembro de 2016. Neste período, os componentes de rendimento foram determinados: comprimento da espiga (EL), número de espigas m^{-2} ($NE m^{-2}$), peso do hectolitro (HW), peso dos mil grãos (TGW) e rendimento. O EL foi determinado com uma régua graduada em centímetros e 10 espigas foram avaliadas

aleatoriamente para cada unidade experimental. O NE m^{-2} foi determinado por contagem direta das espigas colhidas, excluindo a bordadura de cada parcela e extrapolado para m^{-2} . HW, TGW e a produtividade de grãos foram avaliados, de acordo com BRASIL (2009).

Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade pelo teste F e a comparação de médias foi feita pelo teste de Tukey. As fontes de variação foram genótipos de trigo (parcelas), regimes hídricos (subparcelas) e suas interações. Para os dados sem interação significativa foram apresentados os efeitos simples de genótipos de trigo ou regimes de água.

O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o programa SAS Proc Mixed, através do método de máxima verossimilhança restrita (reml). Os dados também foram submetidos ao teste de correlação entre todas as variáveis, utilizando o software estatístico R. A intensidade de correlação foi considerada muito forte ($r + 0,91$ a $+ 1,00$), forte ($r + 0,71$ a $+ 0,90$), média ($r + 0,51$ a $+ 0,70$) e fraca ($r + 0,31$ a $0,50$), segundo Guerra e Livera (1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as variáveis apresentaram resíduos normais pelo teste de Shapiro-Wilk, com significância de 5%. A área foliar, o comprimento do pedúnculo, o peso do hectolitro, o peso de mil grãos e a produtividade apresentaram interação entre genótipos e regimes hídricos com 5% de probabilidade (Tabela 1).

Para a área foliar da folha bandeira (FLA), na interação entre genótipos e regime hídrico, o PF020037 apresentou valores mais altos em WR1 e WR2 (21,6 - 23,6 cm², respectivamente), enquanto que os demais genótipos foram estatisticamente semelhantes (Tabela 1). Os tratamentos mais estressantes (WR3 e WR4) apresentaram FLA semelhante. A FLA é considerada uma fonte primária de fotoassimilados para o enchimento de grãos devido à curta distância entre a espiga e a folha da bandeira (GUENDOOUZ et al., 2016). Assim, a área da folha da bandeira pode ser considerada um indicador do potencial de produção de grãos, pois tem papel predominante no enchimento de grãos (YANG et al., 2016). Entretanto, a maior FLA obtida no PF020037 não promoveu aumento da produtividade de grãos (Tabela 1), demonstrando que esse genótipo teve um investimento excessivo na área foliar verde, quando submetido a 100 e 83% de reposição hídrica da evapotranspiração. Nos regimes hídricos WR3 e WR4, todos os genótipos apresentaram tendência semelhante, com FLA entre 6,7 3 9 cm².

No desdobramento do regime hídrico dentro de cada genótipo para FLA, o tratamento mais estressante não diferenciou os genótipos (Tabela 1). O PF020037 pareceu ser mais sensível à seca, comparando WR3 (12,6 cm²) com WR2 (23,6 cm²) e WR1 (21,6 cm²). Além disso, para todos os genótipos, o FLA foi reduzido em 50% em relação ao WR1. A redução da FLA é uma consequência de vários distúrbios fisiológicos e morfológicos na planta causados

pela deficiência de água, o que resulta em redução da fotossíntese, afetando negativamente o crescimento, desenvolvimento e produtividade de grãos (FARIAS, 2005). Guendouz et al. (2016) obtiveram redução significativa da FLA sob estresse hídrico. Segundo esses autores, o déficit hídrico diminui a divisão celular, o que reduz a pressão de turgescência e, conseqüentemente, a expansão celular, resultando em menor área foliar.

A FLA apresentou correlação positiva com a produtividade, com índice de 0,46 ($p < 0,01$) (Tabela 3). Era esperado um maior índice de correlação entre essas variáveis, como o encontrado por Faisal et al. (2014), que obteve um índice de 0,98 entre a área foliar da bandeira e a produtividade do trigo. Plantas com área foliar maior apresentam área fotossinteticamente ativa maior, que transfere maior quantidade de fotoassimilados para o enchimento de grãos e aumenta a produtividade das culturas (YANG et al., 2016). Assim, a fraca relação entre a FLA e a produtividade neste trabalho pode ser explicada devido à alta dependência dessa relação às condições ambientais (TAJAMMAL et al., 2003).

Para o comprimento do pedúnculo (PL), no desdobramento da interação dos genótipos dentro de cada regime hídrico, nos WR1 e WR2, apenas PF020037 apresentou menor PL. Para WR3 e WR4, todos os genótipos de trigo apresentaram PL semelhante, entre 23,3 e 28,1, e 16,9 e 20,6, respectivamente (Tabela 1). O PL possui alta herdabilidade genética (REHMAN et al. 2015), no entanto, os resultados encontrados no presente estudo demonstram que essa característica também pode ser fortemente influenciada pelas condições ambientais, especialmente sob estresse hídrico. Isso ocorre porque em WR1 e WR2, o comportamento distinto entre os genótipos pode resultar da variabilidade genética entre genótipos. Os genótipos submetidos ao estresse hídrico (WR3 e WR4) promoveram considerável redução no seu comprimento e resposta semelhante foi obtida entre os genótipos (Tabela 1).

Em relação aos regimes hídricos dentro de cada genótipo para PL, em geral, todos os genótipos apresentaram valores mais baixos em WR4 (Tabela 1). No entanto, Brillhante, BRS404 e PF080492 apresentaram uma redução significativa de PL em torno de 50% de WR1 para WR4, enquanto o PF020037 a redução para PL foi de 20%.

As respostas do PL foram semelhantes às encontradas para a produtividade (Tabela 1) e a correlação entre essas variáveis foi de 0,83 ($p < 0,01$). Resultados semelhantes foram obtidos por Modarresi et al. (2010) com estresse térmico no trigo; os autores obtiveram uma correlação de 0,85 entre PL e produtividade. O PL é uma variável importante para o estabelecimento da produção de grãos, uma vez que as reservas do caule são uma fonte essencial de carboidratos para o preenchimento completo dos grãos, principalmente em condições de estresse hídrico, quando sua remobilização é aumentada (MOHAMMADI-BAZARGANI, et al., 2012).

Mahpara et al. (2015) afirmam que o PL é um indicador útil da capacidade de produção de trigo em ambientes secos, porque genótipos com caules mais longos possuem mais carboidratos armazenados para transferir para as sementes. Além disso, no trigo, existem vários órgãos não foliares que são fotossinteticamente ativos, e um deles é a parte exposta do caule, que pode assimilar o CO₂ quando exposto à luz (WANG et al., 2001). De acordo com Kong et al. (2010), o pedúnculo exposto é um órgão fotossinteticamente ativo e, portanto, tem uma contribuição importante para o crescimento de grãos, principalmente durante os estágios finais do enchimento de grãos.

A análise dos efeitos simples da altura da planta (HP) foi realizada porque a interação entre genótipos de trigo e os regimes hídricos não foi significativa (Tabela 2). Era esperada a diferença de altura entre os genótipos, pois essa é uma característica intrínseca de cada genótipo e pode estar ligada ao acamamento. Em relação ao fator regime hídrico, a WR1 e a WR2 foram estatisticamente semelhantes (0,97 e 0,99, respectivamente), e foram superiores a

WR3 (0,84) e WR4 (0,63), respectivamente (Figura 1A). A altura das plantas é uma característica de alta herdabilidade genética, no entanto, pode ser influenciada pelo meio ambiente, como o estresse hídrico (ARYA et al., 2018). A água é um elemento-chave na divisão celular, alongamento e diferenciação e, sob déficit hídrico, as células crescem lentamente, resultando em plantas malformadas e atrofiadas e seu ciclo fenológico é alterado (HUSSAIN et al., 2008; SARTO et al., 2017).

A PH apresentou correlação positiva de 0,54 ($p < 0,01$) com a produtividade (Tabela 3). No trigo semi-anão, vários estudos apresentaram correlação positiva entre essas variáveis, e as cultivares mais altas apresentaram maior produtividade (HEYNE e CAMPBELL, 1971; JOPPA, 1973; SALOMON et al., 2003; CAMARGO et al., 2003; NASRI et al., 2014).

A concentração de prolina (PRO) mostrou interação significativa entre os fatores genótipos e regimes hídricos. Ao desdobrar a interação dos genótipos dentro de cada regime hídrico, em WR1 todos os genótipos apresentaram valores semelhantes, entre 0,72 e 1,02 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de peso fresco (Tabela 1), indicando que genótipos de trigo sob condições bem irrigadas não alteram o conteúdo de prolina nas folhas. No WR2, os maiores valores foram encontrados em Brilhante (7,4 $\mu\text{mol/g}$ de peso fresco), enquanto os demais genótipos apresentaram valores semelhantes (entre 0,97 e 1,89 $\mu\text{mol/g}$ de peso fresco) (Tabela 1). Essa resposta mostra uma rápida reação do Brilhante à condição de estresse hídrico, pois aumenta significativamente a concentração de prolina, com uma pequena redução da água aplicada (100 mm).

Os genótipos de trigo que acumulam concentrações mais elevadas de prolina são mais tolerantes ao estresse hídrico (YANG et al., 2000), devido à maior capacidade de manter o potencial hídrico foliar (NOWSHERWAN et al., 2017). O aumento da concentração de moléculas compatíveis, como a prolina, mantém a turgidez celular, uma vez que o aumento da pressão osmótica no interior das células mantém o fluxo de água na planta, permitindo que

seus processos fisiológicos continuem, sob condições de baixo potencial hídrico do solo (MARIJUAN e BOSCH, 2013).

No WR3, todos os genótipos mostraram aumentos significativos nas concentrações de prolina (Tabela 1). No entanto, novamente a Brilhante apresentou os maiores valores desse osmorregulador (10 $\mu\text{mol/g}$ de peso fresco). PF020037 e PF080492 apresentaram as menores concentrações de prolina (3,67 e 3,32 $\mu\text{mol/g}$ de peso fresco, respectivamente). Este resultado demonstra que esses genótipos são mais sensíveis ao déficit moderado de água.

Sob estresse hídrico severo (WR4), os valores mais baixos foram encontrados no PF080492 (2,60 $\mu\text{mol/g}$ de peso fresco), e os demais apresentaram valores semelhantes. Este genótipo mostrou baixas concentrações deste aminoácido desde WR2 (0,97 $\mu\text{mol/g}$ de peso fresco) e, posteriormente, aumentou ligeiramente a concentração de prolina à medida que o estresse hídrico se intensificou. Essa resposta demonstra que esse genótipo, provavelmente, tem baixa adaptação ao déficit hídrico, uma vez que o aumento da concentração de prolina desempenha um papel importante no sistema antioxidante protetor e reduz os danos oxidativos, promovendo maior tolerância ao estresse hídrico em genótipos de trigo (VENDRUSCOLO et al., 2007).

Em relação aos regimes hídricos dentro de cada genótipo, em todos os genótipos, os menores valores de prolina foram obtidos em WR1 e WR2 (Tabela 1). Isso ocorre porque o aumento na concentração desse aminoácido ocorre apenas sob limitação da água para mitigar os efeitos deletérios sobre os processos fisiológicos (FILIPPOU et al., 2014). Assim, o aumento na concentração de prolina foliar só foi verificado à medida que a intensidade do estresse hídrico foi aumentada em WR3 e WR4. A prolina é um soluto com alta sensibilidade de resposta à condição de estresse hídrico e, portanto, a determinação desse aminoácido nas folhas é importante para a seleção de plantas tolerantes ao estresse ambiental, principalmente o déficit hídrico (ASHRAF et al., 2011)

Entretanto, o acúmulo de prolina nos tecidos foliares, à medida que o estresse hídrico foi intensificado, não teve efeito positivo na produtividade de trigo. Houve uma correlação negativa obtida entre os níveis de prolina e a produtividade ($r = -0,41^{**}$, $P < 0,01$) (Tabela 3), indicando que as plantas de trigo expostas ao déficit hídrico aumentam o acúmulo de prolina, mas há uma redução significativa na produtividade (Tabela 1). Esses resultados estão de acordo com uma revisão de literatura feita por Serraj e Sinclair (2002); os autores encontraram uma fraca relação entre a produtividade das culturas e um aumento da concentração de osmólitos. Além disso, esses autores afirmam que a maioria dos artigos publicados não indica efeito ou influência negativa do aumento da concentração de osmólitos na produtividade das culturas. Assim, os dados obtidos neste trabalho sustentam a hipótese de que a prolina desempenha um papel importante na osmoproteção, no entanto, ela não reflete nos aumentos na produção de trigo sob estresse hídrico.

As variáveis de trocas gasosas apresentaram interação significativa entre os genótipos e os regimes hídricos (Tabela 1), exceto a taxa líquida de assimilação de CO_2 (A) (Tabela 2). Para A , o Brilhante apresentou valores mais altos ($21 \mu\text{CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) que PF020037 ($18.4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e semelhante aos genótipos BRS404 ($19.2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e PF080492 ($19.1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Tabela 2). Essa tendência diferente de fotossíntese entre genótipos já era esperada, uma vez que a variação natural da capacidade fotossintética entre os genótipos de trigo é frequentemente relatada na literatura (HIKOSAKA, 2009; CHYTYKET al., 2011; WU e BAO, 2011; LAWSON et al., 2012; SADRAS et al., 2012; DRIEVER et al., 2014 e ABID et al., 2016).

Sikder et al. (2015) também relataram alta variação entre seis genótipos de trigo na taxa líquida de assimilação de CO_2 . Segundo esses autores, a variação encontrada deveu-se às linhas de derivação, mostrando que, mesmo com as evidências de que a domesticação do trigo

resultou em materiais com taxas fotossintéticas mais baixas, existe diversidade genética para essa característica e é possível aumentar a capacidade fotossintética de cultivares de trigo.

WR1 e WR2 apresentaram maiores taxa líquida de assimilação de CO₂ (24,4 e 23,6 μCO₂ m⁻²s⁻¹, respectivamente) e foram estatisticamente diferentes de WR3 (17,3 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) e WR4 (12,5 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) (Figura 1B). Essas reduções podem ser atribuídas à menor taxa fotossintética devido aos danos no metabolismo fotossintético causados pelo déficit hídrico (ENDRES et al., 2010), principalmente devido à produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), que podem danificar os componentes fotossintéticos da cadeia de transporte de elétrons e conseqüentemente reduzir a capacidade fotossintética das plantas (LAWSON et al., 2012).

Na interação de desdobramento de *g_s*, *C_i* e *E*, todos os genótipos apresentaram valores semelhantes em WR1, WR2 e WR4, exceto *g_s* em WR1 (Tabela 1). No WR3, com redução de 300 mm de água aplicada em relação à WR1, em geral, Brilhante apresentou os maiores valores (0,24 mol m⁻² s⁻¹, 249,1 μmol m⁻² s⁻¹ e 5,4 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ para *g_s*, *C_i* e *E*, respectivamente) e PF020037 apresentaram os menores valores de *g_s*, *C_i* e *E* (0,14, 198,4 e 3,0, respectivamente). Essa mesma resposta foi verificada para *A* para todos os regimes hídricos (Tabela 2). Assim, o maior valor de *A* encontrado no Brilhante comparado ao PF020037 no WR1, WR2 e WR4 está possivelmente relacionado à maior eficiência na assimilação de CO₂; O Brilhante pode manter taxas de assimilação líquida de CO₂ mais altas do que PF020037, mesmo com valores semelhantes de *g_s*, *C_i* e *E*. Os valores mais altos de *A* encontrados no WR3 do Brilhante em relação a PF020037 são conseqüência de maiores valores de *g_s*, *C_i* e *E* obtidos pelo Brilhante em relação ao PF020037 (Tabela 1).

Para essas três variáveis mencionadas acima, em geral, os genótipos de trigo apresentaram tendência semelhante em função dos regimes hídricos, e WR1 e WR2 apresentaram valores semelhantes, maiores que WR3 e WR4, respectivamente (Tabela 1).

Esses resultados foram semelhantes ao efeito simples obtido em A (Figura 1B). No entanto, o BRS404 para g_s e PF020037 para g_s e E, obtiveram valores mais altos em WR1 do que em WR2 (Tabela 2). No entanto, a diminuição da condutância estomática sob estresse hídrico leve, como ocorreu no PF020037 ($0,40 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e no BRS404 ($0,46 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) no WR2 (redução de 100 mm na água aplicada em comparação ao WR1), não foi suficiente para afetar significativamente a taxa de assimilação de CO_2 (Figura 1B). Resultados semelhantes também foram descrita por Sasaki e Machado (1999) no trigo, ao estudar o efeito da variação do conteúdo de água no solo nas trocas gasosas e nas relações hídricas.

BRS404 e PF020037 também obtiveram g_s inferiores, Ci e E na WR3 e foram estatisticamente semelhantes ao WR4 (Tabela 1). Essa resposta demonstra maior sensibilidade à condição de estresse hídrico moderado (WR3), pois eles reduziram consideravelmente os valores dessas variáveis nesse regime hídrico. Assim, esses genótipos demonstram baixa capacidade de manter a taxa fotossintética sob condições de estresse hídrico, fato de extrema importância para a manutenção do crescimento e da produtividade do trigo.

Em condições de deficiência hídrica, as plantas fecham os estômatos e reduzem a condutância estomática, a fim de restringir a perda de água, reduzindo a transpiração. Como consequência, ocorre uma menor absorção de CO_2 , o que consequentemente reduz a taxa fotossintética e compromete o acúmulo de fotoassimilados nas plantas (OUYANG et al., 2017). O potencial máximo da capacidade fotossintética raramente é alcançado em campo, mesmo em condições favoráveis. Isso ocorre porque a limitação estomática devido à disponibilidade limitada de água no solo e a um atraso no movimento estomático em relação às mudanças na fotossíntese sob condições ambientais flutuantes (LAWSON et al., 2012).

A taxa cumulativa de fotossíntese durante o crescimento e desenvolvimento das plantas é determinante para a produtividade das culturas (LAWSON et al., 2012). Neste trabalho, foi

obtida uma correlação positiva entre as variáveis de troca gasosa A , g_s , C_i e E , com a produtividade com índices de 0,65, 0,75, 0,80, 0,76, respectivamente ($p < 0,01$) (Tabela 3).

O aumento do potencial fotossintético resulta em aumentos significativos na produtividade das culturas (LEFEBVRE et al., 2005; PARRY et al., 2011). Portanto, em condições de seca, a redução no crescimento e no rendimento das plantas geralmente está relacionada à redução da atividade fotossintética (PEIXOTO et al., 2002). Assim, a avaliação das trocas gasosas é uma ferramenta muito útil no diagnóstico da integridade do aparato fotossintético, considerando que são técnicas precisas e não destrutivas (TORRES NETTO et al., 2005) e fortemente correlacionadas com a produtividade.

O rendimento quântico máximo do fotossistema II (F_v/F_m) e o rendimento quântico efetivo do fotossistema II (F_v'/F_m') foram semelhantes para todos os genótipos de trigo dentro de cada WR, exceto para F_v'/F_m' no WR3 (Tabela 1). Essa resposta diferente entre genótipos em WR3 para F_v'/F_m' demonstra uma inibição mais intensa da atividade fotossintética no fotossistema II (PSII) para PF020037 (0,47) em comparação com Brilhante (0,57) (Tabela 1). Esse resultado está de acordo com os encontrados nas variáveis de troca gasosa: A , g_s , C_i e E (Tabela 1), demonstrando que o F_v'/F_m' apresenta alta sensibilidade na previsão da integridade da maquinaria fotossintética de plantas de trigo. Portanto, materiais de trigo mais adaptados às condições de estresse hídrico podem ser selecionados com a determinação de F_v'/F_m' , uma vez que traz estimativas da eficiência quântica da fotossíntese de maneira mais prática e rápida.

Para o efeito de WRs dentro de cada genótipo, em geral, WR1 foi estatisticamente maior que WR4 em todos os genótipos de trigo para F_v'/F_m' e F_v/F_m (Tabela 1). Essa resposta sugere uma maior fotoinibição em plantas sob estresse hídrico severo, uma vez que as reduções nos rendimentos quânticos da fotossíntese indicam danos significativos ao PSII (HUNT, 2003).

Björkman e Demmig (1987) determinaram os valores da razão F_v/F_m em um grande número de espécies de plantas vasculares e descobriram que folhas saudáveis de várias espécies tinham valores de F_v/F_m em torno de $0,832 \pm 0,004$. Segundo Krause e Weis (1991) valores abaixo de 0,80 ocorre fotoinibição crônica da fotossíntese. Assim, em geral, WR1, WR2 e WR3 mantiveram o F_v/F_m próximo a esse valor ótimo (0,83), ao contrário do F_v/F_m no WR4, onde as médias foram inferiores (0,80).

