

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Fabíola Mendes Braga

**CRESCIMENTO DE PLANTAS C3 E C4 EM RESPOSTA A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CO₂
E ARRANJOS COMPETITIVOS**

Montes Claros

2020

Fabíola Mendes Braga

Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂ e arranjos competitivos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Reginaldo Arruda Sampaio

Coorientador: Evander Alves Ferreira

Montes Claros
Dezembro de 2020

Braga, Fabíola Mendes.

B813c
2020

Crescimento de plantas C3 E C4 em resposta a diferentes concentrações de CO2 e arranjos competitivos [manuscrito] / Fabíola Mendes Braga. Montes Claros, 2020.
63 f. : il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Reginaldo Arruda Sampaio

Banca examinadora: Cássia Michele Cabral, José Barbosa dos Santos, Ignácio Aspiazu, Evander Alves Ferreira, Luiz Arnaldo Fernandes, Reginaldo Arruda Sampaio.

Inclui referências: f. 23-26

1. Erva daninha -- Teses. 2. Fotossíntese -- Teses. 3. Cultivo consorciado -- Teses. 4. Dióxido de Carbono -- Teses.. I. Sampaio, Reginaldo Arruda. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 632.51

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 15 dias do mês de dezembro de 2020, às 13:30 horas, sob a Presidência do Professor Reginaldo Arruda Sampaio, D. Sc. (Orientador - ICA/UFMG) e com a participação dos Professores Evander Alves Ferreira, D. Sc. (Coorientador - ICA/UFMG), Luiz Amaldo Fernandes, D. Sc. (ICA/UFMG), Cássia Michele Cabral, D. Sc. (UFVJM), José Barbosa dos Santos, D. Sc. (UFVJM) e Ignácio Aspiazu, D. SC. (Unimontes), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de tese de **Fabiola Mendes Braga**, aluna do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: **"CRESCIMENTO DE PLANTAS C3 E C4 EM RESPOSTA A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CO₂ E ARRANJOS COMPETITIVOS"**, sendo a aluna considerada **APROVADA**. E, para constar, eu, Professor Reginaldo Arruda Sampaio, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 15 de dezembro de 2020.



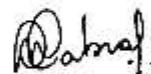
Reginaldo Arruda Sampaio
Orientador



Evander Alves Ferreira
Coorientador



Luiz Amaldo Fernandes
Membro



Cássia Michele Cabral
Membro



José Barbosa dos Santos
Membro



Ignácio Aspiazu
Membro

Dedico a Heitor, meu filho.

AGRADECIMENTOS

Mais uma vitória sendo alcançada e ao meu lado várias pessoas especiais que acompanharam o término de um capítulo da minha história;

Agradeço a Deus, por me permitir mais essa conquista;

À minha família: Fernando e Heitor, que sempre estão ao meu lado, me apóiam e me dão força quando os caminhos se tornam mais difíceis;

Aos meus pais, Haroldo e Dalva por nunca desistirem de mim e não medirem esforços para que eu alcançasse o sucesso;

À minha irmã Patrícia e a Débora, que sempre se fizeram presente com seus conselhos e suas sábias palavras. Apesar de tão distante sempre estiveram por perto;

À Maria Stêfany, Márcio, colegas do LAARA e professores que contribuíram para a realização do meu trabalho ou de alguma maneira contribuíram para minha formação;

Ao professor Reginaldo, pela paciência, conselhos e orientação não só no decorrer deste trabalho, mas por toda a minha vida acadêmica. Serei eternamente grata!

Ao professor Evander, por contribuir com seus ensinamentos e possibilitar a realização deste trabalho;

Ao apoio financeiro da CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;

À coordenação da pós-graduação pelo apoio e incentivo.

A todos, muito obrigada!

Crescimento de plantas C₃ e C₄ em resposta a diferentes concentrações de CO₂ e arranjos competitivos

RESUMO

Projeções climáticas se baseiam na emissão de gases de efeito estufa e sugerem o aumento na concentração de gás carbônico atmosférico. Plantas com metabolismo C₃ tendem a aumentar sua taxa fotossintética e acumular mais fotoassimilados do que as plantas de metabolismo C₄ quando submetidas a elevadas concentrações de CO₂. Paralelo a esse cenário, a interação com outras espécies pode alterar a produtividade das culturas. Para isso, buscou-se avaliar o desenvolvimento de plantas C₃ e C₄ sob diferentes concentrações de CO₂ ambiente em consórcio com plantas daninhas. Para avaliar as plantas C₄ foram conduzidos no delineamento inteiramente casualizado, dois experimentos em câmaras de crescimento: um com *braquiária decumbens* e um com milho cv. Híbrido Duplo. Para a braquiária foi montado um esquema fatorial 3 x 4, sendo o primeiro fator, três concentrações de CO₂ nas câmaras de crescimento (420; 840 e 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), e o segundo fator, arranjos de plantas em condição de competição (braquiária cultivada isoladamente; braquiária + picão-preto (*Bidens pilosa*); braquiária + milho (cv. Híbrido Duplo) e braquiária + feijão carioca BRS Pérola. Com relação às plantas de milho o esquema fatorial foi de 3 x 3, sendo o primeiro fator, três níveis de CO₂ citados e o segundo fator, os diferentes arranjos de plantas em competição com plantas daninhas (milho cultivado isoladamente milho + picão-preto e milho + *braquiária decumbens*). Para avaliar as plantas C₃, foram conduzidos em DIC, dois experimentos: um com picão-preto e um com feijão. Para o picão-preto foi montado um esquema fatorial 3 x 4, sendo o primeiro fator, três concentrações de CO₂ nas câmaras de crescimento (420; 840 e 1.680 μmol^{-1}), e o segundo fator, os arranjos de plantas em condição de competição (picão-preto cultivado isoladamente, picão-preto + *Braquiária decumbens*, picão-preto + milho (cv Híbrido Duplo) e picão-preto + feijão (carioca BRS Pérola). Já com relação à avaliação das plantas de feijão o esquema fatorial foi de 3 x 3, sendo o primeiro fator representado pelos três níveis de CO₂ citados e o segundo fator, os diferentes arranjos de plantas em competição com plantas daninhas (feijoeiro cultivado isoladamente (carioca BRS Pérola), feijoeiro + picão-preto e feijoeiro + *Braquiária decumbens*. Para todos os experimentos, foram avaliados a eficiência fotoquímica do fotossistema II, a razão entre a a fluorescência variável e fluorescência máxima, os teores de clorofila e a fluorescência de clorofila. Aos 50 dias após a emergência das plantas foi medida a estatura e contado o número de folhas, a matéria seca das raízes, a matéria seca do colmo, a matéria seca das folhas e a matéria seca total. Os dados foram submetidos ao programa estatístico Sisvar para análise de variância e comparação das médias pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. De maneira geral, o incremento do gás favoreceu o desenvolvimento das espécies por meio da fertilização por CO₂, aumentando a estatura, o número de folhas, o teor de clorofila total e a massa seca das culturas, porém, a limitação na interação com as espécies competidoras está diretamente relacionada à espécie avaliada.

Palavras-chave: planta daninha; fotossíntese; interação de plantas; aumento de CO₂.

Growth of C3 and C4 plants in response to different CO₂ concentrations and competitive arrangements

ABSTRACT

Climate projections are based on the emission of greenhouse gases and suggest an increase in the concentration of atmospheric carbon dioxide. Plants with C3 metabolism tend to increase their photosynthetic rate and accumulate more photoassimilates than plants with C4 metabolism when subjected to high concentrations of CO₂. Parallel to this scenario, the interaction with other species can alter the productivity of the crops. For this, it sought to evaluate the development of C3 and C4 plants under different concentrations of ambient CO₂ in consortium with weeds. To evaluate the C4 plants, two experiments in growth chambers were conducted in a completely randomized design: one with brachiaria decumbens and one with corn cv. Double Hybrid. For brachiaria, a 3 x 4 factorial scheme was set up, the first factor being three concentrations of CO₂ in the growth chambers (420; 840 and 1680 µmol mol⁻¹), and the second factor, plant arrangements under competition conditions (brachiaria cultivated in isolation; brachiaria + black picão (*Bidens pilosa*); brachiaria + corn (cv. Double Hybrid) and brachiaria + Rio beans BRS Perola. With regard to corn plants, the factorial scheme was 3 x 3, being the first factor, three levels of CO₂ mentioned and the second factor, the different arrangements of plants in competition with weeds (maize cultivated separately maize + black pepper and maize + brachiaria decumbens). To evaluate the C3 plants, two experiments were carried out in DIC: one with black pepper and one with beans. A 3 x 4 factorial scheme was set up for the black prick, the first factor being three concentrations of CO₂ in the growth chambers (420; 840 and 1,680 µmol⁻¹), and the second factor, the plant arrangements in competition (black picão cultivated in isolation, black picão + Brachiaria decumbens, black picão + corn (cv. Hybrid Double) and black pic + bean (carioca BRS Perola). Regarding the evaluation of bean plants, the factorial scheme was 3 x 3, with the first factor represented by the three levels of CO₂ mentioned and the second factor, the different arrangements of plants in competition with weeds (beans cultivated alone (carioca BRS Perola), beans + picão-preto and feijoeiro + Brachiaria decumbens. For all experiments, the photochemical efficiency of photosystem II, the ratio between variable fluorescence and maximum fluorescence, chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence were evaluated. At 50 days after the emergence of the plants, height was measured and the number of leaves, the dry matter of the roots, the dry matter of the stem, the dry matter of the leaves and the total dry matter were counted. The data were submitted to the Sisvar statistical program for analysis of variance and comparison of means by the Tukey test at 5% probability of error. In general, the increase in gas favored the development of the species through CO₂ fertilization, increasing the height, the number of leaves, the total chlorophyll content and the dry mass of the crops, however, the limitation in the interaction with the species competing species is directly related to the species evaluated.

Keywords: weed plant; photosynthesis; plant interaction; increase in CO₂.

LISTA DE TABELAS

5.1 Artigo 1 – Crescimento de braquiária e milho submetidos a diferentes concentrações de CO₂ e arranjos competitivos 27

Tabela 1. Estatura de plantas (EST), número de folhas (NF), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) de brachiária em competição com culturas e picão-preto 33

Tabela 2. Massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do caule (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) de plantas de brachiária em competição com culturas e picão-preto..... 36

Tabela 3. Estatura de plantas (EST), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) de milho em competição com plantas daninhas.... 38

Tabela 4. Massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do colmo (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) de plantas de milho em competição com plantas daninhas..... 40

5.2 Artigo 2 - Crescimento de picão-preto e feijoeiro submetidos a diferentes concentrações de CO₂ e arranjos competitivos 46

Tabela 1. Estatura de plantas (EST), número de folhas (NF), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) de picão-preto em competição com braquiária, milho e feijoeiro 51

Tabela 2. Massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do caule (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) em plantas de picão-preto em competição com braquiária, milho e feijoeiro 54

Tabela 3. Estatura (EST), número de folha (NF), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) de plantas de feijoeiro cultivado em competição com plantas daninhas 57

Tabela 4. Massa da matéria seca das raízes (MSR), Massa da matéria seca do caule (MSC), Massa da matéria seca das folhas (MSF) e Massa da matéria seca total (MST) de plantas de feijoeiro cultivado em competição com plantas daninhas 59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos.....	11
3	Revisão de Literatura	12
3.1	Milho	12
3.2	Feijão	13
3.3	Elevação da Concentração de CO ₂ na atmosfera	14
3.4	Efeito da Concentração de CO ₂ na Produção Agrícola	15
3.5	A resposta do CO ₂ em Plantas C3	18
3.6	A Resposta do CO ₂ em Plantas C4	19
3.7	Efeito do CO ₂ na Infestação de Plantas Daninhas em Áreas Agrícolas	21
4	REFERÊNCIAS	23
5	Artigos	27
5.1	Artigo 1 – Crescimento de braquiária e milho submetidos a diferentes concentrações de CO ₂ e arranjos competitivos.....	27
5.2	artigo 2 - Crescimento de picão-preto e feijoeiro submetidos a diferentes concentrações de CO ₂ e arranjos competitivos.....	46
6	CONCLUSÕES / CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	630

1 INTRODUÇÃO

As emissões globais de carbono devem continuar aumentando nos próximos anos, ultrapassando os $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ já atingidos atualmente, caso não haja um plano global para mitigação dos gases gerados principalmente pelo uso de combustíveis fósseis. Os impactos gerados, além de alterar o volume e a distribuição das precipitações pluviométricas, e a concentração de CO_2 , afetam, entre outros, o equilíbrio ecológico e o microclima.

Em busca de se mitigar os impactos causados, algumas estratégias são adotadas de diversas formas e objetivos, entre elas o uso do CO_2 para otimizar a fotossíntese das plantas com o intuito de melhorar a produtividade das culturas.

Sabe-se que, em plantas com metabolismo C3, um dos fatores que limitam a fotossíntese está nas concentrações ofertadas de CO_2 . Dessa forma, plantas que utilizam essa via metabólica tendem a apresentar melhores respostas no seu crescimento quando há incremento do gás no ambiente. Tais observações não são assim tão evidentes em plantas com metabolismo C4, que são consideradas mais evoluídas naturalmente devido a sua anatomia funcional, que é capaz de concentrar maior quantidade de CO_2 em suas células, tornando a fotossíntese um processo mais eficiente. Porém, são encontrados diversos estudos que sugerem maior crescimento de plantas que utilizam tanto o metabolismo C3 quanto o C4 quando submetidas a concentrações de CO_2 mais elevadas que as condições ambientes atuais.

Com uma fotossíntese mais eficiente, a planta consegue acumular mais fotoassimilados e melhorar seu desempenho, o que pode ser evidenciado por meio dos aumentos na produtividade de algumas culturas, independente do seu metabolismo. Tais ganhos em produtividade podem então ser considerados uma consequência positiva do aumento dos níveis de CO_2 atuais. Dessa forma, como as projeções futuras para este gás tendem a permanecer em ascensão, o estudo do comportamento de algumas espécies se torna viável para avaliar seu desempenho sob novas condições ambientes.

Com a avaliação do comportamento de algumas espécies ao novo cenário que irão enfrentar, tornará mais fácil a tomada de decisões para as possíveis intervenções que visem o melhor desempenho da cultura com menores gastos. O aumento do CO_2 ambiente é uma consequência das ações provenientes da vida moderna e que dificilmente será contornada, o que nos dá como opção, estudar seus impactos de maneira a tirar proveitos da melhor forma possível, já que seus prejuízos são amplamente conhecidos e de difícil reversão.

Com o aumento deste gás no ambiente e a comprovação da fertilização por CO_2 sendo evidenciada, algumas estratégias direcionadas ao aumento da produtividade de algumas espécies pode fazer com que haja melhores resultados no desempenho das culturas com menores custos, já que o gás será ofertado em maior quantidade.

Dessa forma, novas tecnologias poderão ser testadas de forma a direcionar as concentrações já conhecidas do ambiente aos comportamentos esperados para determinada cultura, melhorando o seu desempenho com menores gastos, sugerindo que a elevação do CO_2 pode apresentar como um efeito mitigador por meio da manutenção ou acúmulo de fotoassimilados pelas plantas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o crescimento de plantas de espécies C3 e C4 submetidas a diferentes concentrações de CO₂ ambiente e em diferentes arranjos de competição.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o crescimento de plantas de braquiária e de milho em diferentes concentrações de CO₂ ambiente;
- Avaliar o crescimento de plantas de braquiária e de milho em condições de competição em diferentes concentrações de CO₂ ambiente;
- Avaliar o crescimento de plantas de picão-preto e de feijão em diferentes concentrações de CO₂ ambiente;
- Avaliar o crescimento de plantas de picão-preto e de feijão em condições de competição em diferentes concentrações de CO₂ ambiente.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Milho

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família Gramineae/Poaceae, sendo uma planta anual, robusta e ereta, variando de um a quatro metros de altura. Sua domesticação e seleção natural a tornou aprimorada para a produção de grãos e é considerada uma das plantas mais eficientes no armazenamento de energia. A sua semente possui massa aproximada de 300 mg e, com um prazo de aproximadamente nove semanas, a planta já consegue atingir dois metros de altura, dada a eficiência de seu metabolismo (MAGALHÃES *et al.*, 2002).

Dentre os diversos mecanismos desenvolvidos por essa espécie para melhorar a sua resistência à seca, podemos considerar o seu sistema radicular extenso, ou maior relação raiz/parte aérea, pequeno tamanho das células, presença de cutícula foliar mais espessa e mais cerosa, mudança no ângulo foliar, ajuste osmótico, entre outros (MAGALHÃES *et al.*, 2002).

Originário da América do Sul, o milho é um importante cereal na produção brasileira de grãos, com elevado potencial produtivo comprovado pelos extensos trabalhos desenvolvidos na área de melhoramento genético. É o terceiro cereal mais produzido no mundo, ficando atrás apenas do trigo e arroz, e junto com a soja é o principal cereal produzido no Brasil, correspondendo a 90% da produção nacional. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de grãos da safra 2019/20 dirige-se para o recorde de 253,7 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

Estudos têm comprovado altas produtividades devido ao aumento da área foliar, alterações na relação fitomassa e órgãos reprodutivos e por outras alterações morfofisiológicas da planta, assim como o desenvolvimento de métodos que regulam e aumentam a eficiência da energia solar utilizada na fotossíntese. Porém, fatores como a abertura estomática e a condutância de CO₂ no interior das células do mesófilo, idade, localização das folhas, deficiência hídrica, tornam a relação entre a fotossíntese e a produção um tanto complexa (MAGALHÃES *et al.*, 2002).

Aproximadamente 90% da matéria seca do milho é proveniente da fixação de CO₂ pela fotossíntese. Por ser uma planta de metabolismo C₄, ou seja, possui elevada eficiência da utilização da luz solar e CO₂, uma das suas limitações na produtividade pode estar relacionada a quedas na sua produtividade devido à deficiência de luz em períodos críticos ao seu desenvolvimento (MAGALHÃES *et al.*, 2002).

As plantas C₄ podem ser classificadas em três grupos de acordo com a descarboxilação na bainha vascular, e o milho está no grupo que apresenta maior eficiência no uso da radiação solar (entre 64,5 e 69,0 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), enquanto os outros grupos se encaixam em valores na faixa de 52,6 a 60,4 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Este mecanismo é favorecido pela sua anatomia, que possui menor área entre as nervuras e lamela suberizada, que reduz as perdas de CO₂ para o meio externo. Por tais evidências, o milho se torna uma cultura de elevada produtividade e rendimento de grãos em relação a outras espécies (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

A planta que possui o aparato fotossintético do tipo C₄ é aquela em que o mecanismo de concentração de CO₂ da RUBISCO mantém a elevada razão CO₂/O₂ e reduz a fotorrespiração. Esta elevada razão CO₂/O₂ acontece pela alta afinidade da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) pelo CO₂, que por sua vez fixa o dióxido de carbono por meio da formação do ácido oxalacético e leva

este produto de quatro carbonos para as células da bainha do feixe vascular, onde é descarboxilado. O CO_2 então é refixado pela rubisco e eleva a sua concentração no meio fazendo com que a RUBISCO opere no limite da sua taxa máxima de saturação de CO_2 , inibindo sua atividade de oxigenase e eliminando a fotorrespiração (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Devido a este mecanismo, o milho praticamente não satura por radiação solar, já que a concentração de CO_2 provoca a saturação do mesmo no sítio da RUBISCO e não permite a limitação da carboxilação (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

3.2 Feijão

O feijão é uma planta herbácea, de raízes fibrosas, que apresenta caule com aproximadamente 1 metro, estriado e denso. Suas folhas possuem estipulas triangulares a lanceoladas (SNACK *et al.*, 2011).

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) possui a proteína como sua composição principal, e é uma importante fonte utilizada na alimentação humana, sendo amplamente cultivado e consumido na maioria dos países da América Latina e da África, tendo o Brasil como principal país produtor e consumidor mundial (SOUZA *et al.*, 2019).

