UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS

PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOINFORMÁTICA

JANAINA DA SILVA FORTIRER

Meta-análise do efeito da elevada concentração de CO_2 atmosférico em espécies neotropicais

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - 88882.461730/2019-01

São Paulo

2021

JANAINA DA SILVA FORTIRER

Meta-análise do efeito da elevada concentração de CO_2 atmosférico em espécies neotropicais

Versão Corrigida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Bioinformática da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Bioinformática
Orientador: Prof. Dr. Marcos Silveira Buckeridge
Coorientadora: Profa. Dra. Camila de Toledo Castanho
Colaboração: Dra. Adriana Grandis

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Janaina da Silva Fortirer

Meta-análise do efeito da elevada concentração de CO_2 atmosférico em espécies neotropicais - Janaina da Silva Fortirer; Orientador: Prof. Dr. Marcos Silveira Buckeridge. Coorientadora: Profa. Dra. Camila de Toledo Castanho. Colaboração: Dra. Adriana Grandis. São Paulo – SP, 2021.
90 p.

Meta-analysis of the effect of the elevated concentration of atmospheric CO_2 in neotropical species – Janaina da Silva Fortirer; Supervisor: Prof. Marcos Silveira Buckeridge. Joint supervisor: Prof. Camila de Toledo Castanho. Colaboration: PhD. Adriana Grandis. São Paulo – SP, 2021.
90 p.

Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Bioinformática).
1 - Instituto de biociências, IB - USP.
2 – Instituto de Matemática e Estatística, IME -USP
Universidade de São Paulo, 2021.

Programa Interunidades de Pós-Graduação em Bioinformática
Área de concentração: Bioinformática

1- Mudanças climáticas. 2 – Brasil. 3 – Fotossíntese. 4 - Espécies tropicais 5 – Elevado CO_2. 6 -Alta temperatura. 7 - Fisiologia vegetal. 8 - Espécie neotropical. 9 – Crescimento. 10 – Carbono.

1- Climate change. 2 – Brazil. 3 – Photosynthesis. 4 – Tropical species. 5 – Elevated CO_2. 6 – High temperature. 7 - Plant physiology. 8 – Neotropical species. 9 – Growth. 10 – Carbon.

Agradecimentos

Agradeço a Marinete Alberto da Silva, Jean-Marie Carmain Fortirer, Gabriel Edouard da Silva Fortirer e Charles-Edouard da Silva Fortirer.

À Universidade de São Paulo pela oportunidade de desenvolver este estudo.

A orientação fornecida pelo Dr. Marcos Silveira Buckeridge, Dra. Camila de Toledo Castanho e Dra. Adriana Grandis.

Aos meus amigos: Antonio Deusany Carvalho Junior, Crislaine Almeida, Kelly Jaqueline Alves, Lucas Vinícius Domingues, Marcelo Henrique Donegá Martins de Souza e Stephanie Albuquerque.

Agradeço aos professores que foram importantes para minha formação acadêmica: Dr. André Fujita, Dr. Cláudio Gonçalves Tiago, Dr. Eduardo Santos, Dr. Luciano Martins Verdade, Dr. Marcos Sorrentino, Dr. Ricardo Leite Camargo, Dra. Taitiâny Karita Bonzanini e Valéria Flora Hadel.

Aos colegas do Laboratório de Fisiologia Ecológica de Plantas (Lafieco): Amanda Rusiska, Arthur Cambler, Bruno Viana Navarro, Carmen Palacios, Débora Pagliuso, Eglee Igarashi, Evelyn, Grayce Romim, Giuliano Locosseli, João Pereira, Mariana Latarullo, Marina Soldi, Lauana Oliveira, Laura, Marcela, Vinicius Jardim e Viviane Costa.

Aos integrantes do grupo Internet das Coisas - InterHortas: Antonio, Celso, Késsia, Letícia, Luan e Silvia.

Agradeço todo o suporte fornecido pela secretaria da pós-graduação: Cristiane de Fátima Braulino, Márcia Ferreira e Marlene Rodrigues.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por financiar este estudo.

Agradeço a todos que de alguma forma participaram na realização deste estudo.

Sumário

Lista de abreviaturas e siglas 8

Resumo 9

Introdução geral 13

Mudanças climáticas e o efeito do elevado CO_2 na vegetação 13

Referências bibliográficas 17

CAPÍTULO I: 23

Importância da meta-análise em estudos envolvendo respostas das plantas às mudanças climáticas no Brasil 23

Resumo 24

Abstract 25

1. Introdução 26

2. Metodologia 29

2.1 Como obter os dados para realizar a meta-análise 29

2.2 Como aplicar uma meta-análise 30

3 Resultados e discussão 31

3.1 Histórico das conferências sobre mudanças climáticas e o impacto na produção de estudos meta-analíticos sobre o efeito do eCO_2 nas plantas 31

3.2 Análise integrativa das variáveis que são contempladas em estudos brasileiros elegíveis para uma meta-análise sobre respostas das plantas às mudanças climáticas 36

4. Conclusão 40

5. Referências bibliográficas 42

CAPÍTULO II: 50

Efeito do elevado CO_2 na fotossíntese, carboidratos e biomassa de árvores e herbáceas em clima tropical do Brasil: meta-análise 50

Resumo 51

Abstract 52

1. Introdução 53

2. Metodologia 56

2.1. Busca na literatura 56

2.2. Meta-análise 58

3. Resultados 60

3.1. Parâmetros fotossintéticos são estimulados em plantas em clima tropical sob elevado CO_2 61

3.2. O amido é o carboidrato não estrutural que aumenta a concentração em folhas em plantas sob elevado CO_2 65

3.3. A biomassa aumenta em resposta ao elevado CO_2 e é diferente entre árvores e herbáceas 66

3.4. Heterogeneidade e viés de publicação 67

4.1. Assimilação fotossintética é maior em elevado CO_2 e semelhante entre herbáceas e árvores 69

4.2. Amido é o carboidrato não estrutural que mais se acumula nas folhas de plantas submetidas ao elevado CO_2 72

4.3. O efeito do elevado CO_2 na biomassa é maior em árvores do que em herbáceas 73

4.4. As respostas das plantas em clima tropical no Brasil se assemelham às respostas em clima temperado 74

5. Conclusões 75

6. Referências bibliográficas 76

Referência bibliográfica dos trabalhos utilizados na meta-análise 87

Conclusão final 92

Anexos 93

Lista de abreviaturas e siglas

A	taxa de assimilação líquida de CO_2 (µmol m^{-2} s^{-1})
aCO_2	concentração ambiente de CO_2 atmosférico
AST	Açúcares solúveis totais
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
C	carbono
C3	plantas com via fotossintética C3
C4	plantas com via fotossintética C4
Ca	fração molar de CO_2 atmosférico (µmol mol^{-1} s^{-1})
Ci	concentração interna de CO_2 na câmara estomática do mesófilo (µmol mol^{-1} s^{-1})
Ci/Ca	taxa de CO_2 intercelular e ambiental
CO_2	dióxido de carbono
eCO_2	elevado níveis de CO_2 atmosférico
E	taxa de transpiração foliar (taxas de transpiração de água (mmol m^{-2} s^{-1})
EUA	eficiência fotossintética do uso da água (A/E (µmol CO_2 mol H_2O^{-1}))
FACE	*Free Air CO_2 Enrichment*
gs	condutância estomática (µmol m^{-2} s^{-1})
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
J_{max}	taxa máxima de transporte de elétrons (µmol m^{-2} s^{-1})
Lafieco	Laboratório de Fisiologia Ecológica de Plantas
OTC	*Open Top Chambers*
ppm	partes por milhão
Rd	taxa de respiração foliar no escuro
Vc_{max}	velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (µmol m^{-2} s^{-1})
USP	Universidade de São Paulo
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

Resumo

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou desde a revolução industrial até a atualidade. O aumento de CO_2 na atmosfera pode resultar em alterações fisiológicas e bioquímicas, que podem influenciar no crescimento das plantas e mudar o metabolismo dos carboidratos. O Brasil é a nação tropical mais rica em termos de armazenamento de carbono florestal e detentora da maior biodiversidade do planeta. Contudo, trabalhos sobre o efeito do elevado CO_2 (eCO_2) nas plantas em clima neotropical, em especial do Brasil, não têm sido incluídos em meta-análises globais. Portanto, este trabalho tem como objetivo sintetizar quantitativamente o conhecimento atual sobre o efeito de eCO_2 na vegetação brasileira em experimentos com CO_2 realizados no Brasil. Este trabalho está dividido em dois capítulos. O Capítulo I discute a importância da meta-análise em si e seu valor para compreender as respostas das plantas ao eCO_2. O Capítulo II apresenta uma meta-análise de estudos efetuados com plantas no Brasil em eCO_2. O primeiro capítulo revisa os eventos históricos a respeito da evolução do conhecimento sobre as mudanças climáticas globais no planeta e aponta a meta-análise como ferramenta de grande importância para compreender a fisiologia das plantas em resposta ao aumento de CO_2. Propomos neste trabalho o uso de meta-análise para compilar os dados existentes sobre mudanças climáticas. Portanto, entendemos que a meta-análise é uma metodologia estatisticamente rigorosa para integrar resultados de pesquisas primárias sobre o efeito das mudanças climáticas na vegetação. Identificamos que o número de algumas variáveis (C, N e área foliar) comumente medidas em experimentos que analisam as respostas das plantas às mudanças climáticas não estão presentes em número suficiente de estudos para realizar uma meta-análise e discutimos como realizar estudos considerando as variáveis necessárias em futuras meta-análises. A meta-análise do segundo capítulo inclui 36 trabalhos, selecionados a partir de uma revisão sistemática, com experimentos de Câmaras de Topo Aberto (OTC) ou *Free-air CO_2 Enrichment* (FACE) que pesquisaram o efeito do eCO_2 em plantas. Nossa meta-análise verificou que a exposição das plantas ao eCO_2 resultou no aumento médio significativo da biomassa (+30%), na taxa de assimilação líquida de CO_2 (+49%), na eficiência fotossintética do uso da água (+116%), aumento dos níveis de açúcares solúveis totais nas folhas (+7%), na concentração de amido foliar (+58%) e diminuição da condutância estomática (-23%). Não houve mudança nas respostas na taxa de transpiração (E), taxa de CO_2 intercelular por CO_2

atmosférico (Ci/Ca), taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) e velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}) em plantas expostas ao eCO_2. O hábito de vida das espécies alterou significativamente a resposta da biomassa em árvores e herbáceas, sendo que árvores jovens acumulam mais biomassa do que as herbáceas quando expostas ao eCO_2. Em ambos os capítulos, destacamos a importância de que mais estudos sejam realizados com espécies nativas e cultivadas em clima neotropical para melhorar nossa compreensão preditiva das respostas das plantas tropicais ao eCO_2.