A exceção foi PF020037, que apresentou valores estatisticamente semelhantes entre todos os regimes hídricos em F_v/F_m (Tabela 1). Essa conservação dos valores de F_v/F_m em função das WRs aplicados, provavelmente ocorreu devido às características do genótipo, indicando que a maior parte da radiação talvez estivesse sendo usada na fase fotoquímica da fotossíntese e, portanto, não houve comprometimento do PSII devido ao estresse hídrico. De acordo com Silva et al. (2007), a capacidade de manter valores similares de F_v/F_m sob estresse hídrico pode indicar alta eficiência no uso de radiação, possivelmente por reações de assimilação de carbono.

No entanto, F_v/F_m , que representa a eficiência da captura de energia pelos centros abertos do PSII (HUNT, 2003) foi menos sensível que F_v'/F_m' para a avaliação da capacidade fotossintética. Isso ocorre porque F_v'/F_m' quantifica a eficiência operacional do PSII e, de acordo com Genty et al. (1989) é mais eficiente para determinar as variações no rendimento quântico da fotossíntese em comparação com a razão F_v/F_m . Essa sensibilidade mais alta de F_v'/F_m' em relação ao F_v/F_m para detectar alterações na capacidade fotossintética pode ser confirmada nas correlações entre os parâmetros de troca gasosa. Os valores de F_v'/F_m' para todos os índices de correlação foram fortes para A , g_s , C_i e E (0,79, 0,76, 0,80, 0,77, respectivamente), enquanto as correlações F_v/F_m com essas variáveis apresentaram valores mais baixos (0,63, 0,53, 0,53 e 0,54, respectivamente).

A fluorescência da clorofila tem sido amplamente utilizada para estudar a capacidade fotossintética das plantas. Essa técnica, além de ser um método não destrutivo, permite avaliar qualitativa e quantitativamente a absorção e utilização da energia luminosa pelo aparato fotossintético (OLIOSI et al., 2017). Kalaji et al. (2016) também destacaram a fluorescência da clorofila *a* como um método eficaz para avaliar o desempenho fotossintético, fornecendo informações detalhadas sobre a integridade dos complexos coletores de luz.

Para as correlações entre a fluorescência da clorofila *a* e a produtividade, o Fv'/Fm' mostrou-se mais sensível, em comparação ao Fv/Fm , pois obteve maior índice de correlação com a produtividade de grãos ($Fv'/Fm' - 0,68$ e $Fv/Fm - 0,49$). Isso fornece evidências de que Fv'/Fm' expressa variações de produtividade superiores à razão Fv/Fm , porque as alterações no rendimento quântico da fotossíntese são melhor representadas pela variável Fv'/Fm' do que por Fv/Fm (GENTY et al., 1989). Considerando que 90% da produção de uma cultura ocorre em resposta à atividade fotossintética (FLOSS, 2004), uma variável que melhor expressa a condição do aparato fotossintético tende a apresentar maiores índices de correlação com a produtividade.

Os índices NDVI e PRI não mostraram interação entre os fatores estudados, portanto, cada fator foi apresentado separadamente. O NDVI nos genótipos Brilhante, BRS404 e PF020037 foram de 0,57, 0,55 e 0,59, respectivamente, e foram estatisticamente superiores ao PF080492 (0,50) (Tabela 2). Os índices de vegetação são comumente usados para estimar as características biofísicas das plantas, principalmente para o índice de área foliar e o acúmulo de biomassa (CHENG et al., 2013). Assim, a diferença encontrada entre os genótipos na área foliar e altura da planta (Tabela 1), refletiu na variação do índice NDVI. Essa evidência é confirmada pelas correlações obtidas entre o NDVI e as variáveis PH e FLA, que apresentaram índices de correlação de 0,70 e 0,78, respectivamente.

Portanto, é possível diferenciar os genótipos de trigo pelos padrões do NDVI, pois este é sensível para identificar as variações na biomassa da planta, parâmetro que tem sido eficaz para prever a produção de trigo (YUE et al., 2017). Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Hazratkulova et al. (2012) e Ramya et al. (2015), que confirmaram que é possível diferenciar genótipos de trigo através dos valores de NDVI para a seleção de genótipos resistentes ao estresse abiótico.

Ao avaliar os WRs como fator isolado, o WR1 e o WR2 não diferiram entre si e apresentaram NDVI de 0,66 e 0,62, respectivamente e estes foram superiores a WR3 (0,54) e WR4 (0,39), respectivamente (Figura 1C). Maiores valores de NDVI indicam que as plantas possuem maior quantidade de clorofila e melhor desenvolvimento, levando a um maior potencial produtivo. Plantas sob estresse mostram uma diminuição na absorção de clorofila e uma redução na reflectância do infravermelho devido a alterações na estrutura celular, uma vez que essa diminuição leva a um aumento na reflectância no vermelho (AYALA-SILVA e BEYL, 2005).

Gizaw et al. (2016) trabalhando com trigo sob três regimes hídricos, também encontraram resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho; os autores observaram que os valores de NDVI foram maiores sob irrigação (0,76 a 0,81) e menores sob estresse hídrico (0,66 a 0,68). Na soja, Crusiol et al. (2016) também obtiveram que os valores de NDVI eram maiores nas plantas irrigadas do que nas plantas sob estresse hídrico.

O PF020037 apresentou PRI de 0,25 e estatisticamente superior aos demais genótipos de trigo (Tabela 2). Isso ocorreu provavelmente porque o PF020037 produz cera nas folhas, e essa é uma característica intrínseca desse genótipo. Segundo Holmes e Keiller (2002), as ceras são refletores eficientes de radiação de comprimento de onda maior, que podem ter superestimado o índice PRI e o NDVI no P020037. A reflectância é influenciada tanto pelos

elementos bioquímicos da folha quanto pelas características morfológicas, como as ceras das cutículas, que interferem no espalhamento de fótons (GAMON et al., 2001).

Em relação aos regimes hídricos, os valores de PRI em WR1 e WR2 foram maiores e estatisticamente semelhantes (0,25 e 0,24, respectivamente), seguidos por WR3 (0,22) e WR4 (0,19), respectivamente (Figura 1D). De acordo com Gamon et al. (1992), o índice PRI é sensível a alterações nos pigmentos carotenóides das folhas, que desempenham um papel essencial na fotoproteção, pois liberam o excesso de energia antes de danificar as estruturas celulares. Essa fotoproteção está relacionada à defesa do aparelho fotossintético contra o oxigênio singlete extremamente reativo que danifica muitos componentes celulares (DERKS et al., 2015). Portanto, esses pigmentos são importantes na prevenção da indução de danos oxidativos causados pelo estresse hídrico.

O índice PRI é baseado nas mudanças reversíveis do pigmento de xantofila a curto prazo em plantas sob estresse hídrico (GAMON et al., 1990). Essas alterações estão ligadas à dissipação do excesso de energia absorvida que não pode ser processada através da fotossíntese e, portanto, levam à redução da eficiência no uso da luz (GARBUSKY et al., 2011). Assim, o PRI tem sido uma ferramenta muito útil para estimar a eficiência da luz, que por sua vez reflete o desempenho fotossintético das plantas (KOVÁČ et al., 2018).

Com base nisso, os menores valores de PRI encontrados em WR3 e WR4 estão possivelmente relacionados à redução da eficiência do uso da luz, o que conseqüentemente afetou o desempenho fotossintético dos genótipos de trigo. As correlações obtidas entre o PRI e as variáveis de troca gasosa confirmam essa hipótese, onde A , g_s , C_i e E apresentaram taxas de correlação com o PRI de 0,69, 0,67, 0,62 e 0,60, respectivamente ($p < 0,01$). Segundo Magney et al. (2016), a temperatura do ar, a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor são variáveis mecanicamente relacionadas e associadas ao PRI. Isso sugere que o PRI é sensível para estimar essas variáveis. Assim, a interpretação do PRI pode ser uma ferramenta

que indica o estresse hídrico nas plantas. Além disso, o uso desse índice pode levar à detecção precoce de plantas sob estresse hídrico, auxiliando na tomada de decisão em culturas comerciais, além de contribuir para a seleção de materiais tolerantes ao estresse hídrico nos programas de melhoramento (MAGNEY et al., 2016).

Nesse sentido, a identificação de características fisiológicas relacionadas à produtividade de grãos pode ser utilizada para a seleção de plantas, uma vez que a produtividade de uma planta é o produto da energia solar interceptada e do CO₂ fixado durante um período. No entanto, as avaliações do metabolismo fotossintético por meio do IRGA têm limitações para seleções rápidas, pois têm a capacidade de avaliar algumas plantas ou até uma ou duas folhas por planta, tornando-a uma prática dispendiosa (CENDRERO-MATEO et al., 2017). Dessa forma, os sensores hiperespectrais utilizando as variáveis NDVI e PRI mostraram-se um método mais rápido e eficiente para a avaliação de características fisiológicas, pois permitiram uma análise mais rápida do desempenho fotossintético nas plantas, o que contribuiu consideravelmente para o processo de seleção de plantas tolerantes ao estresse hídrico.

Esperava-se que as respostas F_v'/F_m' obtidas do LIFT ($F_v'/F_m'_L$) fossem semelhantes às obtidas pelo IRGA (F_v'/F_m'), conforme encontrado por outros autores quando avaliaram as duas variáveis simultaneamente (KOLBER et al., 2005; OSMOND et al., 2017). Neste trabalho, a medição da F_v'/F_m' com IRGA (estágio de floração) foi avaliada 15 dias antes da $F_v'/F_m'_L$, no estágio de enchimento dos grãos, onde há intensa degradação da clorofila e desmontagem do aparato fotossintético devido à remobilização dos grãos por fotoassimilados (MACEDO et al., 2007). Flagella et al. (1994) encontraram ligeiros aumentos de F_m no trigo durante a fase vegetativa, seguidos de uma redução durante a floração, diminuindo a razão F_v'/F_m' , uma vez que F_o permaneceu constante. Além disso, $F_v'/F_m'_L$ apresentou correlações

fracas com variáveis de troca gasosa (0,34, 0,31, 0,29 e 0,37, para A, gs, Ci e E, respectivamente) e não se correlacionou com a produtividade de grãos.

Os componentes de produção, número de espigas por m^2 ($NE\ m^{-2}$) e comprimento da espiga (EL) não apresentaram interação entre genótipos e regimes hídricos. Os efeitos simples indicaram que PF080492 obteve os maiores valores para essas duas variáveis (511 $NE\ m^{-2}$ e 9,26 cm, respectivamente) (Tabela 3). Na Figura 1E, WR1, WR2 e WR3 não diferiram entre si, com valores de 8,2, 8,12 e 8,06 cm, mas estes foram estatisticamente maiores que WR4 (7,42 cm) para o comprimento da espiga. O número de espigas (Figura 1F) foi semelhante entre WR1 e WR2, com valores de 543,6 e 834,8 $NE\ m^{-2}$, que foram maiores que WR3 (408,1 $NE\ m^{-2}$) e WR4 (304,9 $NE\ m^{-2}$), respectivamente.

O $NE\ m^{-2}$ e o EL foram correlacionados com a produtividade de grãos ($p < 0,01$) (Tabela 3), mas com fraca correlação para o EL (0,46) e forte para o $NE\ m^{-2}$ (0,87). Em relação ao EL, esse resultado demonstra que esse componente de produção não exerce alta influência na produtividade de grãos de trigo. Esse resultado está de acordo com os encontrados por Ojha et al. (2018), que não encontraram correlação entre comprimento da espiga e produtividade nos genótipos de trigo.

Por outro lado, o $NE\ m^{-2}$ demonstrou ser uma variável importante para a seleção de genótipos mais produtivos, pois apresentou forte correlação com a produtividade (Tabela 3). Segundo Khan e Naqvi (2012), o $NE\ m^{-2}$ pode ser usado para selecionar trigo com alta produtividade sob diferentes níveis de irrigação. O principal componente responsável pela regulação da produtividade de grãos impulsionado por fatores ambientais é o $NE\ m^{-2}$, um componente do número de grãos m^{-2} (SLAFER et al., 2014).

O peso de mil grãos (TGW), o peso do hectolitro (HW) e a produtividade apresentaram interação significativa entre genótipos e WRs (Tabela 1). A avaliação dos genótipos dentro de cada regime para TGW, o Brillhante foi superior aos demais em WR1 (3,7 g), enquanto os

BRS404, PF080492 e PF020037 obtiveram 3,4, 3,3 e 3,4 g, respectivamente. Nos regimes WR2, WR3 e WR4, o PF080492 geralmente apresentava a menor média. Para o efeito de WRs dentro de cada genótipo, WR1 foi estatisticamente semelhante ao WR2, mas superior a WR3 e WR4 nos genótipos Brilhante e PF080492. BRS404 e PF020037 apresentaram valores semelhantes entre os regimes WR1, WR2 e WR3. (Tabela 2).

O TGW apresentou correlação de 0,54 ($p < 0,05$) com a produtividade. A correlação do TGW com a produtividade do trigo é descrita por vários autores (GONZALEZ-NAVARRO et al., 2016; AYER et al., 2017) e essa resposta ocorre porque o TGW pode responder a modestas mudanças nos fatores genéticos ou ambientais, agindo assim com um ajuste fino da produtividade de grãos (SLAFER et al., 2014).

No desdobramento da interação para HW, o efeito dos genótipos nas WRs, no geral o PF020037 foi menor do que os outros no WR1 e WR2, enquanto nos regimes mais estressados, WR3 e WR4, o TGW foi semelhante entre os quatro genótipos de trigo (Tabela 1). Essa resposta do HW em função dos WRs foi semelhante à encontrada na produtividade de trigo (Tabela 1), que a caracteriza como uma variável importante para a seleção de genótipos mais produtivos. Isso pode ser confirmado pela forte correlação (0,73) entre a produtividade e TGW. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Dogan (2009), que encontraram um índice de correlação de 0,76 entre HW e produtividade em *Triticum durum*.

Em relação aos WRs dentro de cada genótipo, todos os genótipos apresentaram valores mais altos de HW em WR1 que WR4. Porém, o BRS404 apresentou HW semelhante até WR3 e valores mais baixos em WR4.

Os valores de HW do trigo normalmente variam de 70 a 85 kg hl⁻¹, mas podem ser maiores ou menores devido às condições ambientais (TROCCOLI e DI FONZO 1999). Assim, quanto maior o valor de HW, melhor a qualidade da farinha de trigo. Portanto, a

capacidade do BRS404 de manter altos valores de HW até o estresse hídrico moderado (WR3), condição semelhante ao encontrado no cultivo em segunda safra no Cerrado brasileiro, e é uma característica interessante a ser considerada na seleção de materiais destinados a essa época de cultivo, pois o HW é uma variável importante para comercialização, pois indica indiretamente as características de qualidade dos grãos.

Para a produtividade, no desdobramento da interação dos genótipos de trigo em cada WR, PF020037 produziu menos grãos que os outros genótipos em WR1 (Tabela 1) (2858,4 kg ha⁻¹). No WR2, esse genótipo teve produtividade semelhante ao BRS404 e Brilhante (2752,9 kg ha⁻¹, 3757,9 kg ha⁻¹ e 3582,7 kg ha⁻¹, respectivamente. O PF080492 nesta WR produziu 1300 kg ha⁻¹ a mais que os outros genótipos (Tabela 1).

Nos regimes mais estressados, WR3 e WR4, não houve diferença estatística entre todos os genótipos na produtividade de grãos (Tabela 1). Esse resultado indica que, sob estresse hídrico intenso, embora alguns genótipos tenham apresentado melhor desempenho em algumas variáveis biométricas ou fisiológicas (Tabela 1, Figura 1), não foram suficientes para promover maior produtividade. No entanto, em situações de estresse leve (WR2), o PF080492 foi um material interessante em termos de produtividade.

A avaliação dos regimes dentro de cada genótipo para produção, em geral, os quatro genótipos apresentaram maiores valores nos regimes WR1 e WR2 em relação à WR4 (Tabela 2). Para Brilhante e BRS404, o WR1 expressou o maior produtividade comparado ao WR3. PF080492 teve melhor desempenho em WR1 e WR2 e o WR3 foi estatisticamente diferente de WR4. Para PF020037, o WR1, WR2 e WR3 apresentaram produtividade semelhante e com valores superiores ao WR4. Embora o PF020037 geralmente tenha a menor produtividade, foi o único genótipo a manter valores de produtividade semelhantes até o WR3.

CONCLUSÕES

1. É válido o uso de sensores hiperespectrais e de fluorescência como ferramenta na seleção de genótipos de trigo,
2. Os genótipos não se diferiram entre si para a tolerância à seca;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, M.; TIAN, Z.; ATA-UI-KARIM, S. T.; LI, Y. CUI, Y.; ZAHOOR, R.; JIANG, D.; DAI, T. Improved tolerance to post-anthesis drought stress by pre-drought priming at vegetative stages in drought-tolerant and -sensitive wheat cultivars. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, n.1, p. 218-227, 2016

ALVARES, C.A; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711–728, 2013.

ARYA, V. K.; SINGH, J.; KUMAR, L.; NAGAR, S. S.; AHALAWAT, N. K.; CHAND, P. Genetic variability and heritability studies in relation to grain yield and its component traits in wheat (*Triticum aestivum* L.), **International Journal of Agricultural and Statistical Sciences**, v. 14, n. 1, p. 215-222, 2018.

ASHRAF, M.; AKRAM, N. A.; ALQURAINY, F.; FOOLAD, M. R. Drought tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. **Advances in Agronomy**, v. 111, n. 1, p.249-296, 2011.

AYALA-SILVA T, BEYL C. A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 2, p. 305-317, 2005.

AYER, D. K.; SHARMA, A.; OJHA, B. R.; PAUDEL, A.; DHAKAL, K. Correlation and path coefficient analysis in advanced wheat genotypes. **SAARC Journal of Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2017.

BERNIER, J.; ATLIN, G. N.; SERRA, J. R.; KUMAR, A.; SPANER, D. Breeding upland rice for drought resistance. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 88, n. 6, p. 927–939, 2008.

BJÖRKMAN, O.; DEMMING, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. **Planta**, v.170, p.489-504, 1987.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

CAMARGO, C. E. de O., FERREIRA FILHO, A.W. P; RAMOS, L. C. da S.; PETTINELLI JÚNIOR, A.; CASTRO, J. L. de; FELÍCIO, J. C.; SALOMON, M. V.; MISTRO, J. C. Comportamento de linhagens diaplóides de trigo em dois locais do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 2, p. 217-226, 2003.

CENDRERO-MATEO, M. P.; 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, 53-79, 2017.

CHENG, Y. B.; MIDDLETON, E. M.; ZHANG, Q.; HUENNRICH, K. F.; CAMPBELL, P. K. E.; CORP, L A.; COOK, B. D.; KUSTAS, W. P.; DAUGHTRY, C. S. Integrating Solar Induced Fluorescence and the Photochemical Reflectance Index for Estimating Gross Primary Production in a Cornfield. **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, p.6857-6879, 2013.

CHYTYK, C. J.; HUCL, P. J.; GRAY, G. R. Leaf photosynthetic properties and biomass accumulation of selected western Canadian spring wheat cultivars. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 91, n. 2, p. 305–314, 2011.

CRUSIOL, L. G. T.; CARVALHO, J. de F. C.; SIBALDELLI, R. N. R.; NEIVERTH, W.; RIO, A. do; FERREIRA, L. C.; PROCÓPIO, S. de O.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. NDVI variation according to the

time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. **Precision Agriculture**. v. 18, n. 4, p. 470-490, 2016

DEMIREVSKA, K.; ZASHEVA, D.; DIMITROV, R.; STOILOVA, L. S.; STAMENOVA, M.; FELLER, U. Drought stress effects on Rubisco in wheat: changes in the Rubisco large subunit. **Acta Physiologiae Plantarum**. v. 31, n. 1, p. 1129-1138, 2009.

DERKS, A.; SCHAVEN, K.; BRUCE, D. Diverse mechanisms for photoprotection in photosynthesis. Dynamic regulation of photosystem II excitation in response to rapid environmental change. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 1847, n. 4-5, p. 468–485, 2015.

DOGAN, R. The correlation and path coefficient analysis for yield and some yield components of durum wheat (*Triticum turgidum* var. Durum 1.) in west anatolia conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v. 41, n. 3, p. 1081-1089, 2009.

DRIEVER, S. M.; LAWSON T.; ANDRALOJC, P. J.; RAINES, C. A.; PARRY, M. A. J. Natural variation in photosynthetic capacity, growth, and yield in 64 field-grown wheat genotypes. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 17, p. 4959–4973, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - SPI, 2006. 286 p.

FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; WU, C.; WANG, D.; HUANG, J. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options, **Frontiers in Plant Science**. v. 8, n. 1147, 2017. 16 p.

FAISAL, M. M. AL-TAHIR. Flag leaf characteristics and relationship with grain yield and grain protein percentage for three cereals. **Journal of Medicinal Plants Studies**, n. 2, v. 5, p. 1-7, 2014.

FARIAS, J. R. B. Dinâmica da água no sistema solo-água-atmosfera: déficit hídrico em culturas. **ITEM**. n. 68, p. 32-37, 2005.

FILIPPOU, P.; BOUCHAGIER, P.; SKOTTI, E.; FOTOPOULOS, V. Proline and reactive oxygen/nitrogen species metabolism is involved in the tolerant response of the invasive plant species *Ailanthus altissima* to drought and salinity. **Environmental and Experimental Botany**, v.97, n. 1, p.1-10, 2014.

FLAGELLA, Z.; PASTORE, D.; CAMPANILE, R. G.; DI FONZO, N. Photochemical quenching of chlorophyll fluorescence and drought tolerance in diferente durum wheat (*Triticum durum*) cultivars. **Journal of Agricultural Science**, v. 122, n. 1, p. 183-192, 1994.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: Ed. da UPF, 2004.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; BILGER, W.; BJÖRKMAN, O.; FREDEEN. A.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. **Oecologia**, v. 85, n. 1, p. 1-7, 1990.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; FREDEEN, A. L.; THAYER, S. Assessing photosynthetic downregulation in sunflower stands with an optically-based model. **Photosynth Res**, v. 67, n. 1, p. 113- 125, 2001.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. **Remote Sens. Environ**, v. 41, n. 1, p. 35-44, 1992.

GARBULSKY, M. F.; PEÑUELAS, J.; GAMON, J.; INOUE, Y.; FILELLA, I. The Photochemical Reflectance Index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies; a review and meta-analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 281-297, 2011.

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.

GIZAW, S. A.; GARLAND-CAMPBELL, K.; CARTERA, A. H. Evaluation of agronomic traits and spectral reflectance in Pacific Northwest winter wheat under rain-fed and irrigated conditions. **Field Crops Research**, v. 196, n. 1, p. 168-179, 2016.

GONZALEZ-NAVARRO, O. E.; GRIFFITHS, S., MOLERO, G.; REYNOLDS, M. P.; SLAFER, G. A. Variation in developmental patterns among elite wheat lines and relationships with yield, yield components and spike fertility. **Field Crops Research**, v. 196, n.1, p. 294–304, 2016.

GUENDOOUZ, A.; SEMCHEDDINE, N.; MOUMENI, L.; HAFSI, M. The effect of supplementary irrigation on leaf area, specific leaf weight, grain yield and water use efficiency in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. **Journal of Crop Breeding and Genetics**, v. 2, n. 1, p. 82 – 89, 2016.

GUERRA, N. B.; LIVERA, A. V. S. Correlation between the sensory profile and physical and chemical determinations of pineapple cv. Pearl. **Brazilian Journal of Fruit Crops**, Cruz das Almas, v. 21, n. 1, p.32-35, 1999.

HARB, A.; KRISHNAN, A.; AMBAVARAM, M. M.; PEREIRA, A. Molecular and physiological analysis of drought stress in Arabidopsis reveals early responses leading to acclimation in plant growth. **Plant Physiology**, v. 154, n. 3, p. 1254–1271, 2010.

HAZRATKULOVA, S.; SHARMA, R. C.; ALIKULOV, S.; ISLOMOV, S.; YULDASHEV, T.; ZIYAEV, Z.; KHALIKULOV Z.; ZIYADULLAEV Z.; TUROK, J. Analysis of genotypic variation for normalized difference vegetation index and its relationship with grain yield in winter wheat under terminal heat stress. **Plant Breeding**, v. 131, n. 6, p. 716–721, 2012.

HEYNE, E. G.; CAMPBELL, L. G. Experiments with semi-dwarf wheats in Kansas. **Transactions Kansas Academy Science**, v. 74, n. 2, p. 147-156, 1971.

HIKOSAKA, K.; SHIGENO, A. The role of Rubisco and cell walls in the interspecific variation in photosynthetic capacity. **Oecologia**, v. 160, n. 3, p. 443–451, 2009.

HOLMES, M. G.; KEILLER, D. R. Effects of pubescence and waxes on the reflectance of leaves in the ultraviolet and photosynthetic wavebands: a comparison of a range of species. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 1, p. 85-93, 2002.

HUNT, S. Measurements of photosynthesis and respiration in plants. **Physiologia. Plantarum**, v. 117, n. 1, p. 314-325, 2003.

HUSSAIN, M.; MALIK, M. A.; FAROOQ, M.; ASHRAF, M. Y.; CHEEMA, M. A. Improving Drought tolerance by exogenous application of glycinebetaine and salicylic acid in sunflower. **J. Agron. Crop Sci.** v.194, 2008. p. 193–199.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: An earth resource perspective.** Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 592 p.

JOPPA, L. R. Agronomic characteristics of near-isogenic tall and semi-dwarf lines of durum wheat. **Crop Science**, v. 13, n. 6, p. 743-746, 1973.

KALAJI, H. M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R. J. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, n. 4, p.1-11, 2016.

KHAN, N.; NAQVI, F. Correlation and Path Coefficient Analysis in Wheat Genotypes under Irrigated and Non-Irrigated Conditions. **Asian Journal of Agricultural Sciences.** v. 4, n. 5, p. 346-351, 2012.

KOLBER, Z.; KLIMOV, D.; ANANYEV, G.; RASCHER, U.; BERRY, J.; OSMOND, B. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. **Photosynthesis Research**, v. 84, n. 1-3, p. 121-129, 2005.

KOVÁČ, D.; VESELOVSKÁ, P.; KLEM, K.; VEČEŘOVÁ, K.; AČ, A.; PEÑUELAS, J.; URBAN, O. Potential of Photochemical Reflectance Index for Indicating Photochemistry and

Light Use Efficiency in Leaves of European Beech and Norway Spruce Trees. **Remote Sens.** v. 10, n. 8, p. 1-27, 1202, 2018.

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 42, n. 1, p. 313- 349, 1991.

KRAUSE, G.H. e WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. v. 42, p. 313-349, 1991.

LAWSON, T.; KRAMER, D. M.; RAINES, C. A. Improving yield by exploiting mechanisms underlying natural variation of photosynthesis. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, n.2, p. 215–220, 2012.

LEFEBVRE, S.; LAWSON, T.; ZAKHLENIUK, O. V.; LLOYD, J. C.; RAINES, C. A. Increased sedoheptulose-1,7-bisphosphatase activity in transgenic tobacco plants stimulates photosynthesis and growth from an early stage in development. **Plant Physiol**, v. 138, n. 1, p. 451-460, 2005.

LIANG, S. **Quantitative remote sensing of land surfaces**. Hoboken: Wiley interscience, 2005. 534 p

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SILVA, M. A. da; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 8, n. 2, p.204-214, 2013.

LIU, H. S.; LI, F. M. Root Respiration, Photosynthesis and Grain Yield of Two Spring Wheat in Response to Soil Drying. **Plant Growth Regulation**, v. 46, n. 3, p. 233-240, 2005.

MACEDO, T.B.; PETERSON, R.K.D.; DAUSZ, C.L.; WEAVER, D.K.; Photosynthetic responses of wheat, *Triticum aestivum* L., to defoliation patterns on individual leaves. **Environmental Entomology** 36:602-608, 2007.

MAGNEY, T. S.; VIERLING, L. A.; EITEL, J. U. H.; HUGGINS, D. R.; GARRITY, S. R. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 173, n. 1, p. 84-97, 2016.

MAHPARA, S.; HUSSAIN, S. T.; FAROOQ, J. Drought tolerance studies in wheat (*triticum aestivum* L.). **Cercetări Agronomice în Moldova**, v. 47, n. 4, 160, p. 1-8, 2014

MARIJUAN, M. P.; BOSCH, S. M. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v.18, n. 12, p. 660-666, 2013.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da Microbacia Hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **RA E GA**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 520-533, 2011.

MIRANSARI, M.; RIAHI, H.; EFTEKHAR F.; MINAIE, A.; SMITH, D. L. Improving Soybean (*Glycine max* L.) N₂ Fixation under Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 32, n. 4, p. 909-921, 2013.

MODARRESI, M.; MOHAMMADI, V.; A. ZALI, A. MARD. M. Response of Wheat Yield and Yield Related Traits to High Temperature. **Cereal Research Communications**, v. 38, n. 1, p. 23–31, 2010.

MOHAMMADI-BAZARGANI, M.; HAJIREZAEI, M. R.; SALEKDEH, G. H.; BUSHEHRI, A. A. S.; FALAHATI-ANBARAN, M.; MORADI, F. NAGHAVI, M. R.; EHDAIE, B. A view on the role of metabolites in enhanced stem reserves remobilization in wheat under drought during grain filling. **Australian Journal of Crop Science**. v. 6, n. 12, p. 1613-1623, 2012.

MUNNS, R. Plant adaptations to salt and water stress: differences and commonalities. In: TURKAN, I. (Ed.). **Plant responses to drought and salinity stress: developments in a postgenomic Era**. London: Elsevier, 2011. p.132. (Advances in botanical research, 57).

NASRI, R.; KASHANI, A.; PAKNEJAD, F.; VAZAN, S.; BARARY, M. Correlation, path analysis and stepwise regression in yield and yield component in wheat (*Triticum aestivum* L.) under the temperate climate of Ilam province, Iran. **Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences**, v. 4, n. 4, p. 188-198, 2014.

NOWSHERWAN, I.; SHABBIR, G.; MALIK, S. I.; ILYAS, M.; CHEEMA, N. M. Selection of wheat genotype(s) for drought stress based on physiological traits. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 17, n. 3, p. 1-7, 2017.

OJHA, R.; SARKAR, A.; ARYAL, A.; RAHUL, K. C.; TIWARI, S.; POUDEL, M.; PANT, K. R.; SHRESTHA, J. Correlation and path coefficient analysis of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. **Fmg. & Mngmt**, v. 3, n. 2, p. 136-141, 2018.

OLIOSI, G.; RODRIGUES, J. de O.; FALQUETO, A. R.; PIRES, F. R.; MONTE, J. A.; PARTELLI, F. L. Chlorophyll a fluorescence transient and vegetative growth in conilon coffee under different nitrogen sources. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 248-259, 2017.

OSMOND, B.; CHOW, W. S.; WYBER, R.; ZAVAFER, A.; KELLER, B.; POGSON B. J.; ROBINSON, S. A. Relative functional and optical absorption cross-sections of PSII and other photosynthetic parameters monitored in situ, at a distance with a time resolution of a few seconds, using a prototype light induced fluorescence transient (LIFT) device. **Functional Plant Biology**, v. 44, n. 10, p. 1-22, 2017.

OUYANG; W.; STRUIK, P. C.; YIN, X.; YANG, J. Stomatal conductance, mesophyll conductance, and transpiration efficiency in relation to leaf anatomy in rice and wheat genotypes under drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 18, p. 5191–5205, 2017.

PARRY, M. A. J.; REYNOLDS, M.; SALVUCCI, M. E.; RAINES, C.; ANDRALOJC, P. J.; ZHU, X. G.; PRICE, G. D.; CONDON, A. G.; FURBANK, R. T. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 2, p. 453-467, 2011.

PEIXOTO, P. H. P.; MATTA, F. M. da; CAMBRAIA, J. Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, n. 4, p. 821-832, 2002.

PIERUSCHKA, R.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z. S.; BERRY, J. A. Monitoring of cold and light stress impact on photosynthesis by using the laser induced fluorescence transient (LIFT) approach. **Functional Plant Biology**, v.37, n. 5, p. 395-402, 2010.

PIRASTEH-ANOSHEH, H.; SAED-MOUCHESHI, A.; PAKNIYAT, H. PESSARAKLI, M. Stomatal responses to drought stress In: PARVAIZ, A. (Ed). **Water stress and crop plants: a sustainable approach**, v. 2, Wiley-Blackwell: Chichester, 2016. p. 24-40.

RAHMAN, M.; BARMA, N. C. D.; BISWAS, B. K.; KHAN, A. A.; RAHMAN, J. Study on morpho-physiological traits in spring wheat (*Triticum aestivum* l.) under rainfed condition. **Bangladesh J. Agril. Res**, v. 41, n. 2, p. 235-250, 2016.

RAMYA, K. T.; JAIN, N.; RAMYA, P.; SINGH, P. K.; ARORA, A.; SINGH, G. P.; PRABHU, K. V. Genotypic variation for normalized difference vegetation index and its relationship with grain yield in wheat under terminal heat stress. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 75, n. 2, p. 174-182, 2015.

RIBEIRO JÚNIOR, W.Q.; RAMOS, M.L.G.; REBOUÇAS, U.V.; TRINDADE, M. da G.; FERREIRA, F.M.; SIQUEIRA, M.M.H.; SILVA, H.L.M.; RODRIGUES, G.C.; GUERRA, A.F; ROCHA, O.C.; AMÁBILE, R.F.; ALBUQUERQUE, N.C.; SÓ E SILVA, M.; ALBRECHT, J.C.; DURÃES, F.O.M. **Fenotipagem para tolerância à seca visando o melhoramento do trigo no Cerrado**. Passo Fundo: Circular Técnica on-line, v. 1, 2006. 17 p.

SADRAS, V. O.; LAWSON, C.; MONTORO, A. Photosynthetic traits in Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. **Field Crops Research**, v. 134, n. 1, p. 19-29, 2012.

SALOMON, M. V.; CAMARGO, C. E. de O.; FERREIRA FILHO, A. W. P.; PETTINELLI JÚNIOR, A.; CASTRO, J. L. de. Desempenho de linhagens diaplóides de trigo obtidas via cultura de anteras quanto à tolerância ao alumínio, produção de grãos e altura de planta. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 2, p. 189-198, 2003.

SANTOS, H. G. dos, JACOMINE, P.K., ANJOS, L. H. C dos, OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A. de, ARAUJO FILHO, J. C. de, OLIVEIRA, J. B. de, CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 5ª. ed., Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SARTO, M. V. M.; SARTO, J. R. W.; RAMPIM, L.; ROSSET, J. S.; BASSEGIO, D.; COSTA, P. F. da; INAGAKI, A. M. Wheat phenology and yield under drought: A review, **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 8, p. 941-946, 2017.

SASSAKI, R. M. e MACHADO, E. C. Trocas gasosas e condutância estomática em duas espécies de trigo em diferentes teores de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.9, p.1571-1579, 1999.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T. R. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 1, p. 333- 341, 2002.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 33, n.1, p. 1729-1737, 1998.

SIKDER, S.; FOULKES, J.; WEST, H.; SILVA, J. de; GAJU, O.; GREENLAND, A.; HOWELL, P. Evaluation of photosynthetic potential of wheat genotypes under drought condition. **Photosynthetica**, v. 53, n. 1, p. 47-54, 2015.

SILVA, M. de A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G. da; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.3, p.193-201, 2007.

SILVA, S. C. P. da; BAPTISTA, G. M. de M. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.21, n. 2, p. 354-370, 2015.

SLAFER, G. A., SAVIN, R.; SADRAS, V. O. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. **Field Crops Research**, v. 157, n.1, p. 71–83, 2014.

TAJAMMAL, M. A.; HUSSAIN, A.; NAZ, N. Environmental response and influence of flag leaf area on grain protein percentage and yield in bread wheat. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 6, n. 15, p. 1328 - 1331, 2003.

TORRES NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G. de; BRESSAN-SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v.104, n. 1, p.199-209, 2005.

TROCCOLI , A.; DI FONZO, N. Relationship between kernel size features and test weight in *Triticum durum*, **Cereal Chemistry**, v. 76, n. 1, p. 45-49, 1999.

VENDRUSCOLO, A. C. G; SCHUSTER, I.; PILEGGI, M.; SCAPIM, C. A.; MOLINARI, H. B. C.; MARUR, C. J.; VIEIRA, L. G. C. Stress-induced synthesis of proline confers tolerance to water deficit in transgenic wheat. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 10, p. 1367-1376, 2007.

WANG, Z. M.; WEI, A. L.; ZHENG, D. M. Photosynthetic characteristics of non-leaf organs of winter wheat cultivars differing in ear type and their relationship with grain mass per ear. **Photosynthetica**. v. 39, n. 2, p. 239-244, 2001.

WU, X.; BAO, W. Leaf Growth, Gas Exchange and Chlorophyll Fluorescence Parameters in Response to Different Water Deficits in Wheat Cultivars. **Plant Production Science**, v. 14, n. 3, p. 254–259, 2011.

YANG, C.W.; LIN, C.C.; KAO, C.H. Proline, ornithine, arginine and glutamic acid contents in detached rice leaves. **Biologia Plantarum**, v. 43, n.1, p. 305–307, 2000

YANG, F.; LIU, Y.; CHENG, H.; CHANG, J.; CHAI, S.; LI, M. Genetic dissection of flag leaf morphology in wheat (*Triticum aestivum* L.) under diverse water regimes. **BMC Genetics**, v. 17, n. 1, 94, p. 1-15, 2016.

YUE, J.; YANG, G.; LI, C.; LI, Z.; WANG, Y.; FENG, H.; XU, B. Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. **Remote Sensing**, v. 9, n.7, 708, p. 1-19, 2017.

ZHANG, M.; LV, D.; GE, P.; BIAN, Y.; CHEN, G.; ZHU, G.; LI, X.; YAN, Y. Phosphoproteome analysis reveals new drought response and defense mechanisms of seedling leaves in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Proteomics**, v. 109, n. 23, p. 290-308, 2014.

ZHU, J. K. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 53, n. 1, p. 247–273, 2002.

Tabela 1. Área foliar (FLA - cm²), Comprimento do pedúnculo (PL - cm), Conteúdo de prolina nas folhas (Pro - μmol g⁻¹ de peso fresco), Condutância estomática (gs - mol m⁻²s⁻¹), Concentração de CO₂ nas cavidades subestomáticas (Ci - μmol m⁻² s⁻¹), Taxa de transpiração (E - mmol H₂O m⁻² s⁻¹), Rendimento efetivo máximo do Fotossistema II (Fv'/Fm'), Rendimento quântico máximo do Fotossistema II (Fv/Fm), Fv/Fm_L (Rendimento quântico máximo do Fotossistema II - LIFT), peso de mil grãos (TGW), peso do hectolitro (HW - g) e produtividade (YD - kg ha⁻¹), de quatro genótipos de trigo sob quatro regimes hídricos, em 2016.