A produção do feijão é distribuída em três safras. A Companhia Nacional de Abastecimento CONAB estima sua produção semelhante ao consumo, em que, no balanço, a soma das três safras é estimada em 3,126 milhões de toneladas na safra 2020/21.

Apesar do baixo uso de sementes certificadas, são observados vários incentivos ao melhoramento das sementes no nosso país, sendo lançados com frequência novas cultivares mais resistentes às limitantes bióticas e com produtividades mais elevadas, e com diferentes classes comerciais (SOUZA *et al.*, 2019).

Cultivado durante todo o ano e sob diferentes sistemas de cultivo, o feijão possui uma arquitetura de planta ereta e sua precocidade a torna altamente demandada e valorizada pelos produtores (SOUZA *et al.*, 2019).

As características industriais e tecnológicas aceitam grãos com cor e tamanhos uniformes, com peso médio de 100 grãos de 26 g e conteúdo proteico em torno de 23% (MELO *et al.*, 2010).

Uma outra característica importante desta cultura está na fixação do nitrogênio, que é característico da família Fabaceae. As bactérias do gênero *Rhizobium* presentes nos nódulos das raízes fixam o nitrogênio proveniente da atmosfera em troca de carboidratos utilizados em sua sobrevivência. Tal evidência acopla um benefício econômico e ambiental a esta cultura, já que o nitrogênio, uma vez fixado, permanece no solo fazendo com que se reduzam o uso de fertilizantes para as culturas que serão beneficiadas posteriormente. (WILKER *et al.*, 2019).

Em relação ao seu metabolismo, por fazer parte de um grupo C3, o seu processo de fotossíntese é comumente considerado por ter a capacidade de regeneração da RUBISCO como fator limitante. Assim, a taxa de assimilação de CO_2 é controlada por três fatores: 1) a capacidade da ribulose 1-5bifosfato carboxilase/oxigenase consumir ribulose bifosfato (RuBP), 2) capacidade do ciclo de Calvin em regular a regeneração de RuBP, e 3) a capacidade de síntese de amido e sacarose para regenerar fósforo inorgânico para a fotofosforilação (SAGE; KUBIEN, 2007).

O aumento de CO₂ em plantas C3 estimula a assimilação líquida de CO₂ limitada pela rubisco devido ao aumento da disponibilidade de substrato concomitante a supressão da fotorrespiração (VON CAEMMERER, 2000).

3.3 Elevação da Concentração de CO₂ na atmosfera

O último relatório divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC indica a constante evolução global nos níveis de emissão de gases de efeito estufa, em que a concentração de CO₂ na atmosfera atingiu 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. O aumento da temperatura média terrestre no período de 2006 a 2015 foi de 1,53 °C, superando o período de 1850 a 1900, e causando várias alterações, como a mudança nos índices de precipitação, início e fim das épocas de cultivo, redução regional da produção agrícola, redução na disponibilidade de água doce e alteração na biodiversidade (IPCC, 2020).

A medição dos gases atmosféricos que contribui para o efeito estufa confirma que a proporção de CO₂ aumentou em nível global de 280 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ antes da era industrial para 379 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ em 2005. A estimativa atual está em uma emissão de 412,88 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (NOAA, [2020]).

Dentre as estratégias para a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e aumentar a absorção de carbono, está o gerenciamento do uso das terras, que por consequência aumenta o crescimento das plantas, o microclima, o estado dos nutrientes no solo, entre outros, em que foi observado também que o aumento dos níveis de CO₂ promove o crescimento de plantas e a cobertura das plantas lenhosas em pradarias e savanas (IPCC, 2020).

Os elevados níveis de GEEs vêm interferindo nos diversos setores, dentre eles os impactos nas plantas e na produtividade em geral de todos os ecossistemas, pois alteram as propriedades climáticas básicas globais. Os impactos podem chegar a alterar a fisiologia das plantas, a produção e a biomassa, assim como o rendimento das culturas de uma forma geral (WANG *et al.*, 2019).

O último relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) discorre sobre as especulações acerca do aumento previsto para a temperatura terrestre em que, além de alterar o volume e a distribuição das precipitações e concentração de CO₂, afetam o equilíbrio ecológico e faz com que aumentem também os processos de respiração e decomposição, gerando um aumento nas perdas de carbono e nitrogênio para a atmosfera (AMBRIZZI; ARAUJO, 2020).

Acredita-se que o aumento nos níveis de CO₂ é capaz de otimizar a fotossíntese nas folhas e consequentemente o rendimento das culturas (DSLEEN *et al.*, 2015; MACKINDER, 2018; WANG *et al.*, 2018). O processo de fotossíntese é dependente de vários fatores, entre eles a temperatura e a concentração de CO₂ que é ofertada pelo meio em que a planta está inserida. Dessa forma, o CO₂ e outros gases de efeito estufa que estão em constante ascensão estão trazendo como consequência o aumento da temperatura no mundo e desta forma podem elevar também a taxa fotossintética das plantas (RUIZ-VERA, 2013; IPCC, 2020).

De acordo com Bao *et al.* (2018) são sequestrados em média de uma a duas toneladas métricas de CO₂ por árvore em cada 1.000 m² de floresta natural, e para flores e vegetais, aumentando-se a concentração de CO₂ para 1.000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ é possível estimular a taxa de crescimento em até 61% das plantas.

Em um estudo feito por Daud *et al.* (2019) foi observado que plantas de *Terminalia catappa* possuem a capacidade de absorção de 0,511 g de CO₂ por folha por hora, e que a absorção de CO₂ de árvores de *Pterocarpus indicus* podem absorver por volta de 4.642 kg de CO₂ por árvore por hora.

Nesse sentido, o aumento da concentração de CO₂ tende a influenciar tanto a temperatura quanto a taxa fotossintética das plantas. Em um estudo com aumento de CO₂ e temperatura em plantas de soja, Ruiz Vera *et al.* (2013) concluíram que a assimilação líquida fotossintética de carbono foi reduzida quando a temperatura foi elevada, sendo justificado pelo declínio na condutância estomática e intercelular. Logo concluíram que o aumento da temperatura influencia na fotossíntese independente do incremento de CO₂ testado. Dessa maneira, não se deve avaliar apenas os níveis de CO₂ aplicados à cultura, já que temperaturas além da ideal podem prejudicar o funcionamento de algumas enzimas, em especial a RUBISCO.

Porém, existem estudos como os de Long *et al.* (2006) e Ainsworth *et al.* (2008) que apontam que, a resposta positiva das lavouras devido ao aumento da fotossíntese em resposta ao aumento do CO₂, denominada fertilização por CO₂, pode não ser tão eficaz quanto o esperado.

Assim, a análise da produção agrícola entre 1981 e 2002 revelou uma resposta negativa na produção de trigo, milho e cevada devido ao aumento exagerado da temperatura global. Tanto os Estados Unidos quanto a Europa tiveram prejuízos catastróficos na agricultura devido às alterações climáticas e principalmente ao aumento da temperatura em suas lavouras (AINSWORTH; ORT, 2010).

Estudos como os de Bernacchi *et al.* (2006), Oliveira *et al.* (2013), Wang *et al.* (2016), Busch, Sage (2017), Mackinder (2018) e Dorneles *et al.* (2019) relataram sobre o comportamento das plantas em relação ao incremento do CO₂ nas culturas. Tais estudos preveem melhorias na fotossíntese das plantas por meio de engenharia genética, identificando-se estratégias para melhorar o rendimento das culturas aumentando a capacidade fotossintética de CO₂, incluindo alterações nas propriedades cinéticas da rubisco para reduzir a fotorrespiração, ou melhorar a tolerância térmica da rubisco, melhorar a difusão do CO₂ no cloroplasto, e aumentar a eficiência do uso da luz na fotossíntese, aumentando a capacidade de utilização de carbono.

Porém, sabe-se que muitas dessas alternativas terão respostas mais eficientes em determinadas condições ambientais do que em outras, devendo selecionar com critério qual técnica será a melhor a ser utilizada para otimização dos resultados, pois as mudanças climáticas são flutuantes e imprevisíveis em determinados momentos. Deve-se, portanto, ser estudado em particular qual o fator limitante da fotossíntese local para então se escolher a melhor maneira de otimizar o processo fotossintético por meio do incremento de CO₂.

3.4 Efeito da Concentração de CO₂ na Produção Agrícola

Para Hong *et al.* (2018) o aquecimento global vem causando perdas econômicas na China, sendo o setor agrícola o que mais produz CO₂. Prevê-se que o aumento do CO₂ associado ao acúmulo de outros gases de efeito estufa na atmosfera aumente a temperatura terrestre (IPCC, 2020).

Neste sentido, Wang *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2019) afirmam que a mudança climática global acaba sendo uma ameaça em potencial para a segurança alimentar devido ao aumento nas concentrações de CO₂ e nas alterações na temperatura, impactando diretamente às culturas.

Sabe-se que o CO₂ é a molécula primária da fotossíntese em que sua oferta é crucial para desempenho de todo o processo. Logo, se houver um aumento da disponibilidade de CO₂ atmosférico, pode levar a uma alteração na atividade fotossintética causando um efeito de fertilização, já que a fotossíntese é aumentada com o aumento da oferta de CO₂. Porém, toda essa dinâmica é dependente de muitas outras variáveis como água, luz e nutrientes para que ocorra com total eficiência (DONOHUE *et al.*, 2013; DORNELES *et al.*, 2019).

Com o aumento do interesse na captura direta do CO₂ da atmosfera para aproveitar o seu efeito positivo sobre a fotossíntese, alguns trabalhos vêm recomendando o aumento da concentração de CO₂ atmosférico para elevar a produtividade das culturas, podendo também ser utilizado com grande potencial em estufas, desde que operadas de forma adequada (HOUSE *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2014; DORNELES *et al.*, 2019).

A concentração do CO₂ atmosférico aumentou em até 50% nos últimos 50 anos no hemisfério Norte devido às características peculiares do ecossistema, tais como fotossíntese aprimorada, aumento da respiração heterotrófica e o aumento da vegetação lenhosa. Estas alterações observadas na sazonalidade atmosférica demonstram que as mudanças podem ser contabilizadas incorretamente, de forma que o aumento na produtividade agrícola pode ter contribuído muito mais do que se estima (BASTOS *et al.*, 2019).

Vários estudos, como os de Ainsworth; Long (2005) e Ainsworth; Rogers (2007) comprovaram que o aumento do CO₂ estimulou a fotossíntese. Embora se saiba que a rubisco está se adaptando as condições ambientais prevaletentes, com o seu ponto ótimo variando de 20 a 35°C, com taxa fotossintética dependente tanto da temperatura quanto do volume de CO₂ que é oferecido para as plantas (YAMORI *et al.*, 2006; BUSCH; SAGE, 2017; GALMÉS *et al.*, 2019).

Nos estudos de Renato *et al.* (2018), em que se estudou as plantas de milho em situações de temperatura e CO₂ elevados, não foi observado o aumento nem redução da taxa fotossintética e nem da produtividade, porém, um ganho de temperatura de até 2°C apresentou-se favorável para esta cultura. Wang *et al.* (2018) observaram que, a elevação da concentração de CO₂ atmosférico para 500 µmol mol⁻¹ e a temperatura em 2°C, promoveu o aumento da produtividade de grãos de trigo em 11,3% e, para o arroz, de 5,9%. Um fato também observado foi no teor das proteínas, sendo reduzido em 14,9 e 7,0%, respectivamente, levando a uma falsa conclusão de que a elevação do CO₂ pode anular o efeito negativo deste gás na agricultura devido aos ganhos em produtividade para estas culturas.

Wang *et al.* (2016), ao pesquisarem arroz e trigo, observaram que o enriquecimento de CO₂ aumentou a biomassa em 17,6%, já para o rendimento dos grãos, os autores encontraram um aumento de 14,6% para os grãos de arroz e não encontraram diferença significativa para os grãos de trigo. No caso do índice de colheita, o qual avalia a capacidade de uma colheita em transferir o produto fotossintético para o grão, nenhuma alteração significativa foi encontrada para ambos os grãos.

Existem estudos que comprovam que essas alterações climáticas na concentração de CO₂ e na temperatura trazem impactos positivos nos processos fisiológicos das plantas, assim como na produção da biomassa e na produtividade das culturas. Por meio do incremento do CO₂ é possível melhorar a eficiência da fotossíntese nas folhas e o rendimento das culturas como apresentado nos trabalhos de Ainsworth; Rogers (2007), Ruiz-Vera *et al.* (2013); Sleen *et al.*, (2015); Wang *et al.*, (2016) e Wang *et al.* (2019).

Wang *et al.* (2016) relatam aumento significativo da produção de arroz em 8% quando elevado o teor de CO₂ ambiente a 500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, levando a conclusão de que o CO₂ é capaz de melhorar o desempenho fotossintético das plantas.

Também, Bernacchi *et al.* (2007) confirmam o aumento menor que o previsto em experimentos FACE (*Free Air Gas Concentration Enrichment*) de 24% da assimilação fotossintética das folhas de soja quando submetidas a concentrações de CO₂ mais elevadas. Convém destacar que o aumento na taxa fotossintética com concomitante elevação do CO₂, pode ser diminuída por vários fatores, incluindo menor taxa de carboxilação na ribulose 1-5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RUBISCO), redução na cadeia transportadora de elétrons, que é proporcional à taxa de regeneração da RbBP, e redução da condutância estomática, sendo que no campo, dificilmente a fotossíntese alcançará um estado fixo, já que as concentrações ambientes são flutuantes. Assim como os fatores mencionados, os estudos acerca do estresse hídrico e da temperatura devem ser avaliados.

Rogers *et al.* (2004) constataram aumento de 25% da fotossíntese quando plantas de soja foram submetidas a elevadas concentrações de CO₂. Por outro lado, Bernacchi *et al.* (2007) mostraram que a mudança atmosférica na concentração do CO₂, aumentado a 550 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, é capaz de reduzir a condutância estomática sob inúmeras condições, bem como alguns outros parâmetros, como mudanças no microclima do solo, da planta e no dossel, o que pode também interferir diretamente na evapotranspiração e na resposta da condutância estomática das folhas de soja.

Ainsworth; Rogers (2007) confirmam que as plantas absorvem e respondem ao aumento da concentração de CO₂ no ambiente por meio do aumento da fotossíntese e da redução da condutância estomática, fazendo com que todos os outros efeitos nas plantas sejam decorrentes destes dois fatores primordiais.

Os aumentos nas taxas fotossintéticas das plantas são evidentes em ambientes nos quais são controlados por meio de câmaras ou estufas, porém em ambientes abertos, esta resposta pode ser alterada afetando a resposta primária das plantas (AINSWORTH; ROGERS 2007).

Nos estudos feitos por Sanches *et al.* (2017) foi comprovado que o aumento do CO₂ no ambiente interferiu de forma positiva nas relações hídricas, trocas gasosas e no acúmulo de carboidratos em plantas de café arábico. As taxas de fotossíntese líquida foram maiores em plantas cultivadas com aumento do CO₂, independente da disponibilidade hídrica a qual estavam submetidas.

Busch e Sage (2017) concordam que o incremento de CO₂ pode não resultar em aumento da fotossíntese, uma vez que, mesmo havendo a saturação da rubisco com esse gás, a limitação pode se dar não pela quantidade de enzima existente mas sim pela capacidade de sua regeneração. Os autores descrevem alguns fatores que podem indiretamente limitar a fotossíntese, ou seja, não seria o suprimento de CO₂ o fator que aumenta ou reduz a taxa fotossintética, mas sim a recuperação desta enzima.

As reações observadas envolvem diversos processos enzimáticos que gastam energia, no caso a redução do ATP. A capacidade de regeneração da rubisco dentro das condições térmicas ideais está diretamente ligada à incidência de luz saturante, o que reflete na cadeia transportadora de elétrons na folha. A luz saturada sob condições elevadas de CO₂ é controlada pela quantidade de amido e sacarose que, por sua vez, fornece o Pi (fosfato inorgânico) para síntese de ATP. Com suprimento ideal de ATP, as reações ocorrem de forma natural e propiciam condições ambientais favoráveis para um bom

andamento das reações e consequente ganho de biomassa pela fotossíntese. Essas limitações na disponibilidade de energia pelas plantas são observadas com mais intensidade nas plantas cujo metabolismo C3 é predominante (DORNELES *et al.*, 2019).

Outro fator observado por diversos autores na literatura está na aclimação das espécies ao incremento de CO₂. Por muitas vezes, os processos fisiológicos desenvolvem mecanismos de compensação que reduzem ou minimizam os efeitos do CO₂ a longo prazo (DORNELES *et al.*, 2019). Ainsworth, Long (2005) apresentam os processos de aclimação por meio da redução na velocidade máxima aparente de carboxilação. A capacidade de fixação de nitrogênio em leguminosas geralmente melhora a resposta do CO₂ elevado, e a redução na quantidade de enzimas rubisco e de nitrogênio ocorrem simultaneamente à aclimação fotossintética.

Diante das buscas encontradas, Wang *et al.* (2016) afirmam que o enriquecimento de CO₂ simultâneo ao aumento da temperatura, podem compensar ou até reverter o efeito positivo do enriquecimento de CO₂, porém, devido a variabilidade nos dados encontrados ao avaliar por longos períodos, se faz necessário pesquisas mais específicas a fim de se especular as condições de cultivo futuras de acordo com as mudanças climáticas que vêm ocorrendo mundialmente.

Diante do exposto, a resposta de cada planta ao incremento de CO₂ fica condicionado a espécie vegetal, condições ambientais, disponibilidade de água e nutrientes, e ao seu metabolismo fotossintético, em que o aproveitamento máximo acontece em plantas cujo porte arbóreo é maior e em gramíneas C3. Já para os arbustos e culturas C3 e C4 encontramos um aproveitamento intermediário e, por fim, encontramos nenhuma resposta ou até mesmo respostas negativas para gramíneas com metabolismo C4 (AINSWORTH, LONG 2005; AINSWORTH, ROGERS, 2007; XU *et al.*, 2015).

3.5 A resposta do CO₂ em Plantas C3

A assimilação do CO₂ depende do ganho de carbono via rubisco (carboxilação/oxigenação) e a perda de CO₂ pela fotorrespiração e respiração mitocondrial. A rubisco é uma enzima bifuncional, logo a atividade oxigenase/carboxilase aumenta com o seu metabolismo e gera perdas de CO₂ pela fotorrespiração. Dessa forma, o aumento da fotorrespiração e a respiração mitocondrial podem limitar as taxas de assimilação de carbono em plantas C3 a altas temperaturas. No caso das plantas C4, estas se utilizam de um mecanismo compartimentado, capaz de acumular CO₂ em torno da rubisco, restringindo a competição com o O₂ e a fotorrespiração, para superar a limitação à assimilação de CO₂ (GANDIN *et al.*, 2014).

Galmés *et al.* (2016) também discorrem sobre as condições fisiológicas do metabolismo C3 para a fotossíntese, em que as taxas de fixação do CO₂ são limitadas pela carboxilação da rubisco, que por sua vez é limitada por sua capacidade de regeneração (geralmente pela cadeia transportadora de elétrons) ou pela atividade da enzima carboxilase/oxigenase da rubisco. As limitações implicam na incapacidade de catalisar o processo, ou a distinção ineficiente entre CO₂ e O₂. Devido a tal fato, a planta tenta compensar seu mecanismo acumulando grandes quantidades de rubisco e perdendo quantidades significativas de CO₂ e NH₃ que já haviam sido assimilados no processo de fotorrespiração. Uma taxa lenta de catálise e inibição competitiva por O₂ compromete também a eficiência do uso da água e do nitrogênio pela planta.

Ainsworth; Long (2005) corroboram com os achados na literatura quando afirmam que se espera encontrar melhores respostas ao incremento de CO₂ atmosférico em plantas com metabolismo C3 quando comparadas às respostas de plantas com metabolismo C4. A condução do experimento influencia diretamente na resposta a esta captação, uma vez que experimentos em ambientes fechados tendem a apresentar melhores resultados do que aqueles experimentos conduzidos em ambientes abertos. Os autores atribuem a diferença a esta resposta pelo status dos nutrientes e teores de N nas folhas das espécies cultivadas, já que as adubações nitrogenadas ocorrem de formas diferentes nestas duas situações.