Palavras-chave: mudanças climáticas, Brasil, fotossíntese, crescimento, carbono, espécies tropicais.

Abstract

The concentration of carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere has increased since the industrial revolution to the present. The increase in CO_2 in the atmosphere can result in physiological, biochemical changes. In addition to influencing plant growth and changing carbohydrate metabolism. Brazil is the richest tropical nation in terms of forest carbon storage and the greatest biodiversity on the planet. However, studies on the effect of high CO_2 (eCO_2) on plants in the Neotropical climate, especially in Brazil, have not been included in global meta-analyzes. Therefore, this work aims to quantitatively synthesize current knowledge about the effect of eCO_2 on Brazilian vegetation in experiments with CO_2 carried out in Brazil. This work is divided into two chapters. Chapter I discusses the importance of meta-analysis itself and its value for understanding plant responses to eCO_2; Chapter II presents a meta-analysis of studies carried out with plants in Brazil in eCO_2. The first chapter reviews historical events regarding the evolution of knowledge about global climate changes on the planet and points to meta-analysis as a tool of great importance to understand the physiology of plants in response to the increase in CO_2. In this work, we propose the use of meta-analysis to compile the existing data on climate change. Therefore, we found that the meta-analysis was a statistically rigorous methodology for integrating results of primary research on the effect of climate change on vegetation. We found that the number of some variables (C, N and leaf area) commonly measured in experiments that analyze plant responses to climate change are not present in a sufficient number of studies to perform a meta-analysis. We discussed how to conduct studies considering the variables needed in future meta-analyzes. The second chapter meta-analysis includes 36 studies, based on a systematic review, with Open Top Chambers (OTC) or Free-air CO_2 Enrichment (FACE) experiments that investigated the effect of eCO_2 on plants. Our meta-analysis found that plant exposure to eCO_2 resulted in a significant average increase in biomass (+ 30%), in the net CO_2 assimilation rate (+ 49%), instantaneous leaf water use efficiency (+ 116%), increased levels of total soluble sugars (+ 7%), starch concentration (+ 58%) and decreased stomatal conductance (-23%). Significant changes have not been observed in the responses in the transpiration rate (E), ratio of intercellular to atmospheric CO_2 concentration (Ci/Ca), maximum rate of electron transport (J_{max}), and maximum carboxylation rate (Vc_{max}) in plants exposed to the eCO_2. The species' habit of life significantly altered the response of biomass in trees and herbaceous, with young trees accumulating more biomass than herbaceous when exposed to eCO_2. In both

chapters, we highlight the importance of further studies being carried out with native species and cultivated in a neotropical climate to improve our predictive understanding of the responses of tropical plants to eCO_2.

Keywords: climate change, Brazil, photosynthesis, growth, carbon, tropical species.

Introdução geral

Mudanças climáticas e o efeito do elevado CO_2 na vegetação

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou cerca de 46% desde a revolução industrial até a atualidade (CO2.EARTH, 2020; LINDSEY, 2019). O aumento de CO_2 atmosférico é consequência do uso de combustíveis fósseis, desmatamento de florestas e mudanças no uso da terra (HOUGHTON, 2001; IPCC, 2014, 2021). A projeção do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), no cenário mais pessimista, é que em 2100 os níveis de CO_2 subam para 1300 ppm (IPCC, 2014) (IPCC, 2014).

O dióxido de carbono é um dos gases do efeito estufa (GEE) e o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera contribui para as mudanças climáticas globais (IPCC, 2014, 2021). A elevada concentração de CO_2 atmosférico pode ser reduzida pelas plantas que assimilam o CO_2 para realizarem a fotossíntese (DE GRAAFF *et al*., 2006). Nesse sentido, a manutenção e recuperação da vegetação terrestre é o principal meio de sequestrar carbono (NOBRE; NOBRE, 2002), sendo que as plantas tropicais e subtropicais alocam metade (52%) do carbono disponível na superfície terrestre na forma de biomassa (AINSWORTH; LONG, 2005; KÖRNER, 2009). Estudos mostram que as mudanças climáticas podem influenciar diretamente as espécies nativas de árvores e as espécies cultivadas no Brasil, sendo que o elevado CO_2 pode afetar negativamente a produção agrícola (DAMATTA *et al*., 2010; IPCC, 2014).

O aumento de CO_2 na atmosfera pode resultar em mudanças nos processos fisiológicos das plantas, como o metabolismo dos carboidratos, e influenciar no crescimento (ARENQUE *et al*., 2014; PALACIOS *et al.* 2019). Na fotossíntese, a taxa de assimilação de CO_2 geralmente aumenta quando as plantas são expostas a uma concentração de CO_2 atmosférico elevado (eCO_2), enquanto a condutância estomática (gs), taxa de respiração foliar no escuro (Rd) e a taxa de transpiração diminui sob eCO_2 (AINSWORTH *et al.*, 2003; CURTIS, 1996; CURTIS; WANG, 1998; YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2017). Também pode ocorrer a diminuição da velocidade máxima de carboxilação (V_{cmax}) e indiretamente a diminuição da taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) (AINSWORTH *et al*., 2003).

A síntese de carboidratos ocorre por meio da assimilação de carbono na fotossíntese (LAMBERS; CHAPIN III; PONS, 2008). Esse processo está relacionado às taxas de assimilação de CO_2 e o eCO_2 pode influenciar no metabolismo de carboidratos. As alterações fisiológicas

podem aumentar a produção de carboidratos, influenciar no crescimento e o rendimento de espécies cultivadas (CAO *et al.*, 2017). O elevado CO_2 influencia na eficiência fotossintética (LEAKEY *et al.*, 2009; MORGAN *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2012) e geralmente aumenta a quantidade de carboidratos disponíveis na planta (ARENQUE *et al.*, 2014; PALACIOS, 2017). Pesquisas realizadas no Brasil também concluíram que o elevado CO_2 influência no metabolismo dos carboidratos não estruturais (glicose, sacarose, frutose) e no amido das plantas (AIDAR *et al.*, 2002; ARENQUE *et al.*, 2014; PALACIOS, 2017; MAYORGA, 2010; MORTARI, 2012). Plantas com hábitos de vida diferentes (arbóreas ou herbáceas) respondem diferentemente ao eCO_2 (AINSWORTH; LONG, 2005; AINSWORTH; ROGERS, 2007), sendo as plantas arbóreas mais responsivas ao eCO_2 no que concerne o crescimento (AINSWORTH; LONG, 2005; AINSWORTH; ROGERS, 2007). No entanto, esses efeitos precisam ser pesquisados a fim de melhorar a compreensão das respostas fisiológicas de cada grupo ao eCO_2 (ANDERSON-TEIXEIRA *et al.*, 2016; LONG *et al.*, 2006; NORBY *et al.*, 2001).

Existem experimentos que cultivam plantas e simulam o aumento de carbono na atmosfera. Uma das metodologias utilizadas para aumentar o CO_2 atmosférico nesses experimentos é denominada FACE (*Free Air Carbon Enrichment*), que permite o aumento de CO_2 em condições de campo sem alterar o microclima (AINSWORTH; LONG, 2021). O sistema FACE usa um anel com uma série de tubos de ventilação vertical ou horizontal que liberam jatos de ar enriquecido com CO_2 (eCO_2) e não usa estruturas de contenção do gás (MCLEOD; LONG, 1999). Já o sistema OTC (*Open Top Chambers*) consiste em uma estrutura metálica, com paredes laterais transparentes e a parte superior com uma abertura que permite a renovação do ar enriquecido com CO_2, que é distribuído a partir de um tubo circular por ventiladores que garantem uma distribuição uniforme do dióxido de carbono dentro da câmara (AIDAR *et al.*, 2002; DAMATTA *et al.*, 2010; MACHACOVA, 2010). Esses sistemas podem ser empregados para estudar as plantas em diversos ecossistemas, os mais estudados são de regiões temperadas (AINSWORTH; LONG, 2021; AINSWORTH; LONG, 2005) e pouco ainda se sabe sobre as espécies de plantas cultivadas em climas tropicais (JONES *et al.*, 2014).

O Brasil é a nação tropical mais rica em carbono florestal (63 bilhões de toneladas) (FAO, 2010) e detentora da maior biodiversidade do planeta (56.000 espécies de plantas conhecidas) (AGUIAR *et al.*, 2016; UNEP-WCMC, 2010), o que denota a importância do país para todas as economias globais. O Laboratório de Fisiologia Ecológica de Plantas (Lafieco), na

Universidade de São Paulo (USP), o Núcleo de Fisiologia e Bioquímica de Plantas do Instituto de Botânica e o Laboratório de cultura de tecidos vegetais, na Universidade Federal de Viçosa (UFV) o possuem pesquisas com os experimentos em eCO_2 com o sistema OTC (OLIVO *et al*., 2002; COSTA, 2004; MARABESI, 2007, O). O Climapest Face da Embrapa foi o primeiro FACE da América Latina e o primeiro a estudar a cultura do café no mundo (GHINI *et al.*, 2011). Em Ribeirão Preto, São Paulo, existe uma instalação FACE e OTC que desenvolve pesquisas com espécies tropicais (MARTINEZ *et al*., 2008; CURTARELLI, 2013; HABERMANN *et al*., 2020). O programa de pesquisa Amazon FACE foi criado em 2014 para realizar experimentos de campo sobre o efeito do eCO_2 em florestas na cidade de Manaus - Amazônia (LAPOLA; NORBY, 2018). O Amazon FACE vem trabalhando com OTCs instaladas no sub-bosque das áreas de estudo do FACE.

