

Universidade Federal de Pelotas
Instituto de Biologia
Departamento de Botânica
Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal



Dissertação

**DESEMPENHO FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DE CULTIVARES DE TRIGO EM
RESPOSTA AO ELEVADO CO₂**

GILBERTO TROYJACK JUNIOR

Pelotas, 2020

Gilberto Troyjack Junior

Desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de trigo em resposta ao elevado CO₂

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Fisiologia Vegetal.

Orientador: Dr. Sidnei Deuner

Co-Orientador: Dr. Nathan Levien Vanier

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

T864d Troyjack Junior, Gilberto

Desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de trigo em resposta ao elevado CO₂ / Gilberto Troyjack Junior ; Sidnei Deuner, orientador ; Nathan Levien Vanier, coorientador. — Pelotas, 2020.

56 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, Instituto de Biologia, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. *Triticum aestivum*. 2. Mudanças climáticas. 3. Elevada concentração de CO₂. 4. Qualidade fisiológica e nutricional. I. Deuner, Sidnei, orient. II. Vanier, Nathan Levien, coorient. III. Título.

CDD : 633.1191

Desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de trigo em resposta ao elevado CO₂

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Fisiologia Vegetal, Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, Instituto de Biologia- Departamento de Botânica, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 10/12/2020.

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Sidnei Deuner (Orientador)
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Lavras

.....
Prof. Dr. Junior Borella
Doutor em Fisiologia Vegetal pela Universidade Federal de Pelotas

.....
Prof. Dr. Diogo da Silva Moura
Doutor em Fisiologia Vegetal pela Universidade Federal de Pelotas

Dedico

Aos meus pais Gilberto e Jacir;

Aos meus irmãos Adriano, Robson, Cristian;

À minha namorada Yasmin.

“Construí amigos, enfrentei derrotas,
venci obstáculos, bati na porta da vida e
disse-lhe: Não tenho medo de vivê-la”.

Augusto Cury.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força para superar todas as adversidades e finalizar mais essa etapa.

Aos meus pais, Gilberto e Jacir, por todo o esforço e empenho para que eu possa ir em busca dos meus objetivos. Muito obrigado, amo vocês!

À minha namorada Yasmin, por todo o amor e companheirismo de sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sidnei Deuner, pela paciência, ensinamentos e amizade, por ter depositado em mim a confiança para conduzir este trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Nathan Levien Vanier por todas contribuições no desenvolvimento desse estudo.

Aos Amigos e colegas do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, em especial ao Cleiton, Eduardo e Renan, pelo companheirismo, apoio e momentos de descontração.

Aos colegas do Laboratório de Nutrição de Plantas, por toda acolhida e ajuda ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado!

A Renata Menegatti pelo auxílio nas minhas análises de carboidratos.

Ao Dr. Germani Concenço pela disponibilização e ajuda nas avaliações com o IRGA.

Ao professor Luis Antonio de Avila pelo auxílio e disponibilização das OTC's.

A Fundação Pró Sementes por fornecer as sementes para a realização desse estudo, em especial a Dr^a Kassiana Kehl.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, pelos conhecimentos repassados ao longo do curso.

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

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Resumo

TROYJACK JUNIOR, Gilberto. **Desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de trigo em resposta ao elevado CO₂**. 2020. 56f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal). Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, Instituto de Biologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos cereais mais antigos do mundo, tendo sua origem datada há mais de 10.000 anos, na antiga Mesopotâmia. Esse cereal é amplamente distribuído e consumido no mundo, principalmente, devido à grande diversidade de produtos derivados, como massas, pães e biscoitos, os quais desempenham importante função energética e nutricional na alimentação humana. Entretanto, estudos relacionados às mudanças climáticas, principalmente a elevada concentração de CO₂ (e[CO₂]), vêm relatando alterações na qualidade nutricional e industrial dos grãos, sobretudo em espécies C₃, tais como o trigo. Concomitantemente com a e[CO₂], temos o acelerado crescimento populacional, que, até 2050, estima-se chegar a mais de 9,3 bilhões de habitantes, necessitando incrementar a produção de grãos em mais de 70%. Nesse sentido, é importante compreender o comportamento das plantas frente a esse cenário de mudanças climáticas. Com isso, o objetivo desse estudo foi caracterizar o efeito da elevada concentração de CO₂ atmosférico sobre os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e a produtividade das cultivares de trigo FPS Certero, FPS amplitude e ORS vintecinco. As cultivares de trigo foram cultivadas em Câmaras de Topo Aberto (OTC's) sob duas concentrações de CO₂, 400 ppm (ambiente) e 700 ppm (elevado). As avaliações de clorofila foram feitas durante os estádios reprodutivos (74, 81, 88, 95 DAS) da cultura e as trocas gasosas foram avaliadas aos 88 DAS (Antese). Quanto às trocas gasosas, pôde-se observar comportamento similar entre as cultivares, as quais apresentaram incrementos na assimilação líquida de carbono, concentração interna de CO₂ e na eficiência no uso da água, além de redução na condutância estomática e na transpiração sob e[CO₂]. O aprimoramento na fotossíntese líquida em e[CO₂] foi acompanhado de aumentos no teor de açúcares solúveis totais, amido e sacarose nas folhas das cultivares de trigo. Os índices de clorofila *a* e *b* apresentaram reduções sob e[CO₂] aos 88 e 95 DAS. A e[CO₂] proporcionou ganhos no número de espigas por plantas, grãos por espiga e produção por planta, todavia apresentando menor Peso de Mil Grãos (PMG), possivelmente pelo menor tamanho dos grãos em relação ao controle (400). Nos grãos de trigo, pôde-se observar que a e[CO₂] incrementou o teor de amido total, todavia, constatou-se uma redução na porcentagem de proteína bruta dos grãos, evidenciando uma maior relação C/N nos grãos de trigo sob e[CO₂].

Palavras-chave: *Triticum aestivum*. Mudanças climáticas. Elevada concentração de CO₂. Qualidade fisiológica e nutricional.

Abstract

TROYJACK JUNIOR, Gilberto. **Physiological and productive performance of wheat cultivars in response to elevated CO₂**, 2020. 56f. Dissertation (Master Degree in Plant Physiology) - Post-Graduation Program in Plant Physiology. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

The wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most ancient grains of the world, its origins goes back more than 10.000 years, in ancient Mesopotamia. This grain is widely distributed and consumed around the world, specially, due to its great diversity of derivative products, such as pastas, bread and biscuits, which develop an important energetic and nutritional function on human feeding. However, studies regarding climate changes, mainly on elevated concentration of CO₂ (e[CO₂]), have been reporting changes on the nutritional and industrial quality of the grains, mostly on C₃ species, such as wheat. Alongside with the e[CO₂], it is noted an accelerated populational growth, that, up until 2050, it is estimated to reach more than 11,3 billions of people, demanding an improvement on grain production over 70%. Therefore, it is important to understand the plants' behaviour concerning climate changes scenario. Thus, this study aimed to characterize the high concentration of CO₂ effect on physiological and biochemical parameters and also, the productivity of the FPS Certero, FPS amplitude and ORS vintecinco wheat cultivars. The wheat cultivars were cultivated on Open Top Chambers (OTC's) under two CO₂ concentrations, 400 ppm (Ambient) and 700 ppm (Elevated). Chlorophyll evaluations were accomplished during the culture reproductive stadiums (74, 81, 88, 95 DAS) and the gas exchange were evaluated on 88 DAS (Anthesis). As for the gas exchange, it was observed a similar behaviour between cultivars, which presented an increase on net carbon assimilation, internal concentration of CO₂ and water use efficiency, besides the stomatal conductance and transpiration under e[CO₂] reduction. The liquid photosynthesis improvement on e[CO₂] was accompanied by increases of total soluble sugar, starch and sucrose proportion on the cultivars' wheat leaves. The *a* and *b* chlorophyll indexes presented a reduction under e[CO₂] on 88 and 95 DAS. The e[CO₂] provided gains on the spikes per plant, grains per spikes and production per plant, nevertheless presented less Thousand Grain Weight (TGW), possibly due to smaller grain size regarding control (400 ppm). On the wheat grains, it could be observed that e[CO₂] increased the total starch proportion, though a reduction on the crude grain protein percentage was perceived, pointing out a higher relation C/N on wheat grains under e[CO₂].

Keywords: *Triticum aestivum*. Climate changes. Elevated CO₂ concentration. Physiological and nutritional quality.

Lista de Figuras

- Figura 1.** Temperatura máxima e mínima e média do ambiente interno das OTC's durante o mês de julho de 2019- 400 ppm (A), 700 ppm CO₂ (B).....24
- Figura 2.** a) Assimilação líquida de carbono b) Concentração intercelular de c) Condutância estomática d) Taxa transpiratória e) Eficiência no uso da água (A/E) em função das diferentes cultivares e níveis de CO₂. (Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade).32
- Figura 3.** a) Teor de amido b) Açúcares solúveis totais (AST) c) Sacarose (SAC) em folhas de trigo em função dos diferentes níveis de CO₂, “400 ppm” CO₂ ambiente e “700 ppm” elevado CO₂. (Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade).33
- Figura 4.** a) Número de espigas por planta b) Número de grãos por espiga c) Peso de Mil Grãos, d) Produção por vaso, e) Altura de plantas em função das diferentes cultivares e níveis de CO₂ (Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade).34
- Figura 5.** a) Teor de amido total nos grãos. B) Porcentagem de proteína bruta nos grãos de trigo. em função das diferentes cultivares e níveis de CO₂ (Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade).35

Lista de Tabelas

Tabela 1- Características físicas e químicas do solo coletado na área experimental da Palma, Campus Capão do Leão, UFPel.....	23
Tabela 2- Índices de Chla e Chlb das folhas das cultivares FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco.	29
Tabela 3- Índices de Chla e Chlb das cultivares de trigo FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco submetidos a duas concentrações de CO ₂ atmosférico.....	30
Tabela 4- Índices de Chla e Chlb das folhas das cultivares FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco submetidos a duas concentrações de CO ₂ atmosférico.	30

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
CAPÍTULO 1- Níveis elevados de CO₂ incrementam o desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de trigo	
INTRODUÇÃO.....	21
MATERIAL E MÉTODOS.....	22
Parâmetros fisiológicos	25
a. Índice de clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>) e <i>b</i> (Chl <i>b</i>)	25
b. Trocas gasosas	25
Parâmetros bioquímicos	25
a. Carboidratos na folha bandeira	25
b. Quantificação da proteína bruta e amido total nos grãos:	26
Componentes do rendimento	28
Delineamento experimental	29
RESULTADOS.....	29
DISCUSSÃO	35
Parâmetros fisiológicos	35
Parametros bioquímicos.....	39
Componentes do Rendimento.....	42
CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

INTRODUÇÃO GERAL

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma espécie pertencente à família Poaceae (gramíneas), do gênero *Triticum*, do qual se originou a palavra trigo, que significa “quebrado, triturado” (CONAB, 2017; OLIVEIRA, 2018), referindo-se à atividade realizada para separar o grão da casca que o recobre (LEON; ROSSEL, 2007). Essa espécie, originária do sudoeste asiático, foi introduzida na Índia, China e Europa, em que há relatos datando de seu cultivo há 5.000 a.C.. Atualmente, esse cereal é amplamente cultivado no planeta, ocupando em torno de 20% de toda área agricultável, sendo juntamente com o arroz e o milho os três cereais mais cultivados no mundo (TAKEITI, 2015; CONAB, 2019).

Entre as culturas de inverno, é a que apresenta a maior importância econômica, pois em diferentes realidades de cultivo, possui alta capacidade produtiva de grãos, os quais são matéria prima para a fabricação de uma diversidade de alimentos. A nível mundial, na safra 2019/20, a produção desse cereal foi de mais de 762 milhões de toneladas (USDA, 2020) sendo a União Europeia, China, Índia e a Rússia os maiores produtores, juntos somando mais de 50% da produção (CONAB, 2019).

No Brasil, a área cultivada de trigo na safra 2019/20 foi de aproximadamente 2,4 milhões de hectares, atingindo uma produção superior a 5,4 milhões de toneladas, ocupando a quarta posição em volume de produção, atrás apenas das culturas da soja, milho e arroz. Neste cenário, o Paraná e o Rio Grande do Sul destacam-se com mais de 92% da produção nacional (CONAB, 2019).

Atualmente, o trigo cultivado no Brasil tem obtido ganhos significativos em produtividade, isso se deve em grande parte ao melhoramento genético, que vem desenvolvendo genótipos com alto potencial produtivo, além da adoção de novas tecnologias de cultivo (CONAB, 2017; DORNELES et al., 2019). O Brasil é o segundo maior produtor de trigo da América do Sul, ficando atrás somente da Argentina. Contudo, a produção brasileira não supre a demanda do mercado interno, o que torna o país um importador de trigo (CONAB, 2020). Isso deve-se ao fato de que o trigo ocupa apenas 10% de toda área utilizada para o cultivo de soja e milho, durante o verão, em grande parte devido ao baixo preço de mercado desse cereal, além das condições climáticas, que muitas vezes são desfavoráveis.

O trigo é componente básico na dieta alimentar da maioria dos países, sendo depois do arroz, o alimento mais importante para os seres humanos, fornecendo aproximadamente 16 gramas de proteína per capita (Média mundial). A ampla diversidade de produtos derivados desse cereal, como biscoitos, pães, massas, desempenha um importante papel econômico e nutricional, em virtude de seus grãos serem importantes fontes de proteínas e carboidratos na dieta humana (SCHEUER et al., 2011). No entanto, estudos desenvolvidos em diversas partes do mundo, vêm indicando efeitos adversos na produção e qualidade dos grãos de trigo, relacionados às mudanças climáticas, principalmente no que se refere ao aumento dos níveis de CO₂ atmosférico, por ser substrato primário para as reações de carboxilação (LI; JIANG; LIU, 2016; CHUMLEY; HEWLINGS, 2020).

Desde a revolução industrial, em meados do século XVIII, a concentração global de CO₂ vem aumentando continuamente ao longo dos anos (Aproximadamente 1 a 3 ppm ano⁻¹), passando de 280 ppm para mais de 416 ppm atualmente, e tem-se como o principal causador deste aumento, a ação antrópica, que é decorrente da queima desenfreada de combustíveis fósseis (Carvão, petróleo e gás natural) e da mudança no uso do solo (Desmatamento) (SOUZA et al., 2008; IPCC, 2018).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2019) estima que até o fim do século XXI as alterações climáticas globais, que são resultantes da constante emissão de gases do efeito estufa, irão acarretar no aumento substancial da concentração do CO₂ atmosférico, de 400 para mais de 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Se essas previsões se confirmarem, as culturas agrícolas como o trigo, possivelmente serão influenciadas, visto que o CO₂ é a principal fonte de carbono para o processo de carboxilação na etapa bioquímica da fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 2017). Atualmente, a taxa carboxilação de plantas C3 é limitada pela concentração CO₂ (400 ppm) e, com a elevação da concentração de CO₂ ($e[\text{CO}_2]$) na atmosfera, haverá uma maior disponibilidade de CO₂ em relação ao O₂ próximo ao sítio ativo da enzima Rubisco, aumentando a taxa de carboxilação e reduzindo competitivamente a fotorrespiração, desencadeando uma série de alterações no crescimento, desenvolvimento, rendimento de sementes e no metabolismo bioquímico das plantas (EKMAN et al., 2007; WARD et al., 2012; ZHANG et al., 2012; LOCKE et al., 2013; PAL et al., 2014; ZHANG; CHEN; LI, et al., 2020).

As plantas no geral possuem três vias de assimilação do CO₂ atmosférico, as quais estão classificadas em C₃, C₄ e CAM. A via de fixação de carbono C₃ apresenta um grande gargalo, pois desempenha atividade catalisadora de duas reações antagônicas: carboxilação e oxigenação. Quando a Rubisco desempenha o papel de oxigenase, ela direciona o fluxo do carbono através de uma via que é denominada fotorrespiração, a qual pode levar a perdas entre 25% e 30% do carbono fixado. Assim, a diminuição da atividade oxigenase da enzima Rubisco, em ambiente enriquecido com CO₂, pode gerar incrementos na assimilação líquida do carbono (LONG et al., 2006; TSUTSUMI et al., 2014).

Plantas que possuem via de fixação C₄ e CAM desenvolveram evolutivamente aparatos anatômicos e fisiológicos, os quais maximizam a eficiência na absorção e utilização do CO₂ atmosférico (SMITH et al., 1987; STRECK, 2005), assegurando que a Rubisco esteja sempre sob altas concentrações de CO₂, tornando a fotorrespiração inaparente nessas espécies. Em compensação, sob elevadas concentrações de CO₂ atmosférico, as plantas com metabolismo C₃ possuem um incremento na sua taxa média de fotossíntese em relação a plantas com metabolismo C₄ (STRECK, 2005), podendo variar de acordo com a cultura, sendo que para cereais, como é o caso do trigo, que apresenta metabolismo C₃, o incremento médio é de 30%. Mesmo com algumas limitações metabólicas, inicialmente, o aumento da taxa fotossintética em ambientes com elevada concentração de CO₂ favorece a produção de biomassa vegetal (número de perfilhos, por exemplo, é maior), favorecendo o incremento da produção final de grãos (KRISHNAN et al., 2007; BORDIGNON, 2016).

O produto final da fotossíntese são as cadeias carbonadas ou carboidratos, os quais podem ser utilizados na síntese de compostos orgânicos, tanto da parte estrutural (Constituintes da estrutura do vegetal), quanto do metabolismo da planta (STRECK, 2015). Contudo, quando há um fluxo maior de átomos de carbono (C), e conseqüentemente, uma produção de carboidratos acima da capacidade de síntese destas rotas metabólicas, grande parte das plantas têm um maior acúmulo de carboidratos não estruturais em suas folhas, principalmente na forma de amido (DELUCIA et al., 1985) e sacarose, reduzindo a quantidade de proteínas sintetizadas, devido a diluição do nitrogênio, com o aumento da biomassa sobre e[CO₂] (STRECK, 2015; BORDIGNON, 2016).

O nitrogênio (N) é um elemento altamente requerido pela cultura do trigo, sendo um componente essencial no processo de formação de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos de plantas e na composição da molécula de clorofila. A deficiência desse nutriente nas plantas ocasiona a redução do desenvolvimento vegetativo, bem como clorose nas folhas velhas, configurando-se como o principal limitante para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o que interfere diretamente no rendimento final da cultura e na qualidade de proteína no grão (FUERTES-MENDIZABAL et al., 2010; RAIJ, 2011; TAIZ e ZEIGER, 2017). Depois do carbono (40% da matéria seca da planta) e oxigênio (45%), o N (78%) é o elemento mais abundante nas plantas.

A diminuição da composição de aminoácidos, os quais são componentes fundamentais na formação das proteínas de grão (LI; JIANG; LIU, 2016), reflete no teor proteico de grão, que é um importante indicador de qualidade nutricional (FERNANDO et al., 2014). Pesquisadores têm concentrado seus esforços com intuito de compreender os mecanismos subjacentes à redução da concentração proteica e alternativas para maximizar a eficiência do uso do nitrogênio, nutriente fundamental para o desenvolvimento da cultura (SULTANA et al., 2017).

As concentrações de N nos tecidos vegetais são alteradas durante o desenvolvimento da cultura, e devido a sua alta mobilidade, são maiores nos tecidos mais jovens em relação aos materiais maduros ou senescentes (RUETER; ROBINSON, 1986). Entretanto, sob níveis adequados de nutrição, o conteúdo de N nas folhas em uma cultura como o trigo é normalmente entre 1,5 e 3% da massa seca da planta antes da senescência, o que equivale a 15 e 30 kg de N por tonelada de biomassa da cultura (DUNCAN et al., 2018). Em vista disso, não nos surpreende o N ser um dos fatores relevantes na regulação do crescimento e produtividade das culturas e no controle da qualidade nutricional (FAGERIA; BALIGAR, 2005; DUNCAN et al., 2018).

Para o trigo, inúmeros estudos em sistema “*open top chambers*” (OTC) e “*free air carbon dioxide enrichment*” (FACE) vêm indicando que a e[CO₂] na atmosfera promove nas plantas ganho de biomassa e aumento na produção de grãos. Estes estudos foram desenvolvidos em países como a China (WU et al., 2004), Alemanha (HÖGY et al., 2013), Austrália (ARACHCHIGE et al., 2017; THOMPSON et al. 2019), Índia (PANDEY et al., 2017) e Itália (VERRILLO et al., 2017), os quais têm relatado que o aumento do rendimento do trigo em ambiente com e[CO₂] está associado a

uma redução no teor de proteína de grão e, conseqüentemente, no valor nutricional. Entretanto, mesmo o trigo sendo uma importante cultura para o Brasil, ainda são escassos dados referentes ao comportamento das cultivares de trigo brasileiros sob as condições de elevação dos níveis de CO₂ na atmosfera e ainda que visem caracterizar a qualidade dos grãos.

Além disso, com o rápido e contínuo crescimento populacional que o mundo vem passando ao longo dos anos, o qual já ultrapassa os 8 bilhões de habitantes, a demanda por abastecimento de alimentos está constantemente aumentando. Sendo assim, estudos que possibilitem elucidar os efeitos futuros que o elevado CO₂ terá sobre as plantas são fundamentais, com o objetivo de traçar formas de manejo das culturas nesse ambiente, para que a produção alimentícia no Brasil e a nível mundial, consiga suprir a demanda que está em constante aumento.

Segundo estimativa da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), em 2050, a população mundial deverá atingir em torno de 9,3 bilhões de pessoas, e frente a essa crescente na população, a agricultura tem grandes e novos desafios para que haja uma produção de alimentos que atenda a demanda populacional. Portanto, é fundamental sustentar sistemas agrícolas com maior produção de alimentos, enquanto simultaneamente tem-se que se adaptar a um clima em mudança (HÖGY et al., 2013). Tendo em vista todos esses aspectos, para superar esses desafios futuros, além de ter muita dedicação, serão necessários muitos estudos, buscando formas de mitigar um dos principais desafios da humanidade: a segurança alimentar.

Um dos grandes desafios para a comunidade científica é atenuar os mecanismos de resposta desta cultura frente ao cenário de mudanças climáticas, e assim definir estratégias que garantam a manutenção das áreas de cultivo, do manejo e da produtividade. Sabe-se dos efeitos positivos do elevado CO₂ atmosférico sobre a taxa fotossintética das plantas (principalmente cereais) como, por exemplo, o conseqüente maior acúmulo de biomassa, entretanto, há uma escassez de estudos que correlacionem os parâmetros fisiológicos e bioquímicos com a qualidade final dos grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENQUE, B.C. **Responses of Senna reticulata, a legume tree from the Amazonian flood plains, to elevated atmospheric CO₂ concentration and water logging.** *Trees*, v.28, p.1021-1034, 2014.

BORDIGNON, L. **Efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da elevação da temperatura em plantas e suas interações biológicas.** 2016. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

CALIMAN, F.R.B. Enriquecimento intermitente de CO₂ e análise do acúmulo de massa seca e da partição de fotoassimilados em tomateiro. **Acta Agronômica**, v.58, n.3, p.133-139, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v58n3/v58n3a03.pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2019.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Acompanhamento da safra de grãos, Safra 2010/2011.** 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_07_15_11_03_18_boletim_julho_-_2011.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

CONAB - Companhia nacional de abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, agosto 2019.** 2019. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 01 de setembro de 2019.

DELUCIA, E.H. et al. Photosynthetic inhibition after longterm exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide. **Photosynthesis Research**, v.7, n.2, p.175-184, 1985.

DUNCAN, E. G., O'SULLIVAN, C. A., ROPER, M. M., BIGGS, J. S., & PEOPLES, M. B. (2018). Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: Review. **Field Crops Research**, 226, 56–65.

EKMAN, A. BÜLOW, L. STYMNE, S. Elevated atmospheric CO₂ concentration and diurnal cycle induce changes in lipid composition in *Arabidopsis thaliana* **New Phytol.**, 174 (2007), pp. 591-599.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** 2012. Disponível em <http://www.fao.org/>. Acesso em: 23 mai. 2020.

FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; AIZPURUA, A.; GONZÁLEZ-MORO, M. B.; ESTAVILLO, J. M. Improving wheat breadmaking quality by splitting the n fertilizer rate. **European Journal of Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 52-61, 2010.

CHUMLEY, H. HEWLINGS, S., The effects of elevated atmospheric carbon dioxide [CO₂] on micronutrient concentration, specifically iron (Fe) and zinc (Zn) in rice; a systematic review, **Journal of Plant Nutrition**, p. 1-8, 2020.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. 2007. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>> Acesso em: 31 mai. 2020.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. 2019. **IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems.** Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>> Acesso em: 01 jul. 2020.

KIM, H.Y. et al. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂. **Plant Soil**, v.342, p.59-71, 2011.

KRISHNAN, P. et al. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v.122, p.233-242, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788090700045X#>>. Acesso em: 8 jan. 2020.

LEON, A. E.; ROSELL, C. M. De tales harinas, tales panes: granos, harinas e productos de panificación en Iberoamerica. Córdoba: Hugo Baez, 2007. 480 p. Disponível em: Acesso em: 10 jul. 2020.

LI, X., JIANG, D., & LIU, F. (2016). Dynamics of amino acid carbon and nitrogen and relationship with grain protein in wheat under elevated CO₂ and soil warming. **Environmental and Experimental Botany**, 132, 121–129.

LOCKE, A.M. SACK, L. C. BERNACCHI, J. ORT, D.R. Soybean leaf hydraulic conductance does not acclimate to growth at elevated [CO₂] or temperature in growth chambers or in the field. **Ann. Bot.**, 112 (2013), pp. 911-918.

OLIVEIRA, A. F., **Tópicos em ciencia e tecnologia de alimentos: resultados de pesquisas acadêmicas- v.4.** São Paulo: Blucher, 2018, 400 p.

PAL, M., CHATURVEDI, AK, PANDEY, S.K. Subindo atmosférica CO₂ pode afectar a qualidade do óleo e o rendimento de sementes de girassol (*Helianthus annuus* L.). **Acta Physiol Plant** 36, 2853–2861 (2014).

PANDEY, V.; SHARMA, M.; DEEBA, F.; MAURYA, V. K.; GUPTA, S. K.; SINGH, S. P. MISHRA, A.; NAUTIVAL, C. S. Impact of Elevated CO₂ on Wheat Growth and Yield under Free Air CO₂ Enrichment. **American Journal of Climate Change**, v.6, n.4, p.573-596, 2017.

SMITH, S. D., STRAIN, B. R. & SHARKEY, T. D. 1987. Effects of CO₂ enrichment on four Great Basin grasses. **Functional Ecology**, 1, 139-143.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBERO, A.; LOUREIRO, R. S. & BISPO, C. J. C. 2008. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 16: 87-95.

STRECK, N. A. Acclimation mechanisms to elevated CO₂ in plants. **Ciência Rural**, v.45, n.9, p.1564-1571, 2015.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.730-740, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v35n3/a41v35n3.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

SCHEUER, P. M.; FRANCISCO, A.; MIRANDA, M. Z.; LIMBERGER, V. M. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.2, p.211-222, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. 888 p.

TAKEITI, C. Y. **Trigo**. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2015. Disponível em: Acesso em: 20 jul. 2020.

TSUTSUMI, K. KONNO, M. MIYAZAWA, S. I. MIYAO, M., Sites of Action of Elevated CO₂ on Leaf Development in Rice: Discrimination between the Effects of Elevated CO₂ and Nitrogen Deficiency, **Plant and Cell Physiology**, Volume 55, Issue 2, February 2014, Pages 258-268, Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/pcp/pcu006>> Acesso em: 01 jul. 2020.

VERRILLO, F.; BADECK, F. W.; TERZI, V.; RIZZA, F.; BERNARDO, L.; MARO, A.; FARES, C.; ZALDEI, A. MIGLIETTA, F.; MOSCHELLA, A.; BRACALE, M.; VANNINI, C. Elevated field atmospheric CO₂ concentrations affect the characteristics of winter wheat (cv. Bologna) grains. **Crop & Pasture Science**, v.68, n.3, p.713-725, 2017. USDA – **United States Department of Agriculture. Statistics of grain and feed. 2019**. Disponível em: <https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_Subject/index.phpS>. Acesso em: 10 fev. 2020.

YANG, L. et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, v.98, p.12-19, 2006.

WARD, J.K. SAMANTA ROY, D. CHATTERJEE, I. BONE, C.R. SPRINGER, C.J. KELLY, J.K. Identification of a major QTL that alters flowering time at elevated [CO₂] in *Arabidopsis thaliana*. **Plos One**, 7 (2012), p. e49028

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 jul. 2020.

ZHANG, F. F.; WANG, Y. L.; HUANG, Z. Z.; ZHU, X. C.; ZHANG, F.J.; CHEN, F. D., Effects of CO₂ enrichment on growth and development of *Impatiens hawkeri* **Sci. World J.**, 2012.

CAPÍTULO 1

Níveis elevados de CO₂ incrementam o desempenho fisiológico e produtivo de cultivares de trigo

INTRODUÇÃO

O trigo é um dos cereais mais antigos cultivados no mundo, tendo sua origem datada há mais de 10.000 anos, na antiga Mesopotâmia (CONAB, 2019). Esse cereal possui lugar de destaque no cenário mundial em área de cultivo e produção, ficando atrás somente do milho. É componente básico na alimentação humana, sendo importante fonte de proteínas, carboidratos, gorduras, elementos minerais e vitaminas (CASTRO et al., 2008). Entretanto, estudos relacionados a mudanças climáticas, principalmente as elevadas concentrações de CO₂ (e[CO₂]), vêm relatando uma diminuição na qualidade nutricional dos grãos, principalmente em plantas com metabolismo fotossintético C₃, tais como o trigo (VERILLO et al., 2017). Concomitantemente com a elevação dos níveis de CO₂ atmosférico, temos o acelerado crescimento populacional, que, até 2050, estima-se chegar a 9,3 bilhões de habitantes, sendo necessário incrementar a produção mundial de grãos em até 70% nas próximas décadas (2020-2050) (FAO, 2017; VITALE; ADAM; VITALE, 2020). Apesar dos esforços para aumentar a disponibilidade global de alimentos, é imprescindível compreender a interação entre aumento dos níveis de CO₂ e os efeitos futuros no metabolismo das plantas, rendimento e qualidade dos grãos (PANOZZO et al., 2014).

A concentração global de CO₂ na atmosfera teve um incremento de mais de 30%, passando de 280 para mais de 400 ppm, a partir do período da Revolução Industrial, em meados de 1750 (CANADELL et al., 2007; TANS; KEELING, 2016). Além disso, as previsões alertam que a concentração global de CO₂ continuará a aumentar, devido em grande parte às contínuas emissões de carbono através da ação antrópica (MEEHL et al., 2007). Segundo as estimativas do painel

intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC, 2019), até 2100, a concentração deve chegar a 700 ppm.

Diversas pesquisas vêm relatando efeitos benéficos da $e[CO_2]$ atmosférico sobre a fisiologia das plantas cultivadas. Isso se deve ao fato de o CO_2 ser substrato primário para as reações de carboxilação, sendo fator limitante sob as concentrações atmosféricas atuais, para as plantas com metabolismo C3, em comparação com plantas C4, as quais possuem mecanismos anatômicos e fisiológicos que possibilitam utilizar de forma eficiente o CO_2 atmosférico (WALTER et al., 2015). Normalmente, à medida que a concentração de CO_2 aumenta, há um “efeito fertilizante” no crescimento de espécies C3 (AINSWORTH; LONG, 2005; PANOZZO et al., 2014). Dentre os efeitos benéficos da $e[CO_2]$, pode-se destacar o aumento na taxa fotossintética (AINSWORTH; LONG, 2005); a diminuição da atividade oxigenase da Rubisco (Fotorrespiração) (BOOKER et al., 2007); aumento da eficiência no uso da água; aumento na produção de biomassa; além de ganhos em produtividade (THILAKARATHNE et al., 2013).

Contudo, estudos têm relatado que esses efeitos benéficos observados sob $e[CO_2]$ contrastam com uma diminuição na qualidade nutricional dos grãos (TAUB et al., 2008; HÖGY et al., 2009; ERBS et al., 2010; FERNANDO et al., 2012; NUTTALL et al., 2017). No trigo, a diminuição da qualidade nutricional, geralmente, leva a uma redução no teor de proteínas dos grãos (NUTTALL et al., 2017). Outrossim, devido à importância do trigo como uma cultura alimentar básica na dieta de quase metade da população mundial e uma das principais fontes de proteínas e minerais na maioria dos países em desenvolvimento, essa redução na qualidade dos grãos preocupa a segurança alimentar e a saúde humana (CAKMAK, 2004). Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi caracterizar o efeito da concentração de CO_2 ambiente (400 ppm) e elevado (700 ppm) sobre parâmetros fisiológicos, rendimento e qualidade nutricional dos grãos de 3 as cultivares de trigo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no ano agrícola 2019/2020 em Câmaras de Topo Aberto (OTC do inglês - *Open Top Chamber*) localizada na área experimental do Departamento de Fitossanidade da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), no município de Capão do Leão/RS. Cada

OTC possui uma área útil de 4 m² e 2 m de altura, com laterais protegidas por filme plástico transparente de polietileno e equipadas com redutor de abertura do topo para deflexionar o ar e prevenir a diluição da concentração desejada de CO₂ dentro da câmara.

Para a realização do estudo foram utilizadas sementes das cultivares FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco, as quais foram fornecidas pela Fundação Pró-Sementes. Foram utilizados 10 vasos por cultivar, em cada tratamento (400 e 700 ppm de CO₂), mantendo-se, após emergência, 3 plantas por vaso, que foram irrigadas sempre que necessário, a fim de manter o solo próximo da capacidade de campo. Para cada nível de CO₂, utilizou-se uma OTC, sendo mantida sob concentração de 400 ppm de CO₂, considerada concentração atual no ambiente (Controle), e com 700 ppm (e[CO₂]), conforme estimativas para o ano de 2050 (IPCC, 2019).

O solo utilizado é classificado como um planossolo, e foi adubado conforme recomendações técnicas da Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do RS e SC (CQFS – RS/SC, 2016) para a cultura, com base na análise prévia quanto aos atributos químicos e físicos do solo (Tabela 1).

Tabela 1 - Características físicas e químicas do solo coletado na área experimental da Palma, Campus Capão do Leão, UFPel.

pH Água 01:01	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	CTC efetiva	% M.O	% Argila	Classe Argila	K ⁺	*P
	cmol _c dm ⁻³				m/v			mg dm ⁻³	
4,8	0,8	0,7	1,1	2,6	1,1	17,5	3	27	3,4

*O fósforo (P) foi extraído usando solução de Mehlich.

Os índices de clorofila *a* e *b* (Chla e Chlb) foram avaliados nos estádios reprodutivos da cultura, aos 74 e 81 dias após a semeadura (DAS) que compreende o estágio fenológico 10,1 (Espigamento) e aos 88 e 95 DAS, estágio fenológico 10,5 (Antese) conforme escala de Feeks e Large, (1954). A análise de trocas gasosas foi realizada no estágio fenológico 10,5 (Antese). Para as análises bioquímicas foi utilizada uma planta por vaso, totalizando cinco repetições para cada cultivar e tratamento CO₂.

As plantas dos outros cinco vasos foram destinadas à avaliação dos parâmetros de rendimento e atributos de qualidade dos grãos.

A temperatura interna das OTC's foi monitorada diariamente com auxílio de um datalogger (HOBO Pro v₂), instalado na altura do dossel das plantas. Na figura 1 constam as temperaturas máxima, mínima e média diárias para o mês de julho.

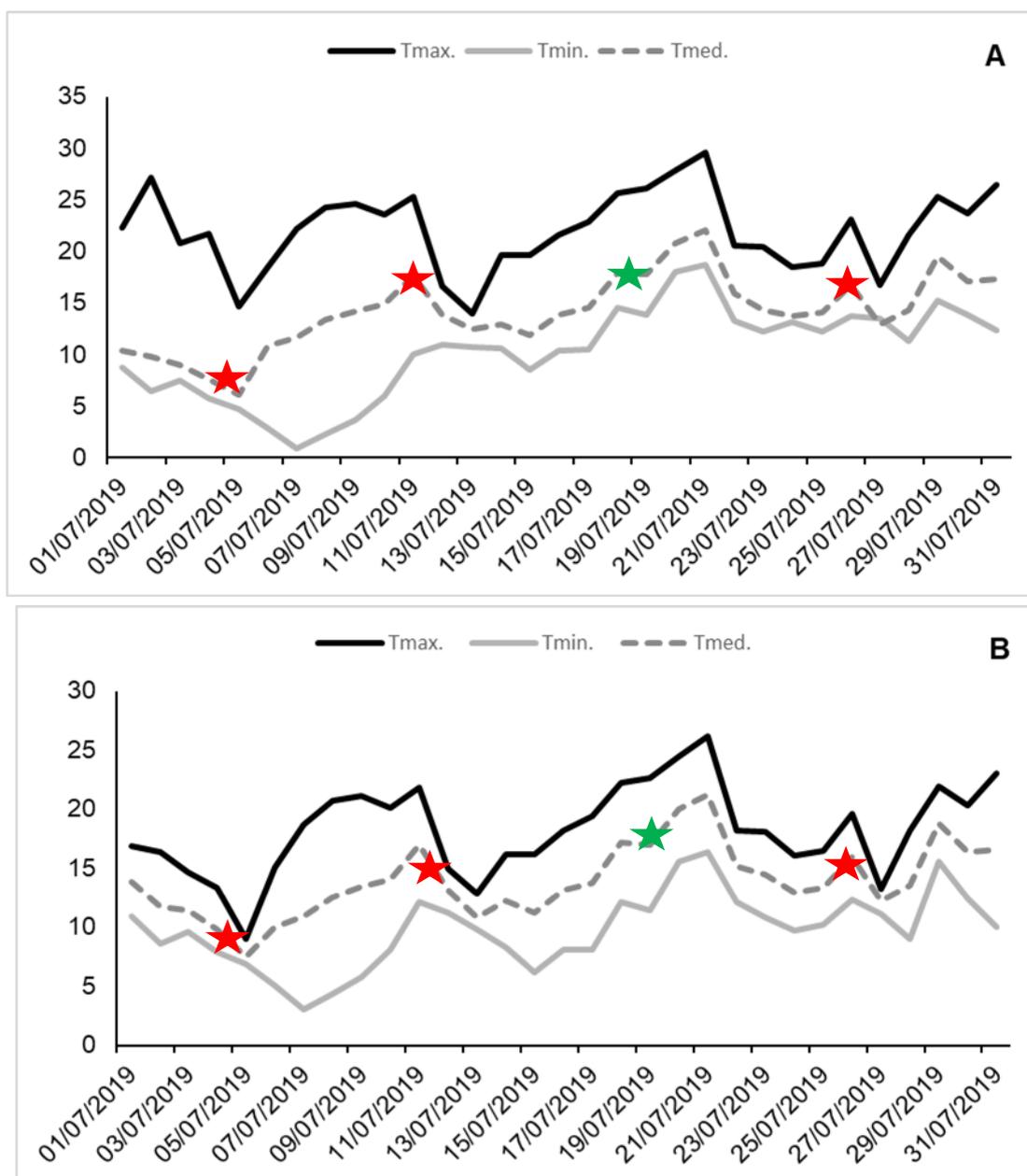


Figura 1. Temperatura máxima, mínima e média do ambiente interno das OTC's durante o mês de julho de 2019. A - 400 ppm de CO₂, B - 700 ppm e CO₂, * Data das avaliações de Chla e Chlb, trocas gasosas e coleta de matéria fresca aos 88 dias após a semeadura (DAS), * Data das avaliações de Chla e Chlb aos 74, 81 e 95 DAS.

Parâmetros fisiológicos

a. Índice de clorofila *a* (Chla) e *b* (Chlb)

Os índices de clorofila foram mensurados na porção mediana da folha bandeira de uma planta por vaso em cinco repetições de cada tratamento com auxílio de um clorofilômetro (Modelo Clorofilog, Falker).

b. Trocas gasosas

As trocas gasosas foram mensuradas em seguida da avaliação do índice de clorofilas aos 88 DAS (Estadio fenológico 10,5), nas mesmas folhas no período das 9h:30min às 11h:30min, com auxílio de um analisador de gases infravermelho (IRGA), modelo GFS-3000 (Walz, Effeltreich, Alemanha). A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) utilizada foi de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a concentração de CO_2 foi mantida em 400 ppm para o controle e 700 ppm para o tratamento elevado, a temperatura da cubeta foi ajustada em 25°C . Foi mensurada a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A); condutância estomática (G_s); taxa transpiratória (E) e a concentração interna de CO_2 (C_i). A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada a partir da razão das variáveis A/E .

Parâmetros bioquímicos

a. Carboidratos na folha bandeira

Os açúcares solúveis totais (AST), amido e sacarose, foram determinados a partir da folha bandeira de cinco plantas por tratamento. 250 mg de massa fresca (MF) foram macerados em 8 mL de solução extratora M:C:W (Metanol:clorofórmio:água milli-Q na proporção de 12:5:3) com auxílio de gral e pistilo e acondicionado em frascos âmbar por 24 horas no escuro. Após esse período, foram adicionados mais 2 mL de solução M:C:W e o extrato centrifugado a 600 rpm durante 30 minutos. Em seguida, 8 mL do sobrenadante foram transferidos para tubos tipo Falcon, e adicionou-se 2 mL de clorofórmio e 3 mL de água milli-Q. Os falcons foram centrifugados novamente por 30 min a 600 rpm para separação de fases. A fase superior foi coletada e concentrada por evaporação até aproximadamente 50% do volume, em banho-maria a 30°C por 24 horas, com a finalidade de eliminar o excesso de metanol e resíduos de clorofórmio, concentrando a amostra. O extrato obtido ao final foi posteriormente utilizado para quantificação de AST (GRAHAM e SMYDZUK, 1965), sacarose (HANDEL, 1968).

Para a quantificação de AST, em tubos de ensaio com tampas de rosca banhados em gelo, após a adição dos extratos diluídos em água mili-Q, pipetou-se 1,5 mL de solução de antrona (0,15% em ácido sulfúrico concentrado) a cada tubo. Passados 15 minutos, agitaram-se os tubos e incubou-se em banho-maria a 90 °C por 20 minutos. Em seguida, mantiveram-se os tubos no escuro até a atingir temperatura ambiente. Já para a quantificação de sacarose, em tubos de ensaio com tampas de rosca banhados em gelo, após a adição dos extratos adicionou-se 100 µL de KOH 30%. Os tubos foram deixados em banho-maria por 10 min a 100 °C. Após atingir a temperatura ambiente, adicionou-se 3 mL de antrona (0,15% em ácido sulfúrico 70%) e novamente foram incubados em banho-maria a 40 °C por 15 min.

O precipitado (Pellet) obtido da primeira centrifugação, após secagem em temperatura ambiente, foi ressuspendido em 8 mL de ácido tricloroacético 10% (TCA). Após 24 horas mantido em temperatura ambiente no escuro, adicionou-se 2 ml de TCA 10% e centrifugou-se a 600 rpm por 30 minutos. No precipitado anterior, pipetou-se 10 ml de ácido perclórico (PCA) 30%. Após agitação por 30 minutos, os tubos contendo o meio de reação foram centrifugados a 600 rpm por 30 minutos. A partir do sobrenadante coletado, quantificou-se amido (GRAHAM e SMYDZUK, 1965).

A determinação do amido foi realizada da mesma forma que para AST, sendo que ao final, os valores obtidos foram multiplicados pelo fator de correção 0,9, para conversão em teores de amido.

As leituras foram processadas em espectrofotômetro (marca Biospectro, modelo SP-22), no comprimento de onda 620 nm para açúcares solúveis totais, amido e sacarose.

b. Quantificação da proteína bruta e amido total nos grãos:

A proteína bruta na farinha dos grãos de trigo foi determinada em 3 repetições em duplicata de cada tratamento a partir do método Kjeldhal, o qual se baseia em três etapas: digestão, destilação e titulação. Foram utilizados 200 mg de farinha dos grãos em duplicata, uma medida de mistura catalisadora ou digestora (sulfato de sódio e sulfato de cobre pentahidratado na proporção 7/1) e 5 mL de ácido sulfúrico concentrado, que foram colocados em tubos de ensaio de 15 mL. Em seguida, os tubos foram postos no bloco digestor a 100°C e a temperatura foi sendo ajustada até

alcançar 400°C, tendo como objetivo a quebra das ligações orgânicas e a conservação do nitrogênio em amônia. Esse procedimento foi realizado durante aproximadamente três horas em uma capela devido à exaustão de gases que são formados pela oxidação do carbono contido na matéria orgânica e pelo dióxido de carbono que se desprende.

Após o processo de digestão ser finalizado, adicionou-se 10 mL de água destilada. Em seguida, foi acoplado o tubo de ensaio ao destilador de nitrogênio (TE-0364), aquecido a uma temperatura média de 70 °C. Foi inserido 15 mL de hidróxido de sódio e, por arraste de vapor, foi tratado o excesso de sulfato de amônia, havendo a liberação da mesma. A amônia resultante do processo de digestão foi captada em frasco erlenmeyer contendo ácido bórico e três gotas de solução indicadora (solução alcoólica de vermelho de metila a 0,1% e solução alcoólica de verde de bromocresol), o processo terminou quando foi atingido 75 mL de borato de amônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3$) e com a mudança da cor rosa para verde.

A titulação foi feita com auxílio de uma bureta, utilizando-se como solução titulante padrão o ácido clorídrico (HCl concentração 0,1N). O processo é finalizado quando acontece a viragem (mudança de cor na presença do indicador) da cor verde para rosa.

O cálculo para a determinação do nitrogênio total deu-se da seguinte forma:

$$\text{NT} = (\text{Va} - \text{Vb}) \times \text{F} \times 0,1 \times 0,014 \times 100 / \text{P1}$$

Sendo:

- NT – Teor de nitrogênio total na amostra, em percentagem;
- Va – Volume da solução de ácido clorídrico gasto na titulação da amostra;
- Vb – Volume da solução de ácido clorídrico gasto na titulação do branco;
- F – Fator de correção para o ácido clorídrico;
- P1 – Massa da amostra (em gramas).

Para a determinação da proteína total, multiplicou-se o valor do nitrogênio total verificado pelo método de Kjeldahl pelo fator conversão de nitrogênio em proteína, neste caso o valor utilizado foi de 5,77. Utilizou-se a fórmula abaixo para determinar a proteína bruta:

$$\text{PT} = \text{NT} \times \text{Fc}$$

Onde:

- PT – Proteína total;
- NT – Nitrogênio total;
- Fc – Fator de conversão.

Para a quantificação do teor de amido, inicialmente foi determinada a umidade da farinha a 13%. Posteriormente, 250 mg de amostra foram pesados e colocados em tubos do tipo falcon, identificando-os. Em seguida, pipetou-se 10 mL de etanol 85%, agitando-os em vortex e levando para a centrifugação a 3.000 rpm durante 15 minutos, para separar o precipitado do sobrenadante. No precipitado obtido durante a centrifugação, adicionou-se 10 mL de ácido sulfúrico 0,2 N (H_2SO_4) passando para tubos de ensaio com rosca. Logo após, agitou-se os tubos devidamente tampados, e foram levados para o banho maria durante 2 horas, para que ocorra a hidrólise do amido. Após esse período, pipetou-se uma alíquota de amostra inserindo-as em tubos de ensaio contendo água e antrona. Os tubos foram deixados em banho maria fervente durante 3 min. Após atingir a temperatura ambiente, foi feita a leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda de 620 nm. Para o branco, utilizou-se apenas água e antrona.

Componentes do rendimento

Os componentes de rendimento foram avaliados em 5 repetições de cada tratamento na fase de maturação fisiológica da cultura, determinando o comprimento de espiga, número de grãos por espiga, peso de mil grãos e produção por planta.

O tamanho da espiga, em centímetros, foi determinado com paquímetro digital (Modelo, Micrometer, Vernier Digital Vernier Caliper) e expresso pela média do comprimento, da base até a extremidade superior, de cinco espigas por repetição (Vaso).

O número de grãos por espiga foi obtido pela média de contagem direta do número de grãos de cinco espigas.

O peso de mil grãos, em gramas, foi determinado de acordo com as Regras para Análise de sementes (BRASIL, 2009), através da contagem manual de oito repetições de 100 grãos por repetição, e pesadas separadamente em balança de precisão.

A produção foi obtida pela trilha manual de todas as espigas de cada planta, com o peso dos grãos determinado com precisão de 0,0001 g (Modelo M124Ai, BEL Engineering) após ajuste da umidade em 13%.

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento experimental inteiramente casualizado, em sistema bifatorial 2x3, sendo o fator A as concentrações de CO₂ (400 e 700 ppm), fator B cultivares (FPS certero, FPS amplitude e ORS vintecinco). Foi realizada a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e atendendo os pressupostos, realizado a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando o software BioStat.

RESULTADOS

Quanto aos índices de clorofila (Chla e Chlb), houve diferença significativa ($p \leq 0.05$) para as cultivares estudadas aos 74, 88 e 95 DAS. A cultivar FPS Certero apresentou os maiores índices de Chla aos 74 DAS. Para a cultivar FPS amplitude, foram observados valores superiores de Chla e Chlb aos 88 e 95 DAS, e também para Chlb aos 74 DAS, porém, não diferindo da cultivar FPS certero. Já a cultivar ORS vintecinco, apresentou uma redução significativa em relação aos demais cultivares aos 88 DAS para Chla (Tabela 2).

Tabela 2 - Índices de clorofila Chla e Chlb das folhas das cultivares FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco.

Cultivares	74 DAS		81 DAS		88 DAS		95 DAS	
	Chla	Chlb	Chla	Chlb	Chla	Chlb	Chla	Chlb
FPS certero	33,89 b	13,10 ab	36,52 ^{ns}	14,10 ^{ns}	33,16 b	12,17 b	24,92 b	6,53 b
FPS amplitude	36,50 a	14,85 a	35,59 ^{ns}	16,26 ^{ns}	35,85 a	14,46 a	31,78 a	9,44 a
ORS vintecinco	32,35 b	11,79 b	34,60 ^{ns}	13,50 ^{ns}	31,48 c	11,03 b	21,20 b	5,07 b
CV (%)	6,67	13,18	-	-	3,43	9,12	16,77	30,71

Médias seguidas da mesma letra minúsculas na coluna para Chla e Chlb para as cultivares não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV- Coeficiente de variabilidade; DAS- Dias após a semeadura; ns- Não significativo.

Para o tratamento e[CO₂] (700 ppm), houve significativa redução nos índices de Chla aos 88 e 95 DAS e para Chlb aos 95 DAS, não havendo diferenças significativas aos 74 DAS em relação ao controle (Tabela 3).

Tabela 3- Índices de clorofila Chla e Chlb das cultivares de trigo FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco submetidos a duas concentrações de CO₂ atmosférico.

Tratamento ppm CO ₂	74 DAS		81 DAS		88 DAS		95 DAS	
	<i>Chla</i>	<i>Chlb</i>	<i>Chla</i>	<i>Chlb</i>	<i>Chla</i>	<i>Chlb</i>	<i>Chla</i>	<i>Chlb</i>
400	34,93 ^{ns}	13,20 ^{ns}	34,96 ^{ns}	13,87 ^{ns}	34,14 a	12,84 ^{ns}	27,88 a	7,87 a
700	33,57 ^{ns}	13,28 ^{ns}	36,12 ^{ns}	13,08 ^{ns}	32,84 b	11,56 ^{ns}	24,04 b	6,15 b
CV (%)	-	-	-	-	3,43	-	16,77	30,71

Médias seguidas da mesma letra na coluna para os índices de clorofila Chla e Chlb em relação aos níveis de CO₂ não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV- Coeficiente de variabilidade. DAS- Dias após a semeadura; ns- não significativo.

Aos 81 DAS, a análise de variância demonstrou interação significativa entre cultivares x níveis de CO₂ para as variáveis Chla e Chlb. O índice de Chla apresentou uma redução significativa de 8% para a cultivar FPS certero em e[CO₂], comparado ao controle, não apresentando diferenças significativas para as cultivares FPS amplitude e ORS vintecinco. Os maiores valores de Chla, em 400 ppm, foram vistos para as cultivares FPS certero e FPS amplitude, sendo os menores valores para a cultivar ORS vintecinco. Já em 700 ppm, a cultivar FPS amplitude teve valores superiores de Chla, seguido do FPS certero e ORS vintecinco, os quais não diferiram entre si.

O incremento dos níveis de CO₂ reduziu significativamente os índices de Chlb aos 81DAS para a cultivar FPS amplitude, comparado ao controle, não havendo diferenças significativas para FPS certero e ORS vintecinco. Os índices de Chlb, em ambiente com 400 ppm, foram maiores para a cultivar FPS amplitude, enquanto que no ambiente de elevado CO₂, não se pôde constatar diferenças significativas entre as cultivares aos 81 DAS (Tabela 4).

Tabela 4 - Índices de clorofila Chla e Chlb das folhas das cultivares FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco submetidos a duas concentrações de CO₂ atmosférico.

Tratamento Cultivar	81 DAS			
	Chla		Chlb	
	400	700	400	700
FPS Certero	38,12 aA	34,92 abB	13,30 bA	12,50 aA
FPS Amplitude	37,16 aA	35,88 aA	17,26 aA	14,30 aB
ORS Vintecinco	33,08 bA	34,10 bA	11,06 bA	12,28 aA
CV (%)	2,9		12,59	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha para concentração de CO₂ em função de cada cultivar e mesma letra minúscula na coluna para as cultivares dentro de cada concentração de CO₂ não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. CV- Coeficiente de variabilidade. DAS- Dias após a semeadura; ns- não significativo.

As cultivares de trigo FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco apresentaram diferenças significativas ($p \leq 0.05$) em relação aos parâmetros de trocas gasosas. A taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) teve um incremento significativo para a cultivar FPS amplitude em relação as demais cultivares (Figura 2a). Já para a variável eficiência no uso da água (EUA), a qual é estabelecida pela relação entre a assimilação líquida de carbono e a transpiração (A/E), pôde-se verificar um incremento médio para a cultivar FPS Certero, comparado as cultivares FPS Amplitude e ORS Vintecinco (Figura 2B), sendo que a última apresentou os menores valores. A concentração interna de CO₂ (C_i) foi significativamente maior para ORS Vintecinco em relação às cultivares FPS Certero e Amplitude, que não diferiram (Figura 2C). A taxa transpiratória evidenciou uma diminuição significativa para a cultivar FPS Certero em relação as demais cultivares, as quais não diferiram entre si (Figura 2D).

No tratamento e[CO₂] a taxa de assimilação líquida de carbono aumentou nas três cultivares estudadas, sendo que para FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco os valores foram 22%, 23% e 35% superiores ao tratamento ambiente (400 ppm). Aumentos em EUA também foram observados para as três cultivares estudadas sob e[CO₂], em média de 45%, 37% e 84%. Quanto aos resultados de transpiração houve uma redução significativa em e[CO₂], para as cultivares FPS Certero (28%) e ORS Vintecinco (57%), no entanto, para a cultivar FPS Amplitude não houve diferença significativa em relação ao tratamento controle (Figura 2C).

Para a variável condutância estomática (G_s) houve interação entre os fatores. A G_s (Figura 2C) foi inferior para as três cultivares quando submetidas a e[CO₂]. A FPS certero apresentou os menores valores de G_s , independentemente da concentração de CO₂. Já os maiores valores de condutância estomática foram observados para a ORS vintecinco em ambos os tratamentos (Figura 2C).

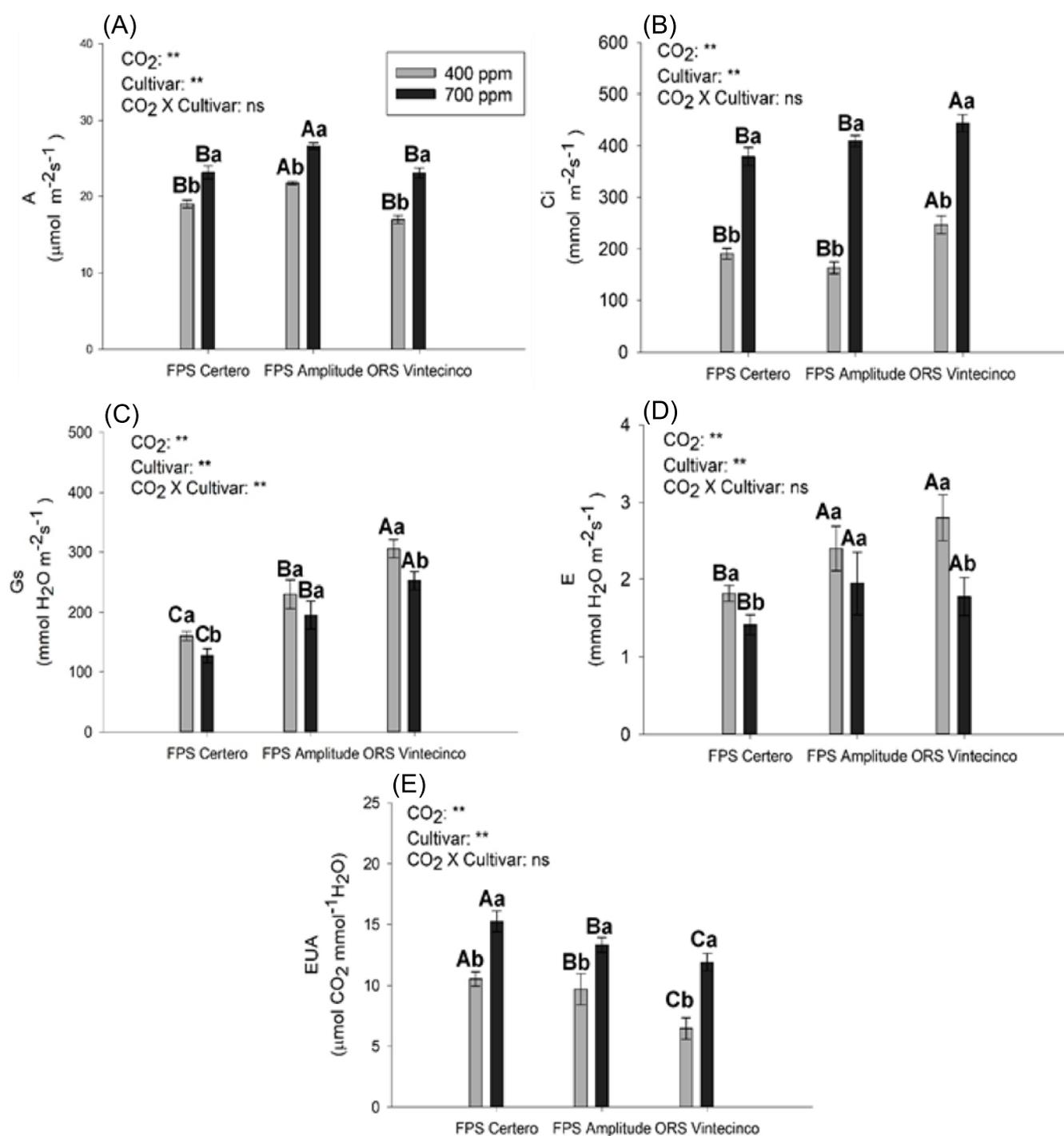


Figura 2 - Trocas gasosas de três cultivares de trigo (FPS Certero, FPS amplitude e ORS Vintecino) cultivadas em condição de CO₂ ambiente (400 ppm) e elevado (700 ppm). (A) Assimilação líquida de carbono – A, (B) Concentração intercelular de CO₂ – Ci, (C) Condutância estomática – Gs, (D) Taxa transpiratória – E, (E) Eficiência no uso da água – EUA. Letras maiúsculas comparam as cultivares dentro de cada tratamento CO₂. Letras minúsculas comparam o efeito das concentrações de CO₂ para cada cultivar. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ** significativo 5% probabilidade de erro; ns: não significativo.

As análises bioquímicas do teor de sacarose e açúcares solúveis totais evidenciaram interação entre os fatores cultivar e concentração de CO₂ (Figura 3). O

teor de sacarose (SAC) diferiu entre os tratamentos apresentando incrementos significativos para as três cultivares em e[CO₂]. A FPS amplitude apresentou os menores teores de SAC para ambos os níveis de CO₂, enquanto que os maiores valores foram encontrados para as cultivares FPS certero e ORS vintecinco.

A quantificação de açúcares solúveis totais diferiu entre os tratamentos para as cultivares FPS amplitude e ORS vintecinco, sendo que os maiores valores foram observados para o tratamento e[CO₂], não havendo diferença significativa para a cultivar FPS certero (Figura 3B). A quantificação do teor amido apresentou comportamento similar para todos as cultivares estudados, tendo incrementos significativos em ambiente enriquecido com CO₂, em média de 16% superior ao controle (Figura 3).

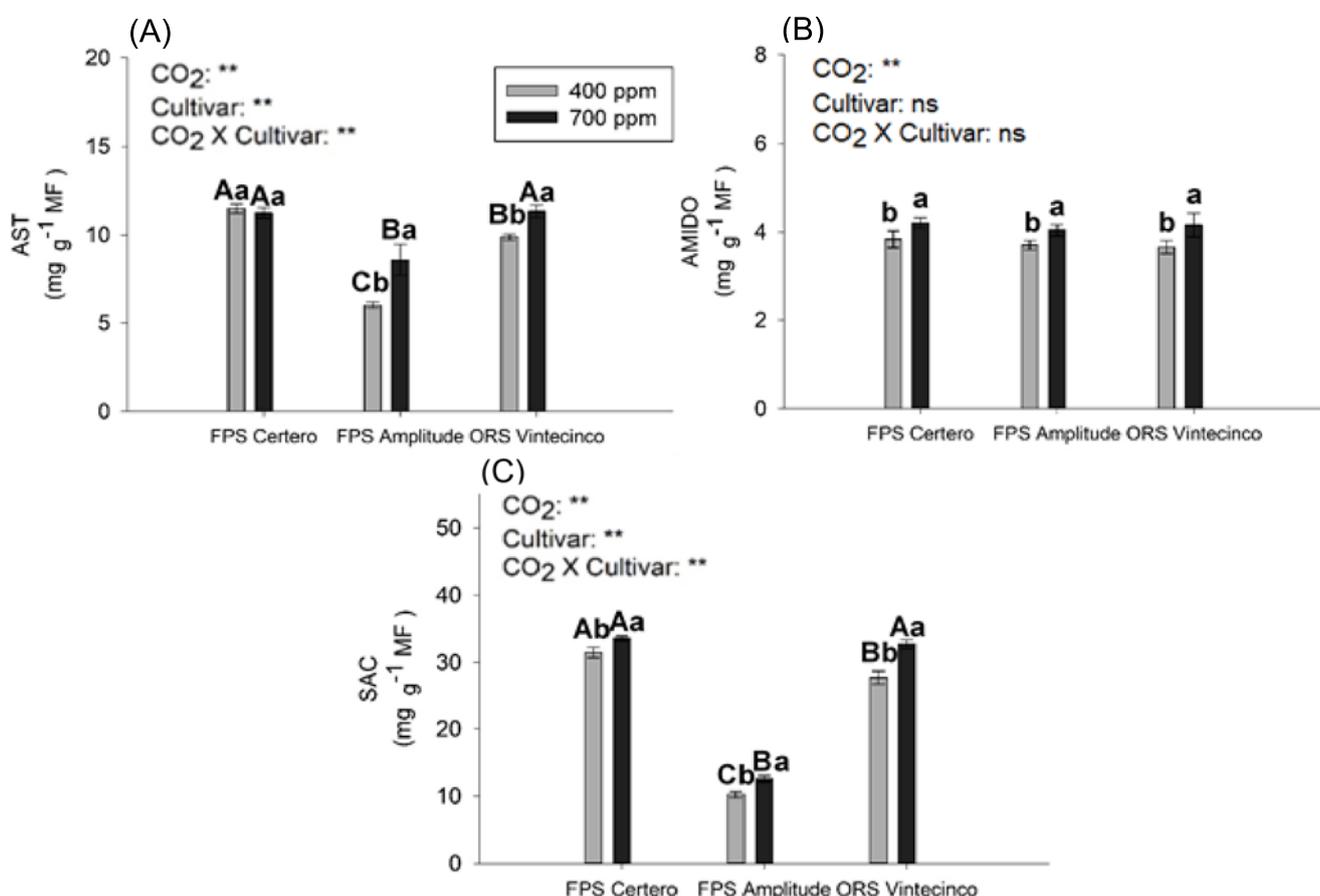


Figura 3- Análises bioquímicas em folhas de três cultivares de trigo (FPS Certero, FPS amplitude e ORS Vintecinco) cultivadas em condição de CO₂ ambiente (400 ppm) e elevado (700 ppm). (A) Teor de amido (B) Açúcares solúveis totais (AST) (C) Sacarose (SAC). Letras minúsculas comparam o efeito das concentrações de CO₂ para cada cultivar. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ** significativo 5% probabilidade de erro; ns: não significativo.

O Número de espiga por planta (Figura 4A) e grãos por espiga (Figura 4B), foi maior para a cultivar FPS amplitude em comparação aos demais cultivares. A

produção por vaso foi superior para as cultivares FPS certero e FPS amplitude em relação a cultivar ORS vinteicinco (Figura 4C).

Para as variáveis de produção, a e[CO₂] incrementou significativamente o número de espigas por planta (Figura 4A), número de grãos por espiga (Figura 4B), produção por vaso (Figura 4D), além de uma maior altura de plantas em relação ao controle (400 ppm) (Figura 4E). Quanto ao peso de mil grãos (PMG), a análise de variância apresentou interação entre os fatores e[CO₂] (400 e 700 ppm) x cultivares (FPS certero, FPS amplitude e ORS vinteicinco). Nas plantas cultivadas em e[CO₂], verificou-se uma diminuição no peso de mil grãos, sendo que, os menores valores de PMG foram observados para a cultivar ORS vinteicinco. Já para o ambiente controle (400 ppm), as cultivares não diferiram entre si quanto ao peso de mil grãos (PMG) (Figura 4C).

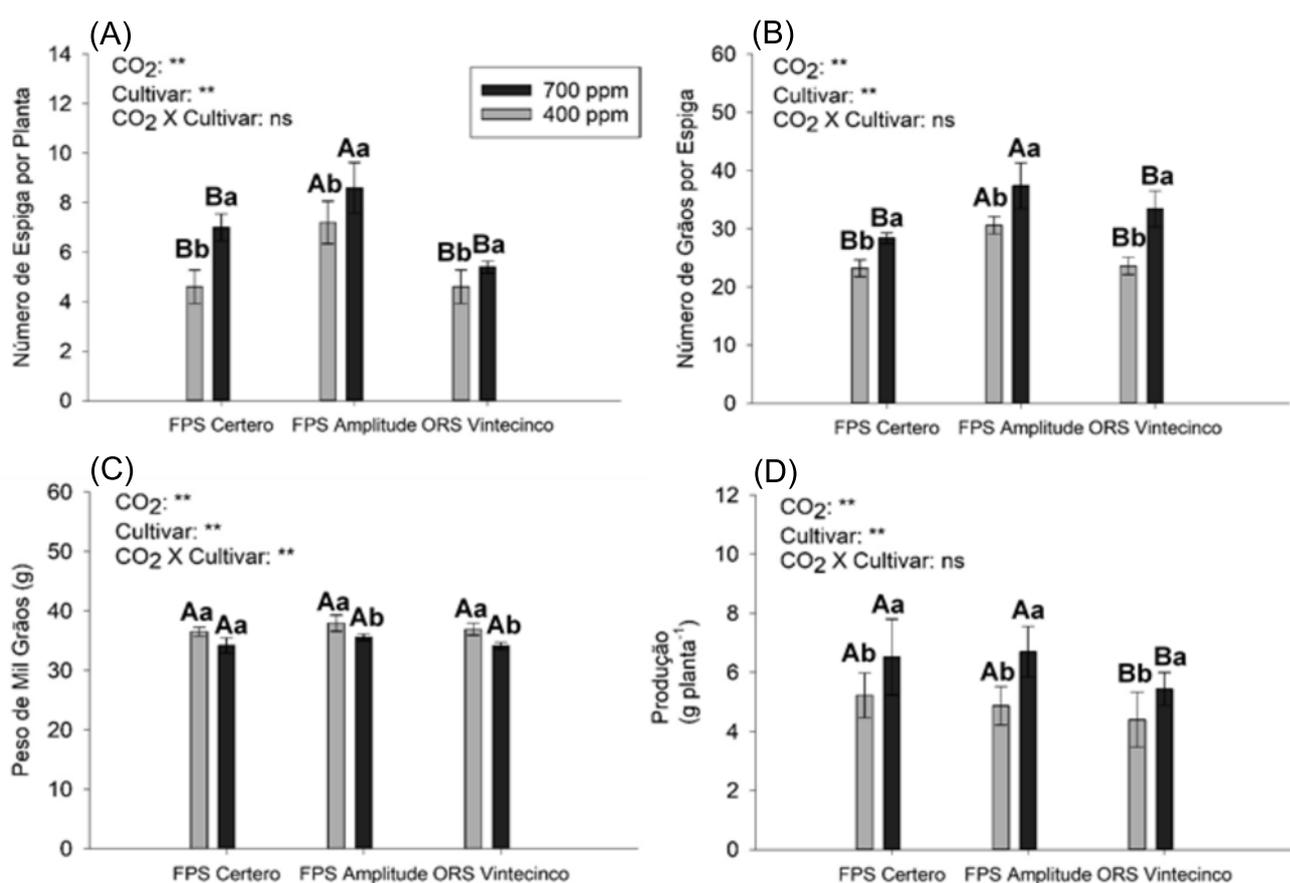


Figura 4. Componentes do rendimento e rendimento de três cultivares de trigo (FPS Certero, FPS amplitude e ORS Vinteicinco) cultivadas em condição de CO₂ ambiente (400 ppm) e elevado (700 ppm). (A) Número de espigas por planta (B) Número de grãos por espiga (C) Peso de Mil Grãos, (D) Produção por vaso. Letras maiúsculas comparam as cultivares dentro de cada tratamento CO₂. Letras minúsculas comparam o efeito das concentrações de CO₂ para cada cultivar. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ** significativo 5% probabilidade de erro; ns: não significativo.

Plantas cultivadas sob e[CO₂] apresentaram diferenças significativas na qualidade nutricional dos grãos, havendo incremento significativo no teor de amido total dos grãos e redução na porcentagem de proteína bruta. O teor de amido total foi maior nas três cultivares estudadas em ambiente com e[CO₂], sendo em média de 20%, 39% e 12% superior em relação a a[CO₂], não havendo interação entre os fatores CO₂ e cultivar de acordo com a análise de variância (Figura 5A). Quanto a porcentagem de proteína bruta dos grãos, observou-se uma redução significativa para FPS amplitude e ORS vinteicinco sendo em média 21% e 17% inferior ao tratamento controle (a[CO₂]), enquanto para FPS certero não se pode verificar significância estatística, todavia, podemos notar uma leve diminuição sob e[CO₂] de 8% (Figura 5B).

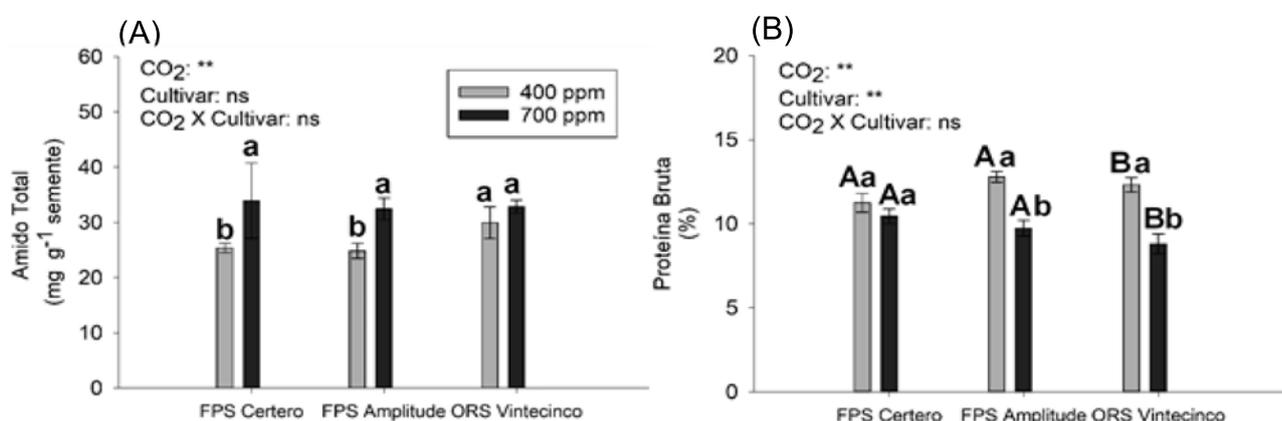


Figura 5. Análises bioquímica dos grãos de três cultivares de trigo (FPS Certero, FPS amplitude e ORS Vintecinco) cultivadas em condição de CO₂ ambiente (400 ppm) e elevado (700 ppm). (A) Teor de amido total nos grãos. (B) Porcentagem de proteína bruta nos grãos de trigo. Letras maiúsculas comparam as cultivares dentro de cada tratamento CO₂. Letras minúsculas comparam o efeito das concentrações de CO₂ para cada cultivar. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ** significativo 5% probabilidade de erro; ns: não significativo.

DISCUSSÃO

Parâmetros fisiológicos

O conteúdo de clorofila nas folhas é utilizado frequentemente para estimar o potencial fotossintético das plantas, pois está intrinsecamente ligado ao processo de absorção e transferência de energia luminosa (RÊGO; POSSAMAI, 2004; MAO et al., 2007). Os elevados índices de clorofila nas folhas possibilitam que as plantas alcancem taxas fotossintéticas maiores, aumentando a capacidade de absorção de “quanta” por unidade de tempo (FAGERIA et al., 2003; TAIZ & ZEIGER, 2017). No entanto, essa relação nem sempre é encontrada, visto que pode ser suprimida por

alguma limitação na etapa bioquímica da fotossíntese (PORRA et al., 1989; CHAPPELLE & KIM, 1992). Nesse estudo, as cultivares FPS certero, FPS amplitude e ORS vintecinco apresentaram uma diminuição no índice de Chla e Chlb em ambiente enriquecido com CO₂ (700 ppm) (Tabela 2 e 3), entretanto, apresentando incrementos na assimilação líquida de carbono (Figura 2a), possivelmente devido a redução da fotorrespiração. Corroborando com o exposto, estudo de Bloom et al., (2010) com plantas de trigo e *Arabidopsis*, observaram que em ambiente com e[CO₂] (557 ppm), houve uma redução no índice de clorofilas, todavia, apresentando incrementos na fotossíntese líquida. Além disso, Wang et al., (2013) verificaram que concentrações de CO₂ entre 600 a 800 ppm causaram efeitos acentuados na diminuição dos índices de clorofila em folhas de trigo em relação a 450-600 ppm. Em tomate, observou-se uma redução nos índices de Chla e Chlb sob ambiente com e[CO₂] de 1000 ppm (LANOUE et al., 2018).

Os menores índices de Chla e Chlb observados nas três cultivares de trigo sob e[CO₂], podem estar relacionados ao maior acúmulo de amido nas células (Figura 5A), o qual pode levar a danos nos cloroplastos e à degradação das clorofilas (DELUCIA et al., 1985; STITT, 1991). Outras hipóteses, todavia, não podem ser descartadas, sendo que inúmeros autores explicam que a limitação estomática verificada em e[CO₂], devido a menor *g_s*, pode restringir a captação de N pelas raízes (CONROY; HOCKING, 1993; DEL POZO et al., 2007; TAUB; WANG 2008; MCGRATH; LOBELL., 2013), visto que a taxa de absorção de N ocorre em função da taxa de absorção de água (MALAVOLTA, 1980), o que levaria à deficiência desse nutriente e, conseqüentemente, à diminuição da síntese de clorofila. Além disso, grande parte dos estudos tem relacionado a redução dos índices de clorofila nas folhas em detrimento ao aumento da biomassa sob e[CO₂], chamado efeito de diluição do N (CONROY e HOCKING, 1993; WANG et al., 2015) ou também pela redução da assimilação de nitrato (NO₃) pelas raízes (BLOOM et al., 2012, 2014; MYERS et al., 2014).

Em relação às cultivares estudadas, a FPS amplitude apresentou aumentos significativos no conteúdo de pigmentos (Chla e Chlb), seguido do “FPS certero” e ORS vintecinco, respectivamente (Tabela 2). Segundo Chen et al., (2014), essas diferenças entre as cultivares estão relacionadas ao maior investimento na síntese de pigmentos, buscando ampliar a área de interceptação da energia luminosa. Provavelmente foi o que aconteceu nesse estudo, em que incrementos nos índices

de Chla e Chlb (Tabela 2) foram observados para FPS amplitude, a qual apresentou ganhos médios na fotossíntese líquida (Figura 2A), número de espigas por planta (Figura 4B), grãos por espiga (Figura 4D) e produção por planta (Figura 4C).

A elevação da concentração atmosférica de CO₂ pode influenciar diretamente sobre a fisiologia das plantas, visto que é fonte primária de carbono para que ocorra as reações de fotossíntese. Neste processo, as plantas utilizam a energia luminosa interceptada pelas clorofilas presentes nos cloroplastos, para reduzir quimicamente o CO₂ da atmosfera em compostos ricos em energia (Carboidratos), os quais são utilizados em todo metabolismo da planta (BARNABY; ZISKA, 2012). Plantas com metabolismo C₃, como o trigo, têm apresentado uma série de benefícios com o enriquecimento do CO₂ atmosférico, dentre os quais destacam-se: Incremento na fotossíntese líquida, redução na condutância estomática e transpiração, além do aumento na eficiência no uso da água e produtividade (WANG et al., 2013).

A taxa fotossintética da maioria das espécies vegetais pode ter um incremento médio de 30 a 60% em ambientes com concentrações de dióxido de carbono entre 600 a 700 ppm em relação aos 400 ppm atuais (TAIZ & ZEIGER, 2017). No presente estudo verificou-se incrementos na assimilação líquida de carbono para as três cultivares estudadas (Figura 3A), sob e[CO₂], com valores médios 28% superiores ao tratamento controle (a[CO₂]). Esse resultado está de acordo com uma série de experimentos anteriores com trigo em sistema de enriquecimento de CO₂ ao ar livre (FACE, *Free Air CO₂ Enrichment*), nos quais as taxas de fotossíntese líquida foram estimuladas em média entre 15 e 28% (GARCIA et al., 1998; WALL et al., 2006; TAUSZ-POSCH et al., 2012; HOUSHMANDFAR et al., 2016). Já em estudo de Aranjuelo et al., (2015), plantas de trigo cultivadas com 700 ppm em OTC's tiveram um aprimoramento na fotossíntese líquida em média de 50%. Em soja, Zheng et al., (2020) observaram incrementos significativos na fotossíntese líquida entre 24,6% e 46,5%, com concentração de CO₂ de 800 ppm. Resultados semelhantes na fotossíntese líquida sob e[CO₂] ainda foram observados em estudos com cevada (Wang et al. 2013), aveia (BHATT et al., 2010), arroz (PAL et al., 2012), girassol (PAL et al., 2014) e grão de bico (RAI et al., 2016), entre outros.

O aumento na fotossíntese líquida sob e[CO₂] ocorre possivelmente devido ao aumento na eficiência catalítica da enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco) (THOMPSON et al., 2017). Em níveis de CO₂ atuais, plantas

com metabolismo C3, não possuem saturação de carbono, portanto, com o aumento na disponibilidade de substrato (CO_2) para a rubisco sob $e[\text{CO}_2]$, há um incremento na atividade carboxilase da enzima, reduzindo conseqüentemente a fotorrespiração (DRAKE et al., 1997; DUSENGE; DUARTE; WAY, 2018). O processo de fotorrespiração é dispendioso em termos energéticos, pois custa energia, ao mesmo tempo que não leva a ganhos de ATP ou carbono à planta (PETERHANSEL et al., 2010). Estima-se que as perdas de carbono na fotorrespiração sejam de aproximadamente 40% (KANT et al., 2012). Nesse sentido, a maior concentração de CO_2 interno (C_i) verificado no presente estudo sob $e[\text{CO}_2]$ (Figura 2B), possibilita o aumento da razão entre $\text{CO}_2:\text{O}_2$ ao redor do sítio ativo da rubisco, incrementando a taxa de carboxilação e reduzindo competitivamente a atividade oxigenase, promovendo o aumento na assimilação líquida de carbono (MAKINO e MAE, 1999; THOMPSON et al., 2017) (Figura 2A).

Além dos ganhos verificados na assimilação líquida de carbono e na concentração interna de CO_2 , em resposta a $e[\text{CO}_2]$, outro efeito bem elucidado é a diminuição da condutância estomática (AINSWORTH; ROGERS, 2007), a qual proporciona uma restrição na perda de água pela transpiração (ELLSWORTH, 2002), e no aumento da eficiência no uso da água. Estudos de Wand et al., (1999); Medlyn et al., (2001); Wullschleger et al (2002); Long et al., (2004) em sistema FACE com mais de 10 espécies, dentre elas C3 e C4, evidenciaram uma redução média de 22% na condutância estomática. Já em soja, Ainsworth et al. (2002) constataram uma redução de 40% na G_s em ambiente com 600 ppm de CO_2 . Para o trigo, em estudo de Tausz-Posch (2012) verificou-se uma redução média de 57%. Assim como os resultados citados anteriormente, pôde-se observar, no presente estudo (Figura 2C), que as cultivares de trigo FPS Certero, FPS amplitude e ORS Vintecinco apresentaram uma diminuição significativa na condutância estomática de 21, 20% e 17%, respectivamente, quando cultivadas sob $e[\text{CO}_2]$.

As concentrações de dióxido de carbono são importantes reguladores na dinâmica de abertura e fechamento dos estômatos, sendo que é por meio deles que as plantas fazem as suas trocas gasosas com o ambiente externo (TAUB, 2010). A abertura dos estômatos permite a difusão do CO_2 para a fotossíntese, além de disponibilizar caminho para a água difundir-se das folhas para a atmosfera (XU et al., 2016). Portanto, as plantas regulam o nível de abertura estomática (Condutância estomática), buscando manter altas taxas de fotossíntese e reduzir a perda de água.

A medida que as concentrações de CO₂ aumentam levam a um controle do grau de abertura estomática (TAUB, 2010), reduzindo a condutância estomática e a taxa transpiratória, entretanto, sem comprometer a concentração interna de CO₂, pois a maior diferença de concentração de CO₂ entre a atmosfera e o interior da folha compensa o aumento da resistência estomática (SHIMONO, 2010; WALTER, 2015), possibilitando manter altas taxas de fotossíntese. O aumento na fotossíntese líquida (Figura 2A) sob e[CO₂] juntamente com a diminuição da condutância estomática e consequentemente da transpiração, estabelecem a maior eficiência no uso da água observadas nesse estudo (Figura 2E).

Parâmetros bioquímicos

O aumento na assimilação líquida de carbono (Figura 2A), sob e[CO₂], foi acompanhado de maiores teores de açúcares solúveis totais, amido e sacarose na folha bandeira das plantas de trigo. Conforme Macneill et al., (2017), a maior taxa de assimilação líquida de carbono sob e[CO₂], devido à diminuição da fotorrespiração, eleva a biossíntese de carboidratos (BOOKER et al., 2007) em média de 30 a 40% (AINSWORTH 2008; AINSWORTH; LONG 2005). No presente estudo, a elevação dos níveis de CO₂ em 700 ppm promoveu o aumento no teor sacarose nas folhas de trigo, em média de 10%, 29%, 22% e nos teores de amido de 14%, 13% e 14%, além de incrementos no teor de açúcares solúveis totais para as cultivares FPS Certero, FPS Amplitude e ORS Vintecinco, respectivamente (Figura 3A), em relação a a[CO₂]. Resultados semelhantes foram observados por Grimmer (1999) e seus colaboradores, em que se verificou um aumento de um terço no teor de sacarose em folhas de mamona cultivadas sob ambiente com aproximadamente 700 ppm de CO₂ (THOMPSON et al., 2017). Em ervilha, Aranjuelo et al., (2013) constatou incrementos no teor de sacarose e amido em todos os órgãos da planta sob e[CO₂] em câmaras de crescimento, enquanto que as concentrações de outros carboidratos permaneceram praticamente inalteradas. Wang, Feng e Schjoerring (2013) em uma meta-análise compilando dados de 59 artigos com trigo sob e[CO₂] também verificaram maior acúmulo de amido (>23%) e sacarose (>15%) nas folhas.

Apesar de encontrarmos valores superiores no teor de sacarose e amido nas folhas de trigo sob e[CO₂], em comparação a a[CO₂], não se pode verificar algum efeito negativo da aclimação no período de avaliação, visto que as plantas mantiveram incrementos na assimilação líquida de carbono. Embora o aumento

desses carboidratos possa ser compreendido como uma consequência da limitação dos órgãos dreno, os papéis desses carboidratos nas plantas devem ser considerados (ARANJUELO et al., 2013). A sacarose é a principal forma de translocação de carbono para os órgãos em desenvolvimento ou de armazenamento (FALLAJ et al., 2008), enquanto o amido é o principal carboidrato de reserva das plantas. O maior teor de sacarose em relação ao amido nas cultivares estudadas sob e[CO₂] pode estar relacionado ao maior requerimento de carbono de seus drenos, uma vez que as plantas crescidas em elevado CO₂ apresentaram aumento no número de espigas por planta (Dreno), além de uma maior altura de plantas. Corroborando com o exposto, resultados de Aranjuelo et al., (2013) com trigo indicam que a força do dreno afeta a distribuição do carbono, na medida em que drenos mais fortes ou em maior quantidade permitem um maior armazenamento de carboidratos, que por sua vez impedem a inibição da fotossíntese pelo acúmulo de carboidratos nas folhas, chamado de feedback negativo. Outrossim, uma linhagem de tabaco com potencial limitado de crescimento das folhas (Folhas sendo o principal dreno da cultura) mostrou aclimação a e[CO₂], enquanto outra com uma capacidade maior de crescimento, não se aclimatou (RUIZ-VERA et al., 2017; TAUSZ-POSCH et al., 2019; BOURGALT, 2019). Segundo Stitt (1991) as plantas podem responder ao aumento do teor de carboidratos foliares de três formas: Diminuindo a taxa fotossintética (Aclimação); aumentando a capacidade de estoque temporário em folhas, caules e drenos já existentes; ou ainda incrementando a formação de novos drenos, sendo as duas últimas o que provavelmente aconteceu nesse estudo.

Os grãos de trigo são importantes fontes de carboidratos, proteínas, aminoácidos, lipídios e minerais, os quais fornecem o valor nutricional na dieta humana (POMERANZ, 1987, SHEWRY, 2009). O trigo possui em média 8 a 16% de proteínas na composição dos seus grãos, sendo que essas podem ser classificadas em: estruturais, metabólicas e de armazenamento (VENSEL et al., 2005). Tais proteínas desempenham importantes funções na qualidade da farinha e no valor nutritivo, além também de serem importantes na germinação e vigor das plântulas (VENSEL et al., 2005). Entretanto, inúmeros estudos vêm relatando que o cultivo de trigo sob e[CO₂] (Comparado a a[CO₂]) leva a ganhos significativos na produção de grãos, todavia, obtendo uma diminuição na porcentagem de proteínas dos grãos

(KIMBALL et al., 2001; HÖGY et al., 2009; FERNANDO et al., 2014 ; FITZGERALD et al., 2016; WALKER et al., 2017; BROBERG et al., 2017).

O teor proteico do grão de trigo é um importante parâmetro na determinação da qualidade de panificação, desempenhando papel fundamental na resistência da massa e, portanto, é um fator determinante no preço final dos grãos (HÖGY et al., 2013; THANHAEUSER, WIESER; KOEHLER, 2014). Para uma qualidade de panificação adequada, é necessária uma média de 11,5% de proteína nos grãos, portanto, sob e[CO₂], a redução na porcentagem de proteínas nos grãos estará abaixo do padrão mínimo de qualidade. No presente estudo, pode-se verificar (Figura 5B) uma substancial redução na porcentagem de proteína bruta dos grãos, confirmando resultados observados em estudos anteriores (HÖGY et al., 2010, ERBS et al., 2010; FERNANDO et al., 2014)., nos quais foi verificado uma redução em média de 5 a 16% (UDLLING et al., 2018).

A diminuição na porcentagem de proteína bruta dos grãos foi acompanhada de um aumento no teor de amido sob e[CO₂]. Os grãos de trigo contêm em média 60-70% de amido, sendo o principal carboidrato de reserva dos grãos, o que lhe torna uma importante fonte energética para a dieta humana. Todavia, estudos anteriores com trigo em atmosfera enriquecida com CO₂ são inconsistentes, não havendo um padrão de resposta, sendo que alguns relatam não haver alteração (ERBS et al., 2010) enquanto outros observaram um aumento no teor de amido dos grãos (HÖGY; FANGMEIER, 2009; PORTEAUS et al., 2009; HÖGY et al., 2009, 2013; BROBERG; HÖGY; PLEIJEL, 2019). Segundo Porteaus et al., (2009), a maior relação amido/proteína observada nesse estudo deve-se possivelmente a alteração no particionamento dos compostos nitrogenados durante o crescimento e desenvolvimento da cultura, refletindo em um aumento na concentração de polissacarídeos de reserva no grão (Amido). Além disso, verificou-se incrementos no teor de carboidratos (C) e uma redução nos índices de clorofilas nas folhas de trigo sob e[CO₂], provavelmente devido ao menor status de N, indicando uma maior relação C/N nas folhas de trigo, o que reflete na maior translocação de carboidratos das folhas (Fonte) para os grãos (Dreno) (NUTTAL et al., 2017). No trigo, as folhas e os caules são fontes de aproximadamente 75% de todo N remobilizado para o enchimento de grãos (SOBA et al., 2019), desse modo, a diminuição do N nas folhas de trigo, sob e[CO₂], contribui para redução da porcentagem de proteínas dos grãos (GAJU et al., 2014).

O efeito negativo da $e[\text{CO}_2]$ sob a porcentagem de proteína bruta do grão ocorre possivelmente devido ao menor *pool* de N disponível para remobilização das folhas. Entretanto, os mecanismos fisiológicos envolvidos na redução da concentração de N nos grãos sob $e[\text{CO}_2]$ ainda não foram completamente elucidados, apesar de que inúmeras hipóteses foram propostas (DIER et al., 2019; SOBA et al., 2019). Uma hipótese constantemente citada é a do “efeito de diluição”, a qual propõe que o aumento na assimilação fotossintética de carbono e o aumento na biomassa da planta sob $e[\text{CO}_2]$, acarreta em uma diluição do N nos tecidos e conseqüentemente no maior requerimento de N (CAI et al., 2016; TAUSZ et al., 2017), possivelmente o que aconteceu no presente estudo, no qual utilizou-se a adubação recomendada para a cultura ($150 \text{ kg de N ha}^{-1}$). Nesse sentido, o decréscimo na porcentagem proteica do grão provavelmente é resultante do suprimento limitado de N das partes vegetativas da planta, ao invés do acúmulo de carboidratos nas folhas durante o enchimento de grãos com o enriquecimento de CO_2 , como alguns estudos propõem. Assim, nossos resultados sugerem que é necessário a aplicação adicional de fertilizantes nitrogenados, visto que, a recomendação atual é inadequada para manter os padrões de qualidade dos grãos. Infelizmente, estudos recentes com trigo sob $e[\text{CO}_2]$, apontam que a aplicação adicional de N não é suficiente para compensar redução na proteína do grão (TAUSZ et al., 2017; PLEIJEL et al., 2019). Deste modo, mais estudos são necessários, pois resultados de pesquisas recentes vêm propondo diferentes mecanismos, os quais podem atuar de forma isolada ou simultaneamente (DIER et al., 2019). A compreensão dos mecanismos envolvidos na depleção do N em plantas crescidas sob atmosfera enriquecida com CO_2 irão possibilitar traçar formas para mitigar/compensar os efeitos adversos na qualidade dos grãos de trigo e outras culturas com importância econômica e nutricional, garantindo a segurança alimentar.

Componentes do Rendimento

A $e[\text{CO}_2]$ tem efeito potencializador bem conhecido na fisiologia de espécies C_3 , uma vez que é substrato para as reações de fotossíntese, e não há saturação de carbono para essas espécies em níveis de CO_2 atuais, a $e[\text{CO}_2]$ proporciona o incremento da fotossíntese, aumentando a disponibilidade de hidratados de carbono, o que resulta em ganho de biomassa e conseqüentemente no rendimento de grãos (KIMBALL et al., 2001; AINSWORTH; LONG, 2005; HÖGY et al., 2009). O

rendimento de grãos do trigo é o produto do peso individual dos grãos, número de espiga por planta e grãos por espiga, além do peso de mil grãos (PMG). Conforme uma meta-análise de Wang, Feng e Schjoerring (2013), constatou-se que grande parte dos estudos com trigo sob e[CO₂] (entre 450 e 800 ppm) relataram ganhos de produtividade, com média superior a 24% em relação ao tratamento controle (a[CO₂]). Quanto aos componentes do rendimento, o número de espigas por planta tende a aumentar em média 15%, seguido de números de grãos por espiga, com 14%, sendo os principais determinantes dos ganhos em produtividade sob e[CO₂] (WANG; FENG; SCHJOERRING, 2013).

Neste estudo, a e[CO₂] levou a uma redução no PMG, possivelmente pelo menor tamanho dos grãos, todavia tendo incrementos no número de espiga por planta e grãos por espiga. Portanto, os ganhos de produção por planta observados em e[CO₂] foram sustentados pelo maior número de espigas e grãos por espiga. Da mesma forma, estudo de Bunce (2008) investigando as respostas de quatro cultivares de feijão sob e[CO₂], constatou que os ganhos de rendimento de grãos estavam associados à maior capacidade de produzir vagens. Já Ziska et al., (2012) verificaram que os ganhos de produtividade da soja sob e[CO₂] estavam relacionados a capacidade de aumentar a produção de grãos por vagens. Além disso, Högy et al., (2013) observaram que o aumento no rendimento de grãos do trigo sob e[CO₂] está intrinsecamente relacionado ao ganho de número de grãos por espiga. Quanto ao PMG, estudos anteriores em sistema FACE relatam diminuição, nenhuma alteração ou aumento (LI et al., 2001; HÖGY; FANGMEIER, 2008). A tendência de diminuição do PMG foi observada em estudos de Högy et al., (2009) com trigo ao longo de vários anos, coincidindo com os resultados observados nesse estudo. Provavelmente, as discrepâncias entre os resultados estão relacionadas às diferentes condições climáticas e cultivares utilizados, tendo em vista que até o momento não se tem um padrão bem estabelecido de resposta a e[CO₂] para os componentes do rendimento de grãos do trigo, principalmente no Brasil, onde são poucos estudos disponíveis.

CONCLUSÃO

A elevada concentração de CO₂ altera o desempenho fisiológico e bioquímico de plantas de trigo, incrementando a assimilação líquida de carbono e a eficiência no uso da água e conseqüentemente, o teor de carboidratos nas folhas.

Os índices de clorofila *a* e *b* foram reduzidos em plantas de trigo cultivadas sob elevada concentração de CO₂, evidenciando o maior requerimento de nutrientes, principalmente o nitrogênio, sendo necessário mais estudos buscando traçar estratégias para mitigar esse efeito adverso.

Para os componentes do rendimento, a maior disponibilidade de CO₂ favoreceu o incremento no número de espigas e grãos por espiga, proporcionando ganhos em produção por planta.

O elevado CO₂ alterou a qualidade nutricional dos grãos, aumentando o teor de carboidratos e reduzindo a porcentagem de proteína bruta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH, E. A.; BUSH, D. R. Carbohydrate export from the leaf: a highly regulated process and target to enhance photosynthesis and productivity. **Plant Physiology** v. 155, p. 64–69, 2011.

AINSWORTH, E. A.; LONG, S.P. O que aprendemos com 15 anos de enriquecimento de CO₂ ao ar livre (FACE)? Uma revisão meta-analítica das respostas da fotossíntese, propriedades do dossel e produção da planta ao aumento de CO₂. **New Phytologist**, v. 165, p. 351 – 372, 2005.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A.; NELSON, R.; LONG, S. P.; Testing the ‘source–sink’ hypothesis of down-regulation of photosynthesis in elevated [CO₂] in the field with single gene substitutions in Glycine max. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 122, p 85–94. 2004.

AINSWORTH, E.A. LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂, **New Phytol.**, v. 165, p. 351-372, 2005.

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A.; LEAKEY, A. D. B.; HEADY, L. E.; GIBON, Y.; STITT, M. SCHURR, U. **O [CO₂] atmosférico elevado altera a captação diurna de C e o balanço dos metabólitos C e N nas folhas de soja em crescimento e totalmente expandidas?** *J. Exp.*, p. 579 – 591, 2015.

ARANJUELO, I.; CABRERA-BOSQUET, L.; MORCUENDE, R.; AVICE, J. C.; NOGUÉS, S.; ARAUS, J. L.; MARTÍNEZ-CARRASCO, R.; PÉREZ, P. Does ear C sink strength contribute to overcoming photosynthetic acclimation of wheat plants exposed to elevated CO₂? **Journal of Experimental Botany**, v. 62, p. 3957–3969, 2011.

ARANJUELO, I.; SANZ-SÁEZ, A.; JAUREGUI, I.; IRIGOYEN, J. J.; ARAUS, J. L.; SÁNCHEZ-DÍAZ, M.; ERICE, G. Índice de colheita, um parâmetro que condiciona a

responsividade das plantas de trigo ao CO₂ elevado, **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 7, p. 1879–1892, 2015.

ARANJUELO, I. Metabolic Effects of Elevated CO₂ on Wheat Grain Development and Composition. **J. Agric. Food Chem.** v. 67, n. 31, p. 8441-8451, 2019.

ARENQUE, B.C. et al. **Responses of Senna reticulata, a legume tree from the Amazonian flood plains, to elevated atmospheric CO₂ concentration and water logging.** *Trees*, v. 28, p. 1021-1034, 2014. doi: 10.1007/s00468-014-1015-0.

ARNON, D.I. Cooper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in **Beta vulgaris**. **Plant Physiology**, Maryland, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.

ASCH, F.; DINGKUHN, M.; DÖRFFLING, K.; MIEZAN, K. Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. **Euphytica, Amsterdam**, v. 113, p. 109-118, 2000.

AZEVEDO, R.A.; ALAS, R.M.; SMITH, R.J.; LEA, P.J. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v.104, p.280-292, 1998.

BARNABY, J. Y.; ZISKA, L. H., Plant responses to elevated CO₂. In: **Encyclopedia of Life Sciences**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0023718>. SM

BHATT, R. K.; BAIG, M. J.; TIWARI, H. S., Elevated CO₂ influences photosynthetic characteristics of Avena sativa L. cultivars. **Journal of Environmental Biology**, v. 31, p. 813–818, 2010.

BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; TEDESCO, M.J. **Fertilidade dos solos e manejo de adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole, 2 ed. 2008. 344 p.

BLOOM, A. J.; BURGER, B. A.; KIMBALL, P. J.; PINTER, M., Nitrate assimilation is inhibited by elevated CO₂ in field-grown wheat. **Nature Climate Change**, v. 4 n. 6, p. 477–80, 2014.

BLOOM, A.J.; BURGER, M.; ASENSIO, J. S. R.; COUSINS, A.B. Carbon dioxide enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and Arabidopsis, **Science**, vol. 328, pg. 899-903, 2010.

BLOOM, A. J.; ASENSIO, L.; RANDALL, S.; RACHMILEVITCH, A. B.; COUSINS, E. CARLISLE, A., CO₂ enrichment inhibits shoot nitrate assimilation in C₃ but not C₄ plants and slows growth under nitrate in C₃ plants. **Ecology**, v. 93, n. 2, p. 355–67, 2012.

BOND, J.; LIEFERT, O., **Wheat Outlook**, WHS-19a, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, February 12, 2019.

BOOKER, F. L.; BURKEY, K. O.; PURSLEY, W. A.; HEAGLE, A. S., Elevated carbon dioxide and ozone effects on peanut: I. Gas exchange, biomass, and leaf chemistry. **Crop Sci.**, v. 47, p. 1475 – 1487, 2007.

BORDIGNON, L. **Efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da elevação da temperatura em plantas e suas interações biológicas**. 2016. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: 2009.

BRITTON, G. Carotenoids. In: **Natural foods colorants**, Hendry, G.F., Blackie, New York, p.141-148, 1992.

BROBERG, M.C.; HÖGY, P.; PLEIJEL, H. **CO₂-Induced Changes in Wheat Grain Composition: Meta-Analysis and Response Functions**. *Agronomy*, v. 7, 32 p., 2017.

BUNCE, J.A., Contrasting responses of seed yield to elevated carbon dioxide under field conditions within *Phaseolus vulgaris*, **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 128, p. 219-224, 2008.

CABANERO, F.J., MARTINEZ, V., CARVAJAL, M. Does calcium determine water uptake under saline conditions in pepper plants, or is it water flux, which determines calcium uptake. **Plant Science**, v.166, p.443-450, 2004.

CAKMAK, I., Identification and correction of widespread zinc deficiency in Turkey-a success story (a NATO-science for stability project), Proceedings—**International Fertiliser Society**, p. 1-26, 2014.

CAKMAK, I.; STRBAC, D.; MARSCHNER, H. Activities of hydrogen peroxide-scavenging enzymes in germination wheat seeds. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, n. 260, p. 127-132, Mar. 1993.

CALIMAN, F.R.B. et al. Enriquecimento intermitente de CO₂ e análise do acúmulo de massa seca e da partição de fotoassimilados em tomateiro. **Acta Agronómica**, v.58, n.3, p.133-139, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v58n3/v58n3a03.pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2020.

CANADELL, J. G.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M. R.; FIELD, C. B.; BUITENHUIS, E. T.; CIAIS, P., Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.** v. 104, p. 18866–18870, 2007.

CARMONA, F. de C. **Salinidade da água e do solo e sua influência sobre o arroz irrigado**. Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo. Porto Alegre, Brasil. 2011. 132p.

CHAPPELLE, E. W.; KIM, M. S. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): na algorithm for a remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B,

and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, p. 239-247, 1992.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS RS/SC. 2004. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Disponível em: < www.sbcs-nrs.org.br/docs/manual_de_adubacao_2004_versao_internet.pdf> Acesso em: 20 agost. 2020.

CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2016) Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 376p. Acesso em: 20 agost. 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A Cultura do Trigo- 2017.** Disponível em:<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_05_03_16_09_46_a_cultura_do_trigo_versao_digital_nova_logo.pdf> Acesso em: 15 de junho de 2020.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Acompanhamento da safra de grãos, Safra 2010/2011.** 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_07_15_11_03_18_boletim_julho_-_2011.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

CONROY, J.; HOCKING, P., Nitrogen nutrition of C3 plants at elevated atmospheric CO2 concentrations. **Physiol. Plant**, v. 89, p. 570-576, 1993.

COUNCE, P.A. et al. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p.436-443, 2000.

Crop Sci., v. 47, p. 1475-1487, 2007.

CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; ASSAD, E. D. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de trigo no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, 1999.

CHAPPELLE, E. W.; KIM, M. S. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): na algorithm for a remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, p. 239-247, 1992.

DRAKE, B. G.; GONZÁLEZ-MELER, M. A.; LONG, S. P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO2? **Annual Reviews on Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 609-639, 1997.

DEL POZO, A.; PÉREZ, P.; GUTIÉRREZ, D.; ALONSO, A.; MORCUENDE, R.; MARTÍNEZ-CARRASCO, R.; Gas exchange acclimation to elevated CO2 in upper-sunlit and lower-shaded canopy leaves in relation to nitrogen acquisition and partitioning in wheat grown in **field chambers**. **Environ. Exp. Bot.** v. 59, p. 371–380, 2007.

DELUCIA, E. H.; SASEK, T. W.; STRAIN, B. R., Inibição fotossintética após exposição a longo prazo a níveis elevados de dióxido de carbono atmosférico., **Photosynth Res.**, v. 7, p. 175–184, 1985.

DELUCIA, E.H. et al. Photosynthetic inhibition after longterm exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide. **Photosynthesis Research**, v.7, n.2, p.175-184, 1985.

DIAS N.S.; BLANCO F.F. Efeito dos sais no solo e na planta. In: GHEYI HR; DIAS NS; LACERDA FC (eds). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal. p. 129-141, 2010.

DIER, M.; SICKORA, J.; ERBS, M.; WEIGEL, H. J.; ZÖRB, C.; MANDERSCHIED, R. Positive effects of free air CO₂ enrichment on N remobilization and post-anthesis N uptake in winter wheat, **Field Crops Research**, v. 234, p. 107-118, 2019.

DUKE, S.O.; KENYON, W.H. Effects of dimethazone (FMC 57020) on chloroplast development II. Pigment synthesis and photosynthetic function in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) primary leaves. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.25, n.1, p.11-18, 1986.

DUNCAN, E. G.; O'SULLIVAN, C. A.; ROPER, M. M.; BIGGS, J. S.; PEOPLES, M. B., Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: Review. **Field Crops Research**, v. 226, p. 56–65, 2018.

ERBS, M.; MANDERSCHIED, R.; JANSEN, G.; SEDDING, S.; PACHOLSKI, A.; WEIGEL, H. J., Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on grain quality parameters and elemental composition of wheat and barley grown in a crop rotation. **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 136, p. 59-68, 2010.

FALLAJ, H.; SCOFIELD, G. N.; BADGER, M. R.; CHOW, W. S.; FURBANK, R. T.; RUANG, Y. L. Localization of sucrose synthase in developing seed and siliques of *Arabidopsis thaliana* reveals diverse roles for SUS during development. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, p. 3283–3295, 2008.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2012. Disponível em <http://www.fao.org/>. Acesso em: 23 mai. 2020.

FERNANDO, N.; PANOZZO, J.; TAUSZ, M.; NORTON, R. M.; NEUMANN, N.; FITZGERALD, G.J.; SENEWEERA, S., Elevated CO₂ alters grain quality of two bread wheat cultivars grown under different environmental conditions. **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 185, p. 24-33, 2014.

FITZGERALD, G.J.; TAUSZ, M.; O'LEARY, G.; MOLLAH, M.R.; TAUSZ-POSCH, S.; SENEWEERA, S.; MOCK, I.; LÖW, M.; PARTINGTON, D.L.; MCNEIL, D.; NORTON, R. M., Elevated atmospheric [CO₂] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. **Glob. Chang. Biol.**, v. 22, p. 2269-2284, 2016.

FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; AIZPURUA, A.; GONZÁLEZ-MORO, M. B.; ESTAVILLO, J. M. Improving wheat breadmaking quality by splitting the n fertilizer rate. **European Journal of Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 52-61, 2010.

GAJU, O.; ALLARD, V.; MARTRE, P.; GOUIS, J. L.; MOREAU, D.; BOGARD, M.; HUBBART, S.; FOULKES, M.J., Nitrogen partitioning and remobilization in relation

to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars, **Field Crops Res.**, v. 155 , p. 213-223, 2014.

GEORGE, K.; NORBY, R. J.; HAMILTON, J. G.; DELUCIA E. H. Respiração de raízes finas em uma floresta de pinus e goma-doce que cresce em CO₂ elevado . **New Phytol.** v.160 , p. 511-522, 2003.

GIANNOPOLITIS, C.N.; RIES, S.K. Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p. 309-314, 1977.

GRIMMER, C., BACHFISCHER, T., AND KOMOR, E., Carbohydrate partitioning into starch in leaves of *Ricinus communis* L. grown under elevated CO₂ is controlled by sucrose. **Plant Cell Environ.** v. 22, p. 1275–1280, 1999.

GUERRA, M.; SOUZA, M.J. de. **Como observar cromossomos** – Um guia de técnicas em citogenética vegetal, animal e humana. Editora FUPEC. Ribeirão Preto. 2002. 131p.

GRAHAM, D.; SMYDZUK, J. Use of Anthrone in the Quantitative Determination of Hexose Phosphates. **Analytical biochemistry**, V.11, p.246-255, 1965.

HANDEL, V. Direct microdetermination sucrose. **Analytical Biochemistry**, v. 22, n. 2, p. 280-283, 1968.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. The water-culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experimental Station**. Circ. n.347, 1938.

HÖGY, P.; FANGMEIER, A., Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. **J. Cereal Sci.**, v. 48, p. 580-591, 2008.

HÖGY, P.; WIESER, H.; KÖHLER, P.; SCHWADORF, K.; BREUER, J.; FRANZARING, J.; MUNTIFERING, R.; FANGMEIER, A., Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from a three-year FACE experimente. **Plant Biol.**, v. 11, n. 1, p. 60-69, 2009.

HOUSHMANDFAR, A.; FITZGERALD, G. J.; MACABUHAY, A. A.; ARMSTRONG, R.; TAUSZ-POSCH, S.; LÖW, M.; TAUSZ, M. Trade-offs between water-use related traits, yield components and mineral nutrition of wheat under Free-Air CO₂ Enrichment (FACE), **European Journal of Agronomy**, v.76, p. 66-74, 2016

IRRI. **The International Rice Research Institute**. Disponível em <http://irri.org/>. 2012. Acesso em: 26 abr. 2017.

KANT, S.; SENEWEERA, S.; RODIN, J.; MATERNE, M.; BURCH, D.; ROTHSTEIN, S. J.; SPANGENBERG, G., Improving yield potential in crops under elevated CO₂: Integrating the photosynthetic and nitrogen utilization efficiencies. **Frontiers in Plant Science**, v. 3, p. 1–9, 2012.

KIM, H.Y. et al. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂. **Plant Soil**, v.342. p.59-71, 2011.

KIMBALL, B.A.; MORRIS, C.F.; PINTER, P.J.; WALL, G.W.; HUNSACKER, D.J.; ADAMSEN, F.J.; LAMORTE, R.L.; LEAVITH, S.W.; THOMPSON, T.L.; MATHIAS, A.D. T; BROOKS, J., Elevated CO₂, drought and soil nitrogen effects wheat quality. **New Phytol.**, v. 150, p. 295-303, 2001.

KRISHNAN, P. et al. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v.122, p.233-242, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788090700045X#>>. Acesso em: 8 jan. 2019.

LANOUE, S.; LEONARDOS, E. D.; KHOSLA, S.; HAO, X.; GRODZINSKI, B., Effect of elevated CO₂ and spectral quality on whole plant gas exchange patterns in tomatoes. **Plos One**, v. 13, n. 10, p. 1-22. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0205861>. Acesso em: 20 jun. 2020.

LARGE, E. C. Growth stages in cereals illustration of the feekes scale. **Plant Pathology**, v. 3, n. 4, p. 128-129, 1954.

LAUCHI, A.; EPSTEIN, E. Mechanism of salt tolerance for plants. **California Agriculture**, Oakland, v.38, n.10, p.12-20. 1984.

LI, X.; JIANG, D.; LIU, F., Dynamics of amino acid carbon and nitrogen and relationship with grain protein in wheat under elevated CO₂ and soil warming. **Environmental and Experimental Botany**, v. 132, p. 121–129, 2016.

LONG, S.P. AINSWORTH, E.A. ROGERS, A. e Ort DR (2004) O aumento do dióxido de carbono atmosférico: as plantas enfrentam o futuro . **Revisão Anual de Biologia Vegetal**. v. 55, p.591 - 628 .

LOOMIS, R.S., CONNOR, D.J. **Crop Ecology: productivity and management in agricultural systems**. Cambridge, University Press, 1992. 538p.

MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E.; ANGHINONI, I.; JUNIOR, S.A.G.; VEZZANI, F.M. **Salinidade na cultura do arroz no Rio Grande do Sul**. Divisão de Pesquisa Estação Experimental do Arroz Equipe de Solos e Águas. Disponível em <www.irga.rs.gov.br>. Acesso em: 27 mar. 2020.

MACHADO, A. de A.; CONCEIÇÃO, A.R. **WinStat: sistema de análise estatística para Windows**. Versão 2.0. Pelotas: UFPel/NIA, 2003.

MACHADO, M.O.; TERRES, A.L. da S. Melhoramento do arroz irrigado na EMBRAPA – CPACT. 9. Tolerância de genótipos à salinidade da água de irrigação, do início da diferenciação da panícula à maturidade safras 1995/96 e 1996/97. **Resumos da XXII Reunião da cultura do arroz irrigado**, Balneário Camboriú, SC, 1997. p. 68-71.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation of seedling emergence and vigour. **Crop Science**. Madison, v.2, n.1, p.176-177, 1962.

MARCOLIN, E.; ANGHINONI, I.; MACEDO, V. M.; GENRO JUNIOR, S. A.; VEZZANI, F. M. **Salinidade da água na cultura do arroz no Rio Grande do Sul**. *Lavoura Arrozeira*, v. 53, p. 27-38, 2005.

MARCOLIN, E.; MACEDO, V.R.M.; GENRO JUNIOR, S.A.; SOUZA, C.H.L. . Volume e eficiência de uso de água na cultura de arroz irrigado em função do estágio fenológico de início de irrigação. In: **VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO**, 2009, Porto Alegre, v. 1, p. 234-237, 2009.

McDONALD, S.; PRENZLER, P.D.; ANTOLOVICH, M.; ROBARDS, K. Phenolics content and antioxidant activity of olive extracts. **Food Chemistry**, v. 73, p. 73-84, 2001.

MCGRATH, J. M.; AND D. B. LOBELL. Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to the nutrient decline of crops grown in elevated CO₂ concentrations. **Plant, Cell & Environment**, v. 36, n. 3, p. 697–705, 2013.

MEDLYN, B. E.; BARTON, C. V. M.; BROADMEADOW, M. S.J. Condutância estomática de espécies florestais após exposição prolongada a concentrações elevadas de CO₂ : uma síntese. **New Phytologist**. v. 149, p. 247 – 264, 2001.

MIZOKAMI, Y.; SUGIURA, D.; WATANABE, C. K.; BETSUYAKU, E.; INADA, N.; TERASHIMA, I., Elevadas alterações provocadas por CO₂ na condutividade mesofílica e nas características anatômicas em mutantes de tipo selvagem e metabolismo de carboidratos de *Arabidopsis*, **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 18, p. 4807–4818, 2019. <<https://doi.org/10.1093/jxb/erz208>>. Acesso em: 20 agost. 2020.

MAO, L.Z., LU, H.F., WANG, Q., CAI, M.M. Comparative photosynthesis characteristics of *Calycanthus chinensis* and *Chimonanthus praecox*. **Photosynthetica**, v. 45, n. 4, p. 601-605, 2007.

MUNNS R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant Cell Environment**, v. 25, p. 239-250, 2002.

MYERS, S. S.; ZANOBETTI, I.; KLOOG, P.; HUYBERS, A. D. B.; LEAKEY, A. J.; BLOOM, E.; CARLISLE, L. H.; DIETTERICH, G.; FITZGERALD, T.; HASEGAWA, N. HOLBROOK, M., Increasing CO₂ threatens human nutrition. **Nature**, v. 510, p. 139–42, 2014. doi: 10.1038/nature13179.

NAKANDALAGE, N.; SENEWEERA, S., Micronutrients use crop efficiency under changing climatic conditions. In: Hossain MA, Kamiya T, Burritt DJ, Phan Tran LS, Fujiwara T (eds) Eficiência de uso de micronutrientes da planta. **Imprensa acadêmica.**, v. 12, 2018.

NAKANO, Y.; ASADA, K. hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

NAVARRO, J.M., GARRIDO, C., MARTINEZ, V., CARVAJAL, M. Water relations and xylem transport of nutrients in pepper plants grown under two different salts stress regimes. **Plant Growth Regulators**, v. 41, p. 237–245, 2003.

NUTTALL, J.G.; O'LEARY, G. J.; PANOZZO, J. F.; WALKEA, C. K.; BARLOW, K. M.; FITZGERALD, G. J., Modelsofgrain quality in wheat— Areview. **FieldCrops Research**, 2017.

ORTOLANI, A. C, TARIFA, J. R. **Recursos hídricos e agricultura no Brasil. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.** São Paulo: EDISER, p.75-83, 1978.

PAL, M.; CHATURVEDI, A.K.; PANDEY, S.K., Subindo atmosférica CO₂ pode afetar a qualidade do óleo e o rendimento de sementes de girassol (*Helianthus annus* L.). **Acta Physiol Plant**, v. 36, p. 2853–2861, 2014.

PAL, M.; TALWAR, S.; DESHMUKH, P. S.; VISHWANATHAN, C.; KHETARPAL, S.; KUMAR, P.; LUTHERIA, D., Growth and yield of chickpea genotypes under elevated carbon dioxide concentration. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 13, p. 367–374, 2008.

PANOZZO, J.F. C.K. WALKER, D.L. PARTINGTON, N.C. NEUMANN, M. TAUSZ, S. SENEWEERA, G.J. FITZGERALD, Elevated carbon dioxide changes grain protein concentration and composition and compromises baking quality. A FACE study, **Journal of Cereal Science**, v 60, p. 461-470, 2014.

POMERANZ, Y., **Ciência e Tecnologia Moderna de Cereais**, VCH Publishers , Nova York, p. 258 – 333, 1987.

PORTEAUS, F.; HILL, J.; BALL, A. S.; PINTER, P. J.; KIMBALL, B. A.; WALL, G. W.; ADAMSEN, F. J.; HUNSAKER, D. J.; LAMORTE, R. L.; LEAVITT, S. W.; THOMPSON, T. L.; MATTHIAS, A. D.; BROOKS, T. J.; MORRIS, C. F). Effect of Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE) on the chemical composition and nutritive value of wheat grain and straw. **Animal Feed Science and Technology**, v. 149(3-4), p. 322-332, 2009.

PORRA, R. J.; THOMPSON, W. A.; KRIDEMANN, P. E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophylls standards by atomic absorption spectroscopy. **Biochimic et Biophysica Acta**, v. 975, p. 384-394, 1989.

PLEIJEL, H.; BROBERG, M. C.; , HOGY, P.; UDDLING, J. Nitrogen application is required to realize wheat yield stimulation by elevated CO₂ but will not remove the CO₂-induced reduction in grain protein concentration. **Glob Change Biol.** v. 25, p. 1868-1876.

RAI, P.; CHATURVEDI, A.K.; SHAH, D., Elevated CO₂ enhances carbohydrate assimilation at flowering stage and seed yield in chickpea (*Cicer arietinum*). **Ind J Plant Physiol.** V. 21, p. 114–121, 2016.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba-SP: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RÊGO JÚNIOR, N.O.; FERNANDEZ, L.G.; CASTRO, R.D. de; SILVA, L.C.; GUALBERTO, S.A.; PEREIRA, M.L.A.; SILVA, M.V. da. Compostos bioativos e atividade antioxidante de extratos brutos de espécies vegetais da caatinga. **Brazilian Journal Food Technololy**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 50-57, 2011.

RÊGO, G. M.; POSSAMAI, E. Avaliação dos teores de clorofila no crescimento de mudas de Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*). Embrapa Florestas. **Comunicado Técnico 128**, 4p., 2004.

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000. 117 p. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 48.

SANDMANN, G; BÖGER, P. Comparison of the bleaching activity of Norflurazon and Oxyfluorfen. **Weed Science**, v.31, n.3, p.338-341, 1983.

SOBA, D.; MARIEM, S. B.; FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; MÉNDEZ-ESPINOZA, M.; GILARD, F.; GONZÁLEZ-MURUA, C.; IRIGOYEN J. J.; TCHERKEZ, G.;

SHEWRY, P. R., Wheat, **J. Exp. Bot.**, v. 60, p. 1537-1553, 2009.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: **LIMA, M.A. et al. Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001. p.33-63. Disponível em: <http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00071250.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2020.

SMITH, S. D., STRAIN, B. R. & SHARKEY, T. D. 1987. Effects of CO₂ enrichment on four Great Basin grasses. **Functional Ecology**, 1, 139-143.

SOARES, J.C.; SANTOS, C.S.; CARVALHO, S.M.P., Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: importance and strategies. **Plant Soil**, v. 443, p. 1–26, 2019.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. **Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2007. 161p.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBERO, A.; LOUREIRO, R. S. & BISPO, C. J. C., Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 87-95, 2008.

STRECK, N.A. **Acclimation mechanisms to elevated CO₂ in plants**. **Ciência Rural**, v. 45, n. 9, p. 1564-1571, 2015.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência**

Rural, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v35n3/a41v35n3.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2020. doi:10.1590/S0103-84782005000300041.

SULTANA et al. A short-term study of wheat grain protein response to post-anthesis foliar nitrogen application under elevated CO₂ and supplementary irrigation. *Journal of Cereal Science*, v. 75, p. 135–137, 2017. doi:10.1016/j.jcs.2017.03.031.

STITT, M. Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. ***Plant, Cell and Environment***. v14, p. 741-762, 1991.

SHIMONO, H.; SUZUKI, K.; AOKI, K.; HASEGAWA, T.; OKADA, M. Effect of panicle removal on photosynthetic acclimation under elevated CO₂ in rice. ***Photosynthetica***, v. 48, n. 4, p. 530-536, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. ***Fisiologia vegetal***. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. ***Fisiologia vegetal***. 6. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. 888 p.

TANS, P.; KEELING, R., ***Trends in Atmospheric Carbon Dioxide***. NOAA, 2016.

TAUB, D. R., MILLER, B., AND ALLEN, H. (2008). Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. ***Glob. Change Biol.*** v. 14, p. 565–575.

TAUB, D. R.; WANG, X., Por que as concentrações de nitrogênio nos tecidos das plantas são menores sob CO₂ elevado? Um exame crítico das hipóteses. *J. Integr. Plant Biol.* v. 50, p. 1365-1374, 2008.

TAUB, D., Efeitos do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono nas plantas. ***Nature Education Knowledge***, v.10, n. 3, p. 21, 2010.

TAUB, D.R.; MILLER, B.; ALLEN, H., Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis *Glob. Change Biol.*, v. 14, p. 565-575, 2008.

THANHAUSER, H.; WIESER, P.; KOEHLER, L., Correlation of quality parameters with the baking performance of wheat flours. ***Cereal Chemistry Journal***, v. 91, p. 333 – 341, 2014.

THILAKARATHNE, C.L. S., TAUSZ-POSCH, K. CANE, R.M. NORTON, M. TAUSZ, S. Intraspecific variation in growth and yield response to elevated CO₂ in wheat depends on the differences of leaf mass per unit area. ***Functional Plant Biology***, v. 40, p. 185-194, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/FP12057>. Acesso em: 8 jun. 2020.

THOMPSON, M.; GAMAGE, D.; HIROTSU, N.; MARTIN, A. E.; SENEWEERA, S., Efeitos do dióxido de carbono elevado na fotossíntese e particionamento de carbono: uma perspectiva sobre a detecção de açúcar nas raízes e a interferência hormonal. *Frente. Physiol* . v. 8, p. 578, 2017.

TORELLO, W.A.; RICE, L.A. Effect of NaCl stress and proline and cation accumulation in salt sensitive and tolerant turfgrasses. **Plant and Soil**, The Hague, v.93, p.227-41, 1986.

TRICKER, P.J. et al. Long-term acclimation of leaf production, development, longevity and quality following 3 yr exposure to free-air CO₂ enrichment during canopy closure in *Populus*. **New Phytologist**, v.162, n. 2, p. 413-426, 2004.

TUBIELLO, F.N. et al. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179-189, 2000.

UDDLING, J.; BROBERG, M. C.; FENG, Z.; PLEIJEL, H., Crop quality under rising atmospheric CO₂, **Current Opinion in Plant Biology**, v. 45, p. 262-267, 2018.

USDA – **United States Department of Agriculture. Statistics of grain and feed. 2019.**

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A., Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. **Plant Science**, v.151, p. 59-66, 2000.

VIEIRA, R.D.; CARVALHO, N.M. **Testes de vigor de sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 164 p.

VITALE, J.; ADAM, B.; VITALE, P. Economics of Wheat Breeding Strategies: Focusing on Oklahoma Hard Red Winter Wheat. **Agronomy**, v. 10, 238 p., 2020.

WALL, G. W.; GARCI, R. L.; KIMBALL, B. A.; WECHSUNG, G. Interactive Effects of Elevated Carbon Dioxide and Drought on Wheat. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 2, p. 354-3381, 2006.

WALTER, L. C.; ROSA, H. T. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, v. 45, p. 1564-1571, 2015.

WALKER, C.; ARMSTRONG, R.; PANOZZO, J.; PARTINGTON, D.; FITZGERALD, G., Can nitrogen fertiliser maintain wheat (*Triticum aestivum*) grain protein concentration in an elevated CO₂ environment? **Soil Res.**, v. 55, p. 518-523, 2017.

WAND S. J. E.; MIDGLEY G. F.; JONES M.H.; CURTIS P. S. Respostas de espécies selvagens de gramíneas C₄ e C₃ (Poaceae) à elevada concentração atmosférica de CO₂ : um teste meta-analítico das teorias e percepções atuais. **Global Change Biology**, p. 723 – 741, 1999.

WANG, L.; PEDAS, P.; ERIKSSON, D.; SCHJOERRING, J. K., Elevated atmospheric CO₂ decreases the ammonia compensation point of barley plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, p. 2713–2724, 2013.

WANG, M.; XIE, B.; FU, Y., Effects of different elevated CO₂ concentrations on chlorophyll contents, gas exchange, water use efficiency, and PSII activity on C₃ and C₄ cereal crops in a closed artificial ecosystem. **Photosynth Res**, p. 126, 351–362, 2015.

WIESER, H.; MANDERSCHIED, R.; ERBS, M.; WEIGEL, H.J., Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on the quantitative protein composition of wheat grains J. **Agric. Food Chem.**, v. 56, p. 6531-6535, 2008.

WULLSCHLEGER, S. D.; TSCHAPLINSKI, T. J. E.; NORBY, R. J. Relações hídricas da planta com CO₂ elevado - implicações para ambientes limitados pela água. **Plant, Cell & Environment**. v. 25, p. 319 – 331,2002.

XU, Z. JIANG, Y. JIA, B. ZHOU, G. Elevated-CO₂ Response of Stomata and Its Dependence on Environmental Factors, **Plant Sci**, p. 1-15, 2016.

YANG, L. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, v.98, p. 12-19, 2006.

ZHU, J. K. Plant salt tolerance. **Trends in Plant Science**, v.6, p. 66-71, 2001.

ZISKA, L.H.; BUNCE, J.A.; SHIMONO, H.; GEALY, D.R.; BAKER, J.T.; NEWTON, P.C.D.; REYNOLDS, M.; JAGADISH, K.S.V.; ZHU, C.; HOWDEN, M.; WILSON, L.T., Food security and climate change: on the potential to adapt global crop production by active selection to rising atmospheric carbon dioxide, **Proc. R. Soc. B**, v. 279, p. 4097-4105, 2012.

ZÖRB, C., LUDEWIG, U., HAWKESFORD, M. J., Perspective on Wheat Yield and Quality with Reduced Nitrogen Supply. **Trends in Plant Science**, 2018.

ZHENG, B.; CHEVALLIER, F.; CIAIS, P.; BROQUET, G.; WANG, Y.; LIAN, J.; YUANHONG, Z. Observing carbon dioxide emissions over China's cities and industrial areas with the Orbiting Carbon Observatory-2. **Atmospheric Chemistry and Physics**. v. 20. p. 8501-8510. 2020.