Busch e Sage (2017) descrevem a taxa de assimilação líquida de CO₂ em nível foliar por meio empírico e explica os processos concorrentes de carboxilação e oxigenação da rubisco. Para esses autores, a taxa líquida de captação de CO₂ é limitante pela razão entre a carboxilação e a oxigenação da Rubisco no cloroplasto. Se todos os processos estão acontecendo de forma natural, a quantidade desta enzima não será o limitante para a taxa de carboxilação, porém, se a limitação passa a ser a regeneração desta enzima, os ganhos no processo fotossintético passam a ser limitantes. Nas espécies cujo metabolismo C3 é predominante e sob temperaturas mais baixas, observa-se um comportamento típico de que a regeneração da rubisco possui limitação energética pelos processos enzimáticos de redução de energia por meio do fornecimento de NADPH da cadeia de transporte de elétrons na fase luminosa. A luz saturada e com elevadas concentrações de CO₂ é limitada pelo fornecimento de amido e sacarose, que por sua vez liberam o Pi (fosfato inorgânico), que regenera o ATP utilizado nas reações de regeneração da rubisco.

3.6 A Resposta do CO₂ em Plantas C4

De acordo com Leakey (2009) as principais espécies comerciais cujo metabolismo fotossintético se enquadra em C4 são o milho (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench), painço (principalmente *Pennisetum glaucum* [L.] r. Br., *Setaria italica* [L.] P. Beauvois, *Panicum miliaceum* L., *Eleusine coracana* L.) e cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.).

Com as mudanças climáticas que vêm ocorrendo nas últimas décadas, as projeções para as plantas de metabolismo C4 que serão mais influenciadas se encontram na América central e África, onde 50 a 88% de suas terras agricultáveis estão concentradas nessas culturas. Com um ambiente menos favorável, os desafios para a produção dificultam os rendimentos, e ainda aliado aos fatores socioeconômicos locais, dificultam ainda mais a produtividade. Nos países mais pobres, qualquer redução na produtividade destas culturas em decorrência de mudanças climáticas acarreta em consequências negativas significantes para a segurança econômica e alimentar. Além disso, os cenários atuais indicam que a produção de alimentos e biocombustível serão dependentes de culturas C4 no futuro, com uma tendência de que a demanda global pelo milho como suprimento alimentício ultrapasse a de trigo e arroz, se tornando a principal colheita do mundo (LEAKEY, 2009).

As mudanças climáticas previstas para o futuro incluem aumento de CO₂ atmosférico, maiores temperaturas, disponibilidade de água, maior concentração de gás O₃ e incidência alterada de pragas, doenças e polinizadores. Estas mudanças incidem com maiores impactos nas regiões tropicais, cujos efeitos podem ser mais drásticos em plantas dessas regiões (LEAKEY, 2009).

Existe uma forte tendência de que o aumento da concentração de CO₂ é capaz de provocar o aumento nas taxas de fotossíntese e redução da condutância estomática na fisiologia das plantas (MACKINDER, 2018; WANG *et al.*, 2019). O aumento da fotossíntese indica aumento de biomassa e ganho de carbono, enquanto que a redução da condutância estomática acarreta em menores taxas respiratórias e, portanto, menos perdas na umidade do solo, logo redução das perdas por estresse hídrico. Porém, esses comportamentos em plantas de metabolismo C4 ainda estão sendo debatidos na literatura (AINSWORTH, LONG, 2005; AINSWORTH, ROGERS, 2007; LEAKEY, 2009).

A alta variabilidade encontrada na literatura com relação a resposta da fotossíntese ao incremento do CO₂ pode estar ligada a diversos fatores como a taxa máxima de carboxilação da RUBISCO e o transporte de elétrons, além de serem também levados em conta a temperatura e condição de crescimento das plantas e as estimativas corretas de condutância estomática e em especial a variação de cada espécie estudada (BUSCH, SAGE, 2016; MACKINDER, 2018).

A explicação fisiológica para justificar o aumento da fotossíntese em plantas C4 se apoia em uma base bioquímica de que aumentando os níveis de CO₂ em torno da RUBISCO, gera o aumento imediato da carboxilação que captura o CO₂ e inibe competição com a oxigenação realizada por esta enzima, que por sua vez acarreta na fotorrespiração e consequente perda de carbono (AINSWORTH, LONG, 2005; AINSWORTH, ROGERS, 2007; LEAKEY, 2009).

As plantas de metabolismo C4 possuem uma maior afinidade por HCO₃⁻, em que o O₂ não se torna um substrato competitivo. Dessa forma, essas plantas conseguem concentrar o CO₂ em torno da RUBISCO mais de 5 vezes a concentração ambiente nas células especializadas da bainha, saturando a reação de carboxilação e inibindo a fotorrespiração. Assim, o incremento de CO₂ ambiente não resultaria em aumentos da taxa fotossintética se tais aumentos forem capazes de alterar bioquimicamente ou fisicamente o interior da folha de maneira a alterar a sensibilidade da folha à resposta ao CO₂ (LEAKEY, 2009).

Em seus levantamentos, Leakey (2009) avaliou diversos estudos em que ficou comprovado que, com o incremento do CO₂, foi possível observar pouco ou nenhuma melhora da fotossíntese em plantas de sorgo (de 370 para 570 μmol mol⁻¹ de CO₂), grama *Paspalum dilatatum* (de 370 para 475 μmol mol⁻¹ de CO₂) e milho (de 370 para 570 μmol mol⁻¹ de CO₂). Porém, em estudos em que foram observadas respostas positivas na fertilização por CO₂, o autor mencionado justifica pela elevação do CO₂ ser capaz de reduzir as necessidades de água da planta, aliviando seu estresse e, dessa forma, dá-se a falsa impressão de que a elevação na concentração de carbono foi o responsável pela estimulação direta do ganho desse elemento. Dessa forma, os níveis elevados de CO₂ ambiente tendem a ser benéficos em plantas de metabolismo C4 apenas sob condições de estresse hídrico.

Tais resultados corroboram com os encontrados por Ainsworth; Rogers (2007), sendo que Ainsworth; Long (2005) também encontraram em suas buscas por incremento da fotossíntese em elevadas concentrações de CO₂ ao ar livre, aumento em 31% da taxa fotossintética de folhas saturadas por luz e em 28% na assimilação de carbono fotossintético. Já o rendimento quântico máximo aumentou em 12% e a condutância estomática foi reduzida em 20% para 40 espécies em 12 experimentos analisados.

A longo prazo, a redução na condutância estomática pode ser causada por alterações na fisiologia da célula, como na densidade estomática ou na porcentagem das células da epiderme que são protetoras, assim como na abertura dos estômatos (AINSWORTH, ROGERS, 2007).

Árvores e arbustos apresentam menor porcentagem de redução na condutância estomática quando comparadas a gramíneas e culturas herbáceas C3 e C4 (AINSWORTH; ROGERS, 2007). Ainda comparando as espécies C3 e C4, apesar de haver uma tendência a se acreditar que os ganhos em espécies C4 não sejam tão expressivos como em espécies C3, Ainsworth; Long, (2005) em seu levantamento literário, encontraram trabalhos que apresentaram tanto respostas com ganhos significativos para ambas as espécies quanto trabalhos que não apresentaram ganhos em espécies C4 como se esperam alguns autores.

3.7 Efeito do CO₂ na Infestação de Plantas Daninhas em Áreas Agrícolas

Alterações climáticas vêm sendo observadas nos últimos anos, de tal maneira que o Quarto Relatório de Avaliações das Mudanças Climáticas Globais (IPCC AR4) atribui tais mudanças às emissões de gases de efeito estufa, sendo o principal agente causador do aumento da temperatura terrestre e modificador da aptidão climática para as culturas agrícolas (CASTRO *et al.*, 2020).

As projeções no aumento da concentração de CO₂ e de outros gases na atmosfera impactam no desenvolvimento das culturas e nas pragas agrícolas. Todas as pragas tendem a ser afetadas pelo aquecimento global e, associados a alterações no regime pluviométrico, padrão de vento, e a inconstância dos eventos climáticos, podem alterar o padrão de crescimento das plantas, inclusive as plantas daninhas, já que possuem a capacidade de se adaptar às condições ambiente, facilitando seu crescimento e desenvolvimento (PATTERSON, 1995).

Os principais impactos estão relacionados à temperatura e ao aumento dos gases atmosféricos. Estudos acerca da influência da temperatura na germinação e desenvolvimento da planta daninha comprovam que muitas vezes a limitação está relacionada a temperatura da região de origem geográfica da espécie, assim existem espécies que manifestam melhores rendimentos quando submetidas à temperatura constante, outras em alternância de temperatura, outras por um intervalo amplo de temperatura (MONDO *et al.*, 2010). Dessa forma, alterações climáticas a longo prazo como vem sendo observados mundialmente podem alterar os mecanismos de desenvolvimento das plantas daninhas.

Assim como a temperatura, o CO₂ é essencial para o processo fotossintético das plantas. Diversos estudos com culturas diferentes apontam que o incremento de CO₂ causa alterações fisiológicas nas plantas de forma a modificar a assimilação do CO₂ e por consequência altera a taxa fotossintética, absorção e translocação de nutrientes, eficiência no uso da água, expressão gênica, quantidade enzimática, especialmente quando outros recursos como água, luz e nutrientes não são fatores limitantes do processo (SANTOS *et al.*, 2017).

Como o CO₂ pode ser um fator limitante, o incremento do gás no ambiente sugere que as espécies C3 apresentem maior crescimento, devido ao melhor aproveitamento do gás pela enzima rubisco em relação às plantas de metabolismo C4. Logo, espécies com metabolismo C3 tendem a ter melhor desempenho competitivo quando consorciado a uma planta C4 em ambiente com elevado teor de CO₂ (SANTOS *et al.*, 2017). Patterson (1995) acredita que apenas as plantas daninhas responderão

diretamente à concentração crescente de CO₂, fazendo com que as perenes sejam de mais difícil controle, caso estimulem a produção de rizomas e outros órgãos de armazenamento. Assim, as consequências diretas e indiretas do aumento do CO₂ podem afetar o crescimento ou a adaptação das plantas daninhas e das culturas em suas interações competitivas ora em benefício, ora em detrimento de ambas.

4 REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E. A.; LEAKEY A. D. B.; ORT, D. R.; LONG, S. P. FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. **New Phytologist**, v.179, p.5-9, 2008.

AINSWORTH, E. A.; LONG SP. 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 Phytologist**, v.165, p. 351-371, 2005.

AINSWORTH, E. A.; ORT, D. R. How do we improve crop production in a warming world? **Plant Physiology**, v.154, n. 2, p. 526-530, 2010.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell, & Environment**, v. 30, p. 258-270, 2007.

AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. Base científica das Mudanças Climáticas - PBMC. **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**, 2020. v. 1.

BAO, J.; HUALU-WEI; ZHAO J.; Bi, T. Xiaotao. Greenhouses for CO₂ sequestration from atmosphere. **Science Direct**, v. 1, p.183-190, 2018.

BASTOS, A.; PHILIPPE, C.; FRÉDÉRIC, C.; CHRISTIAN, R.; ASHLEY, P. B.; FABIENNE, M.; YI, Y.; MARCOS, F.; PIERRE, F.; JOSEP, P.; SHILONG, L. P.; STEPHEN, S.; WILLIAM, K. S.; XUHUI, W.; ZAICHUN, Z.; VANESSA, H.; ETSUSHI, K.; ATUL, K. J.; SEBASTIAN, L.; DANICA, L.; JULIA, E. M. S. N.; PHILIPPE, P.; BENJAMIN, P.; DAN, Z. Contrasting effects of CO₂ fertilization, land-use change and warming on seasonal amplitude of Northern Hemisphere CO₂ exchange. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.19, p. 12361–12375, 2019.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS; Ascar, 2014. 85p.

BERNACCHI, C. J.; ANDREW, D. B. L.; LINDSEY, E. H.; PATRICK, B. M.; FRANK, G. D.; JUSTIN, M. MCGRATH; KELLY, M. G.; VICTORIA, E. W.; ALISTAIR, R.; STEPHEN, P. L.; DONALD, R. ORT. Hourly and seasonal variation in photosynthesis and stomatal conductance of soybean grown at future CO₂ and ozone concentrations for 3 years under fully open-air field conditions. **Plant, Cell & Environment**, v.29, n.11, p.2077-2090, 2006.

BERNACCHI, C. J.; KIMBALL, B.A.; QUARLES, D.R.; LONG S.P.; ORT D.R. Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. **Plant Physiology**, v.143, n.1, p.134-144, 2007.

BUSCH, F. A.; SAGE, R. F. The sensitivity of photosynthesis to O₂ and CO₂ concentration identifies strong rubisco control above the thermal optimum. **New Phytologist**, v. 213, n. 3, p.1036-1051, 2017.

CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Influência da luz e da temperatura na germinação de cinco espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus*. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 527-533, 2007.

CASTRO, F. S.; XAVIER, A. C.; PIMENTA, L. R.; ELESBON, A.; ALEXANDRE, A. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.5, p. 28410-28427, 2020.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3549-producao-de-graos-sinaliza-recorde-final-de-253-7-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 15 out. 2020.

DAUD, M.; BUSTAM, B. M.; ARFIN, B. A comparative study of carbon dioxide absorption capacity of seven urban Forest plant species of Banda Aceh, Indonesia. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 20, n.11, 2019.

DONOHUE, R. J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T. R.; FARQUAR, G. D. Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid environments. **Geophysical Research Letters**, v. 40, p. 3031–3035, 2013.

DORNELES, K. R.; POSSO, D. A.; REBHANN, I.; DEUNER, S.; PAZDIORA, P. C.; AVILA, L. A.; DALLAGNOL, L. J. Respostas morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo mediados pelo aumento da concentração de CO₂ atmosférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1, p. 1-7, 2019.

GALMÉS, J.; CAPO´BAUC, S.; ÜLO, N.; IGUEZ, C. Potential improvement in crop photosynthesis by exploiting rubisco variability. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 49, p. 60–67, 2019.

GALMÉS, J.; CARMEN, H. C.; LAURI, L.; ÜLO N. A. Compendium of temperature responses of Rubisco kinetic traits: variability among and within photosynthetic groups and impacts on photosynthesis modeling. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n.17, p. 5067–5091, 2016.

GANDIN, A.; KOTEYEVA, N. K.; VOZNESENSKAYA, E. V.; EDWARDS, G. E.; COUSINS, A. B. Temperature response of C₃–C₄ intermediates. **Plant, Cell & Environment**, v. 37, p. 2601-2612, 2014.

HONG, C. Y.; LEE, Y. C.; TSAI, M. C.; TSAI, Y. C. Agricultural Sector Input Technical Coefficients, Demand Changes and CO₂ Emissions after the Financial Crisis: Environmental Input-Output Growth Factor Model Approach. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 8, n. 6, p. 339-345, 2018.

HOUSE, K. Z.; BACLIG, A. C.; RANJAN, M.; VAN, E. A. N.; WILCOX, J.; HERZOG, H. J. Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air. **PNAS**, v.108, p. 20428-20433, 2011.

IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change (2020). Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-1/>. Acesso em: 29 jun. 2020.

LEAKEY, A. D. Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C₄ crops for food and fuel. **Proceedings of the Royal Society**, v. 276, n.1666, p. 2333-2343, 2009.

LONG, S. P.; AINSWORTH, E. A.; LEAKEY, A. D. B.; NÖSBERGER, J.; ORT, D.R. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. **Science**, v. 312, p.1918–1921, 2006.

LONG, S. P.; MARSHALL-COLON, A.; ZHU, X. G. Meeting the global demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. **Cell**, v.16, p. 56-66, 2015.

MACKINDER, L. C. M. The Chlamydomonas CO₂: concentrating mechanism and its potential for engineering photosynthesis in plants. **New Phytologist**, v. 217, n.1, p. 54-61, 2018.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2002. 23 p. (Circular Técnica, n. 22).

MELO, L. C.; PELOSO, M. J. D.; PEREIRA, H. S.; FARIA, L. C.; COSTA, J. G. C.; DIAZ, J. L. C.; RAVA, C. A.; WENDLAND, A.; ABREU, A. F. B. BRS Estilo: common bean cultivar with Carioca grain, upright growth and high yield potential. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 10, n. 4, p. 377-379, 2010.

MONDO, V. H. V.; CARVALHO, S. J. P.; DIAS, A. C. R.; MARCOS FILHO, J. Efeitos da luz e temperatura na germinação de sementes de quatro espécies de plantas daninhas do gênero Digitaria. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 1, p. 131-137, 2010.

NOAA. National Climatic Data Center, State of the Climate. [2020]. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>. Acesso em: 29 jun. 2020.

OLIVEIRA, V. F.; SILVA, E. A.; ZAIDAN, L. B. P.; CARVALHO, M. A. M. Effects of elevated CO₂ concentration and water deficit on fructan metabolism in *Viguiera discolor* Baker. **Plant Biology**, v. 15, p. 471-482, 2013.

- PATTERSON, D. T. Weeds in a changing climate. **Weed Science**, v. 43, p. 685–700, 1995.
- RENATO, N. S.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, J. B. L.; PEREIRA, E. G. Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO₂ elevados. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 4, p. 211-220, 2018.
- ROGERS, A.; ALLEN, D. J.; DAVEY, P. A.; MORGAN, E. A.; AINSWORTH, C. J.; BERNACCHI, G.; CORNIC, O.; DERMODY, F. G.; DEHLEMAN, E. A.; HEATON, J.; MAHONEY, X. G.; ZHU, E. H.; DELUCIA, D. O.; ORT, S. P. LONG. Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown throughout their lifecycle under Free air Carbon Dioxide Enrichment. **Plant, Cell & Environment**, v. 27, p. 449–458, 2004.
- RUIZ-VERA, U. M.; SIEBERS, M.; GRAY, S.B.; DRAG, D. W.; ROSENTHAL, D. M.; KIMBALL, B. A.; ORT, D. R.; BERNACCHI, C. J. Global warming can negate the expected CO₂ stimulation in photosynthesis and productivity for soybean grown in the Midwestern United States. **Plant Physiology**, v. 162, n. 1, p. 410-423, 2013.
- SAGE, R. F.; KUBIEN, D. S. The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. **Plant, Cell & Environment**, v.30, n. 9, p.1086-1106, 2007.
- SANCHES, R. F. E.; CATARINO, I. C. A.; BRAGA, M. R.; SILVA, E. A. Influência da alta concentração atmosférica de CO₂ ($\uparrow[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$) $\times$ disponibilidade hídrica nas relações hídricas, trocas gasosas e acúmulo de carboidratos em *Coffea arabica* L. **Hoehnea**, v. 44, n. 4, p. 635-643, 2017.
- SANTOS, J. I.; CESARIN, A. E.; SALES, C. A. R.; TRIANO, M. B. B.; MARTINS, P. F. R. B.; BRAGA, A. F.; NETO, N. J. A.; BARROSO, A. M.; ALVES, P. L. C. A.; HUAMAN, C. A. M. Increase of atmosphere CO₂ concentration and Its Effects on culture/Weed Interaction. **International Scholarly and Scientific Research & Innovation**, v. 11, n. 6, 2017.
- SLEEN, V. D. P.; GROENENDIJK, P.; VLAM, M.; ANTEN, N.P.R.; BOOM, A.; BONGERS, F.; PONS, T.L.; TERBURG, G.; ZUIDEMA, P. A. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO₂ fertilization but water-use efficiency increased. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 24-28, 2015.
- SNACK, C.; MIOTTO, S. T. S.; GOLDENBERG, R. Phaseolinae (Leguminosae, Papilionoideae, Phaseoleae) no estado do Paraná, Brasil. **Rodriguésia**, v.62, p. 695-716, 2011.
- SOUZA, T. L. P. O. de; MELO, L. C.; PEREIRA, H. S.; FARIA, L. C. de; AGUIAR, M. S. de; CABRERA DIAZ, J. L.; CARVALHO, H. W. L. de; MELO, C. L. P. de; COSTA, A. F. da; MAGALDI, M. C. de S.; COSTA, J. G. C. da; WENDLAND, A.; ABREU, A. de F. B.; PEREIRA FILHO, I. A.; POSSE, S. C. P.; MARTINS, M.; ALBRECHT, J. C.; SOUZA FILHO, B. F. de; ALMEIDA, V. M. de; GUIMARÃES, C. M.; BRAZ, A. J. B. P.; MARANGON, M. A.; TRINDADE, N. L. S. R.; SOUZA, N. P. de; FARIA, J. C. de; DEL PELOSO, M. **BRS FP403**: cultivar de feijão preto com alta produtividade e qualidade de grãos, moderada resistência à murcha de Fusarium e podridões radiculares.. 1. ed. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2019. 6 p. (Comunicado Técnico, 247). ISSN 1678-961X.
- VON CAEMMERER, S. **Biochemical Models of Leaf Photosynthesis**. Collingwood, Austrália: CSIRO, 2000.
- WANG, J.; HASEGAWA, T.; LI, L.; LAM, S. K.; ZHANG, X.; LIU, X.; GENXING, P. Changes in grain protein and amino acids composition of wheat and rice under short term increased [CO₂] and temperature of canopy air in a paddy from East China. **New Phytologist**, v. 222, n. 2, p. 726-734, 2018.
- WANG, J.; LIU, X.; ZHANG, X.; SMITH, P.; Li, L.; FILLEY, T. R.; CHENG, K.; SHEN, M.; HE, Y.; PAN, G. Size and variability of crop productivity both impacted by CO₂ enrichment and warming: a case study of 4 year field experiment in a chinese paddy. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 221, p. 40-49, 2016.
- WANG, T.; HUANG, J.; HE, X.; WU, J.; FANG, M.; CHENG, J. CO₂ Fertilization system integrated with a low-cost direct air capture technology. **Energy procedia**, v. 63, p. 6842-6852, 2014.
- WANG, Y.; YIN, W.; ZENG, J. Global convergence of ADMM in Nonconvex nonsmooth optimization. **Journal of Scientific Computing**, v. 78, p. 29-63, 2019.