Um dos desafios desses experimentos é a duração da exposição ao eCO_2 nas plantas, pois algumas espécies têm longevidade maior que a duração do experimento. Neste sentido, modelos matemáticos podem ser usados para inferir o efeito a longo prazo do eCO_2 e inferir projeções de respostas a partir de dados experimentais (BAIG *et al.*, 2015; MEDLYN; JARVIS, 1999). No entanto, é necessário que esse grande fluxo de informações gerado por experimentos individuais esteja disponíveis, como banco de dados, para o desenvolvimento de modelos matemáticos (BAIG *et al.*, 2015; MEDLYN; JARVIS, 1999). As técnicas de revisão sistemática e meta-análise podem ser usadas para sintetizar os resultados experimentais (AINSWORTH; LONG, 2005; CURTIS; WANG, 1998; LIBERATI *et al*., 2009) e auxiliar na síntese de parâmetros importantes que possam ser usados em modelos matemáticos (MEDLYN; JARVIS, 1999; KATTGE; KNORR, 2007; MEDLYN; DEWAR, 1996; SMITH; DUKES, 2013).

A revisão sistemática é uma técnica que seleciona estudos primários sobre um determinado assunto ou questão para reunir evidências sobre o que já foi estudado (LIBERATI *et al*., 2009). Na elaboração da revisão sistemática é necessário identificar e descrever as etapas realizadas para a seleção de estudos e a extração de dados. Essas etapas devem seguir um protocolo que pode ser consultado e disponibilizado para tornar a revisão reprodutível (LIBERATI *et al*., 2009). Por outro lado, a meta-análise é um conjunto de métodos estatísticos que complementa a revisão sistemática, comparando quantitativamente os resultados de diferentes estudos que abordam a mesma questão (KORICHEVA; GUREVITCH; MENGERSEN, 2013). Ademais, a meta-análise determina o efeito do interesse comparando o

grupo controle com o grupo de tratamento. Além de auxiliar na síntese e fornecer uma visão geral dos resultados de um determinado tópico (GLASS, 1976).

Existem estudos de revisões sistemáticas e meta-análises sobre o efeito do eCO_2 na fisiologia das plantas. No entanto, esses estudos foram realizados principalmente para espécies de clima temperado (ver AINSWORTH; LONG, 2005; CURTIS, 1996; CURTIS; WANG, 1998; HAWORTH; HOSHIKA; KILLI, 2016; WAND *et al*., 1999; YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2017). No entanto, para termos uma compreensão mais ampla do efeito do eCO_2 sobre as plantas, é necessária a inclusão de espécies tropicais (AINSWORTH; LONG, 2005; JONES *et al*., 2014). Apesar de existirem estudos realizados no Brasil sobre o efeito do eCO_2 na vegetação brasileira, não há até o momento estudos de meta-análise que sintetizassem o efeito geral do eCO_2 nas espécies cultivadas e não cultivadas no Brasil. O presente trabalho visa cobrir esta lacuna.

Este trabalho está dividido em dois capítulos. O Capítulo I discute a importância da meta-análise em si e seu valor para compreender as respostas das plantas ao eCO_2. Revisa os eventos históricos a respeito da evolução do conhecimento sobre as mudanças climáticas globais no planeta e aponta a meta-análise como ferramenta de grande importância para compreender a fisiologia das plantas em resposta ao aumento de CO_2. O Capítulo II apresenta uma meta-análise de estudos efetuados com plantas no Brasil em eCO_2. Esta análise engloba 36 trabalhos selecionados a partir de mais de um milhar de trabalhos, que foram utilizados para extrair dados do comportamento das plantas em função do eCO_2.

Objetivo geral

Sintetizar quantitativamente o conhecimento atual sobre o efeito de eCO_2 na vegetação brasileira, utilizando como estratégia o emprego da meta-análise em estudos publicados.

Referências bibliográficas

AGUIAR, S.; SANTOS, I. S.; ARÊDES, N.; SILVA, S. Redes-Bioma: Informação e Comunicação para ação sociopolítica em ecorregiões. Ambiente & Sociedade, v. 19, n. 3, p. 233–252, 2016.

AIDAR, M. P. M.; MARTINEZ, C. A.; COSTA, A. C.; COSTA, P. M. F.; DIETRICH, S. M. C.; BUCKERIDGE, M. S. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on the establishment of seedlings of Jatobá, *Hymenaea Courbaril* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). Biota Neotropica, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2002. https://doi.org/10.1590/S1676-06032002000100008.

AINSWORTH, E. A.; DAVEY, P. A.; HYMUS, G. J.; OSBORNE, C. P.; ROGERS, A.; BLUM, H.; NOSBERGER, J.; LONG, S. P. Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with *Lolium perenne* grown for 10 years at two nitrogen fertilization levels under Free Air CO_2 Enrichment (FACE): Photosynthetic acclimation of L. perenne to elevated CO_2. Plant, Cell & Environment, v. 26, n. 5, p. 705–714, maio 2003. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01007.x.

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. 30 years of free‐air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? Global Change Biology, v. 27, n. 1, p. 27–49, jan. 2021. https://doi.org/10.1111/gcb.15375.

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New phytologist, v. 165, n. 2, p. 351–372, 2005.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO_2: mechanisms and environmental interactions: Photosynthesis and stomatal conductance responses to rising CO_2. Plant, Cell & Environment, v. 30, n. 3, p. 258–270, mar. 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x.

ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; WANG, M. M. H.; MCGARVEY, J. C.; LEBAUER, D. S. Carbon dynamics of mature and regrowth tropical forests derived from a pantropical database (TropForC-db). Global Change Biology, v. 22, n. 5, p. 1690–1709, maio 2016. https://doi.org/10.1111/gcb.13226.

ARENQUE-MUSA, B. C.; GRANDIS, A.; POCIUS, O.; DE SOUZA, A. P.; BUCKERIDGE, M. S. Responses of Senna reticulata, a legume tree from the Amazonian floodplains, to elevated atmospheric CO_2 concentration and waterlogging. Trees, v. 28, n. 4, p. 1021–1034, ago. 2014. https://doi.org/10.1007/s00468-014-1015-0.

BAIG, S.; MEDLYN, B. E.; MERCADO, L. M.; ZAEHLE, S. Does the growth response of woody plants to elevated CO_2 increase with temperature? A model-oriented meta-analysis. Global Change Biology, v. 21, n. 12, p. 4303–4319, dez. 2015. https://doi.org/10.1111/gcb.12962.

CAO, Y.; JIANG, M.; XU, F.; LIU, S.; MENG, F. The effects of elevated CO_2 (0.5%) on chloroplasts in the tetraploid black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). Ecology and Evolution, v. 7, n. 24, p. 10546–10555, dez. 2017. https://doi.org/10.1002/ece3.3545.

CO2.EARTH. CO_2 Earth: A Pro Oxygen Website. 2020. Disponível em: https://www.co2.earth. Acesso em: 27 ago. 2020.

COSTA, P. M. F. Efeitos da alta concentração de CO_2 sobre o crescimento e o estabelecimento de plântulas do jatobá de mata *Hymenaea courbaril*. Var. Stilbocarpa (Heyne) Lee & Langenheim (Leguminosae, Caesalpinioideae, Detarieae). 2004.

CURTARELLI, L. M. N. Efeitos da interação entre elevada temperatura (+2°C) e elevada concentração (600ppm) de CO_2 sobre a fisiologia de uma gramínea C4 (Poaceae) em sistema FACE/T-FACE. 2013. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Ciências Biológicas, FFCLRP/USP.

CURTIS, P. S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. Plant, Cell and Environment, v. 19, n. 2, p. 127–137, fev. 1996. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00234.x.

CURTIS, P. S.; WANG, X. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology. Oecologia, v. 113, n. 3, p. 299–313, 1998.

CURTIS, P. S.; WANG, X. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology. Oecologia, v. 113, n. 3, p. 299–313, 1998.

DAMATTA, F. M.; GRANDIS, A.; ARENQUE-MUSA, B. C.; BUCKERIDGE, M. S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. Food Research International, v. 43, n. 7, p. 1814–1823, ago. 2010. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.11.001.

DE GRAAFF, M; VAN GRAENIGEN, K.; SIX, J.; HUNGATE, B.; VAN KESSEL, C. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO_2: a meta-analysis. Global Change Biology, v. 12, n. 11, p. 2077–2091, nov. 2006. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01240.x.

MEDLYN, B. E.; JARVIS, P. G. Design and use of a database of model parameters from elevated CO_2 experiments. Ecological Modelling, v. 124, n. 1, p. 69–83, dez. 1999. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00148-9.

FAO. Global Forest Resources. Main Report. Main Report.: Forestry Paper Food and Agriculture Organization, 2010.

GHINI, R.; HAMADA, E.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; GONÇALVES, R. R. V. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. Summa Phytopathologica, v. 37, n. 2, p. 85–93, jun. 2011.https://doi.org/10.1590/S0100-54052011000200001.

GLASS, G.V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. Educational researcher, v. 5, n. 10, p. 3–8, 1976.

HABERMANN, E., CONTIN, D.R., VICIEDO, D. O., BARRETO, R. F., MORAES, M. A., OLIVEIRA, E. A. D., MARTINEZ, C.A. Efeitos das mudanças climáticas em plantas cultivadas e nativas: atual estado das pesquisas brasileiras. Avanços e Atualidades na Botânica Brasileira. Stricto Sensu Editora, 2020.