		Genótipo*Regime hídrico									
		Water regime (mm)				Water regime (mm)					
Genotype		601 (WR1)	501 (WR1)	301 (WR1)	184 (WR1)	Genotype	601 (WR1)	501 (WR1)	301 (WR1)	184 (WR1)	
FLA	Brilhante	15,6 Ab	14,7 Ab	14,9 Aa	6,7 Ba	Brilhante	0,59 Aa	0,59 Aa	0,57 Aa	0,45 Ba	
	BRS404	15,0 Ab	15,9 Ab	13,0 ABa	8,7 Ba	BRS404	0,57 Aa	0,55 Aa	0,49 Bab	0,48 Ba	
	PF080492	14,4 Ab	17,6 Ab	13,3 ABa	8,0 Ba	PF080492	0,56 Aa	0,58 Aa	0,53 ABab	0,48 Ba	
	PF020037	21,6 Aa	23,6 Aa	12,6 Ba	9,0 Ba	PF020037	0,54 Aa	0,53 ABa	0,47 Cb	0,48 BCa	
PL	Brilhante	38,4Aa	33,2Bab	28,1Ca	19,4Da	Brilhante	0,83 Aba	0,84 Aa	0,82 BCa	0,81 Ca	
	BRS404	34,3Aa	32,2Ab	23,3Ba	16,9Ca	BRS404	0,83 Aa	0,82 Aa	0,82 Aa	0,80 Ba	
	PF080492	35,8Aa	37,8Aa	27,5Ba	19,9Ca	PF080492	0,83 Aa	0,83 Aa	0,82 Aa	0,80 Ba	
	PF020037	25,9Ab	25,6Ac	25,8Aa	20,6Ba	PF020037	0,83 Aa	0,83 Aa	0,82 Aa	0,82 Aa	
PRO	Brilhante	1,01Ca	7,4Ba	10,9Aa	6,65Ba	Brilhante	0,49 Aa	0,52 Aa	0,53 Aab	0,50 Aa	
	BRS404	1,02Ba	1,89Bb	6,13Ab	5,18Aa	BRS404	0,55 Aa	0,56 Aa	0,49 ABab	0,46 Bab	
	PF080492	0,93Ca	0,97BCb	3,32Ac	2,60ABb	PF080492	0,49 Aa	0,48 Aa	0,43 ABb	0,36 Bb	
	PF020037	0,72Ca	1,35Cb	3,67Bc	5,99Aa	PF020037	0,49 Aa	0,47Aa	0,55 Aa	0,47 Aa	
gs	Brilhante	0,44 Ab	0,38 Aa	0,24 Ba	0,11 Ca	Brilhante	3,7 Aa	3,4 ABa	3,3 Ba	2,9 Ca	
	BRS404	0,55 Aa	0,46 Ba	0,15 Cab	0,11 Ca	BRS404	3,4 Ab	3,3 Aab	3,3 Aa	2,9 Ba	
	PF080492	0,44 Ab	0,47 Aa	0,21 Bab	0,10 Ca	PF080492	3,3 Ab	3,1 Ab	2,7 Bb	2,4 Cb	
	PF020037	0,53 Aab	0,40 Ba	0,14 Cb	0,11 Ca	PF020037	3,4 Ab	3,3 Aab	3,4 ABa	3,1 Ba	
Ci	Brilhante	277,1 Aa	269,3 ABa	249,1 Ba	177,5 Ca	Brilhante	81,3 Aa	80,3 ABa	79,4 ABa	78,1 Ba	
	BRS404	298,6 Aa	288,8 Aa	202,1 Bb	187,8 Ba	BRS404	82,6 Aa	81,6 Aa	81,6 Aa	79,0 Ba	
	PF080492	292,8 Aa	291,3 Aa	227,1 Bab	191,9 Ca	PF080492	83,0 Aa	81,6 ABa	79,4 BCa	78,1 Ca	
	PF020037	290,1 Aa	271,4 Aa	198,4 Bb	193,8 Ba	PF020037	77,1 Ab	77,4 ABb	79,7 Ba	77,2 Ba	
E	Brilhante	6,1 Aa	5,9 Aa	5,4 Aa	3,2 Ba	Brilhante	4111,4 Aa	3582,7 ABb	2858,3 Ba	1078,0 Ca	
	BRS404	7,2 Aa	6,4 Aa	3,1 Bb	2,7 Ba	BRS404	4582,9 Aa	3757,9 ABb	3110,5 Ba	1550,1 Ca	
	PF080492	7,1 Aa	6,8 Aa	4,2 Bb	2,4 Ca	PF080492	4921,5 Aa	5108,1 Aa	2675,3 Ba	1169,0 Ca	
	PF020037	7,0 Aa	6,1 Ba	3,0 Cb	2,5 Ca	PF020037	2858,4 Ab	2752,9 Ab	2595,1 Aa	1298,6 Ba	

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade.

Tabela 2. Efeito simples de Altura de plantas (PH - m), Taxa líquida de assimilação de CO₂ (A- $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Índice de Vegetação por diferença Normalizada (NDVI), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Número de espigas m^{-2} (NE) e Comprimento de espigas (EL - cm) de quatro genótipos de trigo, em 2016.

Genótipo	PH	A	NDVI	PRI	NE	EL
Brilhante	0,94 a	21,0 a	0,57 a	0,22 b	432,8 b	7,24 b
BRS404	0,85 b	19,2 ab	0,55 a	0,22 b	430,0 b	7,77 b
PF080492	0,72 c	19,1 ab	0,50 b	0,22 b	511,0 a	9,26 a
PF020037	0,92 a	18,4 b	0,59 a	0,25 a	417,5 b	7,55 b

As médias seguidas pelas mesmas letras na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

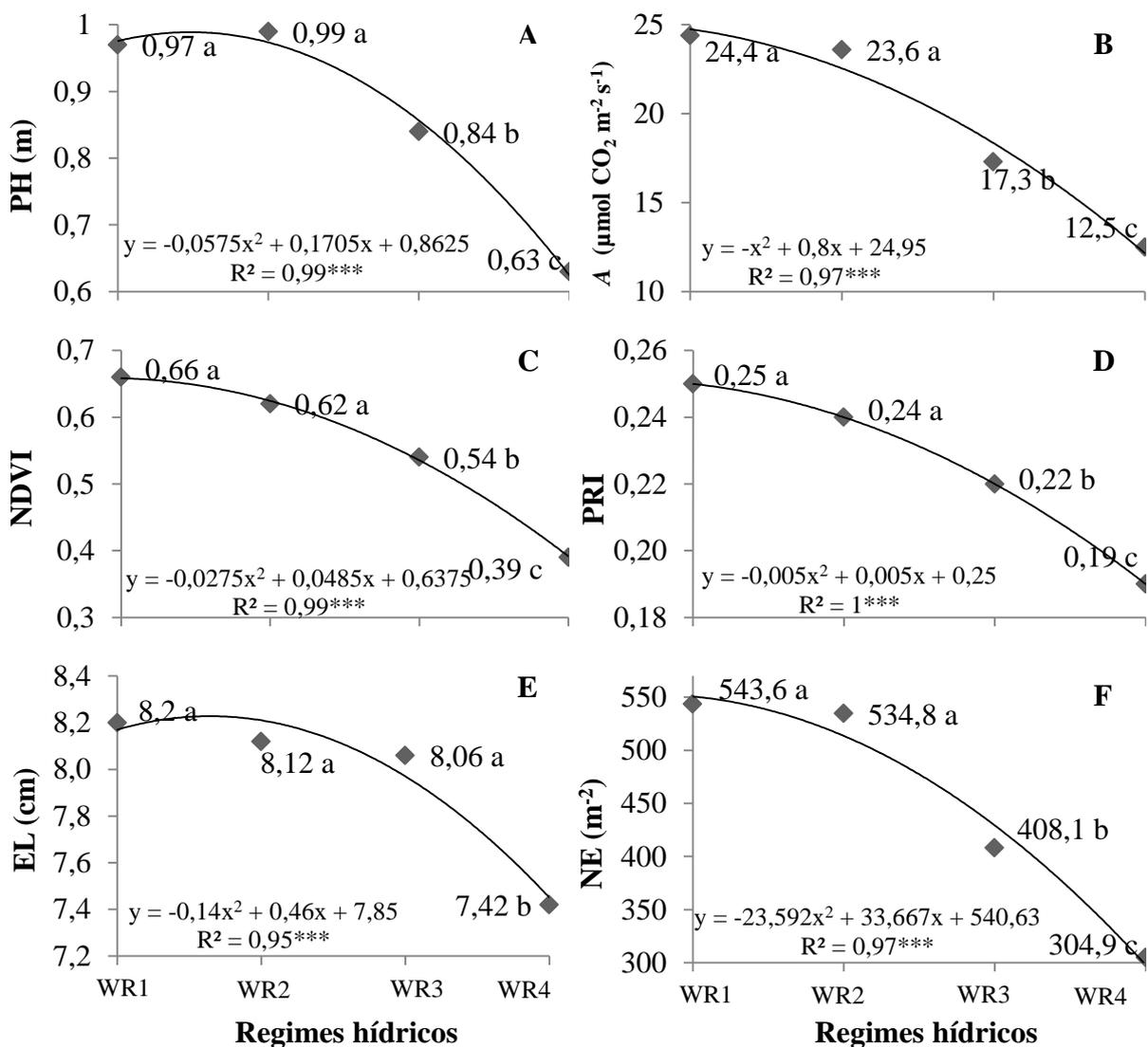


Figura 1. Altura de plantas (A), taxa líquida de assimilação de CO₂ (B), índice de vegetação por diferença normalizada (C), índice fotoquímico de reflectância (D), comprimento de espigas (E) e número de espigas m^{-2} (F), em função dos regimes hídricos (WR) aplicados, em 2016. WR1, WR2, WR3 e WR4, representam 601 mm, 501 mm, 301 mm e 184 mm) aplicados durante o ciclo do trigo.

Table 3. Correlação geral das variáveis: Área foliar (FLA), Altura de Plantas (PH), Comprimento do pedúnculo (PL), conteúdo de prolina nas folhas (PRO), Taxa líquida de assimilação de CO₂ (A), Condutância estomática (gs), Concentração Interna de CO₂ (CI), Transpiração (E), Rendimento quântico efetivo do Fotossistema II (Fv'/Fm'), Rendimento quântico máximo do Fotossistema II (Fv/Fm), Rendimento quântico máximo do FII (Fv/Fm_L), Índice de Vegetação por diferença Normalizada (NDVI), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Comprimento da Espiga (EL), Número de Espigas (NE m⁻²), Peso do Hectolitro (HW), Peso de Mil Grãos (TGW) e produtividade (YD) de quatro genótipos de trigo, submetidos a quatro regimes hídricos.

		FLA	PH	PL	PRO	A	gs	CI	E	Fv'/Fm'	Fv/Fm	Fv/Fm _L	NDVI	PRI	EL	NE	HW	TGW	YD	
FLA		1																		
PH		0,70**	1																	
PL		0,55**	0,64**	1																
PRO		-0,41**	-0,10 ^{ns}	-0,39**	1															
A		0,76**	0,77**	0,72**	-0,39**	1														
gs		0,73**	0,69**	0,75**	-0,57**	0,92**	1													
CI		0,73**	0,68**	0,78**	-0,57**	0,89**	0,96**	1												
E		0,74**	0,68**	0,77**	-0,54**	0,92**	0,96**	0,97**	1											
Fv'/Fm		0,57**	0,61**	0,75**	-0,22 ^{ns}	0,79**	0,76**	0,80**	0,77**	1										
Fv/Fm		0,50**	0,63**	0,58**	-0,10 ^{ns}	0,63**	0,53**	0,53**	0,54**	0,50**	1									
Fv/Fm _L		0,27 ^{ns}	0,50**	0,33**	0,03 ^{ns}	0,34*	0,31*	0,29*	0,37*	0,28 ^{ns}	0,38**	1								
NDVI		0,70**	0,78**	0,63**	-0,30*	0,77**	0,75**	0,71**	0,72**	0,55**	0,69**	0,39**	1							
PRI		0,73**	0,70**	0,47**	-0,45**	0,69**	0,67**	0,62**	0,60**	0,42**	0,61**	0,32*	0,83**	1						
EL		0,18 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	0,37**	-0,50**	0,15 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,32*	0,31*	0,22 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1					
NE		0,58**	0,55**	0,82**	-0,55**	0,71**	0,81**	0,83**	0,81**	0,69**	0,52**	0,21 ^{ns}	0,64**	0,55**	0,47**	1				
HW		0,07 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,57**	-0,22 ^{ns}	0,29*	0,39**	0,44**	0,37**	0,42**	0,18 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,33*	0,11 ^{ns}	0,37**	0,47**	1			
TGW		0,45**	0,79**	0,52**	-0,24 ^{ns}	0,59**	0,51**	0,51**	0,52**	0,39**	0,59**	0,50**	0,75**	0,65**	-0,23 ^{ns}	0,38**	0,37**	1		
YD		0,46**	0,54**	0,83**	-0,41**	0,65**	0,75**	0,80**	0,76**	0,68**	0,49**	0,28 ^{ns}	0,67**	0,48**	0,46**	0,87**	0,73**	0,54**	1	
Correlação isolada para cada genótipo																				
		FLA	PH	PL	PRO	A	gs	CI	E	Fv'/Fm'	Fv/Fm	Fv/Fm _L	NDVI	PRI	EL	NE	HW	TGW	YD	
Brilhante	YD	0,56 ^{ns}	0,86**	0,90**	-0,34 ^{ns}	0,63*	0,78**	0,80**	0,73**	0,72**	0,40 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,81**	0,65*	0,31 ^{ns}	0,66*	0,88**	0,51 ^{ns}		
BRS404	YD	0,82**	0,85**	0,87**	-0,69*	0,86**	0,83**	0,83**	0,84**	0,74**	0,79**	0,80**	0,80**	0,79**	0,56 ^{ns}	0,74**	0,80**	0,18 ^{ns}		
PF080492	YD	0,84**	0,71**	0,92**	-0,76**	0,88**	0,93**	0,93**	0,92**	0,92**	0,83**	0,75**	0,86**	0,79**	0,63*	0,97**	0,91**	0,77**		
PF020037	YD	0,60*	0,81**	0,73**	-0,76**	0,65*	0,65*	0,65*	0,66*	0,39 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,73**	0,80**	0,73**	0,87**	0,23 ^{ns}	0,25 ^{ns}		

** significativo a 1% probabilidade (p < 0.01). * significativo a 5% probabilidade (0.01 = <p < 0.05). ^{ns} não significativo (p > = 0.05).

4. CAPÍTULO 2.

CARACTERIZAÇÃO DE GENÓTIPOS DE TRIGO PARA A TOLERÂNCIA SECA E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA

Guilherme Filgueiras Soares¹, Walter Quadros Ribeiro Júnior², Lucas Felisberto Pereira³, Cristiane Andréa de Lima¹, Daiane dos Santos Soares¹, Onno Muller⁴, Uwe Rascher⁴, Maria Lucrecia Gerosa Ramos^{1*}

¹Universidade de Brasília- Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Campus Darcy Ribeiro – ICC Sul – 70910-900 – Brasília, DF – Brasil

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Cerrados, Rodovia BR 020 Km18, 73310-970 - Planaltina - DF, Brasil

³Instituto Federal Goiano – Faculdade de Agronomia, Campus de Posse- Fazenda Vereda do Canto, GO 453, Km 2,5, 73900-900 – Posse - GO, Brasil

⁴Forschungszentrum, Jülich - Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich – Germany

RESUMO

A seleção de genótipos de trigo com alto potencial produtivo e suas principais características fisiológicas que influenciam o rendimento sob estresse hídrico são importantes para o cultivo fora da estação na região do Cerrado. O objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de trigo através de sua produção e componentes, e parâmetros morfofisiológicos para tolerância à seca (TD) e eficiência do uso da água irrigada (IWUE) em condições de campo na região do Cerrado. Nos invernos de 2016 e 2017 foram plantados dez genótipos de trigo, para a seleção de genótipos de TD para biótipos de sequeiro e IWUE para biótipos irrigados. O experimento foi plantado no inverno com irrigação, pois não há precipitação nesse período e os níveis de água podem simular o estresse hídrico. Para isso, foi desenvolvido um protocolo de fenotipagem que permite um gradiente de irrigação. Os genótipos de trigo foram submetidos a quatro regimes hídricos: WR1, WR2, WR3 e WR4, representando 100%, 83%, 50% e 30% de reposição da evapotranspiração. Os parâmetros morfofisiológicos avaliados foram: altura da planta, comprimento do pedúnculo, comprimento da espiga, número de espigas m^{-2} , peso do hectolitro, peso de mil grãos e produtividade. O BRS264 esteve entre os mais produtivos em WR1 e WR2 nos dois anos de cultivo. O BRS404, um genótipo de sequeiro, foi um dos mais produtivos no WR3 em 2016 e 2017, sendo mais tolerante sob estresse moderado. O Aliança, um genótipo de trigo de terras altas, apresentou maior produtividade no WR4 em 2016 e 2017, sendo o mais tolerante à seca sob forte estresse hídrico. Todas as variáveis estudadas, exceto o comprimento da espiga e a eficiência no uso da água irrigada, apresentaram alta correlação com o rendimento de grãos de trigo. O comprimento do pedúnculo e o peso do hectolitro foram as variáveis que melhor se correlacionaram com a produção de trigo. Nas condições do experimento, nenhuma das variáveis estudadas contribuiu para a seleção dos genótipos de trigo mais eficientes no uso da água irrigada (IWUE). O PCA mostrou que as variáveis PH, PL, NE, TGW e HW são caracteres importantes para a seleção de genótipos mais produtivos.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*, seleção de plantas, estresse hídrico.

ABSTRACT

The selection of wheat genotypes with high yield potential and its main physiological characteristics that influence the yield under water stress are important for the off-season cultivation in the Cerrado region. The objective of this work was to characterize wheat genotypes through their yield and components, and morphophysiological parameters for drought tolerance (DT), and irrigated water use efficiency (IWUE) under field conditions in the Cerrado region. In the winters of 2016 and 2017 ten wheat genotypes were planted, for the selection of genotypes for DT for rainfed biotypes and IWUE for irrigated biotypes. The experiment was planted in winter with irrigation because there is no precipitation during this period and water levels can be done simulating water stress. For this purpose, a phenotyping protocol was developed which enables an irrigation gradient. Wheat genotypes were submitted to four water regimes: WR1, WR2, WR3 and WR4, representing 100%, 83%, 50% and 30% of evapotranspiration replacement. The following morphophysiological parameters were evaluated: plant height, peduncle length, ear length, number of ears m⁻², hectoliter weight, thousand grain weight and yield. BRS264 was among the most productive in WR1 and WR2 in the two years of cultivation. BRS404, a rainfed genotype, was one of the most productive in WR3 in 2016 and 2017, being more tolerant under moderate stress. Aliança, a upland wheat genotype, showed higher productivity in WR4 in 2016 and 2017, being the most drought tolerant under severe water stress. All variables studied, except ear length and efficiency in the use of irrigated water, showed a high correlation with wheat grain yield. The length of the stalk and the weight of the hectoliter were the variables that best correlated with wheat production. Under the conditions of the experiment, none of the studied variables contributed to the selection of the most efficient wheat genotypes in the use of irrigated water (IWUE). The PCA showed that the variables PH, PL, NE, TGW and HW are important characters for the selection of more productive genotypes.

Key words: *Triticum aestivum*, plant selection, water stress.

INTRODUÇÃO

No Brasil, o trigo é cultivado principalmente na região sul e representa 91% da produção nacional (CONAB, 2017). Esse cenário tem consequências marcantes para a estabilização da produção de trigo, uma vez que a instabilidade climática tem proporcionado grande vulnerabilidade no suprimento de trigo ao consumo brasileiro. Portanto, para aumentar a produção brasileira e garantir a autossuficiência de trigo, é essencial buscar regiões agrícolas potenciais (RIBEIRO et al., 2012).

No Cerrado brasileiro, o trigo é cultivado em duas estações: (1) no inverno em condições de irrigação e (2) no verão em condições de sequeiro. No inverno, sob condições de irrigação, as plantas devem ter eficiência no uso da água (WUE), enquanto o cultivo durante o verão, no final da estação chuvosa, o trigo é semeado durante a entressafra, e a principal limitação são os períodos secos, que exigem tolerância à seca (DT) dos genótipos de trigo.

O estresse hídrico altera a fisiologia e morfologia das plantas, de acordo com a intensidade e o tempo de exposição (FAHAD et al., 2017). Além disso, os estágios de pré-floração, floração e enchimento de grãos são os mais sensíveis e a redução de rendimento pode chegar a 50% (MAJID et al., 2007). Especificamente durante a segunda safra (safrinha), onde há períodos de seca (veranicos), e uma redução progressiva da precipitação, é essencial obter genótipos com DT. Assim, é necessário identificar genótipos adaptados ao estresse hídrico e manter a produtividade (MUNNS et al., 2010).

A seleção de genótipos de trigo tolerantes à seca deve ser preferencialmente realizada em condições de campo desde o pré-melhoramento (AVRAMOVA et al., 2016). Protocolos de fenotipagem para tolerância à seca em condições de campo são descritos por Jayme-Oliveira et al. (2017) e podem ser aprimorados para uma seleção mais eficiente. Para isso,

uma análise de correlação vinculada a parâmetros importantes é útil e conclusiva para identificar critérios de seleção e desenvolver melhores variedades. As correlações fenotípicas dentro das variedades são indicadores valiosos do grau em que várias características estão associadas à produtividade das culturas (WAITT e LEVIN, 1998). Essa fenotipagem confiável, além dos procedimentos convencionais e biotecnológicos de reprodução, poderia tornar os processos de genotipagem e prospecção de genes mais eficientes.

O objetivo deste estudo foi caracterizar dez genótipos modernos e tradicionais de trigo sequeiro e irrigado, através de seu rendimento e componentes, para tolerância à seca e eficiência no uso da água irrigada na região do Cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido de junho a setembro de 2016 e 2017, sob sistema plantio direto, na Embrapa Cerrados, Planaltina DF (Brasil), cujas coordenadas geográficas são 15°35'30" S e 47°42'30" W e altitude de 1000 m. O clima predominante na região é do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), típica de savanas com duas estações bem definidas: seca e fria (outono e inverno) e quente e úmida (primavera e verão).

O solo é classificado como Latossolo típico, com textura argilosa (SANTOS et al., 2018), e essa área experimental foi plantada com trigo por dez anos, com as mesmas cultivares selecionadas para este estudo. A caracterização química do solo na camada de 0-20 cm, amostrada antes da instalação do experimento, foi: pH (H₂O) = 6,36; Matéria orgânica = 21,6 g dm⁻³, P (Melich⁻¹) = 7,23 mg dm⁻³; K, Ca, Mg, H+Al e CTC: 0,35; 3,01; 1,72; 3,47 e 8,55 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com 4 repetições. As parcelas corresponderam a dez genótipos de trigo (Brilhante, Aliança, BR18, BRS404, PF020037, PF020062, PF080492 (biótipos de sequeiro) e BRS254, BRS264, CPAC0544 (biótipos irrigados). As subparcelas corresponderam a quatro regimes hídricos (WR). Em 2016 foram aplicados 601 mm, 501 mm, 301 mm e 184 mm, correspondentes a WR1, WR2, WR3 e WR4, respectivamente. Em 2017, foram aplicadas 570 mm, 452 mm, 280 mm e 166 mm correspondentes a WR1, WR2, WR3 e WR4, respectivamente. Em 2016 e 2017, os regimes hídricos utilizados foram equivalentes a 100 %, 83 %, 50 % e 30 % da reposição da evapotranspiração da cultura.

As cultivares de biotipo de sequeiro foram Brilhante, Aliança e BR18 (todos os materiais tradicionais) e BRS 404 (lançado em 2015). As linhagens de sequeiro desenvolvidas para a região do Cerrado foram PF020037 (presença de enceramento intenso nas folhas e colmo, de acordo com Ribeiro Junior et al., 2006), PF020062 (mesma linhagem que o genótipo anterior, mas sem cera). O biotipo de sequeiro PF080492 foi desenvolvido para o Sul do Brasil, com boa adaptação à região do Cerrado. Os biotipos irrigados foram BRS254, BRS264 e CPAC0544.

Os genótipos de trigo foram semeados no início de junho nos anos de 2016 e 2017, com semeadora de parcelas experimentais, modelo Semeato, com 8 linhas e espaçamento de 0,17 metros e 90 plantas por metro. Para a aplicação dos regimes hídricos, foi utilizada uma barra de irrigação por aspersão, com 18 m de largura de cada lado, conectada ao carretel de enrolamento, com velocidade ajustável. A irrigação foi homogênea em todos os genótipos até 30 dias após a emergência das plantas nos dois anos de cultivo. Aos 30 dias após a emergência da planta, 0,5 L ha⁻¹ de "Moddus" (trinexapac-ethyl) foi aplicado na área experimental, para controle de acamamento. Após esse período de estabelecimento da cultura, foi adotada a metodologia de "line source" adaptada (Hanks et al., 1976), que foi modificada pela introdução de uma barra de irrigação, utilizando-se aspersores com diferentes taxas de fluxo do centro para a borda da barra.

A sobreposição entre os diferentes aspersores promoveu uma diminuição do gradiente de água da área central da barra (considerada o nível ideal de água) até o final da barra, o que permitiu criar um gradiente de água ao longo da barra. Foram selecionadas quatro parcelas com diferentes regimes hídricos, cada uma separada da outra por um metro. Cada unidade experimental representou uma área de 1,02 m².

Foram selecionadas quatro parcelas com diferentes regimes hídricos para as avaliações morfofisiológicas e produtividade e estas estavam a 3, 7, 11 e 15 metros do centro da barra irrigadora. Cada unidade experimental possuía a área de 1,02 m².

Durante a fase de irrigação uniforme, 134 mm de água foram aplicadas em 2016, incluindo chuvas de 7,5 mm. Em 2017, durante o mesmo período de irrigação uniforme, foram aplicados 150 mm de água e nenhuma precipitação foi registrada. Os níveis de água aplicados foram calculados de acordo com a evapotranspiração da cultura em cada ano, usando dados de estações meteorológicas localizadas ao lado de experimentos.

O regime hídrico, acumulado durante os 105 dias de ciclo de 2016, no primeiro coletor, a 3 metros do início da barra foi de 601 mm (WR1). Os demais regimes estavam a 7 (WR2), 11 (WR3) e 15 metros (WR4), acumulando 501, 301 e 184 mm, respectivamente. Em 2017, o ciclo da colheita foi de 98 dias, acumulando 575 mm no primeiro coletor, a 3 metros do início da barra, e 475, 290 e 175 mm nos coletores a 7, 11 e 15 metros do centro da barra irrigadora, respectivamente.

A frequência da irrigação foi realizada a cada cinco dias e a mais alta foi baseada no programa de monitoramento da irrigação no cerrado (EMBRAPA, 2011), para substituição da evapotranspiração da cultura do trigo, considerando os dados agrometeorológicos da região do Cerrado, tipo de solo e a data de emergência total das plantas. A quantidade de água aplicada em cada data de irrigação foi quantificada através de duas fileiras de coletores em posição paralela à barra irrigadora.

As avaliações morfológicas iniciaram com o pleno florescimento da cultura e foram realizadas na área útil das subparcelas, em 1 metro de cada regime hídrico nas 4 linhas centrais da parcela. A avaliação da altura da planta (PH) foi obtida de 10 plantas por tratamento e foi medida do nível do solo até o final da espiga.

A colheita do experimento ocorreu em Setembro nos dois anos de cultivo e foi mecanizada, exceto quando foram determinados os componentes de produção, que foram realizados manualmente. Os componentes de produção avaliados foram: comprimento do pedúnculo (PL), comprimento da espiga (EL), número de espigas m^{-2} (NE m^{-2}), peso do hectolitro (PV), peso de mil grãos (TGW) e produtividade. O PL e EL foram determinados com uma fita métrica graduada em centímetros, e 10 plantas foram avaliadas aleatoriamente em cada unidade experimental. O NE m^{-2} foi determinado pela contagem direta das espigas colhidas na área útil e depois extrapolado para m^{-2} . HW, TGW e produtividade foram realizados com base nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). A eficiência no uso da água irrigada (IWUE) foi calculada pela razão entre a produtividade e a quantidade de água aplicada durante todo o ciclo da cultura, e é apresentada em $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$.

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk, que confirmou a normalidade dos dados nos dois anos. Os dados foram submetidos à análise conjunta de variância dos anos de 2016 e 2017 pelo teste F e a comparação de médias foi feita pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. O modelo estatístico foi ajustado usando o SAS Proc Mixed, usando o método de máxima verossimilhança restrita (reml). Os dados também foram submetidos ao teste de correlação de Pearson entre todas as variáveis, utilizando os dados individuais de cada variável e foi feita a análise de componentes principais (PCA) com o programa estatístico R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A identificação de parâmetros ligados simultaneamente à tolerância à seca e à produtividade pode ser uma ferramenta interessante a ser usada em programas de melhoramento. Todas as variáveis estudadas apresentaram resíduos normais de acordo com o teste de Shapiro-Wilk. O efeito das interações genótipos x anos e regime hídrico x anos foi significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F, indicando respostas diferentes dos genótipos e regimes hídricos às condições ambientais. A análise foi realizada separadamente para cada ano e todas as variáveis mostraram interação significativa entre genótipos e regimes de água com 5% de probabilidade (exceto EL em 2017 e NE m⁻² em 2016, Figuras 2, 3, 4 e 5).

EFEITOS DOS GENÓTIPOS E REGIMES HÍDRICOS NA PRODUTIVIDADE

A produtividade apresentou interação entre os genótipos de trigo e WRs avaliados, e os genótipos de trigo apresentaram produtividade diferente, dependendo do ano (Figura 2A). Desta forma, foi avaliada isoladamente para cada ano de cultivo, a resposta dos genótipos em cada regime hídrico e a resposta dos regimes hídricos dentro de cada genótipo.

No regime hídrico WR1, em 2016, os genótipos PF080492 (5302 kg ha⁻¹) e BR18 (5195 kg ha⁻¹) apresentaram maior produtividade que Brilhante (4561 kg ha⁻¹), Aliança (4227 kg ha⁻¹), BRS404 (4188 kg ha⁻¹), BRS254 (4579 kg ha⁻¹) e PF20037 (2874 kg ha⁻¹) (Figura 2A). Nesse mesmo regime hídrico, em 2017, a produtividade dos genótipos de trigo foi diferente, uma vez que o PF080492, que obteve bons resultados no ano anterior, agora expressa baixas produtividades (4855 kg ha⁻¹), juntamente com o PF020062 (4795 kg ha⁻¹). A maior

produtividade deste ano foi observada pelo BRS404 (5745 kg ha⁻¹) em relação aos genótipos mencionados acima.

No regime hídrico sob baixo estresse, WR2, em 2016, PF080492 e BRS264 apresentaram as maiores médias (5192 e 5432 kg ha⁻¹, respectivamente), e BR18 e PF20037 apresentaram as menores produtividades (2924 e 2975 kg ha⁻¹, respectivamente) (Figura 2A). Em 2017, a resposta dos genótipos no WR2 foi semelhante à encontrada no WR1, onde o BRS404 apresentou a maior produtividade (5926 kg ha⁻¹), superior ao PF080492 e PF020062 (5052 e 4659 kg ha⁻¹). Além desses dois genótipos, o BRS404 também foi superior ao Aliança, Brillhante, PF020037 e BR18 (5065, 5030, 4952 e 4791 kg ha⁻¹, respectivamente) (Figura 2A).

Nesses dois regimes hídricos, WR1 e WR2, houve uma tendência para o BRS264 ser mais produtivo entre os anos estudados. Vale ressaltar que o BRS264 é um material desenvolvido para cultivo irrigado. Os outros dois regimes hídricos, WR3 e WR4, também obtiveram um genótipo de destaque (BRS404) nos dois anos estudados.

No regime de estresse moderado, WR3, em 2016, as diferenças entre os genótipos foram menores, e a menor produtividade foi obtida no PF020037 (2431 kg ha⁻¹), e diferiu estatisticamente apenas do BRS254 e BRS404, que apresentaram as maiores produtividades (3180 e 3048 kg ha⁻¹, respectivamente) (Figura 2A). Nesse mesmo regime hídrico para o ano de 2017, o BRS404 (4003 kg ha⁻¹) e o BR18 (3811 kg ha⁻¹) apresentaram produtividade superior ao PF0800492 (2903 kg ha⁻¹). Dessa forma, o BRS404 mostra-se adaptado às condições de estresse hídrico moderado em relação aos demais genótipos, pois mantém seu desempenho produtivo entre os anos sob a mesma condição de estresse. Vale ressaltar que esse regime hídrico é o mais próximo da condição de cultivo de segunda safra na região do cerrado brasileiro, portanto, o BRS404 mostra-se uma boa opção para cultivo.

Sob estresse severo (WR4), em 2016, o Aliança (1880 kg ha⁻¹) apresentou maior produtividade que BRS254 (1070 kg ha⁻¹), BRS264 (754 kg ha⁻¹), PF020492 (1163 kg ha⁻¹), PF020037 (1156 kg ha⁻¹) e BR18 (1261 kg ha⁻¹). Em 2017, nesse mesmo regime hídrico, o Aliança apresentou maior produtividade (2351 kg ha⁻¹), a mesma resposta encontrada no ano de 2016 (Figura 2A). Entre os genótipos de trigo estudados, o Aliança é um material antigo e tradicional no cultivo de sequeiro no Cerrado, e pode ser considerado tolerante à seca.

Esses resultados demonstram a necessidade de mais anos deste tipo de estudo para a seleção de materiais mais produtivos, principalmente para condições de boa disponibilidade hídrica, uma vez que foi constatado que os efeitos ambientais foram determinantes no comportamento dos genótipos de trigo. Relações diferenciais entre componentes de produção e produtividade de grãos podem ser atribuídas a efeitos ambientais no desenvolvimento da planta (ASSENGET al., 2002). Kaya e Akcura (2014) observaram que a produtividade e a qualidade dos grãos eram determinados principalmente pelo ambiente, em comparação às características genéticas dos genótipos de trigo.

Ao avaliar os regimes hídricos em cada genótipo, observou-se que Aliança, BRS254, BRS264, BRS404, PF080492 e PF020037 apresentaram a mesma resposta nos dois anos de estudo (Figura 2A). Nesses genótipos, WR1 e WR2 foram semelhantes e superiores a WR3 e WR4, respectivamente. Para a BR18, em 2016, o WR2 (2924 kg ha⁻¹) foi menor que a WR1 (5195 kg ha⁻¹). Em 2017, para esse genótipo, a produtividade foi estatisticamente diferente para todos os regimes hídricos, com maiores médias observadas na WR1 e diminuiu à medida que a quantidade de água aplicada foi reduzida (Figura 2A). Esse mesmo comportamento foi observado para os genótipos Brillhante, CPAC0544 e PF020062 em 2016, que apresentaram o maior produtividade em WR1, e diminuíram com o aumento do estresse hídrico. Esses mesmos genótipos no ano de 2017 mostraram produtividades em WR1 e WR2 estatisticamente semelhantes e superiores a WR3 e WR4, respectivamente (Figura 2A).

No geral, na avaliação de regimes hídricos em cada genótipo, houve uma diminuição no rendimento em WR4 (Tabela 3). Essa resposta já era esperada, pois vários estudos demonstraram a restrição da produtividade de trigo em detrimento do estresse hídrico. Isso ocorre porque, em geral, os estágios de produção e enchimento de grãos são considerados os mais sensíveis ao estresse hídrico (FAROOQ et al., 2014), e seus efeitos dependem da duração e severidade do estresse (FAHAD et al., 2017). Os efeitos do estresse hídrico nas diferentes fases fenológicas do trigo também foram estudados por Majid et al. (2007). Esses autores obtiveram que as etapas de pré-floração, floração e enchimento de grãos são as mais sensíveis.

Assim, WR3 e WR4, que apresentaram a redução mais significativa na quantidade de água aplicada, apresentaram comprometimento na produtividade de grãos como resultado da menor disponibilidade de água nos períodos mais sensíveis. Além disso, quando o estresse foi mais severo no WR4, a redução foi mais significativa (Tabela 3). Essa mesma tendência foi observada por Ma et al. (2014), onde o estresse severo causou maior redução de produtividade que o estresse moderado.

CARACTERIZAÇÃO DOS GENÓTIPOS

Altura da planta (PH)

Sabe-se que a altura das plantas é uma característica de alta herdabilidade genética; no entanto, o intenso estresse hídrico (ARYA et al., 2018) pode influenciá-la. As plantas com déficit hídrico têm seu crescimento interrompido, pois a água é um elemento-chave na divisão celular, alongamento e diferenciação, e as células com déficit hídrico têm seu crescimento reduzido, resultando em plantas malformadas e atrofiadas e atrasando seu ciclo fenológico (HUSSAIN et al., 2008).

Os resultados do presente trabalho mostraram alguns genótipos foram superiores para a altura das plantas (PH) e uma interação significativa dos genótipos estudados e dos regimes hídricos. No geral, Brillhante foi superior a outros genótipos em quase todos os regimes hídricos em 2016 (1,07, 1,08, 0,95 e 0,72 m em WR1, WR2, WR3 e WR4, respectivamente) e em 2017 (0,94, 0,97, 0,90 e 0,76 m em WR1, WR2, WR3 e WR4, respectivamente) (Figura 2B).

Em geral, as menores alturas foram encontradas nos genótipos CPAC0544, BRS254, BRS264, BR18 e PF080492 nos dois anos e nos quatro regimes hídricos aplicados (Figura 2B). É importante obter plantas menores para genótipos de trigo, uma vez que vários estudos enfatizam a associação da altura das plantas com alto potencial de produtividade, resistência ao acamamento e maior índice de colheita (KELBERT et al., 2004; MOTZO et al., 2004; ZEČEVIĆ et al., 2008). Cabe ressaltar que a aplicação do redutor de crescimento foi homogênea em todos os genótipos e regimes hídricos. O uso de redutor de crescimento é importante porque, no inverno, no cultivo irrigado, os materiais de sequeiro terão maior tendência ao acamamento. No entanto, o acamamento ocorre apenas no inverno e, no verão, sob condições de sequeiro, esse acamamento não ocorre. Além disso, a altura da planta foi correlacionada positivamente com a produtividade (0,61 e 0,63, $p < 0,01$) em 2016 e 2017, respectivamente (Tabela 1). A diminuição da altura da planta sob condições de estresse hídrico pode, portanto, ser um critério de seleção para a tolerância à seca. A altura da planta correlacionou-se positivamente com a produtividade em cultivares de trigo semi-anões e as cultivares mais altas apresentaram os maiores rendimentos (HEYNE e CAMPBELL, 1971; JOPPA, 1973; NASRI et al., 2014).

O regime hídrico teve impacto na altura das plantas na maioria dos genótipos. De maneira geral, nos dois anos de cultivo, todos os genótipos foram estatisticamente semelhantes em WR1 e WR2 e menores em WR3 e WR4 (Figura 2B). Os resultados obtidos

neste estudo mostraram que os regimes hídricos afetaram diferentemente o crescimento dos genótipos de trigo. Além disso, também é observado que a altura das plantas foi mais afetada pelos regimes hídricos em 2016, com quedas mais acentuadas, principalmente de WR1 para WR3 e WR1 para WR4. De WR1 a WR4, a média de PH entre todos os genótipos de trigo em 2016 diminuiu de 13 para 33%, respectivamente, enquanto em 2017 foi menor em 6 e 24%, respectivamente.

Comprimento do pedúnculo (PL)

O comprimento do pedúnculo (PL) tem sido extensivamente estudado como uma característica importante relacionada ao rendimento de grãos. Nossos resultados mostraram pequenas diferenças para PL nos genótipos estudados. Em 2016, o Brillhante apresentou PL maior que o BRS404 no WR1 e WR3. No WR4, o PL foi semelhante em todos os genótipos de trigo. Brillhante teve pedúnculos significativamente mais longos em WR1, WR2 e WR3 em 2017, em comparação com o Aliança e BRS404. No WR4, o PL do Brillhante foram superiores aos BRS264 e PF020037 (Figura 3A). Por outro lado, a disponibilidade de água teve um forte efeito no PL dentro de cada genótipo de trigo. No geral, em dois anos de cultivo, todos os genótipos expressaram uma diminuição progressiva da PL à medida que a WR diminuiu (Figura 3A).

O comprimento do pedúnculo é uma característica importante, pois há uma contribuição das reservas dos pedúnculos e penúltimos entre nós de 10,2 e 8,4%, respectivamente na produtividade do trigo (BORRELL et al., 1993); isso se deve à remobilização das reservas do caule durante o período de enchimento de grãos de trigo, que são uma fonte essencial de carboidratos para o enchimento completo de grãos (EHDAIE et al., 2008), especialmente sob condições de estresse hídrico com aumento da remobilização de carboidratos (MOHAMMADI-BAZARGANI et al., 2012). Os resultados deste trabalho corroboram com

essa ideia: foi obtida correlação positiva entre o comprimento do pedúnculo e produtividade, com índices de correlação significativos de 0,84 e 0,77 ($p < 0,01$), em 2016 e 2017, respectivamente (Tabela 1). Vale ressaltar que entre todas as variáveis estudadas, o comprimento do pedúnculo apresentou a maior correlação com a produtividade (ou seja, índice de correlação de 0,85, MODARRESI et al., 2010). Portanto, sob condições estressantes, o PL deve ser uma variável a ser estudada.

Comprimento da espiga (EL)

A expressão do comprimento da espiga é altamente dependente de fatores genéticos e ambientais (ZECEVIC et al., 2008). Silva et al. (2010) estudaram 17 genótipos de *Triticum durum* e verificaram alta variabilidade no comprimento do EL, indicando alta variabilidade genética, mas também diferenças entre os anos estudados para um mesmo genótipo, indicando uma contribuição de fatores ambientais. Nossos resultados corroboram com este estudo; os genótipos apresentaram diferenças nos comprimentos das espigas (EL) em 2016 e 2017 (Figura 3B). Em 2016, para WR1, WR2 e WR3, BRS254, PF080492 e CPAC0544 foram estatisticamente superiores aos demais (Figura 3B). Para WR4, apenas BRS254 e CPAC0544 apresentaram valores mais altos (8,8 e 8,9 cm, respectivamente) que os demais genótipos estudados. Todos os genótipos apresentaram valores significativamente semelhantes para todos os regimes hídricos ou apenas significativamente diferentes no regime hídrico mais severo (WR4) (Figura 3B).

EL em 2017 não mostrou interação significativa, e são apresentados os efeitos simples desta variável. Os genótipos de trigo apresentaram a mesma tendência do ano anterior: CPAC0544 e BRS254 apresentaram os maiores EL (9,2 e 9,0 cm, respectivamente). O EL nos WRs apresentou resultados diferentes dos obtidos em 2016, o WR4 expressou as maiores

médias para essa variável (8,1 cm, Tabela 1), e esses valores foram estatisticamente diferentes do WR2 (Figura 3B).

O comprimento da espiga não se correlacionou com os outros componentes de produção que exercem alta influência sobre a produção de grãos, além disso, nossos resultados mostraram pouca relação do EL com a produtividade na correlação de Pearson. Em 2016, a correlação foi de 0,30 ($p < 0,01$) e em 2017 o EL não expressou correlação com a produtividade e, quando apresentou, as correlações com outras variáveis foram negativas (Tabela 1). Resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo foram obtidos por Ojha et al. (2018), que não encontraram correlação entre comprimento da espiga e produtividade nos genótipos de trigo.