WILKER, J. L.; NAVABI, A.; RAJCAN, I.; MARSOLAIS, F.; HILL, B.; TORKAMANEH, D.; PAULS, K. P. Agronomic Performance and Nitrogen Fixation of Heirloom and Conventional Dry Bean Varieties Under Low-Nitrogen Field Conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019.

XU, Z.; JIANG, Y.; ZHOU, G. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 701, 2015.

YAMORI, W.; SUZUKI, K.; NOGUCHI, K.; NAKAI, M.; TERASHIMA, I. Effects os rubisco kinetics and rubisco activation state on the temperature dependence of the photosynthetic rate in spinach leaves from contrasting growth temperatures. **Plant, Cell & Environment**, v. 29, n. 8, p. 1659-1670, 2006.

5 ARTIGOS

5.1 Artigo 1 – Crescimento de braquiária e milho submetidos a diferentes concentrações de CO₂ e arranjos competitivos

Este artigo foi elaborado conforme normas da Revista *Weed Science*

CRESCIMENTO DE BRAQUIÁRIA E MILHO SUBMETIDOS A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CO₂ E ARRANJOS COMPETITIVOS

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do incremento de CO₂ ambiente no crescimento de plantas de braquiária e milho em condição de competição. Foi instalado um experimento no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O efeito na braquiária foi avaliado em fatorial 3 x 4, sendo três concentrações de CO₂ (420, 840 e 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em câmaras de crescimento e quatro arranjos: braquiária cultivada isoladamente; braquiária + picão-preto; braquiária + milho e braquiária + feijoeiro. Para plantas de milho o esquema fatorial foi de 3 x 3, sendo os três níveis de CO₂ em câmara de crescimento mencionados e os diferentes arranjos: milho cultivado isoladamente; milho + picão-preto e milho + braquiária. O incremento de CO₂ influenciou o crescimento das plantas quando cultivadas em concentração igual ou superior a 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Diferentes níveis de CO₂ influenciaram a competição entre as espécies. Na concentração de 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, a braquiária cresceu menos quando competiu com picão-preto. Na concentração de 860 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, a competição com milho e feijão afetou a braquiária. Na maior concentração, observou-se a tendência da braquiária mostrar comportamento similar independentemente do arranjo entre espécies. No experimento do milho, concentrações acima de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ofereceram melhores condições para seu crescimento, independente do arranjo. Para todas as concentrações, a competição com picão-preto não afetou a estatura e o teor de clorofila, porém, na concentração de 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, a competição com picão-preto afetou o crescimento do milho.

Palavras-chave: capacidade competitiva, interferência de plantas, plantas daninhas, fotossíntese.

GROWTH OF BRACHIARIA AND CORN SUBMITTED TO DIFFERENT CONCENTRATIONS OF CO₂ AND COMPETITIVE ARRANGEMENTS

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of the increase of ambient CO₂ on the growth of brachiaria and corn plants under competitive conditions. An experiment was set up in a completely randomized design, with four replications. The effect on the brachiaria was evaluated in a 3 x 4 factorial, with three concentrations of CO₂ (420, 840 and 1,680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) in growth chambers and four arrangements: brachiaria cultivated alone; brachiaria + black prick; brachiaria + corn and brachiaria + bean. For maize plants the factorial scheme was 3 x 3, with the three levels of CO₂ in the growth chamber mentioned and the different arrangements: maize grown alone; corn + picão-preto and corn + brachiaria. The increase in CO₂ influenced the growth of plants when grown at a concentration equal to or greater than 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Different levels of CO₂ influenced the competition between species. At a concentration of 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, brachiaria grew less when it competed with black prick. At the

concentration of 860 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of CO_2 , competition with corn and beans affected the brachiaria. In the highest concentration, the tendency of the brachiaria to show similar behavior was observed regardless of the arrangement between species. In the corn experiment, concentrations above 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ offered better conditions for its growth, regardless of the arrangement. For all concentrations, the competition with black picão did not affect the height and the chlorophyll content, however, in the concentration of 1,680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ of CO_2 , the competition with black picão affected the growth of corn.

Keywords: competitive capacity, plant interference, weeds, photosynthesis.

1 INTRODUÇÃO

O CO_2 é essencial à vida no planeta, visto que é um dos principais compostos para a realização da fotossíntese, processo pelo qual os organismos fotossintetizantes transformam a energia solar em energia química, que por sua vez é distribuída para todos os seres vivos por meio da teia alimentar. Os organismos fotossintetizantes, além de absorverem o carbono encontrado na atmosfera na forma de dióxido de carbono pelo processo de fotossíntese, também liberam dióxido de carbono para a atmosfera mediante o processo de respiração (Taiz et al., 2017).

Quando em alta concentração na atmosfera, o CO_2 tende a favorecer o crescimento e desenvolvimento das plantas, principalmente aquelas de metabolismo C_3 em ambientes de temperaturas mais elevadas, aumentando a sua capacidade competitiva. Todavia, por ser um componente básico da fotossíntese, o aumento da concentração desse composto pode promover alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos de todas as plantas (Dorneles et al., 2019).

O efeito do aumento da concentração atmosférica de CO_2 nas plantas é devido a três processos principais: a modulação da atividade da rubisco; a sensibilidade das células-guarda dos estômatos aos níveis de CO_2 ; e a modulação da respiração mitocondrial. Uma maior proporção de CO_2 na atmosfera tem o potencial de aumentar a atividade fotossintética e diminuir a fotorrespiração pela diminuição da atividade de oxigenase da rubisco. Outros efeitos esperados são a redução da condutância estomática, o aumento da eficiência de uso da água (relação entre as quantidades de CO_2 assimilado e de H_2O perdida) e da proporção C/N (carbono/nitrogênio), e a diminuição da respiração no escuro (Long et al., 2015).

A consequência desses efeitos pode ser um aumento na taxa de crescimento, o que pode não ocorrer caso a planta apresente aclimação fotossintética. Porém, mesmo em casos de aclimação, a taxa de fotossíntese em elevadas concentrações de CO_2 ainda é maior do que nas condições normais. No início, a elevada concentração de CO_2 faz com que haja mais moléculas do gás nos sítios ativos da RUBISCO, aumentando a produção de fotoassimilados e assim reduzindo a fotorrespiração. A autorregulação do organismo fica então limitada à produção de diversas enzimas concomitante a regeneração da RUBISCO, que tende a favorecer a biomassa vegetal ou as cadeias carbonadas sintetizadas são utilizadas em diversas outras rotas do vegetal, tanto estruturais quanto no seu metabolismo, podendo então ser alocados nos sistemas de reserva vegetal (Walter et al., 2015).

A braquiária e o milho são espécies denominadas tipo C4, uma vez que em seu mecanismo fotossintético produz-se como primeiro produto estável uma molécula de quatro carbonos, o ácido oxalacético. Essas plantas possuem anatomia diferenciada nas folhas: a bainha do feixe vascular apresenta-se como uma camada de células bem desenvolvidas, nas quais se encontra a enzima rubisco. Uma segunda enzima carboxilativa, a fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase), é encontrada nas demais células do mesófilo foliar. Essa enzima realiza a carboxilação da molécula de fosfoenolpiruvato (PEP), formando o ácido oxalacético, imediatamente transformado em malato e aspartato. Nos cloroplastos das células da bainha, o aspartato e o malato são descarboxilados em CO₂ e piruvato. O CO₂ resultante é concentrado e utilizado pela Rubisco, suprimindo o processo de fotorrespiração e seguindo o ciclo das pentoses (Taiz et al., 2017).

Estudos sobre competitividade de culturas com plantas daninhas permitem desenvolver estratégias para seu manejo, pois podem definir características que confirmam maior habilidade às culturas. Tal fato deve ocorrer dentro do contexto atual, em que se observa incremento da concentração de CO₂ na atmosfera aliado ao aumento da temperatura, o que pode promover alterações relacionadas à capacidade competitiva de plantas daninhas e culturas, bem como modificações no crescimento, morfologia e fisiologia das plantas (Ziska et al., 2019).

Apesar de cerca da metade das gramíneas do mundo possuir metabolismo fotossintético do tipo C4, como é o caso da braquiária e do milho aqui estudados, poucos experimentos têm testado resposta ao aumento de CO₂ em gramíneas de clima temperado e somente uma pequena parcela utiliza gramíneas tropicais.

Diversos autores esperam que as plantas C4 apresentem pouco ou nenhum crescimento suplementar com retorno fisiológico positivo quando se eleva as concentrações de CO₂, já que os teores atmosféricos já são suficientes para a saturação da fotossíntese e não aumentam a carboxilação com o aumento do CO₂. Porém, estudos como os de Renato et al. (2018) apontam para um incremento de aproximadamente 5% na matéria seca final para a cultura do milho cultivada sob concentrações de CO₂ a 700 µmol mol⁻¹.

Diante do exposto, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito do incremento do nível de CO₂ do ambiente no crescimento de plantas de braquiária e milho em condição de competição.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Condições locais e a condução do experimento

Foram conduzidos de dezembro/2014 a janeiro/2015, por 50 dias em câmara de crescimento na dependência do Departamento Agronomia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, dois experimentos: um com capim braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.) e um com milho (*Zea mays* L. cv. Híbrido Duplo Herculex®).

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para avaliar as plantas de ambos os experimentos. Para a braquiária, foi montado um esquema fatorial 3 x 4, sendo o primeiro fator representado por três concentrações de CO₂ nas câmaras de crescimento (420; 840 e 1.680 µmol mol⁻¹), e o segundo fator representado por arranjos de plantas em condição de competição (braquiária cultivada

isoladamente; braquiária + picão-preto (*Bidens pilosa*); braquiária + milho (cv. Híbrido Duplo Herculex®) e braquiária + feijão carioca BRS Pérola. Já com relação às plantas de milho o esquema fatorial foi de 3 x 3, sendo o primeiro fator representado pelos mesmos três níveis de CO₂ citados e o segundo fator correspondente aos diferentes arranjos de plantas em competição com plantas daninhas (milho cultivado isoladamente milho + picão-preto (*Bidens pilosa*) e milho + *braquiária decumbens*).

Como substrato utilizou-se Latossolo Vermelho-Amarelo previamente corrigido e adubado. De acordo com a análise realizada, o solo apresentou as seguintes características: pH em água = 4,3; Matéria Orgânica (MO) = 2,5 dag kg⁻¹; P = 1,5 mg dm⁻³; K = 40 mg dm⁻³; Al = 0,5 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 1,3 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,2 cmol_c dm⁻³; Capacidade de troca de cations efetiva (t) = 2,1 cmol_c dm⁻³; Capacidade de troca de cations total (T) = 6,39 cmol_c dm⁻³; H+Al = 4,79 cmol_c dm⁻³; SB = 1,6 cmol_c dm⁻³; V = 25%; e teor de argila = 38%. A adubação do solo foi de 20 g de cloreto de potássio, 500 g de superfosfato simples, 50 g de sulfato de amônio e 150 g de calcário dolomítico por m³ de substrato, de acordo com recomendação de Cantarutti et al. (2007) para adubação em vaso.

As espécies foram semeadas em vasos plásticos contendo 2,0 L da mistura pré-elaborada de solo e terra vegetal, corrigido e adubado, com incorporação um mês antes da implantação do experimento. Foram semeadas por vaso, cerca de 10 sementes da planta daninha e 4 da cultura com posterior desbaste e após a emergência das plântulas foi realizado um novo desbaste de acordo com o arranjo desejado.

O efeito do ambiente e as avaliações feitas nas plantas de Brachiária e Milho

As plantas foram mantidas em câmara de crescimento durante toda a fase de experimento, em que temperatura, luminosidade, comprimento do dia, umidade e irrigação foram controladas, sendo temperatura média de 27°C, luminosidade de 750 µmol de luz m⁻² s⁻¹ em um período de 12 horas diárias de luz, umidade relativa de 75% e irrigação duas vezes por dia, mantendo o substrato com 80% da capacidade de campo, medido com tensiômetro digital.

A avaliação dos teores de clorofila e a fluorescência de clorofila das plantas de braquiária e milho foram realizadas aos 40 dias após a emergência das plantas de milho.

A análise da eficiência fotoquímica do fotossistema II das folhas das plantas de milho e braquiária foram realizadas com o uso de um fluorômetro (Mini Pan®, Wals), sendo as pinças do aparelho colocadas no terço médio das folhas com lígula completamente visível das plantas. As medições foram feitas após 30 minutos de adaptação ao escuro, ausência total de luz, com emissão de um pulso de luz saturante de 0,3 s, sob frequência de 0,6 kHz, quando se avaliou também a fluorescência variável (Fv), fluorescência máxima (Fm), a razão entre a fluorescência variável e fluorescência máxima (Fv/Fm). Para a medição dos teores de clorofila foi usado o clorofilômetro (Clorofilog/Falker), em que foram obtidos os teores de clorofila total (CHL – mg m⁻²).

A resposta das concentrações de CO₂ e diferentes arranjos de cultivos na morfologia das plantas

Aos 50 dias após a emergência das plantas foi medida a estatura das plantas (EST – cm) e contado o número de folhas (NF). As plantas de braquiária e milho foram coletadas e divididas em

colmo, folhas e raízes e acondicionadas em sacos de papel e levadas a estufa de circulação forçada de ar e seca a temperatura de 60°C até massa constante. As amostras foram pesadas em balança de precisão para obtenção da massa da matéria seca das raízes (MSR – g), massa da matéria seca do colmo (MSC – g) e massa da matéria seca das folhas (MSF – g). A massa da matéria seca total (MST – g) foi obtida pela soma da massa da matéria seca dos três órgãos das plantas avaliadas.

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao programa estatístico Sisvar para análise de variância e comparação das médias dos tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resposta da estatura, número de folhas, teor de clorofila e relação fluorescência variável/fluorescência máxima (Fv/Fm) nas plantas de braquiária

O aumento da concentração de CO₂ promoveu incremento da estatura (EST) das plantas de braquiária, destacando-se que, do menor nível para o maior nível de CO₂, o acréscimo na EST foi de aproximadamente quatro vezes. Quando as plantas de braquiária se encontravam em competição com o picão-preto, verificou-se que a melhor resposta na EST foi observada no tratamento onde a concentração de CO₂ foi de 840 µmol mol⁻¹ (Tabela 1).

Ao se avaliar o efeito da competição na EST dentro de cada concentração de CO₂, constatou-se que na concentração de 420 µmol mol⁻¹ as plantas de braquiária competindo com picão-preto mostraram menor valor médio desta variável. Na concentração de 840 µmol mol⁻¹ a braquiária cultivada isoladamente e quando em competição com o picão-preto mostrou maior crescimento em EST do que nos demais tratamentos. Já no maior nível de CO₂, verificou-se maiores valores nas plantas de braquiária cultivadas isoladamente e os menores valores nos tratamentos onde a braquiária foi cultivada juntamente com o picão-preto (Tabela 1). Dessa forma, quando se eleva a concentração de CO₂ para além da condição ambiente (acima de 840 µmol mol⁻¹), conclui-se que as plantas de braquiária respondem melhor se estiverem sendo cultivadas isoladamente.

Tabela 1. Estatura de plantas (EST), número de folhas (NF), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) de braquiária em competição com culturas e picão-preto

Arranjos	Estatura de plantas (EST - cm)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	10,15 b A	46,42 a A	39,62 a A
Braquiária + Picão-preto	6,57 c B	45,85 a A	27,80 b B
Braquiária + Feijoeiro	8,55 b A	38,45 a B	35,02 a AB
Braquiária + Milho	9,30 b A	37,00 a B	32,75 a AB
CV (%)	30,50		
Arranjos	Número de folhas (NF)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	10,50 b A	15,50 a A	18,50 a A
Braquiária + Picão-preto	4,75 b B	11,75 a AB	13,50 a AB
Braquiária + Feijoeiro	6,50 b AB	9,00 a B	10,00 a B
Braquiária + Milho	7,00 a AB	7,50 a B	7,75 a B
CV (%)	24,78		
Arranjos	Teor de clorofila total (CHL - mg m ⁻²)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	42,65 b A	47,27 a AB	47,50 a A
Braquiária + Picão-preto	34,40 b B	51,67 a A	48,92 a A
Braquiária + Feijoeiro	34,17 b B	43,62 a B	40,55 a B
Braquiária + Milho	40,02 b A	42,42 b B	46,42 a AB
CV (%)	8,95		
Arranjos	Relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila <i>a</i> (Fv/Fm)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	0,81**	0,81	0,80
Braquiária + Picão-preto	0,77	0,80	0,79
Braquiária + Feijoeiro	0,79	0,78	0,81
Braquiária + Milho	0,78	0,80	0,80
CV (%)	4,34		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

**NS. Não significativo pelo Teste F a 5% de erro.

Busch and Sage (2017) afirmam que em concentrações acima de 400 μmol mol⁻¹ de CO₂ a taxa de recuperação da rubisco é menor do que o seu consumo no processo, fazendo com que a limitação nesse caso passe a ser na capacidade de regeneração da enzima, que envolve vários processos que consomem energia além do ATP. Porém, normalmente esses processos limitantes são encontrados com mais frequência em plantas com metabolismo C₃, justificando os resultados encontrados.

A braquiária cultivada isoladamente, em competição com picão-preto e quando cultivada com o feijoeiro mostrou incremento no NF a partir da concentração de 840 μmol mol⁻¹ de CO₂, entretanto, na

parcela em que competia com o milho, não foi observada diferença entre os tratamentos na medida em que se aumentava a concentração de CO₂ (Tabela 1).

O milho e a braquiária são culturas de metabolismo C₄, logo ambas apresentaram comportamentos semelhantes quando em competição, sugerindo que por esse motivo não apresentaram diferença estatística, diferente do que foi observado nos tratamentos em que a braquiária foi cultivada em competição com uma planta C₃.

Na menor concentração de CO₂ atmosférico (420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), verificaram-se maiores valores de NF na planta de braquiária cultivada na ausência de competição sem, no entanto diferir dos tratamentos braquiária + feijoeiro e braquiária + milho. Dessa forma, assim como se comportou na EST para esta concentração de CO₂, a braquiária cultivada com picão-preto apresentou os piores resultados (Tabela 1).

O picão-preto pode interferir no crescimento de outras culturas por ser considerado uma planta daninha que compete por recursos da produção ou pelas condições do meio fazendo dela uma espécie altamente competitiva, podendo liberar substâncias alelopáticas (Santos and Cury, 2011).

Na concentração intermediária de CO₂ (840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e em maior concentração (1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) as plantas de braquiária obtiveram comportamentos semelhantes, em que foram mais afetadas quando cultivadas juntamente com feijoeiro ou milho (Tabela 1). Dessa forma, o número de folhas (NF) de plantas de braquiária mostrou alteração com a concentração de CO₂ e variou também com a espécie com a qual a planta daninha foi cultivada.

As plantas de braquiária apresentaram incremento no teor de clorofila (CHL) em todos os arranjos testados com o aumento na concentração do CO₂. Na parcela em que a braquiária cresceu com o milho, esse aumento só foi percebido quando atingiu a concentração máxima de 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Tabela 1). Logo, a concentração de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foi fundamental para aumentar os índices de clorofila como aconteceu com os demais arranjos competitivos, sendo necessário uma concentração mais elevada do substrato para atingir melhores resultados, assim como aconteceu com plantas de girassol em um estudo feito por Srinivasarao et al. (2016) ao analisar seu crescimento em 550 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, onde melhores resultados só foram observados ao atingir a concentração máxima de CO₂.

Analisando os arranjos em cada intervalo de concentração de CO₂, quando em 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ verificou-se maiores valores nos tratamentos em que a braquiária cresceu isoladamente e quando se encontrava em competição com o milho, ambas as culturas de metabolismo C₄. Pode-se inferir que a competição com plantas de feijoeiro ou picão-preto afetou de forma negativa o teor de CHL de plantas de braquiária (Tabela 1).

Quando cultivada nas concentrações de 840 e 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, verificou-se maior teor de CHL quando a braquiária foi cultivada isoladamente, diferindo dos tratamentos no qual a braquiária cresceu juntamente com plantas de feijoeiro e milho. (Tabela 1).

A redução do teor de clorofila, ocorrida com o aumento da densidade de plantas infestantes, ocorreu provavelmente em função da concorrência das plantas daninhas com a cultura, especialmente por nitrogênio, que é o elemento mais intensamente solicitado pela maioria das plantas daninhas (Ferreira et al., 2019).

Ao se avaliar a relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) em plantas de braquiária, não foi constatada diferença estatística entre os tratamentos, destacando-se que os valores médios observados para essa variável se mantiveram na faixa de 0,77 a 0,81 (Tabela 1).

O rendimento quântico máximo do PS II (F_v/F_m) pode variar de 0,75 a 0,85 em plantas não submetidas a estresses (Bolhàr-Nordenkampf et al., 1989), sendo a redução desta razão um excelente indicador de efeito fotoinibidor quando as plantas estão submetidas ao estresse químico (Araus and Hogan, 1994). Importante destacar que essa faixa ideal corresponde aos valores inseridos entre 0,75 (limite mínimo) e 0,85 (limite máximo), valores esses indicados nas tabelas observadas, dessa forma, os diferentes arranjos de plantas e concentrações de CO_2 não afetou a integridade do aparato fotossintético de plantas de braquiária conforme observado na tabela 1.

O efeito na massa da matéria seca das raízes, massa da matéria seca do caule, massa da matéria seca das folhas e massa da matéria seca total das plantas de braquiária

A massa da matéria seca das raízes (MSR) de plantas de braquiária apresentou acréscimo com o incremento da concentração de CO_2 para todos os tratamentos, com exceção da parcela onde a braquiária foi cultivada com plantas de picão-preto. Na testemunha, esse aumento foi de aproximadamente 75%, quando considerada a partir da concentração de CO_2 mais baixa ($420 \mu\text{mol mol}^{-1}$) até a mais elevada ($1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$) (Tabela 2).

Para os arranjos em cada intervalo de CO_2 , na menor concentração verificaram-se menores valores médios de MSR nas parcelas onde a braquiária se encontrava em competição com picão-preto e milho, ou seja, a convivência com essas duas espécies reduziu o crescimento radicular das plantas de braquiária nessa concentração de CO_2 , entretanto, nas concentrações de 840 e $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 os maiores valores médios de MSR foram observados apenas nos tratamentos onde a braquiária foi cultivada isoladamente (Tabela 2).

Ao avaliar o aumento da população de braquiária e picão-preto competindo com o milho, Maciel et al. (2020) constataram redução da MSR nas plantas de milho, sendo que a competição que menos afetou a MSR do milho ocorreu quando em competição com braquiária, provavelmente pelo fato de que ambas possuem o mesmo metabolismo, oferecendo às espécies habilidades competitivas similares. Os autores apontaram ainda que quando o milho foi cultivado com o picão-preto, ou quando cultivado com picão-preto e braquiária, a cultura do milho foi afetada mais severamente.

A massa da matéria seca do caule (MSC) de plantas de braquiária mostrou incremento com o aumento do nível de CO_2 em todos os arranjos avaliados (Tabela 2). No entanto, ao se avaliar o efeito do arranjo de plantas na MSC dentro de cada concentração de CO_2 , constatou-se que na menor concentração, os tratamentos onde a braquiária foi cultivada juntamente com o picão-preto e o feijoeiro apresentaram os menores valores médios de MSC. Na concentração intermediária de CO_2 ($840 \mu\text{mol mol}^{-1}$) verificou-se redução da MSC nos tratamentos onde a braquiária foi cultivada em competição com feijoeiro e milho. Já no maior nível de CO_2 não foi observada diferença estatística entre os tratamentos, indicando que independente das plantas de braquiária serem cultivadas isoladamente, ou com outra planta, sua resposta em relação a MSC será a mesma se forem cultivadas a uma concentração de $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (Tabela 2).

Tabela 2. Massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do caule (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) de plantas de braquiária em competição com culturas e picão-preto

Massa da matéria seca das raízes (MSR - g)			
Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)			
Arranjos	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	0,40 b A	0,62 ab A	0,70 a A
Braquiária + Picão-preto	0,30 a B	0,37 a B	0,36 a B
Braquiária + Feijoeiro	0,38 b A	0,47 a AB	0,45 a AB
Braquiária + Milho	0,30 b B	0,43 a AB	0,48 a AB
CV (%)	35,60		
Massa da matéria seca do caule (MSC - g)			
Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)			
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	0,31 b A	0,54 a A	0,52 a A
Braquiária + Picão-preto	0,18 b B	0,55 a A	0,52 a A
Braquiária + Feijoeiro	0,22 b B	0,42 ab B	0,55 a A
Braquiária + Milho	0,32 b A	0,46 a B	0,42 a A
CV (%)	39,30		
Massa da matéria seca das folhas (MSF - g)			
Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)			
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	0,64 a A	0,72 a A	0,78 a A
Braquiária + Picão-preto	0,51 a A	0,49 a A	0,52 a AB
Braquiária + Feijoeiro	0,35 b AB	0,53 a A	0,52 a AB
Braquiária + Milho	0,17 b B	0,58 a A	0,60 a B
CV (%)	27,43		
Massa da matéria seca total (MST - g)			
Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)			
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Braquiária	1,51 b A	1,89 a A	1,92 a A
Braquiária + Picão-preto	1,07 b B	1,05 b B	1,81 a A
Braquiária + Feijoeiro	1,31 b AB	1,35 b AB	1,61 a A
Braquiária + Milho	1,43 b AB	1,04 c B	1,74 a A
CV (%)	23,27		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Srinivasarao et al. (2016) estudaram a relação a parte aérea/raiz, de culturas C3 e C4, e observou que culturas C4 não apresentaram diferença significativa, sob cultivo em CO₂ elevado, indicando que a quantidade de CO₂ não foi suficiente para elevar a fotossíntese, pois a fotossíntese é aumentada em resposta a atividade da carboxilase pelo aumento da disponibilidade de substrato (CO₂) em oposição a oxigenação. Tal fato pode reduzir a fotorrespiração e ainda contribuir para o aumento da biomassa do caule.

Plantas de braquiária cultivadas isoladamente e em competição com picão-preto não apresentaram diferença na massa da matéria seca das folhas (MSF) com o incremento da concentração de CO₂, entretanto, quando cultivada com o feijoeiro e o milho, observou-se aumento dos valores médios de MSF com o incremento da concentração de CO₂ a partir de 840 μmol mol⁻¹ (Tabela 2).

Maciel et al. (2020) em experimento de milho em competição com braquiária e picão-preto, concluíram que os menores valores de massa seca da parte aérea foram observados quando o milho estava em competição com a braquiária em todas as densidades de plantas testadas, porém os valores encontrados foram muito próximos daqueles em que o milho foi cultivado juntamente com braquiária e picão-preto.

Nas concentrações de 420 e 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , verificou-se que as parcelas onde a braquiária cresceu juntamente com milho mostraram os menores valores de MSF, entretanto, no nível intermediário de CO_2 (840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), não foi verificada diferença na MSF dentre os diferentes arranjos de plantas (Tabela 2).

Estudos revelam que plantas que possuem maior crescimento e melhor desenvolvimento de massa radicular tendem a ser mais competitivas, já que possuem maior capacidade em extrair água em maior profundidade. Outro fator que contribui para que as plantas maiores se sobressaiam entre as menores é o fato de possuírem melhor vantagem na captação de luz solar, favorecendo a fotossíntese (Lamego et al., 2013; Manabe, 2015).

A massa da matéria seca total (MST) de plantas de braquiária apresentou acréscimo com o incremento da concentração de CO_2 para todos os tratamentos quando atingiu a concentração de 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Todavia, quando cultivada com o milho, a braquiária apresentou menor valor de MST cultivada a concentração de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (Tabela 2).

Ao avaliar os arranjos em casa concentração, na menor e intermediária (420 e 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , respectivamente), verificou-se um comportamento semelhante para a MST, em que a melhor resposta foi observada quando a braquiária foi cultivada isoladamente. Entretanto, na maior concentração de CO_2 (1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) não foi verificada diferença na MST quando cultivada isoladamente ou com os diferentes arranjos de plantas (Tabela 2).

Nas áreas agrícolas, as plantas daninhas por serem espécies não cultivadas e ocorrerem, em geral, em populações superiores às das plantas cultivadas, são frequentemente rotuladas como mais competitivas (Forte et al., 2017).

Assim, é possível inferir que a capacidade das espécies de plantas daninhas e das culturas em acumular matéria seca, principalmente na fase inicial de desenvolvimento, está diretamente relacionada com a capacidade competitiva destas. Desse modo, o que determina a interação competitiva entre a cultivar e a planta daninha depende da interpretação dos resultados com base no comportamento da variável em questão, podendo ser a produção de massa seca da parte aérea, a área foliar, a estatura, o perfilhamento e o índice de cobertura do solo, dentre outros (Forte et al., 2017).

Interessante destacar que no presente trabalho a concentração de CO_2 influenciou a dinâmica de competição entre as espécies, onde na maior concentração deste gás não foi verificada diferença na MST nas plantas de braquiária cultivadas isoladamente, ou competindo com milho, feijoeiro ou picão-preto (Tabela 2).

Quando se avalia a competição entre plantas prevalecem duas características intrínsecas às culturas, as quais as favorecem de maneira a se sobressaírem em relação às plantas daninhas: a tolerância, que está relacionada à habilidade de manter o seu rendimento nas situações de competição; ou a supressão, que está ligada a capacidade da cultura em afetar o desenvolvimento da planta daninha por sua interferência (Carvalho et al., 2011).

Cury et al. (2012) afirmam que o milho quando está sob competição possui capacidade limitada de acumular nutrientes, reduzindo o seu armazenamento e podendo trazer prejuízos a planta. Porém, os autores não consideram essa redução no acúmulo de nutrientes como um fator de desvantagem competitiva, já que em espécies de plantas daninhas, como *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Brachiaria brizantha*, *Commelina benghalensis*, *Euphorbia heterophylla*, os teores de nutrientes também são drasticamente reduzidos devido à competição.

Resposta da estatura, teor de clorofila e relação fluorescência variável/fluorescência máxima (Fv/Fm) nas plantas de milho

No experimento do milho, verificou-se incremento da EST das plantas com o aumento da concentração de CO₂ em todos os arranjos testados, sendo o milho cultivado com a braquiária o arranjo que apresentou menor desempenho na EST para a concentração de 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Tabela 3).

Tabela 3. Estatura de plantas (EST), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) de milho em competição com plantas daninhas

Arranjos	Estatura de plantas (EST - cm)		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	14,37 b A	26,30 a A	25,27 a A
Milho + Picão-preto	15,05 b A	24,70 a AB	25,87 a A
Milho + Braquiária	13,35 c A	19,45 b B	26,92 a A
CV (%)	15,81		
	Teor de clorofila total (CHL - mg m^{-2})		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	56,11 a A	36,85 b A	38,05 b A
Milho + Picão-preto	48,98 a AB	33,60 b A	38,17 b A
Milho + Braquiária	46,67 a B	30,35 b A	26,30 b B
CV (%)	22,52		
	Relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila <i>a</i> (Fv/Fm)		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	0,75**	0,77	0,79
Milho + Picão-preto	0,76	0,80	0,79
Milho + Braquiária	0,78	0,79	0,77
CV (%)	6,67		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

**NS. Não significativo pelo Teste F a 5% de erro.

Wandscheer et al. (2013) encontraram menores valores de altura das plantas de milho quando em competição com plantas daninhas, indicando redução na sua produtividade relativa. Também, Maciel et al. (2020), ao estudarem a competição entre milho, picão-preto e braquiária, afirmam que a

competição com picão-preto afetou de forma mais intensa a estatura das plantas de milho quando comparada as combinações de competição entre milho + braquiária e milho + picão-preto + braquiária.

Apesar do estímulo médio de ganho de biomassa e assimilação fotossintética serem menor para plantas C4, eles não podem ser considerados insignificantes. Por muito tempo acreditou-se que as plantas C4 não responderiam ao aumento do CO₂ em função do mecanismo de concentração de CO₂ presente nas células da bainha vascular destas espécies, que confere alta eficiência fotossintética às mesmas (Renato et al., 2018).

Renato et al. (2018) atribuem essa observação ao mecanismo de concentração do CO₂ em plantas C4, já que os teores de CO₂ encontrados na atmosfera já são suficientes para a saturação da fotossíntese, logo não aumentará a carboxilação de plantas com este metabolismo. Por outro lado, Morgan et al. (2011) e Marin e Nassif (2013) demonstraram que plantas C4 podem responder significativamente ao aumento de CO₂ e algumas até de forma semelhante a espécies C3.

Nas concentrações de 420 e 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foram observadas diferenças entre os tratamentos para a variável EST nas plantas de milho. Entretanto, no nível de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, foi verificado que no tratamento em que as plantas de milho cresceram juntamente com a braquiária, houve menor valor médio de EST (Tabela 3). Novamente neste trabalho encontramos resultados parecidos em que plantas com mesmo metabolismo, indicam respostas semelhantes ao incremento de CO₂.

Plantas de milho cultivadas em diferentes arranjos mostraram redução nos valores médios de CHL com o incremento da concentração do CO₂ atmosférico no ambiente em todos os tratamentos testados já a partir de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ (Tabela 3).

O teor de clorofila está intimamente relacionado com a capacidade fotossintética da cultura, de maneira que, quando observadas alterações nos teores de clorofila total, pode-se inferir que o aparato fotossintético também foi alterado, logo sua produtividade também foi prejudicada (Kaspary et al., 2014).

Ao se avaliar o efeito do arranjo de plantas dentro de cada nível de CO₂, verificou-se que na concentração mais baixa de CO₂ (420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) os maiores valores médios de CHL foram observados nas plantas de milho crescendo isoladamente. Na concentração de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foi verificada diferença entre os arranjos de plantas, e na concentração de 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ as plantas de milho cultivadas com braquiária apresentaram os piores resultados (Tabela 3).

Em estudo de milho em consórcio com braquiária, Silva et al. (2015) observaram que as plantas de braquiária afetaram os teores de nutrientes das folhas de milho, porém o consórcio foi considerado viável, pois a redução na produtividade, mesmo na maior densidade de plantio, não ultrapassou 8%, podendo ser compensada por maior produção da forrageira. Além disso, Maciel et al. (2020) observaram redução nos teores de CHL quando o milho estava em competição com plantas daninhas, sendo que, nas parcelas em que o milho foi cultivado com picão-preto, houve os piores resultados.

Ao se avaliar a relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) em plantas de milho, não foi observada diferença entre os tratamentos, destacando-se que os valores médios observados para essa variável se mantiveram na faixa entre 0,75 a 0,80, indicando que não houve qualquer tipo de estresse que afetasse o aparato fotossintético quando submetidas aos diferentes arranjos, ou às diferentes concentrações de CO₂ testadas (Tabela 3).

O efeito na massa da matéria seca das raízes, massa da matéria seca do caule, massa da matéria seca das folhas e massa da matéria seca total das plantas de milho

Todos os tratamentos avaliados mostraram incremento da massa da matéria seca das raízes (MSR) com o aumento do nível de CO₂ a partir de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, destacando-se que em todos os arranjos o incremento médio da MSR foi de cerca de 50% da menor concentração de CO₂ para a intermediária (Tabela 4).

Tabela 4. Massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do colmo (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) de plantas de milho em competição com plantas daninhas

Arranjos	Massa da matéria seca das raízes (MSR - g)		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	0,69 b A	1,32 a A	1,40 a A
Milho + Picão-preto	0,68 b A	1,40 a A	1,55 a A
Milho + Braquiária	0,62 b A	1,45 a A	1,50 a A
CV (%)	15,62		
	Massa da matéria seca do colmo (MSC - g)		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	0,25 b A	0,31 b A	0,79 a A
Milho + Picão-preto	0,27 b A	0,28 b A	0,55 a AB
Milho + Braquiária	0,20 b A	0,31 ab A	0,37 a B
CV (%)	35,90		
	Massa da matéria seca das folhas (MSF - g)		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	0,79 c A	1,04 b A	1,31 a A
Milho + Picão-preto	0,50 b B	0,65 b B	1,02 a B
Milho + Braquiária	0,37 b B	0,53 b B	1,08 a B
CV (%)	16,60		
	Massa da matéria seca total (MST - g)		
	Concentração de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Milho	1,74 b A	2,77 ab A	3,22 a A
Milho + Picão-preto	1,46 b B	2,71 a A	2,87 a B
Milho + Braquiária	1,74 b A	2,81 a A	2,91 a B
CV (%)	23,20		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Ao se avaliar o efeito dos arranjos dentro de cada concentração de CO₂, não foi observada diferença entre os tratamentos nos níveis de concentração de CO₂ avaliados, indicando que independente da concentração ou do arranjo testado, as plantas de milho se comportam da mesma forma (Tabela 4).

Em um estudo de milho em competição com plantas de *Eleusine indica*, Wandscheer et al. (2013) observaram que o milho foi prejudicado pela planta daninha, sendo reduzida significativamente a sua produtividade quando exposto a maiores densidades da planta competidora. Esta, por sua vez, manteve sua produtividade sob o efeito competitivo em todas as densidades avaliadas, sem sofrer alterações devido a presença do milho.

Wandscheer et al. (2013) encontraram menores valores de massa seca da parte aérea e maiores valores de massa seca das raízes em plantas de milho que competiam com *Eleusine indica*, sugerindo que a produtividade da planta de milho foi reduzida quando se aumentava a densidade de plantas daninhas, já a planta daninha manteve a sua produtividade. O mesmo resultado foi encontrado para a massa seca total, que é a soma da massa seca das raízes e dos brotos.

Plantas de milho cultivadas em arranjos com picão-preto ou braquiária mostraram incremento nos valores de massa da matéria seca do colmo (MSC) com o aumento da concentração de CO₂, destacando-se que esse incremento foi de três vezes quando o milho cresceu isoladamente da concentração de 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ a 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ (Tabela 4).

Nos levantamentos de Marin and Nassif (2013), ao avaliarem o comportamento da cana de açúcar em cenários futuros, concluiu-se que quando a temperatura é elevada juntamente com o CO₂, as plantas de metabolismo C4 tendem a elevar a sua produtividade devido ao aumento da eficiência do uso da água, que por sua vez aumenta a produção de biomassa e, conseqüentemente, aumenta a superfície de transpiração. Contudo, há considerável redução da condutância estomática e, por conseguinte, da taxa de transpiração.

O incremento de CO₂ ambiente aumenta a sua difusão da atmosfera para o cloroplasto e então logo é percebida uma maior taxa fotossintética para uma mesma condutância estomática. Concomitantemente, tem-se o mesmo déficit de pressão de vapor entre o estômato e a atmosfera, observando-se uma redução na taxa de respiração, reduzindo o fluxo de seiva e aumentando o potencial de água no xilema, melhorando a eficiência do uso da água (Marin and Nassif 2013).

Nos níveis de 420 e 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foi observada diferença da MSC entre os arranjos de plantas, entretanto, na maior concentração de CO₂ verificou-se que o tratamento de milho cultivado em competição com braquiária mostrou menores valores médios de MSC (Tabela 4); e ambas culturas possuem estruturas semelhantes, podendo justificar os resultados. Carvalho et al. (2011) verificaram que, as plantas de milho em competição com algumas plantas daninhas, tiveram o caule e a folha como órgãos que mais sofreram de forma negativa com a competição.

Todas as parcelas cultivadas com o milho mostraram incremento nos valores da massa da matéria seca das folhas (MSF) com o aumento da concentração de CO₂ para 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, sendo o menor valor encontrado na menor concentração de CO₂ (Tabela 4).

Conforme mencionado por Marin and Nassif (2013), o aumento da concentração de CO₂ em plantas C4 melhora as relações hídricas devido a redução da condutividade estomática, promovendo uma redução dos efeitos negativos causados pelo déficit hídrico no crescimento das folhas e aumento da temperatura foliar, estimulando a divisão e expansão celular e o conseqüente acúmulo de biomassa.

Ao se avaliar o efeito dos arranjos de plantas dentro de cada nível de CO₂ verificou-se que em todos os níveis as plantas de milho mostraram maiores valores médios de MSF quando cultivadas isoladamente, diferindo dos demais tratamentos (Tabela 4).

Não houve interação entre os fatores CO_2 e densidade de plantas em um estudo proposto por Santos et al. (2017) em plantas com metabolismo C3 ao testar plantas daninhas e soja. Para os autores, o aproveitamento do substrato pelo aumento da taxa fotossintética em ambiente rico em CO_2 deve ser esperado em plantas C3 devido a inibição pela fotorrespiração, o que não ocorre em plantas C4, já que a enzima rubisco já se encontra em saturação de CO_2 e pela sua fisiologia, existem maior quantidade de enzima rubisco em plantas C3 do que em plantas C4, que são mais eficientes no uso do CO_2 .

Foi verificado incremento da massa da matéria seca total (MST) de plantas de milho com o aumento do nível de CO_2 para os três sistemas de competição avaliados a partir da concentração de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$ (Tabela 4). Estes resultados corroboram com os achados de Renato et al. (2018) em que foi encontrado um pequeno aumento na MST na cultura do milho quando elevada a concentração de CO_2 para $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$, correspondendo a um incremento de 5% na matéria seca final. Mesmo em se tratando de uma cultura de metabolismo C4, constatou-se aumento evidente no crescimento do milho com a elevação da concentração de CO_2 .

Maciel et al. (2020) avaliaram plantas de milho em competição com braquiária e picão-preto em diversos arranjos e encontrou menores valores de MST quando o milho estava em competição com picão-preto, e o tratamento em que a MST do milho foi menos afetado foi aquele em competição com a braquiária.

Os ganhos podem ser justificados pelo fato de que algumas variedades podem não estar completamente saturadas nas concentrações atuais de CO_2 , ou também o aumento da concentração de CO_2 pode induzir a uma redução na condutância estomática, o que leva a redução da transpiração e consequente aproveitamento do uso da água, melhorando o desempenho da cultura. Por fim, ainda há a hipótese de que com a redução da transpiração, a temperatura foliar tende a aumentar e, portanto, aumentar também a fotossíntese de plantas de metabolismo C4.

Entretanto, espera-se que esse incremento no crescimento seja maior em plantas de metabolismo C3, sendo importante destacar que no presente trabalho avaliou-se apenas a concentração de CO_2 e a temperatura foi mantida constante durante a condução do experimento.

O aumento do CO_2 beneficia tanto a planta daninha quanto a cultura econômica, porém, os efeitos são particulares a cada espécie (Maciel et al., 2020). A resposta da planta daninha que recebe o estímulo envolve a elevação nas taxas fotossintéticas semelhante àsquelas observadas em culturas de metabolismo C3, podendo chegar a duas vezes o ganho em relação à cultura cultivada (Marin and Nassif 2013).

Na concentração de $420 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 verificou-se que no tratamento milho + picão-preto as plantas de milho apresentaram redução da MST em relação aos outros arranjos testados. No nível intermediário de CO_2 não foi observada diferença entre os arranjos, já na concentração $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 observou-se que nos tratamentos milho + picão-preto e milho + braquiária as plantas de milho mostraram menores valores de MST (Tabela 4).

Santos et al. (2017) encontraram um aumento de 32% na produção de massa seca da parte aérea em plantas de *Euphorbia heterophylla*, quando aumentada a concentração ambiente de 400 para $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 . Ao contrário do que se esperava, houve redução na produção máxima das culturas de soja e *Amaranthus viridis* (15 e 2,3% respectivamente) com o aumento do CO_2 .

O estímulo à fotossíntese se deve à redução da competição entre o CO_2 e o O_2 atmosféricos para serem fixados pela enzima ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase (RUBISCO). Dessa forma, de modo geral, são observados incrementos no crescimento das plantas, como os observados no presente trabalho.

4 CONCLUSÕES

O incremento da concentração de CO_2 ambiente influencia o crescimento das plantas de braquiária e milho.

Há aumento de estatura, de número de folhas e de clorofila total a partir de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$, independente do arranjo competitivo utilizado.

Na concentração de $420 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 a competição com o picão-preto prejudica o crescimento da braquiária e na concentração de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$, a competição com o milho afeta mais intensamente o crescimento da braquiária.

Na concentração de $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 há tendência das plantas de braquiária terem comportamento similar, independentemente do arranjo no qual a braquiária é cultivada.

A braquiária responde melhor ao incremento de CO_2 quando cultivada isoladamente, quando comparada a condição de competição com outra cultura.

O milho apresenta melhor rendimento quando cultivado isoladamente e em ambiente cujo incremento de CO_2 é superior à $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

Na concentração de $420 \mu\text{mol mol}^{-1}$, a competição com braquiária não limita o crescimento das plantas de milho.

Na concentração de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$, as plantas de milho quando cultivadas em competição se desenvolvem de forma similar ao milho cultivado isoladamente.

Na concentração de $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$, a competição com o picão-preto e a braquiária interferem negativamente no crescimento das plantas de milho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e as bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

Awasthi JP, Paraste KS, Rathore M, Varun M, Jaggi D, Kumar B (2018) Effect of elevated CO_2 on *Vigna radiata* and two weed species: yield, physiology and crop-weed interaction Crop and Pastures Science 69 6: 617-631.

Araus JL, Hogan KP (1994) Comparative Leaf Structure and Patterns of Photoinhibition of The Neotropical Palms *Scheelea zonensis* and *Socratea durissima* Growing in Clearing and Forest Understory During the Dry Season in Panama. *American Journal of Botany* 81 6: 726-38.

Bolh  r-Nordenkamph HR, Long RSP, Baker N R, Oquist G, Schreiber U, Lechner EG (1989) Chlorophyll Fluorescence As a Probe of the Photosynthetic Competence of Leaves in the Field: A Review of Current Instrumentation. *Functional Ecology* 3 4: 497-514.

Busch FA, Sage RF (2017) The Sensitivity of Photosynthesis to O₂ and CO₂ Concentration Identifies Strong Rubisco Control Above the Thermal Optimum. *New Phytol* 213 3: 1036-51.

Cantarutti RB, Barros NF, Martinez HEP, Novais RF (2007) Avalia  o da Fertiliza  o do Solo e Recomenda  o de Fertilizantes. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS. Pp 769-850.

Carvalho FP, Santos JB, Cury JP, Valadão SD, Braga RR, Byrro ECM (2011) Aloca  o de Matéria Seca e Capacidade Competitiva de Cultivares de Milho com Plantas Daninhas. *Planta Daninha* 29: 373-82.

Cury JP, Santos JB, Silva EB, Byrro ECM, Braga RR, Carvalho FP, Valadão Silva D (2012) Acúmulo e Partilha de Nutrientes de Cultivares de Milho em Competi  o com Plantas Daninhas. *Planta Daninha* 30: 287-96.

Dorneles KR, Posso DA, Rebhahn I, Deuner S, Pazdiora PC, Avila L A, Dallagnol LJ (2019) Respostas Morfofisiológicas e Rendimento de Grãos do Trigo mediados pelo Aumento da Concentra  o de CO₂ Atmosférico. *Rev. Bras. Ciênc Agrárias* 14 1: 1981-0997.

Ferreira EA, Paiva MCG, Pereira GAM, Oliveira MC, Silva EB (2019) Fitossociologia de Plantas Daninhas na Cultura do Milho Submetida    Aplica  o de Doses de Nitrogênio. *Rev. Agric. Neotropical* 6 2: 109-16.

Forte CT, Basso FJM, Galon L, Agazzi LR, Nonemacher F, Concen  o C (2017) Habilidade Competitiva de Cultivares de Soja Transgênica Convivendo com Plantas Daninhas. *Rev. Bras. Ciênc Agrárias* 12 2: 185-93.

Heinemann AB, Maia AHN, Dourado-Neto D, Ingman KT, Hoogenboom G (2006) Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Growth and Development Response to CO₂ Enrichment Under Different Temperature Regimes. *European Journal of Agronomy* 24: 52-61.

Kaspary TE, Lamego FP, Peruzzo ST, Pagliarini IB, Rigon CAG (2014) Pigmentos Fotossintéticos em Azevém Suscetível e Resistente ao Herbicida Glyphosate. *Ciênc Rural*, 44 11: 1901-07.

Lamego FP, Ruchel Q, Kaspary TE, Gallon M, Basso CJ, Santi AL (2013) Habilidade Competitiva de Cultivares de Trigo com Plantas Daninhas. *Planta Daninha* 31: 521-31.

Maciel JC, Duque TS, Silva CT, Pereira GAM, Ferreira EA, Santos JB, Silva EB (2020) Crescimento de Milho Cultivado em Comunidade com *Bidens Pilosa* e *Urochloa Brizantha*. *Research Society Development* 9 10: 1-17.

Manabe PMS, Matos CDC, Ferreira E A, da Silva AF, da Silva AA, Sedyama T, da Silva CT (2015) Efeito da Competi  o de Plantas Daninhas na Cultura do Feijoeiro. *Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em per  dico indexado (ALICE)*.

Marin F, Nassif DSP (2013) Mudanças Climáticas e a Cana de Açúcar no Brasil: Fisiologia, Conjuntura e Cenário Futuro. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental* 17 2: 232-39.

Morgan JA, LeCain DR, Pendall E, Blumenthal DM, Kimball BA, Carrillo Y, Williams DG, White JH, Dijkstra FA, West M (2011) C4 Grasses Prosper as Carbon Dioxide Eliminates Desiccation in Warmed Semi-Arid Grassland. *Nature* 476: 202-05.

Renato NS, Sedyama GC, Silva JBL, Pereira EG (2018) Modelo Fotossintético para Simula  o da Produtividade do Milho em Condi  o es de Temperatura e CO₂ Elevados. *Rev. de Ciências Agrárias* 41 4: 211-20.

Santos AE, Cesarin CAR, Sales MBB, Triano PFRB, Martins AF, Braga NJ, Neto AAM, Barroso PLCA, Alves CAM Huaman (2017) Increase of Atmosphere CO₂ Concentration and Its Effects on Culture/Weed Interaction J. I., World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering 11 6: 419-426.

Santos JB, Cury JP (2011) Picão-preto: Uma Planta Daninha Especial em Solos Tropicais. Planta Daninha 29: 1159-72.

Silva DV, Pereira GAM, Freitas MAM, da Silva AA, Sediya T, Silva GS, Ferreira LR, Cecon PR (2015) Produtividade e Teor de Nutrientes do Milho em Consórcio com Braquiária. Ciência Rural 45 8: 1394-400.

Srinivasarao Ch, Kundu S, Shanker AK, Naik RP, VAnaja M, Venkanna K, Sankar GRM, Rao VUM (2016) Continuous cropping under elevated CO₂: Differential effects on C₄ and C₃ crops, soil properties and carbon dynamics in semi-arid alfisols. Agriculture, Ecosystems & Environment 218: 73-86.

Taiz L, Zeiger E, Moller I. (2017) Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed.

Wandscheer ACD, Rizzardi MA, Reichert M (2013) Competitive Ability of Corn in Coexistence With Goosegrass. Planta Daninha 31 2: 281-89.

Walter LC, Rosa HT, Streck NA (2015) Mecanismos de Aclimatacao das Plantas a Elevada Concentracao de CO₂. Cienc Rural 45 9: 1564.

Ziska LH, Blumenthal D, Franks S (2019) Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. Invasive Plant Science and Management 12 2: 79-88.

5.2 Artigo 2 - Crescimento de picão-preto e feijoeiro submetidos a diferentes concentrações de CO₂ e arranjos competitivos

Este artigo foi elaborado conforme normas da Revista Weed Science.

CRESCIMENTO DE *Bidens Pilosa* E FEIJOEIRO SUBMETIDOS A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CO₂ E ARRANJOS COMPETITIVOS

RESUMO

Objetivou-se com esse estudo avaliar o efeito do incremento do nível de CO₂ do ambiente no crescimento de plantas de picão-preto e feijoeiro em condição de competição. Para isso foi conduzido um experimento em DIC com quatro repetições. O efeito do picão-preto foi avaliado em esquema fatorial 3 x 4, sendo três concentrações de CO₂ nas câmaras de crescimento (420; 840 e 1.680 μmol^{-1}), e quatro arranjos: picão-preto cultivado isoladamente, picão-preto + *Braquiária decumbens*, picão-preto + milho e picão-preto + feijoeiro. Para as plantas de feijão o esquema fatorial foi de 3 x 3, sendo os três níveis de CO₂ em câmara de crescimento citados e os diferentes arranjos: feijoeiro cultivado isoladamente, feijoeiro + picão-preto e feijoeiro + *Braquiária decumbens*. Maiores níveis de CO₂ promovem o maior ganho em estatura e massa de matéria seca das raízes, caules e folhas da cultura e da planta daninha. O teor de clorofila total foi maior também nos maiores níveis de CO₂ considerando as duas espécies avaliadas. O aumento da concentração de CO₂ afetou a dinâmica de competição entre as espécies avaliadas. Na menor concentração de CO₂ ambiente o feijoeiro mostrou-se mais competitivo com as plantas de picão-preto em relação às demais espécies avaliadas. Já nas concentrações de 840 e 1680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, tanto o milho quanto o feijoeiro afetaram o crescimento das plantas de picão-preto. Plantas de feijoeiro foram afetadas negativamente pela convivência com as plantas daninhas em todos os níveis de enriquecimento de CO₂ analisados.

Palavras-chave: interferência competitiva, *Bidens pilosa*, *Phaseolus vulgaris*.

GROWTH OF *Biden Pilosa* AND BEAN PLANT SUBMITTED TO DIFFERENT CONCENTRATIONS OF CO₂ AND COMPETITIVE ARRANGEMENTS

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of the increase in the level of CO₂ in the environment on the growth of black pepper and common bean plants under competitive conditions. For this, an experiment was conducted in DIC with four repetitions. The effect of the black prick was evaluated in a 3 x 4 factorial scheme, with three concentrations of CO₂ in the growth chambers (420; 840 and 1,680 μmol^{-1}), and four arrangements: black prick cultivated alone, black prick + *Brachiaria decumbens*, picao-preto + corn and picao-preto + beans. For bean plants, the factorial scheme was 3 x 3, with the three levels of CO₂ in the growth chamber mentioned and the different arrangements: beans cultivated in isolation, beans + picao-preto and beans + *Brachiaria decumbens*. Higher levels of CO₂ promote the greatest gain in height and dry matter mass of the roots, stems and leaves of the crop and the weed. The total chlorophyll content was also higher at the highest levels of CO₂ considering the two species evaluated. The increase in CO₂ concentration affected the competition dynamics between the

species evaluated. In the lowest concentration of ambient CO₂, the bean proved to be more competitive with the black-pea plants in relation to the other species evaluated. In the concentrations of 840 and 1680 µmol mol⁻¹ of CO₂, both corn and beans affected the growth of the black-pea plants. Bean plants were negatively affected by living with weeds at all levels of CO₂ enrichment analyzed.

Keywords: competitiveness, beggartick, phaseolus vulgaris.

1 INTRODUÇÃO

As concentrações atmosféricas globais dos gases do efeito estufa, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, aumentaram de forma significativa em consequência da atividade antrópica e atualmente ultrapassam em muito os valores antes da era industrial. Os incrementos globais da concentração de CO₂ se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e a mudança no uso da terra, enquanto incrementos da concentração de metano de óxido nitroso são devidos principalmente a agricultura (IPCC 2020).

O dióxido de carbono, CO₂, é essencial à vida no planeta, visto que é um dos principais compostos para a realização da fotossíntese, processo pelo qual os organismos fotossintetizantes transformam a energia solar em energia química, que por sua vez é distribuída para todos os seres vivos por meio da teia alimentar. Os organismos fotossintetizantes, além de absorverem o carbono encontrado na atmosfera na forma de dióxido de carbono pela fotossíntese, também liberam dióxido de carbono para a atmosfera mediante o processo de respiração (Taiz et al., 2017).

O CO₂ em alta concentração na atmosfera tende a favorecer o desenvolvimento das plantas. Por ser um componente básico da fotossíntese, o aumento da concentração pode promover alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos das plantas (Dorneles et al., 2019).

Uma maior proporção de CO₂ na atmosfera tem o potencial de aumentar a atividade fotossintética e diminuir a fotorrespiração pela diminuição da atividade de oxigenase da rubisco. Outros efeitos esperados são a redução da condutância estomática, o aumento da eficiência de uso da água (relação entre as quantidades de CO₂ assimilado e de H₂O perdida) e da proporção C/N (carbono/nitrogênio), e a diminuição da respiração no escuro (Reich et al., 2018; Wolf and Ziska 2018).

A consequência desses efeitos pode ser um aumento na taxa de crescimento, o que pode não ocorrer caso a planta apresente aclimação fotossintética. Porém, mesmo em casos de aclimação, a taxa de fotossíntese em elevadas concentrações de CO₂ ainda é maior do que nas condições normais (Dorneles et al., 2019).

Qualquer alteração climática tende a influenciar não só o desempenho de organismos individuais, mas também as interações com outras espécies em diferentes fases evolutivas e, por consequência altera a competição entre as espécies (Awasthi et al., 2018).

As plantas daninhas causam perdas substanciais de produtividade, particularmente no desenvolvimento das culturas, quando em competição. As mesmas devem ser afetadas diretamente pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, sendo beneficiadas como as culturas econômicas, sendo que os efeitos das mudanças climáticas serão dependentes da espécie. O aumento na

concentração de CO₂ resulta em resposta direta das plantas daninhas que receberam o estímulo, com elevação na taxa fotossintética semelhante às respostas das plantas C3, podendo chegar a duas vezes o ganho fotossintético em relação às plantas cultivadas (XU et al., 2015).