HAWORTH, M.; MOSER, G.; RASCHI, A.; KAMMANN, C.; GRÜNHAGE, L.; MÜLLER, C. Carbon dioxide fertilisation and supressed respiration induce enhanced spring biomass production in a mixed species temperate meadow exposed to moderate carbon dioxide enrichment. Functional Plant Biology, v. 43, n. 1, p. 26–39, 2016.

HOUGHTON, J. T.; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Orgs.). Climate change 2001: the scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2001.

IPCC. Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. EDENHOFER, O. (Orgs.). New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM. Acesso em 17 ago. 2021.

JONES, A. G.; SCULLION, J.; OSTLE, N.; LEVY, P. E.; GWYNN-JONES, D. Completing the FACE of elevated CO_2 research. Environment International, v. 73, p. 252–258, dez. 2014. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.021.

KATTGE, J.; KNORR, W. Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species. Plant, Cell & Environment, v. 30, n. 9, p. 1176–1190, set. 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01690.x.

KORICHEVA, J.; GUREVITCH, J.; MENGERSEN, K. Handbook of meta-analysis in ecology and evolution: Princeton University Press, 2013.

KÖRNER, C. Responses of humid tropical trees to rising CO_2. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, v. 40, p. 61–79, 2009.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. Plant physiological ecology. Springer Science & Business Media, 2008.

LAPOLA, D. M.; NORBY, R. J. Amazon-FACE: Assessing the effects of increased atmospheric CO_2 on the ecology and resilience of the Amazon forest. Science Plan and Implementation Strategy, 2018.

LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ROGERS, A.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Elevated CO_2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. Journal of Experimental Botany, v. 60, n. 10, p. 2859–2876, jul. 2009. https://doi.org/10.1093/jxb/erp096.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GØTZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A; CLARKE, M.; DEVEREAUX, P. J.; KLEIJNEN, J.; MOHER, D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. Journal of clinical epidemiology, v. 62, n. 10, p. e1–e34, 2009.

LINDSEY. Climate change: atmospheric carbon dioxide. 2019. Disponível em: https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide. Acesso em: 30 ago. 2020.

LONG, S. P.; ZHU, X.; NAIDU, S. L.; ORT, D. R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? Plant, Cell and Environment, v. 29, n. 3, p. 315–330, mar. 2006. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x.

MACHACOVA, K. Open top chamber and free air CO_2 enrichment - approaches to investigate tree responses to elevated CO_2. iForest - Biogeosciences and Forestry, v. 3, n. 4, p. 102–105, 15 jul. 2010. https://doi.org/10.3832/ifor0544-003.

MARABESI, M. A. Efeito do alto CO_2 no crescimento inicial e na fisiologia da fotossíntese em plântulas Senna alata (L.) Roxb. 2007.

MARTINEZ, C. A., DE OLIVEIRA, E. D., LEGRACIE, J. R., APPROBATO, A. The Effects of Elevated CO_2 on Tropical Trees Are Related to Successional Status and Soil Nutritional Conditions. In: Allen J.F., Gantt E., Golbeck J.H., Osmond B. (eds) Photosynthesis. Energy from the Sun. Springer, Dordrecht. 2008 https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6709-9_297

MAYORGA, A. Y. Desenvolvimento e efeito da concentração atmosférica de CO_2 e da temperatura em plantas juvenis de *Hymenaea courbaril* L., jatobá. 2010.

MCLEOD, A.R.; LONG, S.P. Free-air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) in Global Change Research: A Review. Advances in Ecological Research.: Elsevier, 1999. v. 28, p. 1–56. https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60028-8.

MEDLYN, B. E.; DEWAR, R. C. A model of the long-term response of carbon allocation and productivity of forests to increased CO_2 concentration and nitrogen deposition. Global Change Biology, v. 2, n. 4, p. 367–376, ago. 1996. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00087.x.

MORGAN, J. A.; MILCHUNAS, D. G.; LECAIN, D. R.; WEST, M.; MOSIER, A. R. Carbon dioxide enrichment alters plant community structure and accelerates shrub growth in the shortgrass steppe. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 104, n. 37, p. 14724–14729, 11 set. 2007. https://doi.org/10.1073/pnas.0703427104.

MORTARI, L. C. Efeitos de uma atmosfera enriquecida com CO_2 sobre a fotossíntese, o crescimento e o metabolismo de carboidratos do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). 2012.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. Estudos Avançados, v. 16, n. 45, p. 81–90, ago. 2002. https://doi.org/10.1590/S0103-40142002000200006.

NORBY, R. J.; COTRUFO, M. F.; INESON, P.; O'NEILL, E. G.; CANADELL, J.G. Elevated CO_2, litter chemistry, and decomposition: a synthesis. Oecologia, v. 127, n. 2, p. 153–165, abr. 2001. https://doi.org/10.1007/s004420000615.

PALACIOS, C. E. J. Efeito do déficit hídrico e CO_2 elevado sobre substâncias fenólicas e ligninas do sorgo var.BRS 330. 2017.

PALACIOS, C. J.; GRANDIS, A.; CARVALHO, V. J.; SALATINO, A.; BUCKERIDGE, M. S. Isolated and combined effects of elevated CO_2 and high temperature on the whole-plant biomass and the chemical composition of soybean seeds. Food Chemistry, v. 275, p. 610–617, mar. 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.052.

SMITH, N. G; DUKES, J. S. Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO_2. Global Change Biology, v. 19, n. 1, p. 45–63, jan. 2013. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02797.x.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME WORLD CONSERVATION MONITORING CENTRE. UNEP-WCMC Species Database.: Cambridge, 2010.

WAND, S. J. E; MIDGLEY, G. F.; JONES, M. H.; CURTIS, P. S. Responses of wild C4 and C3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO_2 concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. Global Change Biology, v. 5, n. 6, p. 723–741, 1999.

WANG, D.; HECKATHORN, S. A.; WANG, X.; PHILPOTT, S. M. A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO_2. Oecologia, v. 169, n. 1, p. 1–13, maio 2012. https://doi.org/10.1007/s00442-011-2172-0.

YAN, W.; ZHONG, Y.; SHANGGUAN, Z. Contrasting responses of leaf stomatal characteristics to climate change: a considerable challenge to predict carbon and water cycles. Global Change Biology, v. 23, n. 9, p. 3781–3793, set. 2017. https://doi.org/10.1111/gcb.13654.

CAPÍTULO I:

Importância da meta-análise em estudos envolvendo respostas das plantas às mudanças climáticas no Brasil

Janaina da Silva Fortirer, Adriana Grandis,
Camila de Toledo Castanho e Marcos Silveira Buckeridge.

Trabalho publicado na *Lecture Notes in Bioinformatics series.*

Resumo

A meta-análise sintetiza os resultados de pesquisas individuais sobre um tema específico e fornece tanto uma visão geral do estado de arte no tema como informações que indicam gargalos na pesquisa. Devido à grande produção de dados científicos na atualidade, as análises integrativas se tornam cada vez mais necessárias e factíveis. Com isto, apresentam pontos de vista mais consistentes num exame amplo. Temas amplos como as respostas de plantas às mudanças climáticas têm sido objeto de meta-análises desde 1996, uma vez que existe uma preocupação global sobre o efeito do CO_2 elevado em plantas cultivadas e de florestas. Propomos neste trabalho o uso de meta-análise para compilar os dados existentes, incluindo estudos relacionados aos efeitos da alta concentração de CO_2 na vegetação dos biomas brasileiros. Para isso, encontramos 36 artigos a partir de uma revisão sistemática. Parâmetros fisiológicos, como fotossíntese, área foliar e carboidratos não estruturais são essenciais para compreender as respostas das plantas ao elevado CO_2 usando meta-análise. No entanto, esses parâmetros não estão presentes em uma parte considerável da literatura, diminuindo o poder estatístico das estratégias meta-analíticas. A meta-análise das respostas das plantas é geralmente realizada com várias espécies, embora haja também estudos com uma única espécie. O uso de muitas espécies aumenta a variabilidade dos efeitos observados, destacando a necessidade de modelagem multinível para diminuir a dependência do resultado final nos dados de uma única espécie. Neste capítulo, discutimos como realizar estudos considerando as variáveis necessárias em futuras meta-análises. Este trabalho argumenta que uma melhor integração dos dados teria relevância significativa para os relatórios nacionais. Desta forma, esperamos que estratégias meta-analíticas possam ser utilizadas para a tomada de decisão nacional, complementando análises globais como as do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Palavras-chave: elevado CO_2, alta temperatura, fisiologia vegetal, espécie neotropical

Abstract

Meta-analysis synthesizes individual research results on the same subject and provides information that indicates bottlenecks in research. Due to the massive production of data, integrative analyzes are necessary, presenting more consistent views of biological phenomena. Broad themes such as plants' response to climate change have been the subject of meta-analyses since 1996, as there is a global concern about the effect of elevated CO_2 on plants and forests. We propose using meta-analysis to compile existing data, including studies related to the effects of high CO_2 on Brazilian biomes' vegetation. For that, we found 36 articles on the theme after a systematic review. Physiological parameters such as photosynthesis, leaf area, and non-structural carbohydrates are essential to understand the plant's responses to elevated CO_2 using meta-analysis. However, these parameters are not present in a considerable portion of the literature, decreasing the statistical power of meta-analytical strategies. The meta-analysis of plants' biological responses is usually performed with several species, although there are also studies with single species. The use of many species increases the variance of the effects, highlighting the need for multilevel modeling to decrease the final result's dependence on the single species data. We discuss how to carry out studies considering the variables needed in future meta-analyses to contribute to better data integration relevant to national reports. In this way, we expect that meta-analytical strategies could be essential for national decision-making and complement global analyses such as those made by the IPCC.

Keywords: elevated CO_2, high temperature, plant physiology, tropical species

1. Introdução

O número de publicações científicas está aumentando exponencialmente, sendo necessárias revisões que compilem esses dados para guiar as diversas áreas de estudo (NAKAGAWA *et al*., 2019). Por muitos anos essas revisões eram realizadas por *revisões narrativas* (HARRISON, 2011). No entanto, a *revisão narrativa* é subjetiva e muitas vezes pode não ser reprodutível, pois pode ser enviesada dependendo do ponto de vista e das preferências de cada autor (QUINTANA, 2015). Para atender essa demanda, as revisões vêm aplicando a metodologia da meta-análise, que incorpora uma *revisão sistemática* prévia para selecionar informações, seguindo critérios de inclusão pré-determinados, onde todas as etapas são documentadas (LIBERATI *et al*., 2009). A meta-análise é um conjunto de métodos estatísticos que compara quantitativamente os resultados de diferentes estudos que abordam uma questão em comum (GLASS, 1976; KORICHEVA; GUREVITCH; MENGERSEN, 2013). Além disso, apresenta dados qualitativos que indicam lacunas no conhecimento atual e novas pesquisas que precisam ser realizadas (NAKAGAWA et al., 2017). Em outras palavras, a meta-análise é a análise das análises (COOK, 1974). Desde que Glass (1976) utilizou pela primeira vez o termo "meta-análise", o método tem sido amplamente aplicado e desenvolvido nas áreas da medicina, sociologia, psicologia e educação (AHN; AMES; MYERS, 2012; RASOULI *et al*., 2017; SÁNCHEZ-MECA; MARÍN-MARTÍNEZ, 2010; TONG; GUO, 2019). Somente na década de 90 a meta-análise começou a ser utilizada na área de ecologia e biologia evolutiva (GUREVITCH, 1993; NAKAGAWA *et al*., 2017) e ainda não é amplamente conhecida nas ciências biológicas (NAKAGAWA *et al.*, 2017).

Há diversos estudos que mostram a resposta dos ecossistemas terrestres às mudanças climáticas, principalmente pelo aumento do CO_2 atmosférico. A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou cerca de ~280 ppm para ~410 ppm desde a revolução industrial até a atualidade (CO2.EARTH, 2020; LINDSEY, 2019). Esse aumento de CO_2 atmosférico se deve ao uso de combustíveis fósseis, queimada de florestas e a mudanças no uso da terra (IPCC, 1990, 2018). A projeção do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), no cenário mais pessimista, é que em 2100 os níveis de CO_2 aumentem para 1300 ppm (IPCC, 2014). Contudo o CO_2 não é apenas um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (HÖHNE *et al*., 2011; RUDDIMAN, 2003; SOLOMON *et al*., 2007) mas também é componente essencial para a fotossíntese, levando ao crescimento e ao aumento da produtividade

do ecossistema (AINSWORTH; LONG, 2005; KÖRNER, 2006; LLOYD; FARQUHAR, 1994; ROY; MOONEY; SAUGIER, 2001). Cerca de 40% da massa seca de uma planta consiste em carbono fixado pela fotossíntese (LAMBERS; CHAPIN III; PONS, 2008). O aumento da concentração de CO_2 resulta no aumento da temperatura. Juntos, os dois fatores exercem alterações significativas nos ecossistemas terrestres, como por exemplo mudança no padrão de chuvas de determinadas regiões (KÖRNER, 2006) ou ainda o aumento na mortalidade de árvores devido à falta de água ou queimadas de florestas (COCHRANE; BARBER, 2009; LOCOSSELLI *et al*., 2020; LOVEJOY; NOBRE, 2019; MALHI *et al*., 2009). Nesse sentido, compreender como as plantas podem responder ao aumento de CO_2 é um dos alvos de estudo importantes deste início de século. Os diversos trabalhos individuais têm empregado o estudo das três variáveis que mais serão afetadas no clima, que são CO_2, temperatura e estresse hídrico.

A meta-análise em mudanças climáticas tem sido aplicada em estudos com espécies de clima temperado e provou ser uma ferramenta valiosa neste campo de análise (AINSWORTH; LONG, 2005; CURTIS & WANG, 1998; HAWORTH *et al*., 2016; STEVENS *et al*., 2017; WAGNER *et al*., 2014; WAND *et al.*, 1999; YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2017b). O trabalho de (CURTIS; WANG, 1998) utilizou a meta-análise para sintetizar e interpretar mais de 500 estudos sobre os efeitos de CO_2 elevado chegando à conclusão que há um aumento de 28% no acúmulo de biomassa de árvores e que, quando acoplado a outros fatores ambientais o efeito é ainda maior. Em outra meta-análise, (WAND *et al*., 1999) mostraram que a biomassa aumenta 33% e 44% em plantas com fotossíntese C3 e C4, respectivamente, quando submetidas ao elevado CO_2. Em outra meta-análise que contempla 120 estudos individuais, foram descritos os principais efeitos sobre a fisiologia das plantas submetidas a elevado CO_2 pelo sistema *Free Air Carbon Enrichment* (FACE) (AINSWORTH; LONG, 2005). Os autores concluíram que as árvores foram mais responsivas do que as espécies herbáceas ao elevado CO_2 e que absorção de carbono em condições de saturação de luz, assimilação diurna de C, crescimento e produção acima do solo, aumentaram, enquanto área foliar específica e condutância estomática diminuíram em plantas expostas ao elevado CO_2. No entanto, estes estudos foram realizados apenas com plantas de clima temperado e se faz necessária a inclusão de estudos em clima tropical (AINSWORTH; LONG, 2005).

As florestas tropicais e subtropicais contribuem para a assimilação e armazenamento de carbono no planeta. No entanto, até 2009, as pesquisas com espécies tropicais representavam

menos de 10% dos estudos para esse ecossistema (KÖRNER, 2009). Apesar de representarem 13% da superfície da terra, as florestas tropicais, além de sua enorme diversidade genética, compõem um dos maiores reservatórios de carbono do mundo, armazenando-o na forma de biomassa, o que representa um estoque de 340 Gt/C que é, cerca de 52% de todo o carbono estocado (KÖRNER, 2009). Embora estudos de espécies tropicais individuais tenham sido publicados desde o início do século, por exemplo AIDAR *et al*. (2002), que relatou um efeito positivo no crescimento das árvores), apenas em 2009 (KÖRNER, 2009) a falta de experimentos com alto CO_2 em árvores e florestas com alta biodiversidade, como a Amazônia, passou a ser destacada de forma mais ampla por pesquisadores de fora do Brasil. O território brasileiro fica na maior área tropical da América do Sul. Possui seis biomas diferentes (Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pampa e Pantanal). Além disto, a região neotropical é frequentemente considerada um *hotspot* de biodiversidade (IBGE, 2021). Devido à riqueza de espécies tropicais encontrada no Brasil, estudos envolvendo aumento de CO_2 no crescimento e desenvolvimento das plantas desses biomas vêm sendo realizados (AIDAR *et al*., 2002; ARENQUE *et al*., 2014; BRAGA *et al*., 2006; DE FARIA; FERNANDES; FRANÇA, 2015; DE OLIVEIRA *et al.*, 2012; GHINI *et al*., 2014; MENDES DE REZENDE *et al*., 2015; OLIVO; MARTINEZ; OLIVA, 2002; PALACIOS *et al.*, 2019; RAKOCEVIC; MATSUNAGA, 2018) contribuindo para o conhecimento das respostas das plantas tropicais às mudanças climáticas. Além disso, diversos trabalhos de teses de mestrado e doutorado também foram realizados, os quais ainda não foram publicados e contribuem para análises meta-analíticas.

No entanto, ainda não há um estudo de meta-análise que sintetize o efeito total do alto CO_2 nas plantas tropicais do Brasil a partir desses dados publicados. Para cobrir esta lacuna, o presente trabalho teve como objetivos: 1) abordar a importância da metodologia da revisão sistemática com meta-análise para uso em estudos em mudanças climáticas; 2) Fornecer um panorama das pesquisas brasileiras sobre o efeito do elevado CO_2 em plantas tropicais e 3) discutir a realização de estudos futuros dos quais espécies e biomas devem ser priorizados, e alguns parâmetros que melhor respondam a variação do efeito do elevado CO_2 sobre as plantas. Essa forma de compilar os dados pode, no futuro, fortalecer a base científica para a adoção das melhores políticas públicas, constituindo uma base de dados sobre a resposta das florestas brasileiras às mudanças climáticas.

2. Metodologia

2.1 Como obter os dados para realizar a meta-análise

As etapas para realização de meta-análise seguem a estrutura da pesquisa científica: problema, pergunta, hipótese, método, coleta de dados, análise dos resultados (LEI *et al*., 2007). A coleta de dados no estudo de meta-análise é realizada por meio da uma revisão sistemática, que seleciona estudos primários e neste caso, estudos experimentais sobre respostas das plantas ao aumento de CO_2 (LIBERATI *et al*., 2009). Na revisão sistemática é necessário identificar e descrever todas as etapas realizadas na seleção de estudos e a extração de dados para que o resultado seja reprodutível (LIBERATI *et al.*, 2009) (Fig. 1A).

Neste trabalho, foi realizada a pesquisa de literatura na *Web of Science* para verificar o histórico de todos estudos que utilizaram o termo meta-análise para investigar o efeito do eCO_2 em plantas. As palavras utilizadas foram: "meta-analysis" OR "meta-analytic" AND "CO2" AND "plant", com atualização da pesquisa em 18 de agosto de 2020. Para ampliar a revisão sistemática, foi realizada uma busca em três bases de dados (*Web of Science*, *Scielo* e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações). As palavras utilizadas nesta pesquisa foram: "*elevated CO2*" OR "*increas* CO2*" OR "*CO2 enrichment*" OR "*rising CO2*" OR "*high* CO2*". Essa busca foi realizada em março de 2019.

A inclusão dos trabalhos encontrados nessas buscas seguiu os seguintes critérios: (I) estudos realizados no Brasil com o efeito do eCO_2 nas respostas fisiológicas em plantas; (II) experimentos com instalações FACE ou *Open-Top Chambers* (OTC); (III) estudos que contemplaram: o tamanho amostral, a média e o desvio padrão/erro do grupo controle e tratamento.

Depois de concluída todas as etapas da revisão sistemática, foi realizada a leitura do texto completo de todos os estudos primários brasileiros incluídos na meta-análise a fim de extrair os seguintes dados: nome da espécie, número amostral, média e desvio padrão/erro padrão para o grupo controle (CO_2 ambiente) e tratamento (elevado CO_2) para cada variável de interesse (Figura. 3), o tipo de experimento (FACE ou OTC) e duração do experimento.

As variáveis moderadoras contribuem para parte da variância observada numa meta-análise. A análise de moderador pode ser conduzida para determinar a fonte de heterogeneidade e o quanto isso contribui para a variabilidade observada de tamanhos de efeito

entre os estudos (NAKAGAWA *et al.*, 2017; QUINTANA, 2015). Neste sentido, as variáveis moderadoras verificadas foram o hábito de vida (arbórea ou herbácea) e a via fotossintética que a planta realiza (com metabolismo C3 ou C4) para verificar se essas variáveis moderadoras influenciam a magnitude das respostas das plantas ao eCO_2.

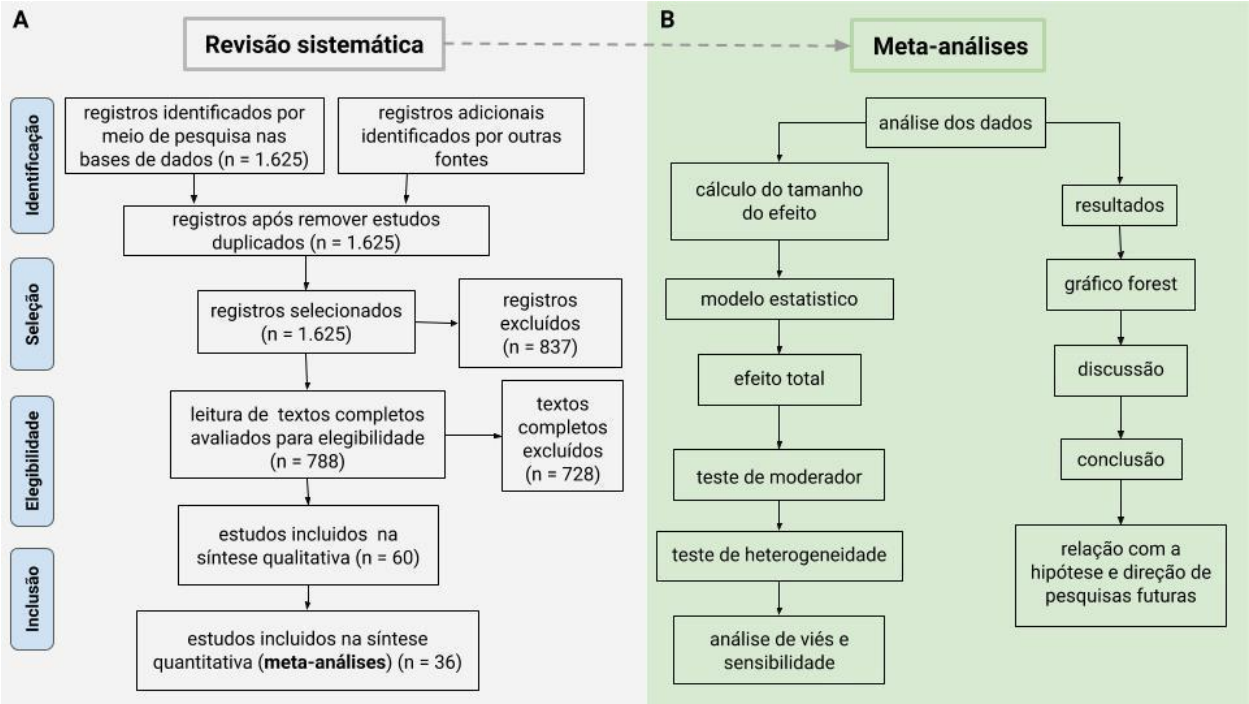

Figura 1. (**A**) Fluxograma mostrando as etapas da revisão sistemática, modificada a partir de (LIBERATI *et al.*, 2009). Números entre parênteses representam os dados obtidos na revisão sistemática realizada neste trabalho para publicações sobre os aumentos de CO_2 e suas respostas fisiológicas em plantas usando estudos individuais de plantas brasileiras. Depois de realizar a revisão sistemática e compilação de dados, (**B**) fluxograma que descreve as etapas para realizar uma meta-análise, baseado em LEI *et al.*, (2007).

2.2 Como aplicar uma meta-análise

Determinar o tipo de tamanho de efeito utilizado é a primeira etapa da análise de dados da meta-análise (LEI *et al.*, 2007) (Fig. 1B). O tamanho do efeito é a unidade básica da meta-análise e possibilita padronizar os resultados de estudos individuais fornecendo uma estimativa média do efeito do elevado CO_2 em relação ao CO_2 ambiente (BORENSTEIN, 2009; HARRISON, 2011; HEDGES; GUREVITCH; CURTIS, 1999). Em meta-análises que pesquisaram o efeito do elevado CO_2 nas plantas foi, geralmente, utilizada a escala logarítmica do tamanho do efeito (LEI *et al.*, 2007; LIN; XIA; WAN, 2010). Depois, da escolha do tamanho de efeito que melhor pode ser utilizado para o conjunto de dados extraídos dos estudos primários,

é necessário verificar se existe dependência dos dados. As pesquisas na área biológica podem incluir mais de uma análise no mesmo experimento e também existem diferentes estudos que pesquisam a mesma espécie, ou um estudo que pesquisa várias espécies. Esses tipos de dados, que são incluídos na meta-análise, requerem uma abordagem com modelo hierárquico, pois permitem dependência no conjunto de dados (NAKAGAWA *et al*., 2017; NAKAGAWA; SANTOS, 2012). Após escolher o tipo de modelo adequado e identificar as variáveis aleatórias que geram ausência de dependência entre as observações, é necessário efetuar o teste de heterogeneidade para determinar a variação entre os estudos e que não é atribuível à variância amostral (HIGGINS, 2003; NAKAGAWA *et al*., 2019; NAKAGAWA; SANTOS, 2012). Depois de quantificar a variação entre os tamanhos de efeito, é importante entender os fatores, ou moderadores, que podem explicar essa variação adicional para elucidar processos importantes que influenciem na variação no tamanho do efeito (NAKAGAWA *et al*., 2017).

Por fim, deve-se fazer o teste de viés de publicação. O viés de publicação ocorre ao fazer uma revisão sistemática com uma amostra de estudos não representativa da totalidade dos estudos realizados, como por exemplo incluir apenas estudos publicados em revistas indexadas, com resultados positivos que possuem maior probabilidade de serem publicados (HAWORTH *et al.*, 2016). Os métodos comumente usados para avaliar o viés de publicação são gráficos de funil (STERNE; EGGER, 2001) e o teste de *Egger* (EGGER *et al.*, 1997). Por último, é recomendável realizar o teste de sensibilidade para verificar a consistência dos dados e possíveis *outliers*.

Para este estudo, foi utilizado o pacote "*metafor*" (VIECHTBAUER, 2010) e os gráficos foram gerados com a utilização do pacote ggplot2 (WICKHAM, 2009), ambos no programa R versão 3.6.0 (R CORE TEAM, 2018).

3 Resultados e discussão

3.1 Histórico das conferências sobre mudanças climáticas e o impacto na produção de estudos meta-analíticos sobre o efeito do eCO_2 nas plantas

A Figura 2A apresenta os destaques históricos da evolução da consciência global sobre as mudanças climáticas. Essas etapas históricas são contrastadas com a evolução da publicação científica sobre os efeitos do CO_2 e da temperatura elevada nas plantas (Fig. 2B). Esses acontecimentos na história da conscientização sobre as mudanças climáticas destacam a

preocupação da sociedade, dos cientistas e do governo com as mudanças climáticas (Fig. 2A). Estas e muitas outras conferências, como as Conferências das Partes (COPs) e relatórios do IPCC têm mudado gradualmente a tomada de decisões políticas em todo o mundo. No entanto, para a formulação de políticas públicas eficazes para mitigar e se adaptar aos efeitos das mudanças climáticas, ainda é urgente produzir mais conhecimento científico sobre os impactos das mudanças climáticas em todo o mundo.

Devido às preocupações com a poluição do ar e a chuva ácida, em 1972, a primeira grande conferência da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre o meio ambiente foi realizada em Estocolmo (RIBEIRO, 2001) (Fig. 2). Após 18 anos, em 1990, o Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) da Nações Unidas, publicou o primeiro relatório sobre o aumento das concentrações dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera da Terra (IPCC, 1990). A partir disso, o Brasil passou a participar ativamente dessas discussões sobre o clima e o ambiente e, em 1992, realizou a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), chamada de Rio 92 (MRE, 2019). Essa conferência produziu um documento contendo a Declaração sobre Ambiente e Desenvolvimento, a Declaração de Princípios sobre Florestas e as Convenções sobre Biodiversidade, sobre Mudança Climática e Desertificação. Assim, a Agenda 21 foi criada no Brasil (MRE, 2019). Em 1995, a primeira Conferência das Partes (COP-1) foi realizada na Alemanha, e o Segundo Relatório do IPCC (WATSON *et al*., 1996) também foi publicado. Todo este histórico mostrou a preocupação da sociedade, dos cientistas e dos governantes com as mudanças climáticas, que resultou em tomadas de decisões políticas, onde foi verificada a necessidade de produzir mais conhecimento científico sobre o impacto das mudanças climáticas mundialmente.

A COP-3 foi realizada em 1997 em Kyoto, no Japão. Esta conferência gerou metas para redução de 5% das emissões dos GEE (UNFCCC, 1997). Os GEE são os principais fatores que aumentam as mudanças climáticas (HOUGHTON; IPCC, 2001) (Fig. 2A). Por volta desse período, surgiram na literatura as primeiras publicações de estudos primários relacionados a plantas e mudanças climáticas e, consequentemente, tornou-se possível a utilização de meta-análises para avaliar o efeito comum entre todos os experimentos (Fig. 2). Entre 1996 (ano de publicação da primeira meta-análise sobre este tema) até 2006, uma média de 4 artigos meta-analíticos foram publicados ao ano (Fig.2B). Em 2007, o dobro de estudos de meta-análises sobre o efeito do eCO_2 nas plantas foi identificado. Isso é consistente com a necessidade

mencionada anteriormente de estudos de análise de dados em grande escala para orientar relatórios globais, como o IPCC.

O quarto relatório do IPCC (2007) foi o que trouxe uma mensagem forte, confirmando que o aumento do CO_2 é resultado das atividades humanas. Uma das principais mensagens do relatório era que: *se medidas drásticas não fossem implementadas, o aquecimento global poderia ser irreversível*. Algumas formas de mitigação e adaptação aos cenários climáticos foram sugeridas (SOLOMON *et al*., 2007). Esse relatório foi significativo porque mostrou ao mundo que, desde a revolução industrial, a vida moderna adotada pela sociedade tem influenciado direta e negativamente o clima do planeta. Neste ano, o IPCC ganhou o prêmio Nobel da Paz por sua realização.

Não só a emissão dos gases do efeito estufa, principalmente o CO_2, como também o aumento da temperatura havia sido descrito em relatórios anteriores. Mas apenas em 2009, na COP-15 em Copenhagen, foi proposto que haveria um aumento de 2 ºC da temperatura global (UNFCCC, 2009). Essas previsões só foram possíveis devido aos estudos individuais realizados no período, resultando em artigos meta-analíticos que compilaram esses trabalhos e mostraram como a temperatura influencia a produtividade das plantas e florestas (Fig. 3).

Analisando as meta-análises (Fig. 3), um ano antes e nos anos subsequentes aos relatórios do IPCC (Fig. 2), o número de estudos aumentou significativamente. Uma das explicações possíveis é que há um ajuste do calendário de publicações da literatura científica sobre mudanças climáticas e da publicação dos relatórios do IPCC. De fato, a importância do IPCC aumentou nas (quase) últimas duas décadas. Quando um relatório do IPCC está sendo preparado - o que leva em média quatro anos - a comunidade científica é consultada e fica sabendo do trabalho em andamento do painel. Como o IPCC define datas limites para inclusão nas citações do relatório, muitas publicações se tornam rapidamente disponíveis, aumentando a quantidade de dados publicados e tornando mais viáveis novas meta-análises.

Essa relação entre a cronologia de eventos e relatórios mundiais com a produção de conhecimento científico mostra a importância de ambos para o desenvolvimento de novas tecnologias para adaptar ou mitigar as consequências das mudanças climáticas. Devido à grande quantidade de dados científicos gerada, as projeções tornaram-se cada vez mais realistas e podem ser calculadas a partir de modelos matemáticos cada vez mais complexos. No quinto relatório do IPCC, publicado em 2018, estimou-se que a partir de 2100 o CO_2 atmosférico poderá atingir

cerca de 1.300 ppm (partes por milhão). Além disso, a média da temperatura global poderá aumentar cerca de 1.5 ºC se não houver ações rápidas para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (IPCC, 2018; UNFCCC, 2015), sendo que nenhuma redução do das emissões de CO_2 resulta em uma menor probabilidade de limitar o aquecimento médio a 1.5º C (IPCC, 2018).

Vários eventos relacionados às mudanças climáticas ocorreram entre 1972 e 2019 (Fig. 2A). No entanto, dois deles parecem ter produzido momentos decisivos para a humanidade. Um deles foi o relatório do IPCC de 2007 que foi categórico ao afirmar que as atividades humanas contribuem para o aumento dos gases do efeito estufa e, consequentemente, que mais dados científicos poderiam ser produzidos (Fig. 2B). Como resultado, a sociedade, os políticos e os cientistas ficaram ainda mais preocupados com as questões das mudanças climáticas.

O segundo momento decisivo foi a publicação do relatório especial *Global Warming of 1.5 ºC* (IPCC, 2018). Nele, os cientistas apontam o perigo de permitir que o planeta aumente a temperatura acima do limiar de 1.5 ºC. Pela primeira vez, os três Grupos de Trabalho do IPCC trabalharam em conjunto, não apenas para mostrar o perigo da temperatura acima de 1.5 ºC e seus efeitos, mas também apontaram quais tecnologias poderiam ser usadas para ajudar a evitar ultrapassar o limite e destacaram a importância do desenvolvimento sustentável como um caminho crucial para a humanidade (IPCC, 2018). Mudanças no uso da terra, que se referem às florestas e à agricultura, foram questões de extrema importância neste relatório especial, destacando a influência dos efeitos da temperatura e do elevado CO_2 nas plantas para o futuro da humanidade.

Entre 1996 e 2019, encontramos 236 artigos que utilizaram a palavra meta-análise nos estudos sobre os efeitos que o elevado CO_2 podem exercer sobre as plantas (Fig. 2B). O estudo pioneiro que utilizou a meta-análise para avaliar o efeito do eCO_2 nas plantas foi realizado por (CURTIS, 1996) (Fig. 2B). Em 2005, (AINSWORTH & LONG, 2005) publicaram uma meta-análise com resultados de 15 anos com experimentos FACE, e 120 trabalhos apresentando aspectos fisiológicos e a produtividade de algumas espécies. Este trabalho foi um marco para os estudos que pesquisam mudanças climáticas, com 2.056 citações (até 19 de agosto de 2020), demonstrando o poder de síntese quantitativa da meta-análise. A média de estudos para este período é de 9% ao ano, sendo mais intenso após 2007. Contudo, pode-se observar que em 2019 a quantidade de meta-análises dobrou em relação ao ano de 2018 (Fig. 2B), indicando que ainda há interesse no estudo de mudanças climáticas e plantas.

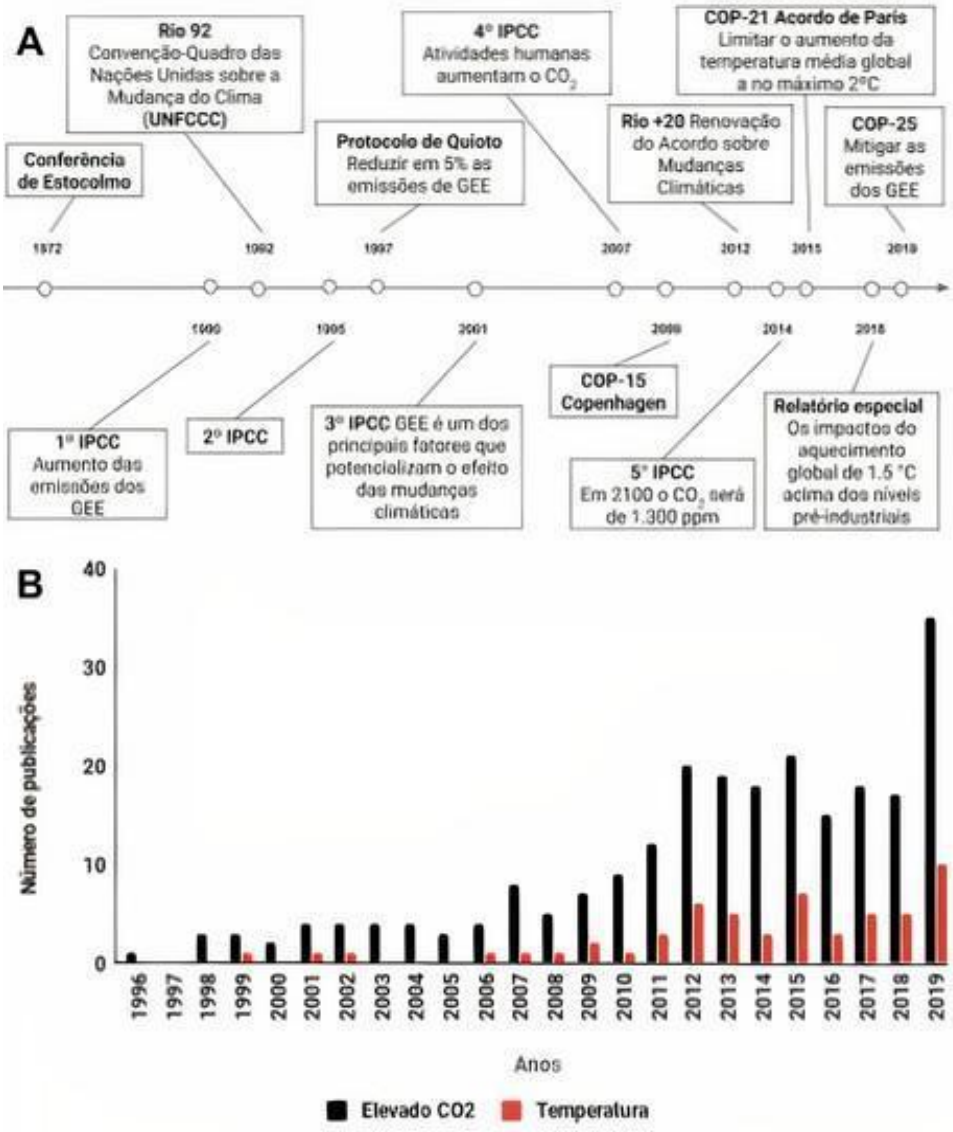

Figura 2. (**A**) Eventos históricos mundiais que vão desde reuniões a relatórios do IPCC que abordaram as mudanças climáticas globais. (**B**) Distribuição ao longo dos anos de manuscritos publicados de meta-análises realizadas em todo o mundo que abordam as respostas das plantas a alto CO_2. Em todos os estudos, 236 meta-análises foram encontradas de 1996 a 2019, obtidas do banco de dados *Web of Science* com as palavras-chave: "*meta-analysis*" OR "*meta-analytic*" AND "CO2" AND "*plant*". Em vermelho está a quantidade desses 236 artigos que abordaram estudos de temperatura.

Os estudos meta-analíticos abordaram alguns processos e relações ecológicas, incluindo fotossíntese e respiração das plantas, crescimento, competição e interação, produtividade, troca e condutância estomática nas folhas, respiração do solo, acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, produção de sementes (BAIG *et al*., 2015; CURTIS, 1996; DE GRAAFF *et al*., 2006;

HAWORTH *et al*., 2016; HIKOSAKA *et al*., 2011; LUO; HUI; ZHANG, 2006; RESCO DE DIOS *et al.*, 2016; WAGNER *et al.*, 2014; WAND *et al*., 1999; YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2017). Esses resultados demonstram que a meta-análise tem sido amplamente utilizada em pesquisas contendo experimentos com elevado CO_2 em plantas e vem a cada nova publicação tentando acoplar o alto CO_2 com outros fatores, como temperatura e condição hídrica. No entanto, a maioria das meta-análises, como a de AINSWORTH; LONG (2005), geralmente inclui apenas experimentos realizados em uma região de clima temperado, o que aponta para a necessidade de estudos envolvendo as respostas das plantas tropicais às mudanças climáticas (JONES *et al.*, 2014). A importância da realização de estudos com espécies em clima tropical é destacada pelo fato de que das 236 meta-análises encontradas neste trabalho, apenas três estudos sobre experimentos com espécies tropicais realizados no Brasil foram incluídos (CLEVELAND *et al*., 2011; MOLES *et al*., 2014; STEVENS *et al*., 2017).

3.2 Análise integrativa das variáveis que são contempladas em estudos brasileiros elegíveis para uma meta-análise sobre respostas das plantas às mudanças climáticas

A revisão sistemática realizada nas três bases de dados retornou 1.625 estudos (Fig. 1A). Após a leitura de títulos e resumos foram excluídos 837 estudos, por não serem estudos experimentais com dados apresentados ou que não foram realizados no Brasil. Para os 788 artigos elegíveis, foi realizada a leitura completa do texto e 728 artigos foram excluídos por não cumprirem ao menos um dos seguintes critérios: pesquisa realizada no Brasil sobre o efeito do eCO_2 nas respostas fisiológicas em plantas e experimentos com instalações FACE ou OTC. Na próxima etapa da revisão sistemática 60 estudos foram incluídos na síntese qualitativa. Porém, destes, apenas 36 atenderam todos os critérios de elegibilidade, como tamanho amostral, média e desvio padrão/erro dos grupos controle e tratamento (Fig. 1A). O número relativamente baixo de estudos incluídos na meta-análise demonstrou que os estudos primários não relatam as mais relevantes para realizar uma meta-análise que permita uma análise quantitativa geral confiável. Dos estudos incluídos na síntese quantitativa, foram extraídas as informações descritas na metodologia e em seguida foram realizadas as etapas mostradas na Figura 1B.

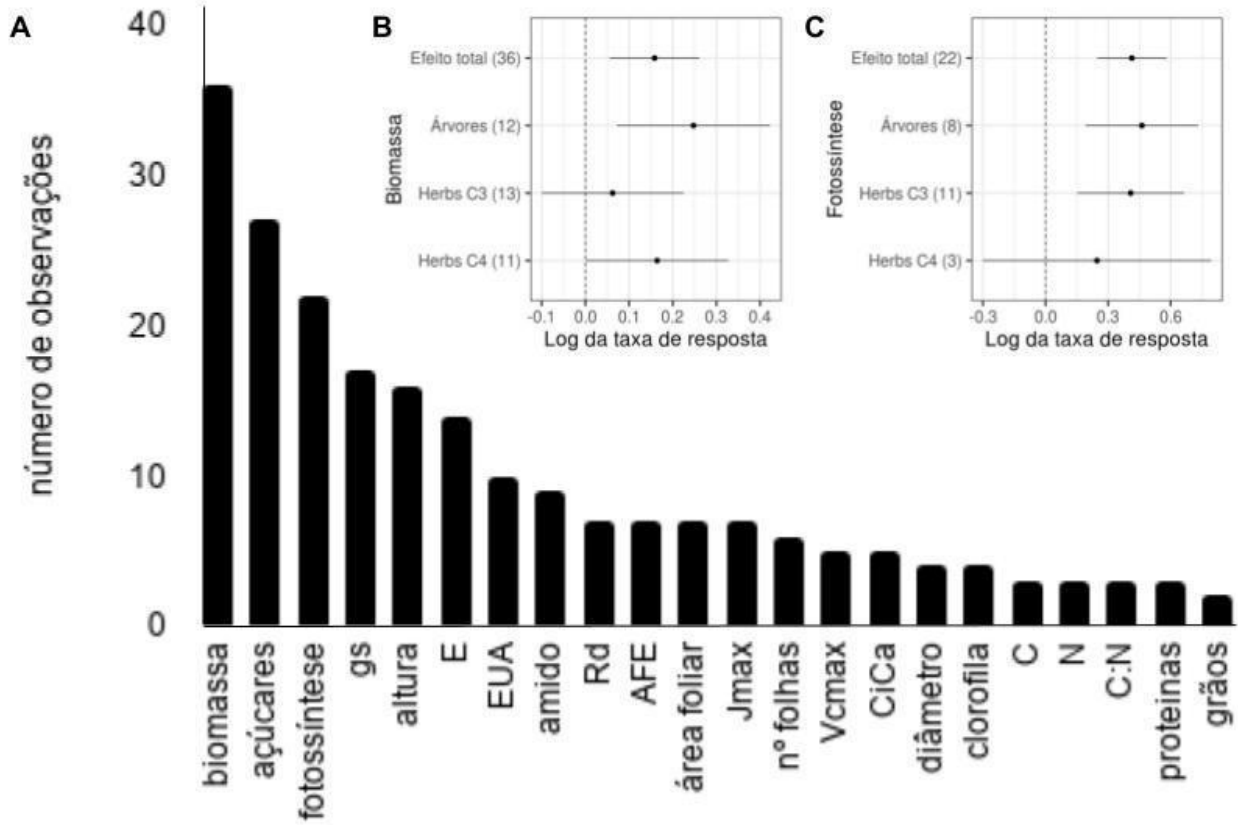

Figura 3. (**A**) Distribuição do número de observações relacionados a 22 variáveis nos 36 estudos incluídos nesta meta-análise. (**B**) Tamanho do efeito do elevado CO_2 na biomassa das plantas. Os dados representam médias ± 95% CI para cada grupo funcional analisado. Os valores que não se sobrepõem a zero apresentam diferença significativa ($\alpha < 0.05$). O número de observações é apresentado entre parênteses. (**C**) Tamanho do efeito do elevado CO_2 na fotossíntese das plantas. Legendas: herbs = herbáceas C3 ou C4.

Dos 36 estudos realizados no Brasil, observamos que 27 espécies foram analisadas, sendo 13 classificadas como árvores e 14 espécies herbáceas. Em relação à via fotossintética, 20 espécies foram classificadas com possuindo via fotossintética C3 e 7 espécies com a via fotossintética C4. No entanto, houve relativamente poucos estudos com espécies de metabolismo C4 (3) em comparação às espécies com metabolismo C3 (11) (Fig. 3C). Apesar de alguns estudos com milho (LEAKEY *et al.*, 2006), o elevado CO_2 não ter apresentado efeito, quando a cana-de açúcar, uma gramínea tropical C4, foi submetida a elevados níveis de CO_2, aumentos na fotossíntese e biomassa foram observados (DE SOUZA *et al.*, 2008). Esses resultados mostraram que parece haver um escape de mecanismos fisiológicos alternativos pelos quais as espécies C4 poderiam responder ao eCO_2. Os autores propõem que o estresse hídrico provocado pelos experimentos, que foram realizados em vasos, poderia estar relacionado a estas respostas.

Posteriormente, DE SOUZA (2011) verificou que, de fato, mesmo as plantas crescendo no campo em condições naturais estão sob certo estresse hídrico e que isto poderia explicar o efeito observado.

A categorização das espécies de acordo com o seu hábito de vida pode fornecer informações sobre a magnitude dos efeitos do eCO_2. Nesse sentido, sejam as plantas arbóreas ou herbáceas e seja o metabolismo da fotossíntese do tipo C3 ou C4, ambos os fatores parecem influenciar diretamente no tamanho do efeito do elevado CO_2 nas plantas estudadas (Fig. 3B). Porém, ao categorizar as diferentes espécies, o número de estudos torna-se menor, como demonstrado na Figura 3C em que a categoria das herbáceas com fotossíntese C3 fica apenas com três observações, o que reduz o poder da análise estatística.

O hábito de vida influencia a magnitude das respostas do eCO_2 na biomassa vegetal. Dos estudos incluídos na meta-análise, obtivemos 36 observações para estimar o tamanho do efeito do eCO_2 na biomassa (Fig. 3B). Esse resultado deve-se à facilidade de mensuração desta variável, pois para medir a biomassa é necessário apenas uma balança. Essa representatividade dos estudos permite uma análise mais detalhada do efeito do elevado CO_2 nas plantas. Entretanto, a variável fotossíntese, que representa o quanto a planta assimila de carbono, há apenas 22 observações que possuem esse tipo de variável (Fig. 3C). O menor número de observações em trabalhos que medem a fotossíntese é resultado de uma maior complexidade em medir esse parâmetro. Isto porque é necessário um profissional habilitado para operar o equipamento, além do alto custo para a sua aquisição. Muitas vezes, algumas variáveis não são abordadas nos trabalhos, pois dependem da complexidade em realizar o estudo, a disponibilidade de pessoal ou equipamentos, ou ainda depende da pergunta que a ser respondida pelo estudo individual.

A confiabilidade de uma meta-análise depende da existência de vários estudos individuais e do número de variáveis para melhor compreensão do efeito do elevado CO_2 na fisiologia da planta. