

Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂

Review: Growth of C3 and C4 plants in response to different CO₂ concentrations

Revisión: Crecimiento de plantas C3 y C4 en respuesta a diferentes concentraciones de CO₂

Recebido: 01/06/2021 | Revisado: 07/06/2021 | Aceito: 09/06/2021 | Publicado: 23/06/2021

Fabiola Mendes Braga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1138-2481>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: fabiolambraga@gmail.com

Evander Alves Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4701-6862>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: evanderalves@gmail.com

Cássia Michelle Cabral

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4730-4509>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: mtchells@gmail.com

Igor Costa de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2014-7726>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: freitasicde@gmail.com

Josiane Costa Maciel

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4714-0388>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: josi-agronomia@hotmail.com

Maria Stéfany Silveira Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3247-5188>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: mssf.freitas@gmail.com

Ignácio Aspiazu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-3324>
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: ignacio.aspiazu@unimontes.br

José Barbosa dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5746-7248>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: jbarbosasantos@yahoo.com.br

Luiz Arnaldo Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-1924>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: luizmcmg@gmail.com

Leidivan de Almeida Frazão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-9007>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: leidivan.fraza@gmail.com

Regynaldo Arruda Sampaio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3214-6111>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: regynaldo@terra.com.br

Resumo

Plantas de metabolismo C3 tendem a apresentar respostas mais evidentes no seu crescimento quando há incremento do CO₂ no ambiente. Tais observações não são 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 CO₂ em suas células tornando a fotossíntese um processo mais eficiente. São encontrados diversos estudos que sugerem maior crescimento de plantas que utilizam tanto o metabolismo C3 quanto o C4 quando submetidas a concentrações de CO₂ mais elevadas que as condições ambientes atuais. O objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão sobre a influência da concentração de CO₂ atmosférico no crescimento de plantas cultivadas com ênfase na cultura do feijão e do milho e plantas daninhas. O aumento do gás carbônico beneficia o crescimento tanto das plantas de metabolismo C3

quanto de metabolismo C4. 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 reduzir 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.

Palavras-chave: Fotossíntese; Incremento de CO₂ atmosférico; Manejo de plantas daninhas C3 e C4.

Abstract

C3 plants tend to present more evident responses in their growth when there is an increase in CO₂ in the environment. Such observations are not so evident in plants with C4 metabolism, which are considered more naturally evolved due to their functional anatomy, which is capable of concentrating a greater amount of CO₂ in their cells, making photosynthesis a more efficient process. Several studies are found that suggest greater growth of plants that use both C3 and C4 metabolism when subjected to higher CO₂ concentrations than current environmental conditions. The objective of the present work was to carry out a review of the influence of atmospheric CO₂ concentration on the growth of cultivated plants with emphasis on the cultivation of beans and corn and weeds. The increase in carbon dioxide benefits the growth of both C3 metabolism and C4 metabolism plants. Knowing that the future trend is that the concentration of carbon dioxide is increased in the atmosphere, due to emissions mainly from fossil fuels, it will become appropriate to invest in more inputs and technologies to reduce competition with weeds, as their growth also it will be favored and may interfere with competition for nutrients, and thus reduce crop productivity.

Keywords: Photosynthesis; Atmospheric CO₂ increase; C3 and C4 weed management.

Resumen

Las plantas C3 tienden a presentar respuestas más evidentes en su crecimiento cuando hay un aumento de CO₂ en el ambiente. Tales observaciones no son tan evidentes en plantas con metabolismo C4, las cuales se consideran más evolucionadas naturalmente debido a su anatomía funcional, que es capaz de concentrar una mayor cantidad de CO₂ en sus células, haciendo de la fotosíntesis un proceso más eficiente. Se encuentran varios estudios que sugieren un mayor crecimiento de plantas que utilizan el metabolismo C3 y C4 cuando se someten a concentraciones de CO₂ más altas que las condiciones ambientales actuales. El objetivo del presente trabajo fue realizar una revisión de la influencia de la concentración de CO₂ atmosférico en el crecimiento de plantas cultivadas con énfasis en el cultivo de frijol y maíz y malezas. El aumento de dióxido de carbono beneficia el crecimiento tanto del metabolismo C3 como de las plantas del metabolismo C4. Sabiendo que la tendencia futura es que se incremente la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, debido a las emisiones principalmente de combustibles fósiles, será oportuno invertir en más insumos y tecnologías para reducir la competencia con las malezas, ya que su crecimiento también lo será. favorecido y puede interferir con la competencia por los nutrientes y, por lo tanto, reducir la productividad de los cultivos.

Palabras clave: Fotosíntesis; Aumento de CO₂ atmosférico; Manejo de malezas C3 y C4.

1. Introdução

As emissões globais de carbono devem continuar aumentando nos próximos anos ultrapassando os 400 μmol 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 e concentração de CO₂, afetam o equilíbrio ecológico, o microclima, o estado dos nutrientes do solo, entre outros.

Sabe-se que em plantas com metabolismo C3, um dos fatores que limitam a fotossíntese está nas concentrações ofertadas de CO₂. 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 CO₂ em suas células tornando então 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 CO₂ mais elevadas que as condições ambientes atuais.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão sobre a influência da concentração de CO₂ atmosférico no crescimento de plantas cultivadas com ênfase na cultura do feijão e do milho e plantas daninhas.

2. Metodologia

Neste trabalho foi realizado uma revisão integrativa da literatura, que consiste em uma busca baseada em material já publicado (Gil, 2017). Esta metodologia busca reunir, avaliar e sintetizar os resultados de uma pesquisa sobre determinado assunto, sendo que esta forma de investigação tradicionalmente inclui material impresso, porém devido às novas formas de disseminação do conhecimento por meios eletrônicos, foram buscados na internet alguns trabalhos já publicados em relação ao assunto em questão, em especial os artigos científicos.

Devido ao crescente número de pesquisas e a complexidade das informações que vão surgindo com o decorrer do tempo, tornou-se necessário a utilização de novas formas de disseminação da pesquisa cientificamente fundamentada a fim de proporcionar aos profissionais, uma melhor comprovação das descobertas evidenciadas em seus estudos. Dessa forma, a revisão integrativa vem sendo utilizada como ferramenta ideal para reunir informações, uma vez que sintetiza os diversos conhecimentos acerca de determinado assunto e direciona a prática evidenciada em conhecimento técnico (Souza, Silva & Carvalho, 2010).

Foi feito então um levantamento de artigos científicos na base de dados eletrônicos do Portal de Periódicos Capes/MEC, Scielo e Google scholar, utilizando palavras descritoras como “increase CO₂”, “metabolism plants C3 and C4”, “fertilization CO₂”, “*Zea mays*”, “*Phaseolus vulgaris*”, “CO₂ weed” “CO₂ planta daninha”. A busca eletrônica foi realizada no período de agosto a novembro de 2020. O refinamento dos trabalhos foi feito de maneira a selecionar aqueles que se encontraram dentro da área de conhecimento, os que possuíam maior relevância, os que estavam escritos em língua portuguesa e inglesa (linguagem de publicação), e aqueles mais recentes (ano de publicação). As informações coletadas na pesquisa foram sintetizadas e reorganizadas em forma de tópicos.

3. Milho

O milho (*Zea mays L.*) pertence à família Gramineae/Poaceae. Planta anual, robusta e ereta, variando de um a quatro metros de altura. Sua domesticação e seleção natural a tornou aprimorada para produção de grãos e considerada uma das plantas mais eficientes no armazenamento de energia (Magalhães, et al., 2002).

Sua semente possui peso aproximado de 0,3g e com um prazo de aproximadamente nove semanas já consegue atingir dois metros de altura, dada sua eficiência de seu metabolismo (Magalhães, et al., 2002).

Dentre os diversos mecanismos desenvolvidos por ela para melhorar sua resistência à seca, podemos considerar 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 para trás apenas para 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 caminha 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 relacionadas a quedas na sua produtividade devido a 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 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) enquanto os outros grupos se encaixam em valores próximos a 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 CO_2 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 CO_2 da RUBISCO mantém a elevada razão CO_2/O_2 e reduz a fotorrespiração. Esta elevada razão CO_2/O_2 acontece pela alta afinidade da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) pelo CO_2 , 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 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).

4. Feijão

O feijão é uma planta herbácea, de raízes fibrosas, que apresentam caules com aproximadamente 1 metro, estriado, denso. Suas folhas possuem estipulas, triangulares a lanceoladas (Snack, et al., 2011).

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) possui a proteína em 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).

A Embrapa Arroz e Feijão busca, por meio do melhoramento genético, cultivares com elevado rendimento e mais resistentes a doenças e ao mesmo tempo em que possibilite colheitas mecanizadas, características estas encontradas na cultivar BRS estilo (Melo, et al., 2010).

As características industriais e tecnológicas aceitam grãos com cor e tamanhos uniformes, com peso médio de 100 grãos de 26g 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* presente 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 CO₂ 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 par 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).

5. Aumento da Concentração de CO₂ na Atmosfera

O último relatório divulgado pelo 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 maior do que no período de 1850 a 1900, 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 contribuem para o efeito estufa afirmam 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 de se reduzir a 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 provoca o crescimento de plantas e a cobertura das plantas lenhosas em pradarias e savanas (IPCC 2020).

Os elevados níveis de GEEs vem 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 biomassa assim como o rendimento das culturas de uma forma geral (Wang, et al., 2018).

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 aumente 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 são capazes de otimizar a fotossíntese nas folhas e consequente rendimento de culturas (Wang, et al., 2018, Mackinder, 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 1.000m² de floresta natural, e para flores e vegetais, o aumentando-se a concentração de CO₂ para 1.000 ppm 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 0,511g de CO₂ por folha por hora, e que a absorção de CO₂ de árvores de *Pterocarpus indicus* podem absorver por volta de 4.642Kg de CO₂ por árvore por hora.

Nesse sentido o CO₂ tende a aumentar tanto a temperatura quanto a taxa fotossintética das plantas pelo aumento do CO₂. 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 aumento da fotossíntese em resposta ao aumento do CO₂, denominada fertilização por CO₂, pode não ser tão eficaz como o esperado.

Analisando a produção agrícola entre 1981 e 2002, percebeu-se 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 as alterações climáticas e principalmente ao aumento da temperatura em suas lavouras (Ainsworth & Ort, 2010).

Já estudos como os de Bernacchi, et al., (2006); Oliveira, et al., (2013); Wang, et al., (2016); Busch & Sage, (2017); Mackinder, (2018); Dorneles, et al., (2019) apontam sobre o comportamento das plantas em relação ao incremento do CO₂ nas culturas. Mackinder, (2018) estuda melhorias na fotossíntese das plantas por meio de engenharia genética. Já Busch & Sage, (2017) apontam estratégias para melhorar o rendimento das culturas aumentando a capacidade fotossintética de CO₂, dentre elas foi proposto 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 serem estudados 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.

6. 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 mesmo sentido, Wang, et al., (2019) afirma 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.

Wang et al., (2016); Wang et al., (2019) dá importância ao entendimento das possíveis mudanças climáticas na produção agrícola para atenuar os impactos negativos à produção de alimentos e destaca o aumento das concentrações de CO₂ como um fator relevante a ser estudado.

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 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 no investimento de pesquisadores em capturar diretamente o CO₂ da atmosfera para aproveitar do seu efeito positivo sobre a fotossíntese, alguns trabalhos vêm ganhando destaque em aumentar a concentração de CO₂ atmosférico para elevar a produtividade das culturas, podendo também ser utilizadas com um grande potencial em estufas, desde que operadas de forma adequada (Smith, 2007; House, et al., 2011; Wang, et al., 2014; Dorneles et al. 2019).

O aumento 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 aumento na produtividade agrícola pode ter contribuído muito mais do que se estima (Bastos, et al., 2019).

Vários estudos como os de Ainsworth e Rogers, (2007); Ainsworth e Long, (2005) comprovaram que o aumento do CO₂ estimulou a fotossíntese. Embora saiba-se que a Rubisco está se adaptando as condições ambientais prevaletentes, o seu ponto ótimo gira em torno de 20 e 35°C e portanto a taxa fotossintética é dependente tanto da temperatura quanto do volume de CO₂ que é oferecido para as plantas (Yamori, et al., 2006; Galmés, et al., 2019, Busch & Sage, 2017).

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.

Já para os estudos feitos por Wang, et al., (2018) em que foi elevada a concentração de CO₂ atmosférico para 500µmol mol⁻¹ e a temperatura em um aquecimento de 2°C, observou-se o aumento na 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.

Em estudos com arroz e trigo, Wang, et al., 2016 observou 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. E para o índice de colheita (avalia a capacidade de uma colheita em transferir o produto fotossintético para o grão) nenhuma alteração significativa foi encontrada para ambos 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 no rendimento da 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 e Rogers, (2007); Ruiz-Vera, et al., (2013); Wang, et al., (2016); Wang, et al., (2019).

Nos trabalhos de Wang, et al., (2016) foi possível perceber o aumento significativo da produção de arroz em 8% quando elevado o teor de CO₂ ambiente a 500ppmv, levando a conclusão de que o CO₂ é capaz de melhorar o desempenho fotossintético das plantas.

Bernacchi, et al., (2007) confirma o aumento de 24% da assimilação fotossintética das folhas de soja quando submetidas a concentrações de CO₂ mais elevadas. Os fatores que afetam tal assimilação estão intimamente relacionados a menor taxa

carboxilação na ribulose 1-5bifosfato 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.

Já nos trabalhos de Rogers, et al., (2004) os achados foram de 25% no aumento da fotossíntese quando submetidas a elevadas concentrações de CO₂ em plantas de soja.

Nos estudos de Bernacchi, et al., (2007) mostraram que a mudança atmosférica na concentração do CO₂ aumentado(a 550 μmol mol⁻¹) é capaz de reduzir a condutância estomática sob inúmeras condições, assim como alguns outros parâmetros como mudanças no microclima do solo, da planta e no dossel e que também podem interferir diretamente na evapotranspiração e na resposta da condutância estomática das folhas de soja.

Ainsworth e 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 são 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 diretamente nas relações hídricas, trocas gasosas e no acúmulo de carboidratos em plantas de café arábico. Busch e Sage, (2017) concordam que o incremento de CO₂ afeta diretamente na fotossíntese das plantas pela Rubisco, já que a limitação se dá 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 (Dorneles, et al., 2019). A capacidade de regeneração da Rubisco dentro das condições térmicas ideais está diretamente ligada a 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.

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 e 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 a aclimação fotossintética.

Diante das buscas encontradas Wang, et al., (2016) afirmam que o tratamento do 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. (Ainswoerth & Long, 2005; Ainsworth & Rogers, 2007; Xu, et al., 2015).

7. 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 aumentam com seu metabolismo e geram perdas de CO₂ pela fotorrespiração. Dessa forma o aumento da fotorrespiração e a respiração mitocondrial podem limitar as taxas e assimilação de carbono em plantas C₃ a altas temperaturas. No caso das plantas C₄, estas utilizam de um mecanismo compartimentado capaz de acumular CO₂ em torno da Rubisco, restringindo a competição com o O₂ e as taxas de 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 na 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 e Long, (2005) corrobora 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) descreve a taxa de assimilação líquida de CO₂ a nível foliar por meio empírico e explica sob os processos concorrentes de carboxilação e oxigenação da Rubisco. Para estes 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 taxa de carboxilação, porém se a limitação passa a ser a regeneração desta enzima, os ganhos no processo fotossintético passa a ser limitante. 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.

8. 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 deste autor 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 (Leakey, (2009).

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 estes comportamentos em plantas de metabolismo C4 ainda estão sendo debatidos na literatura (Leakey, 2009, Ainsworth & Long, 2005; Ainsworth & Rogers, 2007).

A alta variabilidade encontrada na literatura com relação a resposta da fotossíntese ao incremento do CO₂ pode estar ligado 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 (Leakey, 2009; Ainsworth & Long, 2005; Ainsworth & Rogers, 2007).

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 o incremento do CO₂ foi possível observar pouco ou nenhuma melhora da fotossíntese em plantas de sorgo (de 370ppm para 570ppm de CO₂), grama *Paspalum dilatatum* (de 370ppm para 475ppm de CO₂), e milho (de 370ppm para 570ppm de CO₂). Porém em estudos em que foram observadas respostas positivas na fertilização por CO₂, Leakey, (2009) justifica pelo crescimento em CO₂ elevado 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 de carbono.

Dessa forma, os níveis elevados de CO₂ ambiente tendem a ser benéficos em plantas de metabolismo C4 apenas sob condições de estresse hídrico (Leakey, 2009). Tais resultados corroboram com os encontrados por Ainsworth e Rogers, (2007). Ainsworth e Long (2005) também encontraram em suas buscas por incremento da fotossíntese em elevadas concentrações de CO₂ ao ar livre, aumentou em 31% 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 e Long, (2005) em seu levantamento literário, encontraram trabalhos que apresentaram tanto respostas com ganhos significativos para ambas espécies como encontraram também trabalhos que não apresentaram ganhos em espécies C4 como se esperam alguns autores.

9. 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 como o principal agente causador do aumento da temperatura terrestre, modificando também a aptidão climática para as culturas agrícolas (Castro, et al., 2020).

As projeções no aumento da concentração de CO₂ 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 sugerem que as espécies C3 apresentem maior crescimento, devido a melhor aproveitamento do gás pela enzima Rubisco em relação às plantas de metabolismo C4. Logo, espécies com metabolismo C3 tendem a apresentar 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 plantas daninhas perenes sejam de mais difícil controle, caso estimulem a produção de rizomas e outros órgãos de armazenamento.

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 (Patterson, 1995).

10. Considerações Finais

O aumento do gás carbônico beneficia o crescimento tanto das plantas de metabolismo C3 quanto de metabolismo C4, afetando em maior escala o crescimento de plantas C3.

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 reduzir a competição com plantas daninhas, pois o crescimento de plantas daninhas também será favorecido e poderá interferir na competição por nutrientes, e assim, reduzir a produtividade das culturas.

Referências

- Ainsworth, E. A. & Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant Cell Environ*, 30, 258–270.
- Ainsworth, E. A. & Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol*, 165, 351–371.
- Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Ort, D. R. & Long, S. P. (2008). FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. *New Phytol*, 179, 5–9.
- Ainsworth, E. A., & Ort, D.R. (2010). How do we improve crop production in a warming world? *Plant Physiol*, 154(2), 526-530.
- Ambrizzi, T. & Araújo, M. (2020). Base científica das Mudanças Climáticas - PBMC. *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/RAN1_completo_vol1.pdf
- Bao, J., Lu, W. H., Zhao, J. & Bi, T. X. (2018). Greenhouses for CO₂ sequestration from atmosphere. *Science Direct*, 1, 183-190.
- Bastos, A., Ciaís, P., Chevallier, F., Rodenbeck, C., Ballantine A. P., Maignan, F., Yin, Y., Martinez, M. F., Friedlingstein, L., Penuelas, J., Piao, S. L., Smith, W. K., Wang, X., Zhu, Z., Haverd, V., Kato, E., Jain, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Nabel, J. E. M. S., Peylin, P., Poulter, B. & Zhu, D. (2019). Contrasting effects of CO₂ fertilization, land-use change and warming on seasonal amplitude of Northern Hemisphere CO₂ exchange. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 12361–12375.
- Bergamaschi, H. & Matzenauer, R. (2014). O milho e o clima. *Emater/RS Ascar*.
- Bernacchi, C. J., Leakey, A. B. D., Heady L. E., Morgan, P. B., Dohleman, F. G., McGrath, J. M., Gillespie, K. M., Wittih, V. E., Rogers, A., Long, S. P. & Ort, D. R. (2006). 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*, 29(11), 2077-2090.
- Bernacchi, C. J., Kimball, B. A., Quarles, D. R., Long S. P. & Ort, D. R. (2007). Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant Physiology*, 143(1), 134-144.
- Busch, F. & Sage, A. R. (2017). The sensitivity of photosynthesis to O₂ and CO₂ concentration identifies strong Rubisco control above the thermal optimum. *New Phytologist*, 213(3), 1036-1051.
- Castro, F. S., Xavier, A. C., Pimenta, L. R., Elesbon, A. & Alexandre, A. (2020) *Brazilian Journal. of Development.*, 6(5), 28410-28427.
- Carvalho, S. J. P. & Christoffoleti, P. J. (2007). Influência da luz e da temperatura na germinação de cinco espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus*. *Bragantia*, 66(4), 527-533.
- CONAB – Companhia Nacional De Abastecimento. (2020). <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3549-producao-de-graos-sinaliza-recorde-final-de-253-7-milhoes-de-toneladas>.
- Daud, M., Bustam, B. M. & Arfin, B. A. (2019). Comparative study of carbon dioxide absorption capacity of seven urban Forest plant species of Banda Aceh, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(11).
- Donohue, R. J., Roderick M. L., Mcvicar, T. R. & Farquar, G. D. (2013). Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid environments. *Geophysical Research Letters*, 40, 3031–3035.

- Dorneles, K. R., Posso, D. A., Rebhahn, I., Deuner, S., Pazdiora, P. C., Avila, L. A. & Dallagnol, L. J. (2019). Respostas morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo mediados pelo aumento da concentração de CO₂ atmosférico. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 14(1), 1981-1997.
- Galmés, J., Carmen, H. C., Lauri, L. & Ülo N. (2016). A compendium of temperature responses of Rubisco kinetic traits: variability among and within photosynthetic groups and impacts on photosynthesis modeling. *Journal of Experimental Botany*, 67(17), 5067–5091.
- Galmés J., Capo´-Bauc, S., Ülo, N., & Iiguez, C. (2019). Potential improvement in crop photosynthesis by exploiting Rubisco variability. *Current Opinion in Plant Biology*, 49, 60–67.
- Gandin, A., Koteyeva, N. K., Voznesenskaya, E. V., Edwards, G. E. & Cousins, A. B. (2014). Temperature response of C₃–C₄ intermediates. *Plant Cell Environ*, 37, 2601-2612.
- Gil, A. C. (2017). Pós-Graduação-Metodologia-Como Elaborar Projetos de Pesquisa - Cap 2.
- 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*, 108, 20428-20433.
- Hong, C. Y., Lee, Y. C., Tsai, M. C., & Tsai, Y. C. (2018). 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*, 8(6), 339-345.
- IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2020) <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-1/>
- Leakey, A.D. (2009). Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C₄ crops for food and fuel. *Proceedings of The Royal Society B*, 276(1666) 2333-2343.
- Long S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nösberger, J. & Ort, D.R. (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312, 1918–1921.
- Long S. P., Marshall-Colon, A. & Zhu, X.G. (2015). Meeting the global demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell*, 16, 56-66.
- Mackinder, L. C. M. (2018). The Chlamydomonas CO₂: concentrating mechanism and its potential for engineering photosynthesis in plants. *New Phytologist*, 217(1), 54-61.
- Magalhães, P. C., Durães, F. O. M., Carneiro, N. P. & Paiva, E. (2002) Fisiologia do milho. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS. 23 p. (Circular Técnica, n. 22).
- Melo, L. C. Del Peloso, M. J., Pereira, H. S., Faria, L. C., Costa, J. G. C., Díaz, J. L. C., Rava, C. A., Wendland, A. & Abreu, A. F. B. (2010). BRS Estilo: common bean cultivar with Carioca grain, upright growth and high yield potential. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* (Online), Viçosa, 10(4), 377-379 http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-70332010000400015&lng=en&nrm=iso
- Mondo, V. H. V., Carvalho, S. J. P., Diaz, A. C. R., & Marcos Filho, J. (2010). Efeitos da luz e temperatura na germinação de sementes de quatro espécies de plantas daninhas do gênero Digitaria. *Rev. Bras. Sementes*, Londrina, 32(1), 131-137.
- NOAA. 2017. National Climatic Data Center, State of the Climate. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>
- Oliveira, V. F., Silva, E. A., Zaidan, L. B. P. & Carvalho, M. A. M. (2013). Effects of elevated CO₂ concentration and water deficit on fructan metabolism in *Viguiera discolor* Baker. *Plant Biology*, 15, 471-482.
- Patterson, D. T. Weeds in a changing climate, *Weed Science*, 43, 685–700.
- Renato, N. S., Sedyama, G. C., Silva, J. B. L. & Pereira, E. G. (2018). Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO₂ elevados. *Rev. de Ciências Agrárias*, 41(4), 211-220.
- Rogers, A., Allen, D. J., Davey, P. A., Morgan, E. A., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Cornoc, G., Dermody, O., Dohleman, F. G., Heaton, E. A., Mahoney, J., Zhu, X. G., Delucia, E. H., Ort, D. R. & Long, S. P. (2004). Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown throughout their lifecycle under Free air Carbon Dioxide Enrichment. *Plant, Cell & Environment*, 27, 449–458.
- Ruiz-Vera, U. M., Siebers, M., Gray, S. B., Drag, D. W., Rosenthal, D. M., Kimball, D. A., Ort, D. R. & Bernacchi, C. J. (2013). Global warming can negate the expected CO₂ stimulation in photosynthesis and productivity for soybean grown in the Midwestern United States. *Plant Physiology*, 162(1), 410-423.
- Sanches, R. F. E., Catarino, I. C. A., Braga, M. R & Silva, E. A. (2017). Influência da alta concentração atmosférica de CO₂(↑[CO₂]atm) × disponibilidade hídrica nas relações hídricas, trocas gasosas e acúmulo de carboidratos em *Coffea arabica* L. *Hoehnea*, 44(4), 635-643.
- Santos, D, Haerbaert, F. M., Lucio, A. D., Lindolfo, S. & Cargnelutti Filho, A. (2012). Tamanho ótimo de parcela para a cultura do feijão-vagem. *Rev. Ciênc. Agron*, 43(1) 119-128.
- Snak, C., Miotto, S. T. S. & Goldenberg, R. (2011). *Phaseolinae* (Leguminosae, Papilionoideae, Phaseoleae) no estado do Paraná, Brasil. *Rodriguésia*. 62, 695-716.
- 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. J. (2019). BRS FP403: cultivar de feijão preto com alta produtividade e qualidade de grãos, moderada resistência à murcha de Fusarium e podridões radiculares. *Comunicado Técnico 247*.

- Souza, M. T., Silva, M. D., & Carvalho, R. (2010). Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein*, 8(1), 102-106.
- Van der Slepen, 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*, 8, 24-28.
- Von Caemmerer S. (2000). *Biochemical Models of Leaf Photosynthesis*. CSIRO, Collingwood, Austrália
- 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.
- Wang, J., Hasegawa, T., Li, L., Lam, S. K., Zhang, X., Liu, X. & Genxing, P. (2019). 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*, 222(2),726-734.
- Wang J., Liu X., Zhang X., Smith P., Li L., Filley, T. R., 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 40–49.
- wang, T., Huang, J., He, X., Wu, J., Fang, M. & Cheng, J. (2014). CO₂ Fertilization system integrated with a low-cost direct air capture technology. *Energy Procedia*, 63, 6842-6852.
- Walter, L. C., Rosa, H. T. & Streck N. A. (2015). Mecanismos de aclimação das plantas a elevada concentração de CO₂. *Ciencia Rural*, 45(9), 1564.
- Wilker, J. L., Navabi, A., Rajcan, I., Marsolais, F., Hill, B., Torkamaneh, D. & Pauls, K. P. (2019). Agronomic Performance and Nitrogen Fixation of Heirloom and Conventional Dry Bean Varieties Under Low-Nitrogen Field Conditions. *Frontiers in Plant Science*.10, 952.
- Yamori, W., Suzuki, K. Noguchi, K. Nakai, M., & Terashima, I. (2006). Effects of rubisco kinetics and rubisco activation state on the temperature dependence of the photosynthetic rate in spinach leaves from contrasting growth temperatures. *Plant, Cell, Environment*, 29(8), 1659-1670.