Estudos sobre competitividade de culturas com plantas daninhas permitem desenvolver estratégias para seu manejo, pois podem definir as características que confirmam maior habilidade competitiva às culturas. Entretanto, no contexto atual, onde se observa incremento da concentração de CO₂ na atmosfera aliada ao aumento da temperatura, esse fato pode promover alterações relacionadas à capacidade competitiva de plantas daninhas e culturas, onde modificações no crescimento, morfologia e fisiologia das plantas podem ser verificadas em tais condições. Plantas com maiores velocidades de incremento de área foliar, estatura, massa da matéria seca da parte aérea, maior cobertura do solo e interceptação de luz pelo dossel apresentaram maior habilidade competitiva com as plantas daninhas (Mackinder, 2018).

Diante do exposto, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito do incremento do nível de CO₂ do ambiente no crescimento de plantas de picão-preto e feijoeiro em condição de competição.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Condições locais e a condução do experimento

Foram conduzidos de dezembro/2014 a janeiro/2015, por 50 dias em câmara de crescimento na dependência do Departamento Agronomia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, dois experimentos: um com *Bidens pilosa* L. (picão-preto) e um com *Phaseolus vulgaris* L. (feijão carioca BRS Pérola).

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para avaliar as plantas de ambos os experimentos. Para o picão-preto foi montado um esquema fatorial 3 x 4, sendo o primeiro fator representado por três concentrações de CO₂ nas câmaras de crescimento (420; 840 e 1.680 μmol^{-1}), e o segundo fator representado pelos arranjos de plantas em condição de competição (picão-preto cultivado isoladamente, picão-preto + *Braquiária decumbens*, picão-preto + milho (cv Híbrido Duplo Herculex®) e picão-preto + feijão (carioca BRS Pérola). Já com relação à avaliação das plantas de feijão o esquema fatorial foi de 3 x 3, sendo o primeiro fator representado pelos mesmos três níveis de CO₂ citados e o segundo fator correspondente aos diferentes arranjos de plantas em competição com plantas daninhas (feijoeiro cultivado isoladamente, feijoeiro + picão-preto e feijoeiro + *Brachiária decumbens*).

Como substrato utilizou-se Latossolo Vermelho-Amarelo previamente corrigido e adubado. De acordo com a análise realizada, o solo apresentou as seguintes características: pH em água = 4,3; Matéria Orgânica (MO) = 2,5 dag kg⁻¹; P = 1,5 mg dm⁻³; K = 40 mg dm⁻³; Al = 0,5 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 1,3 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,2 cmol_c dm⁻³; Capacidade de troca de cations efetiva (t) = 2,1 cmol_c dm⁻³; Capacidade de troca de cations total (T) = 6,39 cmol_c dm⁻³; H+Al = 4,79 cmol_c dm⁻³; SB = 1,6 cmol_c dm⁻³; V = 25%; e teor de argila = 38%. A adubação do solo foi de 20 g de cloreto de potássio, 500 g de superfosfato simples, 50 g de sulfato de amônio e 150 g de calcário dolomítico por m³ de substrato, de acordo com recomendação de Cantarutti et al. (2007) para adubação em vaso.

O efeito do ambiente e as avaliações feitas nas plantas de picão-preto e feijão

As espécies foram semeadas em vasos plásticos contendo 2,0 L da mistura pré-elaborada de solo e terra vegetal, corrigido e adubado, com incorporação um mês antes da implantação do experimento. Foram semeadas por vaso, cerca de 10 sementes da planta daninha e 4 da cultura com posterior desbaste e após a emergência das plântulas foi realizado um novo desbaste de acordo com o arranjo desejado.

As plantas foram mantidas em câmara de crescimento durante toda a fase experimento, onde temperatura, luminosidade, comprimento do dia, umidade e irrigação foram controladas, sendo temperatura média de 27°C, luminosidade de 750 μmol de luz $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em um período de 12 h diárias de luz, umidade relativa de 60% e irrigação duas vezes por dia mantendo o substrato com 80% da capacidade de campo campo medido com tensiômetro digital.

Realizou-se a análise da eficiência fotoquímica do fotossistema II das folhas das plantas com fluorômetro (Mini Pan®, Wals), sendo as pinças do aparelho colocadas no terço médio da primeira folha completamente expandida. As medições foram feitas após 30 minutos de adaptação ao escuro, no período noturno, com emissão de um pulso de luz saturante de 0,3 s, sob frequência de 0,6 KHz, quando se avaliou também razão entre a fluorescência variável e fluorescência máxima (F_v/F_m). Para a medição dos teores de clorofila foi usado o clorofilômetro (Clorofilog/Falker), em que foram obtidos os teores de clorofila total (CHL – mg m^{-2}) 40 dias após a emergência das plantas.

A resposta das concentrações de CO_2 e diferentes arranjos de cultivo na morfologia das plantas

Aos 50 dias após a emergência das plantas foi medida a estatura (EST – cm) e contado no número de folhas (NF) das plantas. As plantas de picão-preto e feijão foram coletadas e divididas em caule, folhas e raízes e acondicionadas em sacos de papel, e levadas a estufa de circulação forçada de ar e seca a temperatura de 60°C até massa constante. As amostras foram pesadas em balança de precisão para obtenção da massa da matéria seca das raízes (MSR – g), massa da matéria seca do caule (MSC – g) e massa da matéria seca das folhas (MSF – g). A massa da matéria seca total (MST – g) foi obtida pela soma da massa da matéria seca dos três órgãos das plantas avaliadas.

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao programa estatístico Sisvar para análise de variância e comparação das médias dos tratamentos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resposta da estatura, número de folhas, teor de clorofila e relação fluorescência variável/fluorescência máxima (F_v/F_m) nas plantas de picão-preto

As plantas de picão-preto submetidas a níveis crescentes de enriquecimento de CO₂ no ambiente mostram incremento na estatura (EST) para todos os tratamentos testados. O incremento na EST de plantas de picão-preto cultivadas isoladamente foi superior a 100% da concentração ambiente de CO₂ com 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ para o ambiente com máximo enriquecimento (1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), nos demais tratamentos esse incremento foi menor com o aumento da concentração de CO₂ (Tabela 1).

Tabela 1. Estatura de plantas (EST), número de folhas (NF), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila a (Fv/Fm) de picão-preto em competição com braquiária, milho e feijoeiro

Arranjos	Estatura de plantas (EST - cm)		
	Concentração de CO ₂		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Picão-preto	12,27 b A	19,42 ab A	31,92 a A
Picão-preto + Braquiária	7,12 b A	20,00 a A	16,30 a B
Picão-preto + Feijoeiro	12,02 b A	12,65 b B	17,00 a B
Picão-preto + Milho	10,02 b A	17,92 a A	20,92 a B
CV (%)	18,79		
	Número de folhas (NF)		
	Concentração de CO ₂		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Picão-preto	6,25 b A	11,00 a A	11,25 a A
Picão-preto + Braquiária	6,00 b A	10,25 a A	11,75 a A
Picão-preto + Feijoeiro	4,50 b B	8,00 a AB	9,50 a A
Picão-preto + Milho	6,00 b A	7,25 ab B	10,25 a A
CV (%)	14,56		
	Teor de clorofila total (CHL - mg m ⁻²)		
	Concentração de CO ₂		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Picão-preto	34,62 b A	44,52 a A	44,00 a A
Picão-preto + Braquiária	32,65 b A	42,10 a A	43,82 a A
Picão-preto + Feijoeiro	34,40 a A	40,72 a A	40,79 a A
Picão-preto + Milho	30,17 b A	38,48 ab A	45,00 a A
CV (%)	10,21		
	Relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila a (Fv/Fm)		
	Concentração de CO ₂		
	420	840	1.680
	----- $\mu\text{mol mol}^{-1}$ -----		
Picão-preto	0,76**	0,81	0,77
Picão-preto + Braquiária	0,81	0,78	0,79
Picão-preto + Feijoeiro	0,82	0,78	0,75
Picão-preto + Milho	0,81	0,79	0,76
CV (%)	3,63		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

**NS. Não significativo pelo Teste F a 5% de erro.

Ao se avaliar os arranjos dentro de cada nível de CO₂, verificou-se que na concentração de 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foi observada diferença na EST entre os tratamentos. Na concentração 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$

mol^{-1} de CO_2 as plantas de picão-preto mostraram menor estatura quando cultivadas juntamente com plantas de feijoeiro. Já na maior concentração de CO_2 observou-se que a planta daninha mostrou menores valores médios em relação à testemunha quando competindo com braquiária, milho e feijoeiro, podendo-se concluir que a essa concentração de CO_2 , a planta se desenvolve melhor quando cultivada isoladamente (Tabela 1).

Santos et al. (2017) afirma que em condições atuais, o O_2 compete com o CO_2 no sítio de reação da enzima rubisco, o que acarreta em perda de carbono pela fotorrespiração. Se a concentração de CO_2 for aumentada, a fotorrespiração pode ser cessada devido ao aumento do substrato em competição ao O_2 , elevando a fotossíntese e consequentemente a produção das plantas, conforme observado em seus resultados ao testar plantas de soja, *Eyphorbia heterophylla* e *Amaranthus viridis*. Tal fato tende a não ocorrer em plantas de metabolismo C4, que já se encontram em condição de saturação pela enzima rubisco em condições atuais, não sendo tão responsivas quanto as plantas de metabolismo C3, que respondem positivamente ao aumento do gás na atmosfera.

O número de folhas (NF) de plantas de picão-preto mostrou incremento em todos os tratamentos (arranjos de plantas isoladas e em condição de competição) com o aumento da concentração de CO_2 no ambiente. Esse incremento no NF foi de aproximadamente o dobro quando comparada a menor concentração de CO_2 com a maior concentração testada nas plantas de picão-preto crescendo isoladamente (Tabela 1).

Cury et al. (2013) observou uma redução no conteúdo relativo de N, P e K nos componentes vegetativos de feijoeiro ao avaliar a interação da cultura em competição com plantas daninhas. Quando em competição com *E. heterophylla* e *C. benghalensis*, apresentaram menores valores de conteúdo relativo de N, P e K, porém essas espécies foram praticamente suprimidas pela cultura.

Na concentração de $420 \mu\text{mol mol}^{-1}$, verificaram-se que as plantas de picão-preto mostraram menores valores médios de NF quando cultivadas em condição de competição com feijoeiro, já nas outras competições o picão-preto se comportou como se estivesse sendo cultivado isoladamente. Já na concentração de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$, as plantas de picão-preto mostraram menor NF quando cultivadas juntamente com as plantas de milho, diferindo da testemunha cultivada isoladamente ou quando cultivada junto com braquiária. Com $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 não foi verificada diferença entre os tratamentos, logo para esta concentração de CO_2 , o cultivo com a planta daninha ou isolada não influenciou seus resultados (Tabela 1).

Busch and Sage (2017) apontam que em elevadas concentrações de CO_2 , a regeneração da enzima rubisco é menor que seu consumo, sendo sua regeneração limitada por vários processos enzimáticos, inclusive redução de ATP. Assim como a quantidade de luz saturante e as concentrações de CO_2 pode limitar a capacidade de transporte de elétrons na folha e, consequentemente, a produção de amido e sacarose, limitando o fornecimento de energia. Todas essas características de limitações são encontradas mais comumente em plantas de metabolismo C3, com temperaturas mais baixas e níveis saturados de CO_2 .

As parcelas cultivadas com picão-preto isoladamente e em competição com culturas e braquiária e milho mostraram incremento nos valores de teor de clorofila total (CHL) com o aumento da concentração de CO_2 no ambiente, já no tratamento onde a planta daninha se desenvolveu juntamente com feijoeiro, não apresentou diferença estatística a medida que se elevava a concentração de CO_2 (Tabela 1).

Awasthi et al. (2018) encontraram resultados semelhantes em plantas de *Vigna radiata* e duas espécies de plantas daninhas, em que houve o crescimento significativo tanto da leguminosa quanto das plantas daninhas cultivados sob condições de CO₂ elevado. Foram observados maiores ramificações e produção de biomassa da parte aérea das espécies estudadas, sendo justificados, primeiramente pela maior resposta nos ramos e em segundo, pela maior taxa de fotoassimilados pela elevação do CO₂.

O aumento nas taxas fotossintéticas e a melhora nas relações hídricas observados nas plantas cultivadas em elevado CO₂ normalmente geram incrementos de biomassa e altura nestas plantas, que são respectivamente 49% e 12% maiores do que nas plantas cultivadas em atmosfera ambiente de CO₂ (Marin and Nassif 2013).

O aumento do CO₂ beneficia tanto a planta daninha quanto a cultura econômica, porém os efeitos são particulares a cada espécie. As respostas da planta daninha que recebe o estímulo apresentam elevação nas taxas fotossintéticas semelhantes àquelas observadas em culturas de metabolismo C3, podendo chegar a duas vezes o ganho em relação à cultura cultivada (Marin and Nassif 2013).

Ainda analisando o comportamento da CHL, ao se avaliar o arranjo de plantas dentro dos níveis de concentração do CO₂ não foi observada diferença entre os tratamentos para todas as concentrações de CO₂ avaliadas, logo o tipo de arranjo utilizado não influenciou no desenvolvimento da planta em nenhuma das concentrações de CO₂ avaliadas (Tabela 1).

Ao se avaliar a relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) em plantas de picão-preto, não foi observada diferença entre os tratamentos, destacando-se que os valores médios para essa variável se mantiveram entre 0,76 e 0,82 nos tratamentos (Tabela 1). Como não foi observada diferença estatística na Fv/Fm, pode-se inferir que o aparato fotossintético das plantas não foi comprometido, indicando valores dentro da normalidade.

Resposta da massa da matéria seca das raízes, massa da matéria seca do caule, massa da matéria seca das folhas e massa da matéria seca total nas plantas de picão-preto

Ao se avaliar as variáveis massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do caule (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST), verificou-se que em todos os arranjos de plantas avaliados ocorreu incremento nos valores dessas variáveis com o aumento da concentração de CO₂ no ambiente (Tabela 2).

Tabela 2. Massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do caule (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) em plantas de picão-preto em competição com braquiária, milho e feijoeiro

Massa da matéria seca das raízes (MSR - g)			
Arranjos	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Picão-preto	0,23 b A	0,31 ab AB	0,77 a A
Picão-preto + Braquiária	0,25 b A	0,58 ab A	0,76 a A
Picão-preto + Feijoeiro	0,10 b B	0,14 b B	0,80 a A
Picão-preto + Milho	0,30 b A	0,35 b AB	0,89 a A
CV (%)	20,14		
Massa da matéria seca do caule (MSC - g)			
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Picão-preto	0,19 b A	0,23 b B	0,56 a A
Picão-preto + Braquiária	0,25 b A	0,38 a A	0,42 a B
Picão-preto + Feijoeiro	0,10 c B	0,26 b A	0,43 a B
Picão-preto + Milho	0,15 b AB	0,20 b A	0,40 a B
CV (%)	42,92		
Massa da matéria seca das folhas (MSF - g)			
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Picão-preto	0,33 b A	0,35 b B	0,66 a A
Picão-preto + Braquiária	0,35 b A	0,49 ab AB	0,64 a A
Picão-preto + Feijoeiro	0,23 bAB	0,45 a AB	0,46 a B
Picão-preto + Milho	0,11 b B	0,67 a A	0,70 a A
CV (%)	46,36		
Massa da matéria seca total (MST - g)			
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Picão-preto	0,81 b A	0,83 b B	1,99 a A
Picão-preto + Braquiária	0,95 b A	1,08 b A	1,96 a A
Picão-preto + Feijoeiro	0,65 b B	0,80 b B	1,53 a B
Picão-preto + Milho	0,79 b AB	0,89 b B	1,42 a B
CV (%)	34,63		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Nas parcelas em que o picão-preto foi cultivado junto com o feijão ou com o milho, só foram observados aumentos na MSR quando cultivados no limite máximo de concentração de CO₂ (1.680 μmol mol⁻¹). Já para a MSC, quando o picão-preto foi cultivado com feijão, foi observado melhores resultados já quando se elevou a concentração de CO₂ para 840 μmol mol⁻¹, porém na concentração máxima de CO₂ (1.680 μmol mol⁻¹) foi onde se encontrou melhores resultados. Para esta mesma variável, o picão-preto cultivado junto com a braquiária já apresentou seus melhores resultados na concentração de 840

$\mu\text{mol mol}^{-1}$, e nos demais arranjos, os melhores resultados foram encontrados apenas quando as plantas foram submetidas ao limite de $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (Tabela 2).

Ao avaliar produção e partição de matéria seca de cultivares de feijão em competição com plantas daninhas, Cury et al. (2011) observaram que houve menor produção de matéria seca quando o feijão se encontrava em competição com *E. heterophylla* e *C. benghalensis*, e que a cultivar Pérola foi o genótipo de feijão que mais tolerou a competição com as plantas daninhas estudadas.

Da mesma forma, a MSF do picão-preto se comportou em sua melhor forma já na concentração de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$ quando cultivados com feijão, milho e braquiária, sendo que quando cultivado isoladamente, o incremento da MSF só é observado na concentração máxima de CO_2 ($1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$) (Tabela 2).

A MSR de plantas de picão-preto foi afetada negativamente na concentração de $420 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 quando competindo com plantas de feijoeiro. Da mesma forma, observou-se incremento de aproximadamente três vezes a MSR (300%) e aumento de cerca de 200% a MSC, MSF e MST de plantas de picão-preto da menor concentração de CO_2 para a maior concentração (Tabela 2).

Santos et al. (2017) afirmam que, embora as plantas de metabolismo C3 apresentem melhor desempenho que as plantas C4 caso haja incremento nas concentrações de CO_2 ambiente pela eficiência da enzima rubisco, esta atividade não deve ser avaliada isoladamente, mas sim com um acompanhamento nutricional adequado, pois tais vantagens fotossintéticas podem não ser observadas e levar a interpretações equivocadas.

Cury et al. (2013) apontaram o sistema radicular das plantas de feijão como o componente mais afetado pelas plantas daninhas quando em competição, porém a eficiência, o acúmulo e o transporte de N, P e K do feijoeiro varia conforme o genótipo e a espécie daninha competidora.

Já na concentração $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 os maiores valores médios de MSR no picão-preto foram observados quando as mesmas cresceram juntamente com braquiária. Na maior concentração de CO_2 não foi observada diferença entre os tratamentos (Tabela 2).

A espécie de planta daninha contribui significativamente para o impacto na cultura competidora, conforme observado por Cury et al. (2011), em que observaram que as plantas daninhas *Amaranthus spinosus* e *B. plantaginea* foram as espécies que apresentaram maior capacidade competitiva, pois afetaram intensamente o acúmulo e distribuição de matéria seca em todos os componentes do feijão. Dessa forma, o acúmulo e alocação dos recursos energéticos tanto nos componentes vegetativos das culturas quanto das plantas daninhas variam de acordo com as espécies envolvidas.

Santos et al. (2017) demonstraram que a soja e o *Amaranthus viridis* apresentam maior competição intraespecífica com o aumento do CO_2 de 400 para $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Já a *Euphorbia heterophylla* apresentou maior competição intraespecífica na concentração mais baixa de CO_2 ($400 \mu\text{mol mol}^{-1}$) em comparação a de $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

Plantas de picão-preto competindo com a cultura do milho mostraram redução da MSF quando cultivadas na menor concentração de CO_2 , diferindo da testemunha e demais tratamentos. Na concentração $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , verificou-se que a testemunha mostrou menor valor médio e quando cultivada juntamente com o milho, apresentou melhores resultados de MSF e no ambiente mais enriquecido com CO_2 ($1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$), as plantas de picão-preto foram afetadas negativamente quando cresceram juntamente com o feijoeiro (Tabela 2).

Na menor concentração de CO₂ avaliada, as plantas de picão-preto mostraram que a MST afeta negativamente quando competindo com feijoeiro, sem diferir da parcela onde a planta daninha cresceu juntamente com o milho. Na concentração de 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ as plantas de picão-preto cultivadas juntamente com a braquiária mostraram os maiores valores médios de MST, já no ambiente mais rico em CO₂ observou-se que as parcelas cultivadas isoladamente e em competição com plantas de braquiária mostraram maiores valores médios de MST diferindo dos demais tratamentos (Tabela 2).

Os resultados encontrados corroboram com os achados por Wang et al. (2016) ao avaliar trigo e arroz em 4 anos de produção, encontraram aumento de 2,9% na biomassa de arroz para um incremento de 673 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ e aumentos de até 19% na biomassa do trigo para esta mesma concentração de CO₂. Porém, esse mesmo estudo aponta também respostas negativas para a biomassa total e para a produção de grãos em alguns anos estudados, em que os autores atribuem tal fato a redução na condutância estomática e na concentração intercelular de CO₂. Os resultados apontam a especificidade da resposta às alterações fisiológicas a depender de região para região, corroborando com as variações encontradas na literatura.

Awasthi et al. (2018) afirmam que as plantas daninhas respondem de forma similar às plantas cultivadas sob elevados índices de CO₂ ambiente; porém, o que prejudica a produção agrícola provavelmente está ligado ao fato de as plantas daninhas serem mais adaptáveis a qualquer alteração ambiente do que as culturas agrícolas, favorecendo o desempenho das plantas daninhas em detrimento às culturas.

Nas relações de competição, Cury et al. (2011) perceberam que a raiz das cultivares de feijão testadas foi o principal órgão afetado pela competição, enquanto que nas plantas daninhas, as folhas e o caule foram os órgãos mais prejudicados.

Resposta da estatura, número de folhas, teor de clorofila e relação fluorescência variável/fluorescência máxima (Fv/Fm) nas plantas de feijão

A estatura de plantas (EST) de feijoeiro apresentou incremento com o aumento da concentração de CO₂ em todos os arranjos avaliados já quando se elevou a concentração de CO₂ para 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, destacando-se que plantas de feijoeiro crescendo isoladamente mostraram crescimento em estatura cerca de seis vezes maior da menor para a maior concentração de CO₂ (Tabela 3).

Awasthi et al. (2018) apresentam resultados em que o incremento de CO₂ favoreceu o desenvolvimento tanto de plantas daninhas quanto o da leguminosa (*Vigna radiata*), porém a planta daninha *E. geniculata* foi dominante sobre a cultura mesmo com o CO₂ elevado devido a sua maior taxa de crescimento e biomassa.

Tabela 3. Estatura (EST), número de folha (NF), teor de clorofila total (CHL) e relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila a (Fv/Fm) de plantas de feijoeiro cultivado em competição com plantas daninhas

Estatura (EST - cm)			
Arranjos	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	12,67 b B	50,70 ab A	70,95 a A
Feijoeiro + Picão-preto	10,17 b B	31,80 ab B	49,45 a B
Feijoeiro + Braquiária	19,67 b A	54,32 ab A	75,20 a A
CV (%)	30,76		
Número de folha (NF)			
Arranjos	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	4,70**	5,00	5,70
Feijoeiro + Picão-preto	4,00	5,00	5,50
Feijoeiro + Braquiária	4,70	5,50	5,80
CV (%)	20,38		
Teor de clorofila total (CHL - mg m ⁻²)			
Arranjos	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	44,05**	44,00	45,92
Feijoeiro + Picão-preto	43,12	42,40	44,27
Feijoeiro + Braquiária	44,95	44,27	44,50
CV (%)	7,76		
Relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila a (Fv/Fm)			
Arranjos	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	0,81**	0,79	0,81
Feijoeiro + Picão-preto	0,82	0,79	0,80
Feijoeiro + Braquiária	0,82	0,77	0,80
CV (%)	4,48		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

**NS. Não significativo pelo Teste F a 5% de erro.

Plantas de feijoeiro cultivadas juntamente com braquiária apresentaram maior EST na concentração de 420 μmol mol⁻¹ de CO₂, diferente de quando cultivada isoladamente, ou com picão-preto. Nas concentrações 840 e 1.680 μmol mol⁻¹ verificaram-se que os menores valores de EST do feijoeiro foi quando o mesmo se encontrava apenas em condição de competição com plantas de picão-preto (Tabela 3).

O picão-preto afeta as culturas pelo fato de comprometer as características fisiológicas e morfológicas, além do crescimento das culturas (Manabe et al. 2014). As características dessa planta favorecem sua propagação, pois além de ser uma planta com excelente capacidade de extrair nutrientes do solo e acumular em seus tecidos, produzindo mais sementes, é uma planta flexível às mudanças

ambientais, fazendo com que seja uma planta com elevada habilidade competitiva (Santos and Cury, 2011).

Ao se avaliar o número de folhas (NF) em plantas de feijoeiro, não foi constatada diferença entre os tratamentos e níveis de enriquecimento de CO₂ no ambiente, apresentando valores médios entre 4,0 e 5,8 (Tabela 3).

Com relação ao teor de clorofila (CHL) em plantas de feijoeiro, não foi constatada diferença entre os tratamentos e níveis de enriquecimento de CO₂ no ambiente, com valores médios entre 42,4 e 45,92 mg m⁻² (Tabela 3). Dorneles et al. (2019) encontraram redução de 11% de CHL em trigo para concentrações de 700 µmol mol⁻¹ de CO₂, assim como encontrou incremento na estatura (2%), área foliar (21%), massa seca da folha (18%) e massa seca da raiz (44%) neste estudo, além de serem observados grãos com melhor coloração, forma e tamanho.

Ao se avaliar a relação fluorescência variável/fluorescência máxima da clorofila *a* (Fv/Fm) em plantas de feijoeiro, não foi constatada diferença entre os tratamentos, destacando-se que os valores médios observados para essa variável se mantiveram na faixa de 0,77 a 0,82 em todos os tratamentos (Tabela 3).

Manabe et al. (2014) afirma que a taxa fotossintética do feijão sob competição com plantas daninhas é reduzida, ocorrendo o contrário quando a cultura é bem manejada e o controle é feito. Dessa forma é de suma importância o controle das plantas daninhas na cultura pela escolha de métodos eficientes e que minimizem sua interferência na cultura.

Resposta da massa da matéria seca das raízes, massa da matéria seca do caule, massa da matéria seca das folhas e massa da matéria seca total nas plantas de feijão

As variáveis massa da matéria seca das raízes (MSR), massa da matéria seca do caule (MSC), massa da matéria seca das folhas (MSF) e massa da matéria seca total (MST) em plantas feijoeiro mostraram em todos os arranjos avaliados (feijoeiro cultivado isoladamente, feijoeiro + picão-preto e feijoeiro + braquiária) incremento nos seus valores médios com o aumento da concentração de CO₂ no ambiente (Tabela 4). Estes valores indicam que a fotossíntese não foi comprometida com as diferentes proporções de CO₂ testados.

Para a variável MSR, esse incremento já foi observado quando se elevou a concentração de CO₂ para 840 µmol mol⁻¹, já para as variáveis MSC e MSF os melhores resultados só foram encontrados quando atingidas as concentrações de 1.680 µmol mol⁻¹ de CO₂ (Tabela 4). Kim et al. (2005), avaliando o crescimento de plantas de soja em diferentes níveis de concentração de CO₂, verificaram aumento do peso total da massa seca de soja em ambiente enriquecido com 650 µmol mol⁻¹ de CO₂.

Tabela 4. Massa da matéria seca das raízes (MSR), Massa da matéria seca do caule (MSC), Massa da matéria seca das folhas (MSF) e Massa da matéria seca total (MST) de plantas de feijoeiro cultivado em competição com plantas daninhas

Arranjos	Massa da matéria seca das raízes (MSR - g)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	0,23 b B	0,64 ab A	0,82 a A
Feijoeiro + Picão-preto	0,30 b B	0,69 ab A	0,80 a A
Feijoeiro + Braquiária	0,51 b A	0,79 a A	0,81 a A
CV (%)	41,03		
	Massa da matéria seca do caule (MSC - g)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	0,43 b A	0,48b A	0,68 a A
Feijoeiro + Picão-preto	0,10 c B	0,26 b B	0,55 a A
Feijoeiro + Braquiária	0,22 b B	0,28 b B	0,56 a A
CV (%)	58,08		
	Massa da matéria seca das folhas (MSF - g)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	1,41 b A	1,64 b A	2,36 a A
Feijoeiro + Picão-preto	0,45 b B	0,55 b B	1,46 a B
Feijoeiro + Braquiária	0,52 b B	0,62 b B	1,54 a B
CV (%)	13,98		
	Massa da matéria seca total (MST - g)		
	Concentração de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)		
	420	840	1.680
	----- μmol mol ⁻¹ -----		
Feijoeiro	2,12 b A	2,72 b A	3,86 a A
Feijoeiro + Picão-preto	1,25 b B	1,42 b B	2,52 a B
Feijoeiro + Braquiária	1,31 b B	1,98 ab B	2,63 a B
CV (%)	21,33		

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey.

Para Santos et al. (2017) as mudanças nos níveis de CO₂ podem aumentar a competição entre as plantas e favorecer determinada espécie, já que a absorção e concentração de nutrientes como N, P e K pode ser maior em uma do que em outra. Por se tratar de uma planta leguminosa, o feijão possui uma maior capacidade de fixação biológica de nitrogênio no solo, podendo favorecer sua condição em relação a demais espécies e aproveitar o melhor incremento de CO₂ na atmosfera, assim como observaram os autores em relação às plantas de soja em interação com plantas daninhas.

Galon et al. (2016) evidenciam as perdas na produtividade de diversas cultivares diferentes dos grãos do feijoeiro na presença de picão-preto. Porém os resultados encontrados confirmam a hipótese do efeito fertilizante do CO₂ que parte do princípio que a concentração atual de CO₂ na atmosfera é limitante a capacidade fotossintética máxima das plantas C3, devido aos níveis atuais serem insuficiente para saturar a enzima rubisco (Taiz et al., 2017).

Dorneles et al. (2019) apontam que plantas que possuem metabolismo C3 são beneficiadas pelo incremento de CO₂ atmosférico, já que há uma potencialização da atividade carboxilativa, o que faz elevar a fotossíntese sem que ocorra a saturação, além de reduzir as perdas pela fotorrespiração.

Ao se avaliar o efeito do arranjo dentro de cada nível de concentração de CO₂ no ambiente, verificou-se na concentração 420 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, maiores valores médios de MSR foi observado nas plantas de feijoeiro cultivadas em competição com a braquiária, diferindo dos demais tratamentos. Nas concentrações 840 e 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foi observada diferença da MSR nos tratamentos (Tabela 4).

Com relação à MSC de plantas de feijoeiro verificou-se que nas concentrações 420 e 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, os tratamentos no qual as plantas de feijoeiro competiram com picão-preto e com braquiária os valores médios dessa variável foi inferior ao observado nas plantas da cultura crescendo isoladamente. Já na maior concentração de CO₂ não foi observada diferença entre os tratamentos (Tabela 4).

Pessôa et al. (2017) avaliou o desempenho fisiológico do feijão sob manejo de plantas daninhas e concluiu que a competição interfere severamente nas características de fotossíntese, transpiração e concentração intercelular de CO₂ do feijão, fazendo com que a cultura apresente um desbalanço fisiológico e comprometendo seu desenvolvimento.

Plantas de feijoeiro cultivadas nas três concentrações de CO₂ mostraram menores valores médios de MSF e MST quando em competição com plantas daninhas, diferindo das suas testemunhas nos respectivos níveis de enriquecimento de CO₂ (Tabela 4).

Ziska (2017) discute algumas dinâmicas na evolução das plantas, quer seja por adaptação evolutiva pelo meio a aclimação as diferentes formas de adaptação das culturas às mudanças climáticas com o passar dos anos, quer seja também por seleção ligada ao melhoramento genético, que geram indivíduos mais resistentes e também mais aclimatados. Dadas tais diferenças dinâmicas de seleção, qualquer aumento em algum recurso, como o CO₂, por exemplo, pode induzir a disparidades entre plantas daninhas e as culturas.

As alterações no ambiente afetam o desempenho das plantas de uma forma específica em cada espécie, como foi observado, por exemplo, nos estudos de Awasthi et al. (2018) em que, das três espécies estudadas, *E. geniculata* foi a mais responsiva ao aumento do CO₂, com maior transpiração e condutância estomática, além de apresentar sistema de defesa antioxidante mais forte. Dessa forma, as alterações no ambiente poderão responder de forma a ressaltar algum parâmetro a depender da espécie estudada.

4 CONCLUSÕES

O incremento da concentração de CO₂ promove um maior ganho em estatura e massa de matéria seca das raízes, caules e folhas da cultura e da planta daninha.

Em todos os arranjos testados os melhores resultados de crescimento das plantas ocorrem na concentração de 1.680 $\mu\text{mol mol}^{-1}$.

Nas concentrações de 420 e 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ no ambiente, o picão-preto em competição com o feijão apresenta os piores desempenhos em quase todas as variáveis de crescimento.

Na concentração de $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$, o picão-preto crescendo isoladamente apresenta os melhores resultados do que quando em competição com alguma espécie.

Para a maioria das variáveis de crescimento testadas, as concentrações de 420 e $1.680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ favorecem o feijoeiro quando crescendo isoladamente.

Na concentração de $840 \mu\text{mol mol}^{-1}$ as plantas de feijão obtiveram os piores desempenhos quando em competição com o picão-preto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e as bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

- Awasthi JP, Paraste KS, Rathore M, Varun M, Jaggi D, Kumar B (2018) Effect of elevated CO_2 on *Vigna radiata* and two weed species: yield, physiology and crop-weed interaction Crop and Pastures Science 69 6: 617-631.
- Cantarutti, RB; Barros, NF; Martinez, HEP; Novais, RF (2007) Avaliação da Fertilização do Solo e Recomendação de Fertilizantes. In: Novais, RF; Alvarez V., VH; Barros, NF; Fontes, RLF; Cantarutti, RB; Neves, JCL. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS: 769-50.
- Cury JP, Santos JB, Valadão Silva D, Carvalho FP, Braga RR, Byrro ECM, Ferreira EA (2011) Produção e Partição de Matéria Seca de Cultivares de Feijão em Competição com Plantas Daninhas. Planta Daninha 29 1: 149-58.
- Curry JP, Santos JB, Silva EB, Braga RR, Carvalho FP, Valadão Silva D, Byrro ECM (2013) Eficiência Nutricional de Cultivares de Feijão em Competição com Plantas Daninhas. Planta Daninha 31 1: 79-88.
- Dorneles KR, Posso DA, Rebhahn I, Deuner S, Pazdiora PC, Avila LA, Dallagnol LJ (2019) Respostas Morfofisiológicas e Rendimento de Grãos do Trigo Mediados pelo Aumento da Concentração de CO_2 Atmosférico. Rev Bras Cien Agrárias 14 1: 1981-0997.
- Finn GA, Brun WA (1982) Effect of Atmospheric CO_2 Enrichment on Growth, Nonstructural Carbohydrate Content, and Root Nodule Activity in Soybean. Plant Physiol 69: 327-31.
- Galon L, Forte CT, Gabiatti RL, Radunz LL, Aspiazu I, Kujawinski R, Rossetti J (2016) Interference and Economic Threshold Level For Control of Beggartick on Bean Cultivars Planta Daninha 34 3: 411-22.
- Kim SH, Jung WS, Ahn JK, Kim JA, Chung IM (2005) Quantitative Analysis of the Isoflavone Content and Biological Growth of Soybean (*Glycine max* L.) at Elevated Temperature, CO_2 Level and N Application. J Sci Food Agric 85: 2557-66.
- Manabe PMS, Matos CDC, Ferreira EA, Da Silva AA, Sediyaama T, Manabe A, Galon L (2014) Características Fisiológicas de Feijoeiro em Competição com Plantas Daninhas. Biosci Journal 30 6: 1721-28.
- Pessôa UCM, de Oliveira KJA, Souza AS, Pimenta TA, Muniz RVS, Araujo Neto AG (2017) Desempenho Fisiológico e Crescimento do Feijão-Caupi, sob Manejos de Plantas Daninhas. Rev. Verde Agroecologia Desenvol Sustentável 12 2: 246-50.
- Reich PB, Hobbie SE, Lee TD, Pastore MA (2018) Unexpected reversal of C3 versus C4 grass response to elevated CO_2 during a 20-year field experiment. Science 360 (6386): 317-20.

Santos JI, Cesarin AE, Sales CAR, Triano MBB, Martins PFRB, Braga AF, Neto NJ, Barroso, AAM, Alves PLCA, Huaman CAM (2017) Increase of Atmosphere CO₂ Concentration and Its Effects on Culture/Weed Interaction World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering 11 6:419-426.

Santos JB, Cury JP (2011) Picão-preto: Uma Planta Daninha Especial em Solos Tropicais. Planta Daninha 29: 1159-71.

Srinivasarao Ch, Kundu S, Shanker AK, Naik RP, VAnaja M, Venkanna K, Sankar GRM, Rao VUM (2016) Continuous cropping under elevated CO₂: Differential effects on C4 and C3 crops, soil properties and carbon dynamics in semi-arid alfisols. Agriculture, Ecosystems & Environment 218: 73-86.

Taiz L, Zeiger E, Moller I (2017) 6^a ed. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. Porto Alegre: Artmed.

Wang J, Liu X, Zhang X, Smith P, Li L, FilleY TR, Cheng K, Shen M, He Y, Pan G (2016) Size and Variability of Crop Productivity Both Impacted By CO₂ Enrichment and Warming – A Case Study of 4 Year Field Experiment in a Chinese Paddy. Agric Ecosys Environ 221: 40–9.

Wolf J, Ziska L (2018) Comment on “Unexpected Reversal of C3 versus C4 Grass Response to Elevated CO₂ During a 20-Year Field Experiment. Science 361 1: 6402.

Xu Z, Jiang Y, Zhou G (2015) Response and Adaptation of Photosynthesis, Respiration, and Antioxidant Systems to Elevated CO₂ with Environmental Stress in Plants. Frontiers in Plant Science 6: 701.

Ziska LH, Blumenthal D, Franks S (2019) Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. Invasive Plant Science and Management 12 2: 79-88.

Zeng Q, Liu B, Gilna B, Zhang I, ZHU C, Ma H, Pang J, Chen G, Zhu, J (2009) Elevated CO₂ Effect on Nutrient Competition between a C3 Crop (*Oryza Sativa L.*) and a C4 Weed (*Echinochloa crusgalli L.*). Nutrient Cycling in Agroecosystems 89: 93-104.

6 CONCLUSÕES / CONSIDERAÇÕES FINAIS

O incremento de CO₂ ambiente contribuiu para o crescimento tanto das culturas quanto das plantas daninhas, uma vez que em concentrações iguais ou superiores a 840 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ foram observadas melhores respostas na altura, número de folha e massa da matéria seca das plantas avaliadas.

Os resultados desta pesquisa evidenciaram que mesmo se elevando a concentração de CO₂ ambiente, o aparato fotossintético das plantas não foi prejudicado, podendo-se inferir que o aumento deste gás eleva a produção de fotoassimilados sem que haja prejuízos nos componentes fisiológicos principais das espécies testadas. Dessa forma, podemos considerar que a atuação das plantas na absorção de CO₂ pode possuir efeito mitigatório para as projeções futuras em relação à emissão deste gás de efeito estufa.

O aumento do gás carbônico beneficia o crescimento tanto das plantas de metabolismo C3 quanto de metabolismo C4, podendo a cultura ou a planta daninha, sendo que a influência da competição vai depender do arranjo e da espécie daninha testada. Por outro lado, ficou evidente que o cultivo de forma isolada favorece mais o crescimento da cultura do que quando em consórcio com outra espécie.

Sabendo-se que a tendência futura é de que a concentração de gás carbônico seja aumentada na atmosfera, devido às emissões principalmente de combustíveis fósseis, se tornará apropriado investir em mais insumos e tecnologias para eliminar a competição com plantas daninhas, pois o seu crescimento também será favorecido e poderá interferir na competição por nutrientes, e assim, reduzir a produtividade das culturas.

Logo, visando reduzir os custos da produção e buscando medidas que contribuam para sustentabilidade do meio ambiente, poderão ser pesquisadas e utilizadas técnicas específicas de manejo de plantas daninhas para que não afetem o desenvolvimento da cultura que se busca maior produtividade.