Número de espigas (NE m⁻²)

O número de espigas por metro quadrado (NE m⁻²) em 2016 não apresentou interação significativa, portanto os efeitos simples foram analisados. PF080492 apresentou a média mais alta e CPAC0544 apresentou a média mais baixa (517 espigas m⁻² e 359 espigas m⁻², respectivamente, Figura 4A). Para o fator regime hídrico, WR1 e WR2 foram estatisticamente semelhantes e superiores a WR3 e WR4, respectivamente (Figura 4A), indicando que em 2016 a seca afetou o desenvolvimento dos perfilhos.

Em 2017, os genótipos de sequeiro PF080492 e PF020037 obtiveram as médias significativamente mais altas para NE m⁻² no WR1, em comparação com BRS254, BRS264 e CPAC0544 (598,5 e 595,5 NE m⁻², respectivamente). Para o WR2, apenas o PF080492 apresentou valores superiores a todos os demais genótipos de trigo, com exceção de Brilhante, BRS404 e PF020037 (Figura 4A). Nos regimes hídricos WR3 e WR4, todos os genótipos apresentaram valores estatisticamente semelhantes (Figura 4A). Em 2017, os genótipos que não diferiram no NE m⁻² sob diferentes regimes hídricos foram Aliança, BRS254, BRS264 e

CPAC0544 (Figura 4A). Brilhante e BRS404 apresentaram menor NE m⁻² apenas em WR4 (337,2 NE m⁻²). BR18, PF080492 e PF020062 apresentaram menor NE m m⁻² em WR4 em comparação com WR1 (Figura 4A).

O NE m⁻² apresentou bons índices de correlação com produtividade, 0,68 e 0,56 ($p < 0,01$), em 2016 e 2017, respectivamente (Tabela 1). Ojha et al. (2018) obtiveram resultados semelhantes com uma correlação de 0,66 entre NE m⁻² e produtividade. Esses resultados indicam que o NE m⁻² é uma variável importante para a seleção de genótipos de trigo mais produtivos. O NE m⁻² pode ser usado como um critério de seleção eficaz para aumentar a produção de grãos de trigo sob diferentes níveis de irrigação (KHAN e NAQVI 2012). Além disso, o principal componente responsável pela regulação do rendimento de grãos impulsionado por fatores ambientais é o NE m⁻², um componente do número de grãos m⁻² (SLAFER et al., 2014).

Peso de mil grãos (TGW)

O peso de mil grãos (TGW) apresentou diferenças significativas entre os genótipos de trigo e, em geral, o BR18 se destacou positivamente em todos os regimes hídricos nos dois anos estudados. Além disso, no geral, o BR18 foi o único genótipo com TGW significativamente maior (Figura 4B). O efeito dos regimes hídricos dentro de cada genótipo mostrou que a disponibilidade de água desempenhou um papel importante para o TGW. Todos os genótipos nos dois anos reduziram seu TGW no WR4 e a maioria dos genótipos reduziu o TGW no WR3 (Figura 4B).

As correlações do TGW com a produtividade foram significativas ($p < 0,01$), com valores de 0,65 e 0,50 para 2016 e 2017, respectivamente (Tabela 1). De acordo com Slafer et al. (2014), o TGW pode responder a pequenas mudanças devido a fatores genéticos ou ambientais, atuando assim como um ajuste fino do rendimento de grãos. Correlações positivas

entre TGW e produtividade também foram obtidas por Ayer et al. (2017) e Gonzalez-Navarro et al. (2016), este último autor estudou 27 genótipos de trigo de elite.

O BR18, que é um material tradicional de trigo, destacou-se pelo TGW nos dois anos e em todos os regimes hídricos, o que além de ser uma indicação de tolerância à seca, pode levar a uma melhor extração de farinha.

Peso do Hectolitro (HW)

O peso do hectolitro é uma capacidade intrínseca do genótipo, no entanto é dependente do ambiente, da temperatura e da umidade. O peso do hectolitro (HW) apresentou diferenças significativas entre os genótipos estudados, nos dois anos de cultivo (Figura 5A). Nossos resultados indicam que, em geral, o BRS404 obteve uma média de HW mais elevada em todos os regimes hídricos e nos dois anos (de 79,1 a 83,4 kg hL⁻¹, Figura 5A).

Os regimes hídricos dentro de cada genótipo mostraram que a disponibilidade de água desempenhou um papel importante para o HW. Nenhum genótipo se destacou e todos eles sofreram com a redução da disponibilidade de água, sendo que a maioria dos genótipos apresentou redução no HW do WR1 para WR3 (Figura 5A). Vale ressaltar que, apesar das diferenças estatisticamente significativas, todos os genótipos e regimes hídricos nos WR1, WR2 e WR3 tinham um valor aceitável de HW e não seriam descartados no mercado; no entanto, no estresse hídrico severo (WR4), o BRS264 poderia ter problemas na comercialização, embora ainda estivesse em um nível aceitável (acima de 70%).

O peso do hectolitro apresentou boa correlação com a produtividade (0,73, $p < 0,01$) nos dois anos de cultivo (Tabela 1). Resultados semelhantes foram obtidos por Dogan (2009), que encontrou uma correlação de 0,76 entre HW e produtividade em *Triticum durum*.

Segundo Troccoli e Di Fonzo (1999), os valores de HW do trigo geralmente variam de 70 a 85 kg hl⁻¹, mas podem ser maiores ou menores devido às condições ambientais. Quanto

maior o valor do HW, melhor a qualidade do trigo, o que reflete em maior rendimento de farinha. No presente estudo, mesmo com limitação hídrica, todos os genótipos apresentaram valores de HW superiores a 70 kg hl⁻¹, porém, em geral, todos os genótipos apresentaram melhor qualidade dos grãos em WR1 e WR2 e, com a redução da quantidade de água aplicada, o HW também foi reduzido (Figura 5A).

Eficiência no uso da água irrigada (IWUE)

A eficiência no uso da água (WUE) é entendida como uma medida da quantidade de biomassa produzida por unidade de água usada por uma planta (HATFIELD & DOLD, 2019), definida aqui como o rendimento de grãos dividido pela quantidade de água aplicada. Essa variável é uma importante característica fisiológica que reflete a capacidade de resposta das culturas ao estresse hídrico em relação ao rendimento potencial (RICHARD, 2006; ZHANG et al., 2007).

Neste trabalho, a eficiência no uso da água irrigada (IWUE) foi adotada, porque essa variável é mais importante do ponto de vista prático do que a WUE, e também devido às limitações de considerar a ET_c. Segundo Farré e Faci (2009), nem toda a água é usada no processo de evapotranspiração, e parte dela pode ser perdida por escoamento superficial e percolação profunda e, além disso, uma fração do ET_c pode ser proveniente de outras fontes de irrigação, como a água armazenada no solo e a precipitação efetiva. Além disso, de acordo com Farré e Faci (2009), essa variável auxilia na avaliação da produtividade dos sistemas agrícolas.

Em 2016, a avaliação dos genótipos de trigo dentro de cada regime hídrico para o IWUE mostrou diferenças significativas entre os genótipos. No WR1, todos os genótipos apresentaram valores superiores ao PF020037 (Figura 5B). Essa mesma tendência do PF020037 também foi obtida no WR2 e WR3. No WR4, o Aliança apresentou o maior IWUE

em relação aos demais genótipos ($10,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), o menor IWUE foi observado no BRS254 ($5,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) e no BRS264 ($4,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), que são materiais de biotipo irrigado (Figura 5B). Em 2017, todos os genótipos apresentaram IWUE semelhante em WR1 e WR2. No WR3, o BRS404 apresentou IWUE maior que o PF080492, e no WR4, o Aliança apresentou IWUE maior que o PF080492, PF020037 e CPAC0544 (Figura 5B).

Esses resultados mostram claramente que os genótipos de trigo responderam diferentemente aos WRs aplicados nos dois anos, sugerindo que cada genótipo tem um diferente limiar de estresse hídrico no solo. Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com Hu et al. (2006), Siahpoosh et al. (2011) e Siahpoosh e Dehghanian (2012), que também encontraram respostas diferentes entre a eficiência do uso da água em vários genótipos de trigo, de acordo com os regimes de água aplicados.

Em relação aos regimes hídricos em cada genótipo, encontramos uma alta distinção entre genótipos. No geral, WR3 teve o maior rendimento por mm de água aplicada em comparação com WR1 e WR4 (Figura 5B). Esses resultados estão de acordo com vários autores (KATERJI et al., 2010, SOUZA et al., 2019), os quais relatam que sob baixa disponibilidade de água (WR4) observa-se baixos valores de IWUE, pois as plantas não conseguem expressar seu potencial de rendimento, já em na condição de alta disponibilidade de água (WR1), os valores de IWUE também foram baixos devido às plantas não serem capazes de absorver toda a água fornecida e também ao estresse por excesso de água.

O IWUE dos genótipos de trigo estudados não apresentou correlação significativa com as variáveis estudadas nos dois anos de cultivo, exceto para o peso do hectolitro e a produtividade em 2016, mas com fraca intensidade de correlação ($0,30, p < 0,01$ e $0,42, p < 0,01$, respectivamente) (Tabela 1).

ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A porcentagem de variância total explicada pelos diferentes componentes principais e suas correlações são mostradas na matriz dos componentes analisados para os dois anos de cultivo (Tabela 2). Três componentes principais foram importantes: para 2016, contribuíram com 82,38% da variância total observada e, para 2017, a contribuição foi de 75,66% da variância total observada (Tabela 2).

Em 2016, o primeiro componente contribuiu com 56,06% da variância total, onde PH, PL, NE, TGW, HW e YD tiveram uma alta carga positiva. No segundo componente, a contribuição acumulada foi de 71,30% e a alta carga positiva foi expressa por EL e IWUE. No terceiro componente, apenas o IWUE que apresentou carga positiva, acumulando 82,38% da variância total (Tabela 2).

Para o ano de 2017, o primeiro componente contribuiu com 47,84% da variância total e as variáveis que apresentaram alta carga positiva foram as mesmas do primeiro componente do ano de 2016 (PH, PL, NE, TGW, HW e YD). No segundo componente, a contribuição acumulada foi de 62,08%, e a alta carga positiva foi verificada apenas para a variável IWUE. O terceiro componente apresentou alta carga positiva apenas para a variável EL, acumulando 75,66% da variância total (Tabela 2).

Esses resultados mostram que a caracterização dos genótipos de trigo é de relevante importância na seleção de materiais mais produtivos, pois, como observado nos dois anos de cultivo, cinco dos sete componentes avaliados expressaram influência direta no rendimento de grãos, que são: PH, PL, NE, TGW e HW. De acordo com Mwadzingeni et al. (2016), a avaliação de alguns componentes da produção na seleção pode resultar na seleção simultânea de genes complementares que aumentam o rendimento de grãos.

Os biplots dos componentes principais que contêm a relação entre as variáveis estudadas e os genótipos nos diferentes regimes hídricos, nos dois anos de cultivo, estão ilustrados nas Figuras 6 e 7. Com base nos biplots, observamos que, para a obtenção de genótipos com maior rendimento, o componente que mais auxilia na seleção é o PL, pois possui a mesma direção e o menor ângulo do vetor YD. PH, NE, TGW e HW também expressam importância no processo de seleção de materiais mais produtivos. Ao avaliar a distribuição dos pontos de cada genótipo em cada regime hídrico, observou-se que uma tendência para WR1 e WR2 se posicionarem no lado dos valores mais altos do primeiro componente principal, na mesma orientação que o rendimento, independente do genótipo (Figuras 6 e 7). O WR3 concentrou os pontos nos valores mais altos do primeiro e do segundo componentes principais. Já o WR4 apresentou seus pontos concentrados nos valores positivo e negativo do segundo componente principal, com orientação oposta à produtividade (Figuras 6 e 7).

CONCLUSÕES

O BRS264, um biotipo irrigado, esteve entre os genótipos de trigo mais produtivos nos maiores regimes hídricos (WR1 e WR2), nos dois anos de cultivo.

Considerando que WR1 foi o nível mais alto de água, não era esperado que o biotipo de sequeiro (BR18) apresentasse uma produtividade maior que o biotipo irrigado (BRS254).

O BRS404, um genótipo de sequeiro, foi um dos mais produtivos no WR3 em 2016 e 2017, sendo mais tolerante sob estresse moderado.

O Aliança, um genótipo de trigo de sequeiro, apresentou maior rendimento no WR4 em 2016 e 2017 e é o mais tolerante à seca sob severo estresse hídrico.

O comprimento do pedúnculo e o peso do hectolitro foram as variáveis que melhor se correlacionaram com a produtividade de trigo.

A eficiência no uso da água irrigada (IWUE) não se correlacionou com a produtividade e outras características estudadas. Além disso, o IWUE mostrou valores baixos sob baixa e (WR4) e alta disponibilidade de água (WR1).

A análise de componentes principais mostrou que as variáveis PL, NE, TGW e HW são características importantes para a seleção de genótipos mais produtivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711–728, 2013.

ARYA, V. K.; SINGH, J.; KUMAR, L.; NAGAR, S. S.; AHALAWAT, N. K.; CHAND, P. Genetic variability and heritability studies in relation to grain yield and its component traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). **International Journal of Agricultural and Statistical Sciences**, v. 14, p.215-222, 2018.

ASSENG, S.; TURNER, N. C.; RAYB, J. D.; KEATINGE, B. A. A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 123–141, 2002.

AVRAMOVA, V.; NAGEL, K. A.; ABDELGAVAD, H.; BUSTOA, D.; DUPLESSIS, M.; FIORANI, F. E.; BEEMSTER, G. T. S. Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, p. 2453–2466, 2016.

AYER, D. K.; SHARMA, A.; OJHA, B. R.; PAUDEL, A.; DHAKAL, K. Correlation and path coefficient analysis in advanced wheat genotypes. **SAARC Journal of Agriculture** 15: 1-12.

Borrell, A.; Incoll, L.D.; Dalling, M.J. 1993. The influence of the Rht1 and Rht2 alleles on the deposition and use of stem reserve in wheat. **Annals of Botany**, v. 71, p. 317–326, 2017.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. 1.ed. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do trigo**. Brasília: Conab, 2017. Disponível em: < www.conab.gov.br >. Acesso em 20 Fev. 2018.

DOGAN, R. The correlation and path coefficient analysis for yield and some yield components of durum wheat (*Triticum turgidum* var. Durum 1.) in west anatolia conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v. 41, p. 1081-1089, 2009.

EHDAIE, B.; ALLOUSH, G. A.; WAINES, J. G. Genotypic variation in linear rate of grain growth and contribution of stem reserves to grain yield in wheat. **Field Crops Research**, v. 106, p. 34–43, 2008.

FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; WU, C.; WANG, D.; HUANG, J. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-16, 2017.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 33, p. 331-349, 2014.

GONZALEZ-NAVARRO, O.E.; GRIFFITHS, S.; MOLERO, G.; REYNOLDS, M.P.; SLAFER, G.A. Variation in developmental patterns among elite wheat lines and relationships with yield, yield components and spike fertility. **FIELD CROPS RESEARCH**, v. 196, p. 294–304, 2016.

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.

HEYNE, E. G.; CAMPBELL, L. G. Experiments with semi-dwarf wheats in Kansas. **Transactions Kansas Academy Science**, v. 74, p. 147-156, 1971.

HUSSAIN, M.; MALIK, M. A.; FAROOQ, M.; ASHRAF, M. Y.; CHEEMA, M. A. Improving drought tolerance by exogenous application of glycine, betaine and salicylic acid in sunflower. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 194, p. 193–199, 2008.

JAYME-OLIVEIRA, A.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; Ziviani, A. C.; 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.

JOPPA, L. R. Agronomic characteristics of near-isogenic tall and semi-dwarf lines of durum wheat. **Crop Science**, v. 13, p. 743-746, 1973.

KAYA, Y.; AKCURA, M. Effects of genotype and environment on grain yield and quality traits in bread wheat (*T. aestivum* L.). **Food Science and Technology**, v. 34, p. 386-393, 2014.

KATERJI, N.; MASTRORILLI, M.; CHERNI, H. E. Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency. A 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. **European Journal of Agronomy**, v. 32, p. 177-185, 2010.

KELBERT, A.J.; SPANER, D.; BRIGGS, K. G.; KING, J. R. Screening for lodging resistance in spring wheat breeding programmes. **Plant Breeding**, v. 123, p. 349–354, 2004.

KHAN, N.; NAQVI, F. Correlation and path coefficient analysis in wheat genotypes under irrigated and non-irrigated conditions. **Asian Journal of Agricultural Sciences**, v. 4, p. 346-351, 2012.

MA, J.; HUANG, G. B.; YANG, D. L.; CHAI, Q. Dry matter remobilization and compensatory effects in various internodes of spring wheat under water stress. **Crop Science**, v. 54, p. 331–339, 2014.

MAJID, S. A.; ASGHAR, R.; MURTAZA, G. Yield stability analysis conferring adaptation of wheat to pre-and post-anthesis drought conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v. 39, p. 1623-1637, 2007.

MODARRESI, M.; MOHAMMADI, V.; ZALI, A.; MARD, M. Response of wheat yield and yield related traits to high temperature. **Cereal Research Communications**, v. 38, p. 23–31, 2010.

MOHAMMADI, M.; SHARIFI, P.; KARIMIZADEH, R.; SHEFAZADEH, M. K. Relationships between grain yield and yield components in bread wheat under different water availability (Dryland and Supplemental Irrigation Conditions). **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 40, p. 195-200, 2012.

MOHAMMADI-BAZARGANI, M.; HAJIREZAEI, M. R.; SALEKDEH, G. H.; BUSHEHRI, A. A. S.; FALAHATI-ANBARAN, M.; MORADI, F.; NAGHAVI, M. R.; EHDAIE, B. A view on the role of metabolites in enhanced stem reserves remobilization in wheat under drought during grain filling. **Australian Journal of Crop Science**, v. 6, p. 1613-1623, 2012.

MOTZO, R.; FOIS, S.; GIUNTA, F. Relationship between grain yield and quality of durum wheats from different eras of breeding. **Euphytica**, v.140, p. 147-154, 2004.

MUNNS, R.; JAMES, R. A.; SIRAUULT, X. R.; FURBANK, R. T.; JONES, H. G. New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, p. 3499–3507, 2010.

MWADZINGENI, L.; SHIMELIS, H.; TEFAY, S.; TSILO, T. J. Screening of Bread Wheat Genotypes for Drought Tolerance Using Phenotypic and Proline Analyses. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 1276, 2016. 12 p.

NASRI, R.; KASHANI, A.; PAKNEJAD, F.; VAZAN, S.; BARARY, M. Correlation, path analysis and stepwise regression in yield and yield component in wheat (*Triticum aestivum* L.) under the temperate climate of Ilam province, Iran. **Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences**, v. 4, p. 188-198, 2014.

OJHA, R.; SARKAR, A.; ARYAL, A.; RAHUL, K. C.; TIWARI, S.; POUDEL, M.; PANT, K.R.; SHRESTHA, J. Correlation and path coefficient analysis of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. **Farmand Management**, v. 3, p. 136-141, 2018.

RIBEIRO, G.; PIMENTE, A. J. B.; SOUZA, M. A. de; ROCHA, J. R. do A. S. de C.; FONSECA, W. B. da. 2012. Estresse por altas temperaturas em trigo: impacto no desenvolvimento e mecanismos de tolerância. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 18, p. 133-142, 2012.

RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; REBOUÇAS, U. V.; TRINDADE, M. da G.; FERREIRA, F. M.; SIQUEIRA, M. M. H.; SILVA, H. L. M.; RODRIGUES, G. C.; GUERRA, A. F.; ROCHA, O. C.; AMÁBILE, R. F.; ALBUQUERQUE, N. C.; SÓ e SILVA, M.; ALBRECHT, J. C.; DURÃES, F. O. M. **Fenotipagem para tolerância à seca visando o melhoramento genético do trigo no Cerrado**. Technical Circular Embrapa Trigo, v. 1, 2006. 20 p.

RICHARD, R. A. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water scarce environments. **Agricultural water management**, v. 80, p. 197-211, 2006.

SANTOS, H. G. dos, JACOMINE, P.K., ANJOS, L. H. C dos, OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A. de, ARAUJO FILHO, J. C. de, OLIVEIRA, J. B. de, CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 5ª. ed., Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SIAHPOOSH, M. R.; DEHGHANIAN, E. Water use efficiency, transpiration efficiency, and uptake efficiency of wheat during drought. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 1238–1243, 2012.

SIAHPOOSH, M.R.; DEHGHANIAN, E.; KAMGAR, A. Drought tolerance evaluation of bread wheat genotypes using water use efficiency, evapotranspiration efficiency, and drought susceptibility index. **Crop Science**, v. 51, p. 1198–1204, 2011.

SILVA, A.H da; CAMARGO, C.E de. O.; RAMOS JÚNIOR, E.U. Potential of durum wheat genotypes for productivity and agronomic traits in São Paulo State. **Bragantia**, v. 69, p. 535-546, 2010.

SLAFER, G. A.; SAVIN, R.; SADRAS, V. O. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. **Field Crops Research**, v. 157, p. 71–83, 2014.

SOUZA, P. J. O. P.; RAMOS, T. F.; FIEL, L. de C. S.; FARIAS, V. D. da S.; SOUSA, D. de P.; NUNES, H. G. G. C. Yield and water use efficiency of cowpea under water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 119-125, 2019.

TROCCOLI, A.; DI FONZO, N. Relationship between kernel size features and test weight in *Triticum durum*. **Cereal Chemistry**, v. 76, p. 45-49, 1999.

WAIIT, D. E.; LEVIN, D. A. Genetic and phenotypic correlations in plants: a botanical test of Cheverud's conjecture. **Heredity**, v. 80, p. 310–319, 1998.

ZEČEVIĆ, V.; KNEŽEVIĆ, D.; MIĆANOVIĆ, D.; MADIĆ, M. Genetic and phenotypic variability of spike length and plant height in wheat. **Kragujevac Journal of Science**, v. 30, p. 125-130, 2008.

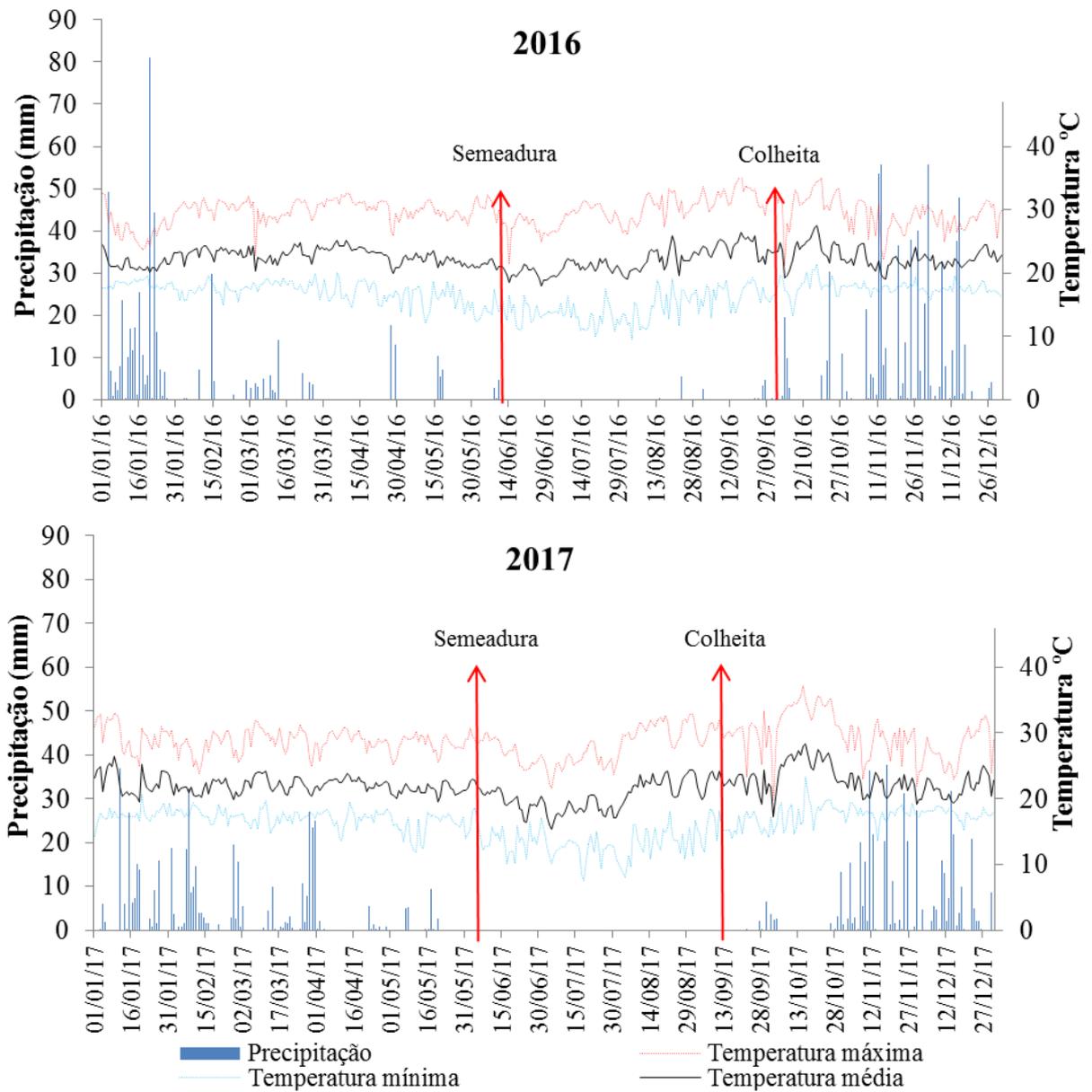


Figura 1. Precipitação (mm), temperatura máxima, mínima e média (°C) na área experimental nos dois anos de cultivo do trigo, 2016 e 2017.

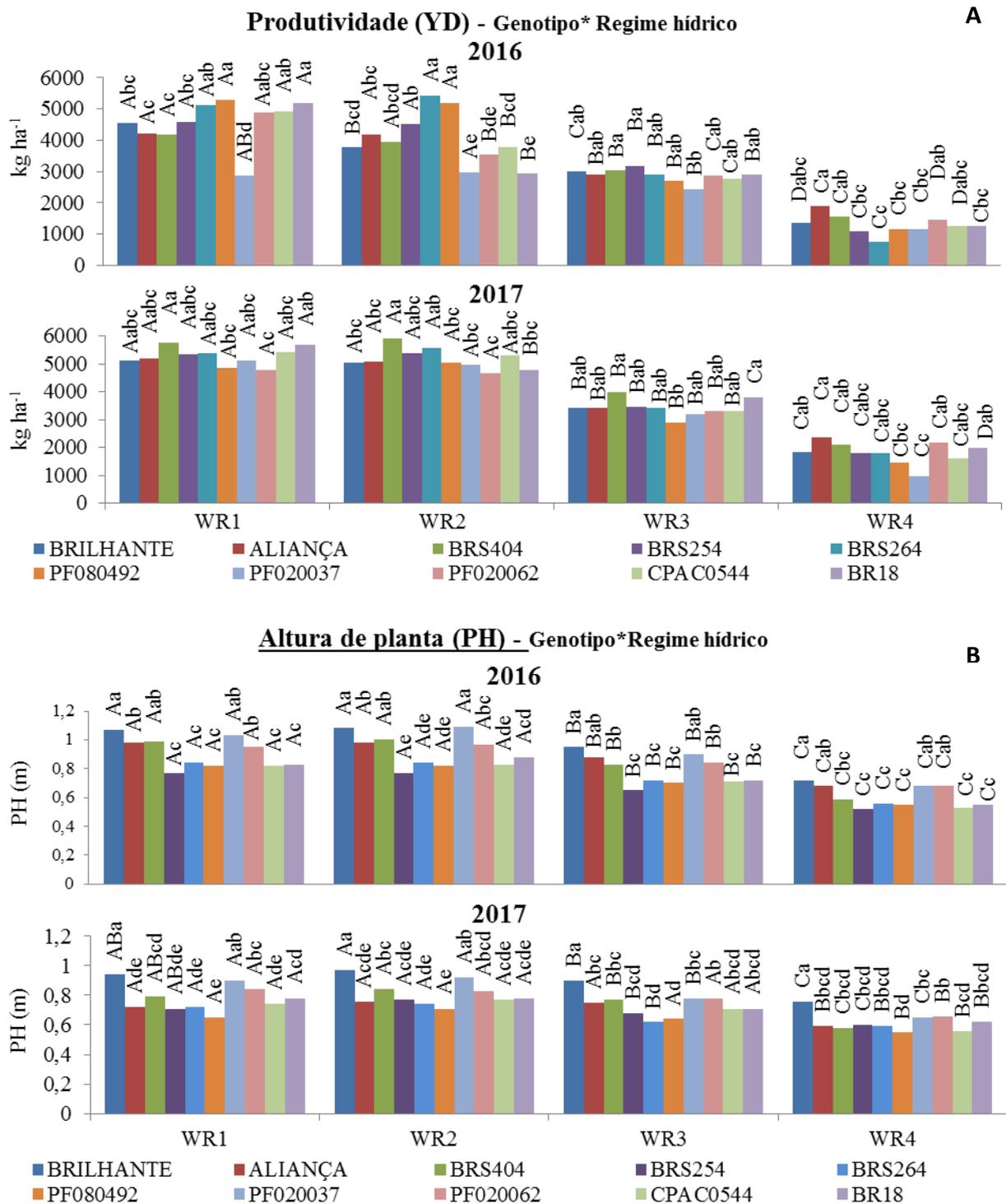


Figura 2. Produtividade (A) e Altura de plantas (B) de dez genótipos de trigo sub quatro regimes hídricos (WR1, WR2, WR3 and WR4 são equivalentes a 100%, 83%, 50% e 30% da reposição da evapotranspiração da cultura). As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey, com uma probabilidade de 5%. Letras maiúsculas comparam os regimes dentro de cada genótipo e letras minúsculas comparam os genótipos em cada regime.

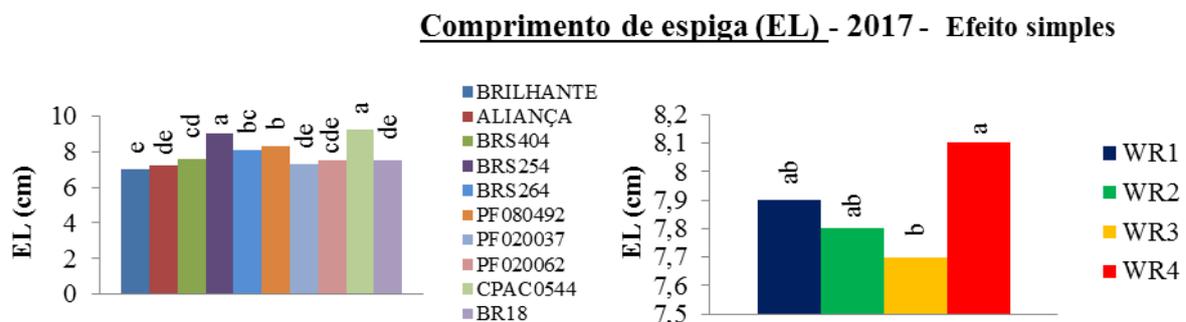
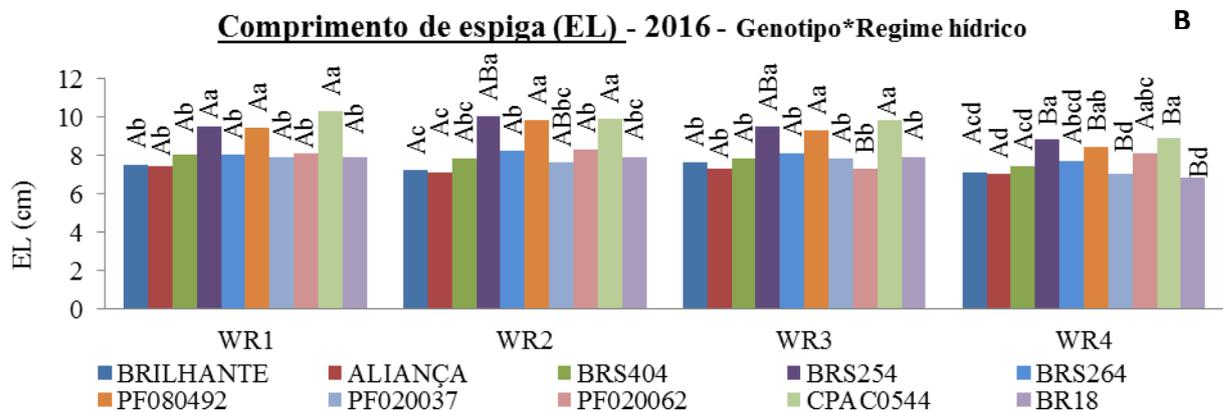
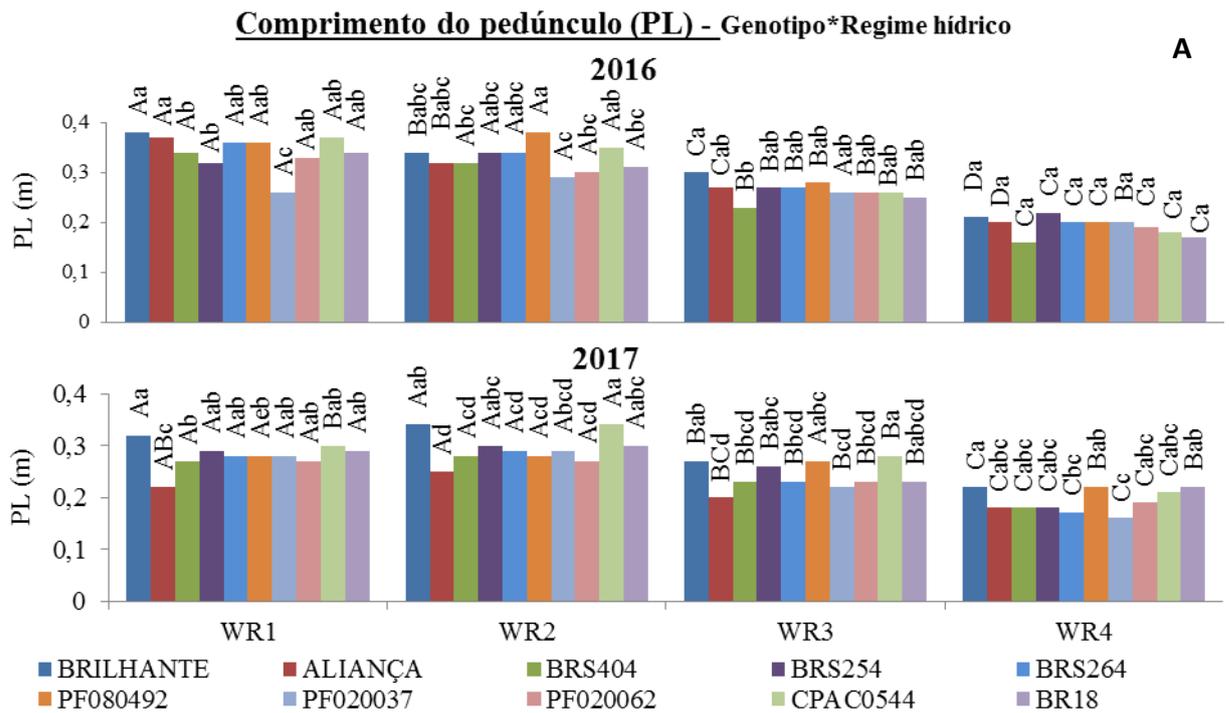
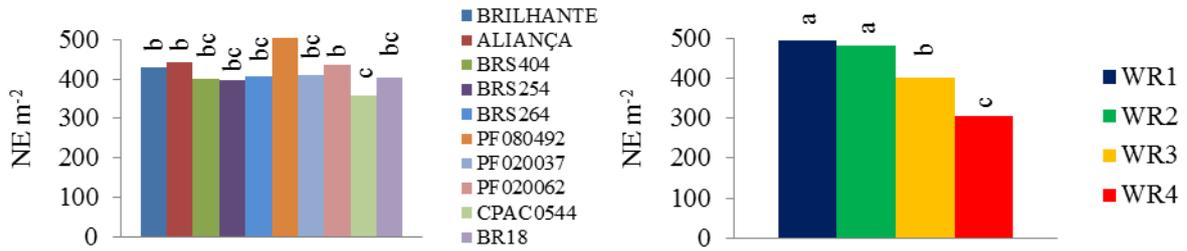


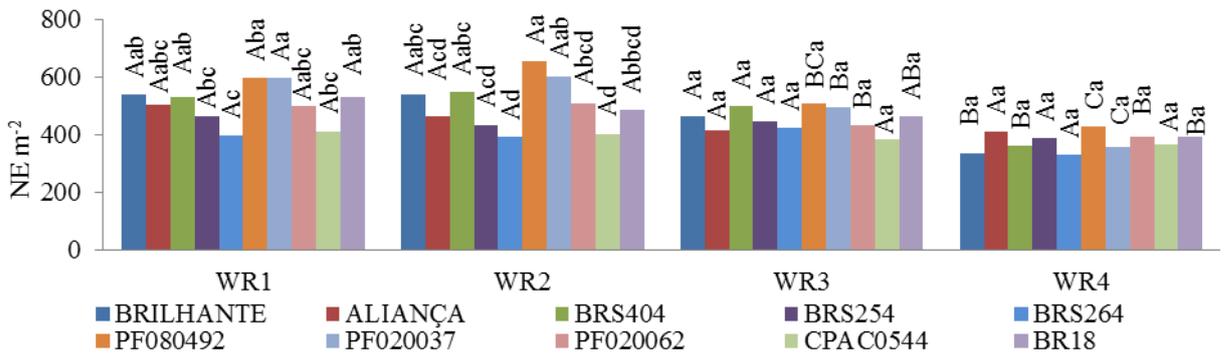
Figura 3. Comprimento do pedúnculo (A) e Comprimento da espiga (B) de dez genótipos de trigo sub quatro regimes hídricos (WR1, WR2, WR3 and WR4 são equivalentes a 100%, 83%, 50% e 30% da reposição da evapotranspiração da cultura). As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey, com uma probabilidade de 5%. Letras maiúsculas comparam os regimes dentro de cada genótipo e letras minúsculas comparam os genótipos em cada regime.

Número de espigas m⁻² (NE m⁻²) - 2016 - Efeito simples

A



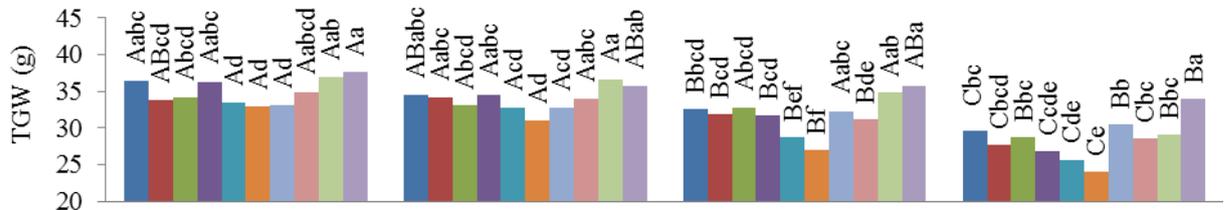
Numero de espigas m⁻² (NE m⁻²) - 2017 - Genótipo*Regime hídrico



B

Peso de mil grãos (TGW) - Genótipo*Regime hídrico

2016



2017

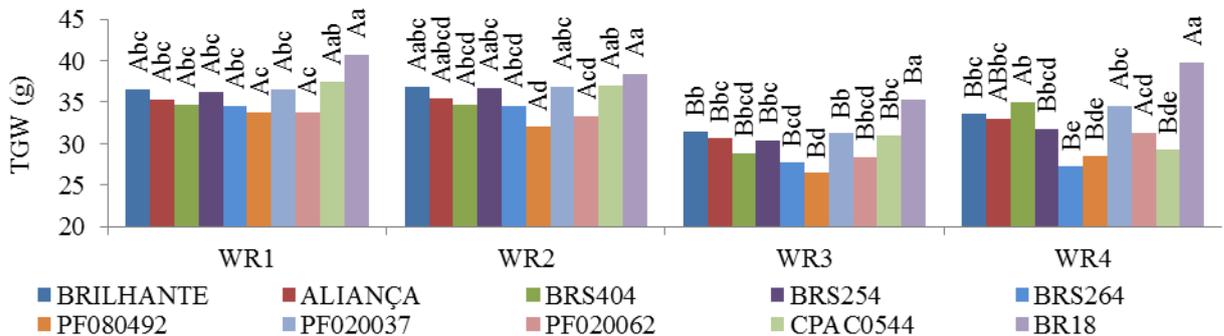


Figura 4. Número de espiga m⁻² (A) e Peso de mil grãos (B) de dez genótipos de trigo sub quatro regimes hídricos (WR1, WR2, WR3 and WR4 são equivalentes a 100%, 83%, 50% e 30% da reposição da evapotranspiração da cultura). As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey, com uma probabilidade de 5%. Letras maiúsculas comparam os regimes dentro de cada genótipo e letras minúsculas comparam os genótipos em cada regime.

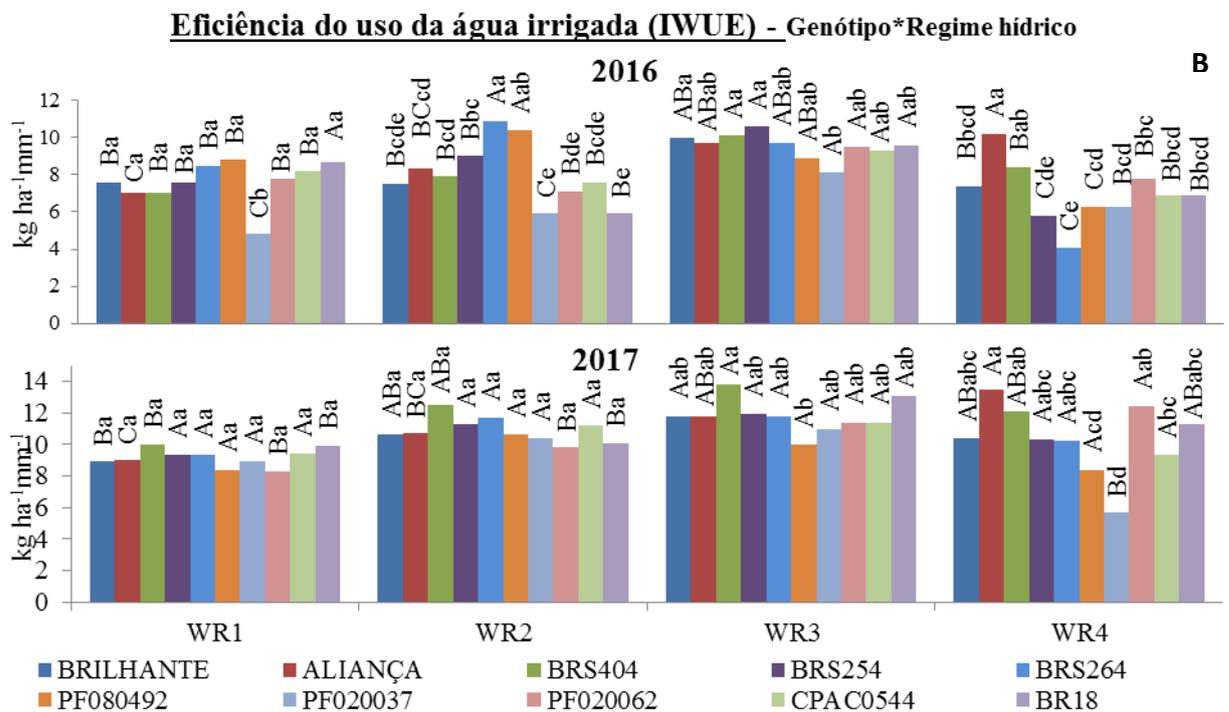
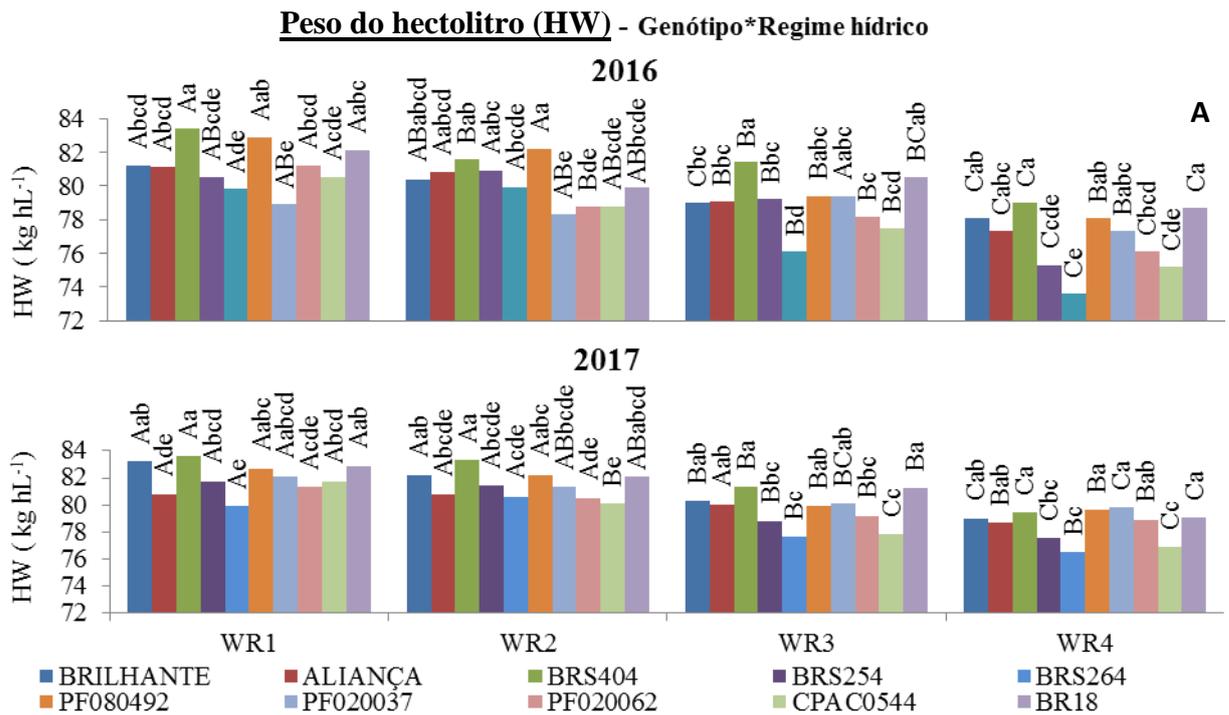


Figura 5. Peso do hectolitro (A) e Eficiência do uso da água irrigada (B) de dez genótipos de trigo sub quatro regimes hídricos (WR1, WR2, WR3 and WR4 são equivalentes a 100%, 83%, 50% e 30% da reposição da evapotranspiração da cultura). As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey, com uma probabilidade de 5%. Letras maiúsculas comparam os regimes dentro de cada genótipo e letras minúsculas comparam os genótipos em cada regime.

Tabela 1. Correlação de Pearson entre altura da planta (PH), comprimento do pedúnculo (PL), comprimento da espiga (EL), número de espiga m⁻² (NE m⁻²), peso do hectolitro (HW), peso de mil grãos (TGW), eficiência do uso de água irrigada (IWUE) e produção de dez genótipos de trigo, submetidos a quatro regimes hídricos. Inferior esquerdo (2016) e superior direito (2017).

	PH	PL	EL	NE m ⁻²	TGW	HW	WUE	YIELD	
2016	PH	1	0.63**	-0.44**	0.46**	0.39**	0.57**	0.06 ^{ns}	0.63**
	PL	0.62**	1	0.05 ^{ns}	0.43**	0.42**	0.57**	0.01 ^{ns}	0.77**
	EL	-0.19 ^{ns}	0.31**	1	-0.21**	-0.21**	-0.32**	-0.11 ^{ns}	-0.13 ^{ns}
	NE m ⁻²	0.55**	0.67**	0.16 ^{ns}	1	0.17*	0.61**	0.01 ^{ns}	0.56**
	TGW	0.58**	0.52**	0.11 ^{ns}	0.31**	1	0.53**	-0.07 ^{ns}	0.50**
	HW	0.55**	0.58**	0.07 ^{ns}	0.54**	0.60**	1	-0.12 ^{ns}	0.73**
	IWUE	0.04 ^{ns}	0.22 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.30**	1	0.10 ^{ns}
	YIELD	0.61**	0.84**	0.30**	0.68**	0.65**	0.73**	0.42**	1
2017	PH	1	0.63**	-0.44**	0.46**	0.39**	0.57**	0.06 ^{ns}	0.63**
	PL	0.62**	1	0.05 ^{ns}	0.43**	0.42**	0.57**	0.01 ^{ns}	0.77**
	EL	-0.19 ^{ns}	0.31**	1	-0.21**	-0.21**	-0.32**	-0.11 ^{ns}	-0.13 ^{ns}
	NE m ⁻²	0.55**	0.67**	0.16 ^{ns}	1	0.17*	0.61**	0.01 ^{ns}	0.56**
	TGW	0.58**	0.52**	0.11 ^{ns}	0.31**	1	0.53**	-0.07 ^{ns}	0.50**
	HW	0.55**	0.58**	0.07 ^{ns}	0.54**	0.60**	1	-0.12 ^{ns}	0.73**
	IWUE	0.04 ^{ns}	0.22 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.30**	1	0.10 ^{ns}
	YIELD	0.61**	0.84**	0.30**	0.68**	0.65**	0.73**	0.42**	1

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$). * significativo a 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$). ^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$).

Tabela 2. Matriz dos componentes das oito variáveis dos dez genótipos de trigo avaliados em quarto regimes hídricos nos dois anos de cultivo.

Variables	2016			2017		
	Dim. 1	Dim. 2	Dim.3	Dim. 1	Dim. 2	Dim.3
PH	0.793	-0.482	-0.046	0.819	-0.053	-0.188
PL	0.901	0.068	-0.239	0.797	0.226	0.376
EL	0.243	0.827	-0.474	-0.376	0.350	0.826
NE	0.809	-0.071	-0.166	0.702	0.050	0.027
TGW	0.752	-0.135	-0.010	0.843	-0.271	0.093
HW	0.814	-0.056	0.164	0.606	-0.341	0.067
IWUE	0.410	0.507	0.736	0.160	0.826	-0.449
YIELD	0.966	0.122	0.077	0.885	0.297	0.111
Variância	4.48	1.22	0.89	3.828	1.139	1.087
% de variância	56.06	15.24	11.08	47.847	14.238	13.581
% acumulada de variância	56.06	71.30	82.38	47.847	62.085	75.666

PH (altura de plantas), PL (comprimento do pedúnculo), comprimento da espiga (EL), número de espiga m⁻² (NE m⁻²), peso do hectolitro (HW), peso de mil grãos (TGW), eficiência do uso de água irrigada (IWUE)

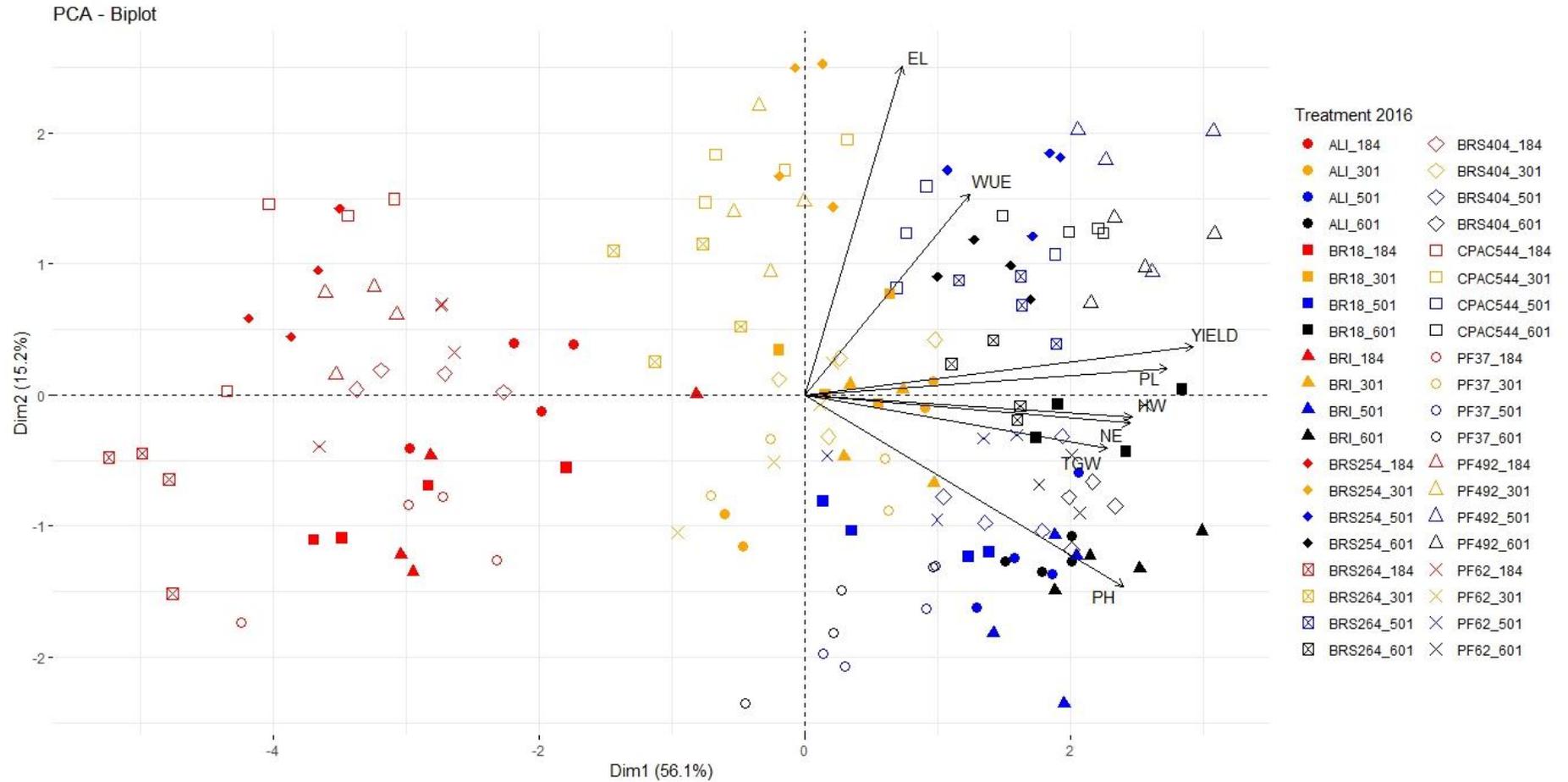


Figura 6. Diagrama de ordenação derivado da análise de componentes principais em 2016, de dez genótipos de trigo e quatro regimes hídricos (WR1, WR2, WR3 e WR4, são equivalentes a 100%, 83%, 50% e 30% da reposição da evapotranspiração da cultura). EL (comprimento de espiga), WUE (eficiência do uso da água), PL (comprimento do pedúnculo), NE (número de espigas m^{-2}), peso do hectolitro (HW) e peso de mil grãos (TGW), YIELD (produtividade), PH (altura de plantas).

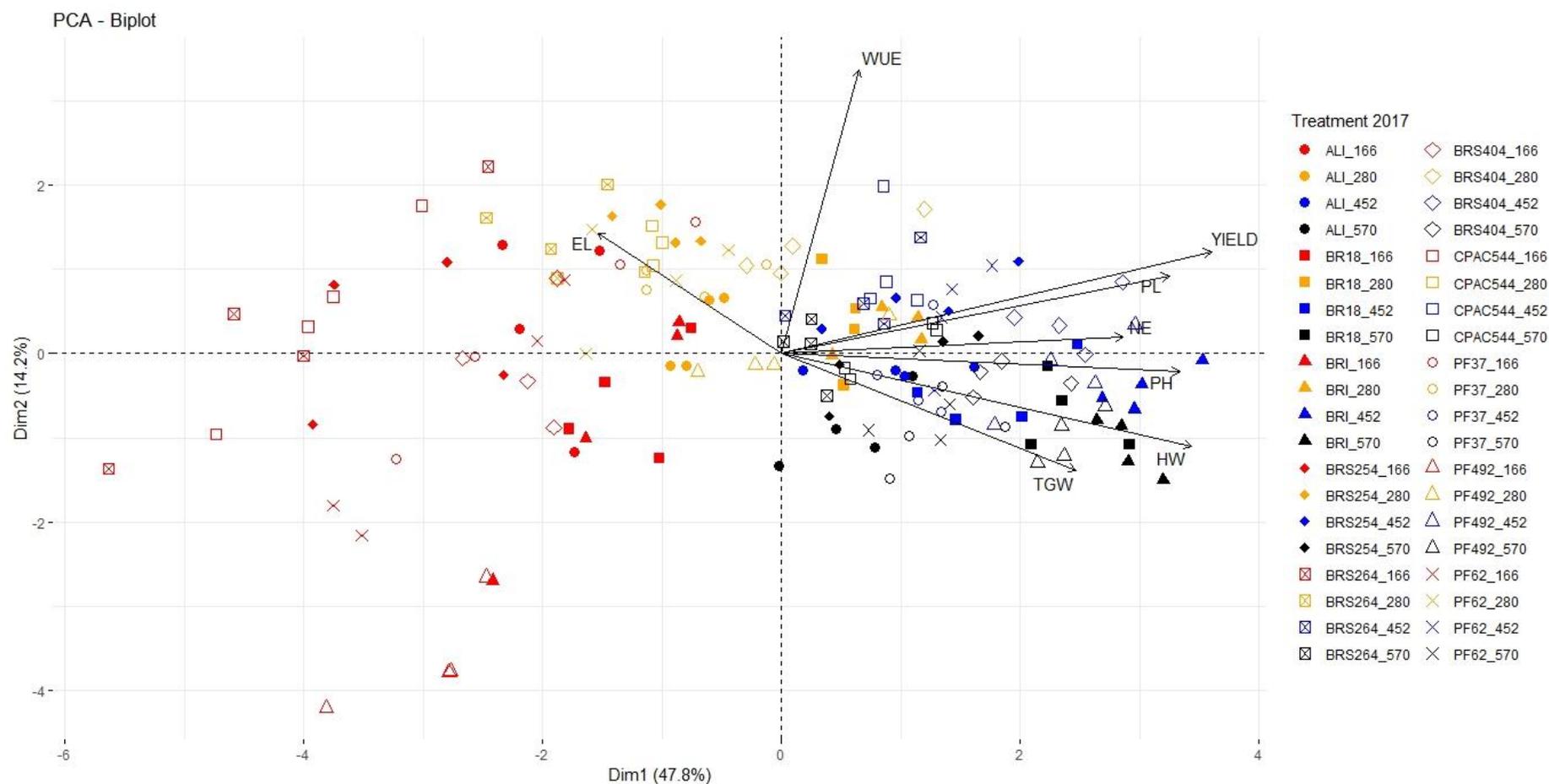


Figura 7. Diagrama de ordenação derivado da análise de componentes principais em 2017, de dez genótipos de trigo e quatro regimes hídricos (WR1, WR2, WR3 e WR4, são equivalentes a 100%, 83%, 50% e 30% da reposição da evapotranspiração da cultura). EL (comprimento de espiga), WUE (eficiência do uso da água), PL (comprimento do pedúnculo), NE (número de espigas m^{-2}), peso do hectolitro (HW) e peso de mil grãos (TGW), YIELD (produtividade), PH (altura de plantas).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente tese foram selecionados selecionar materiais de trigo tolerantes ao estresse hídrico para o cultivo de sequeiro e eficientes no uso da água, para maior sustentabilidade para o cultivo irrigado, no inverno na região do Cerrado. Foi feita a seleção em condições de campo que é mais próxima das condições realizada pelos produtores. O protocolo que vem sendo utilizado, utilizando-se uma barra irrigadora com gradiente de lâminas de água, confirmou que quanto maior o estresse hídrico, menor a produtividade o que mostra que neste protocolo, o fator água foi o maior fator limitante, justificando sua utilização para este fim.

Buscou-se também utilizar ferramentas de seleção mais precisas, confiáveis, não destrutivas e, principalmente, que podem ser utilizadas em larga escala (highthroughput). Como resultado, estas ferramentas que selecionam genótipos para tolerância à seca, através de sensores espectrais e de fluorescência (ligados à fotossíntese) foram validadas pela produtividade e componentes de produção, além de avaliações biométricas e fisiológicas.

Em relação à irrigação, os resultados mostraram que as lâminas indicadas, dependendo do genótipo, podem ser reduzidas em até 20 %, sem prejuízo da produtividade. Na condição de moderado estresse hídrico, regime hídrico 3 (WR3), condição semelhante à encontrada no cultivo em safrinha na região do Cerrado, a produtividade de grãos quando não esteve superior, esteve bem próxima da produtividade nacional. Nas condições de maior disponibilidade hídrica, a produtividade de todos os genótipos esteve bem superior à média da produtividade nacional. Genótipos específicos se destacaram sob estresse severo (Aliança) ou estresse moderado (BRS 404) ou cultivo irrigado (BRS 264).

Portanto, os dados obtidos nesta presente tese evidenciam que o Cerrado é uma região potencial para a expansão da cultura do trigo e que a seleção de materiais mais tolerantes ao

estresse hídrico e mais eficientes no uso da água, é necessária, e que para uma seleção mais eficiente, o uso dos sensores de fluorescência e hiperespectrais podem ser ferramentas valiosas.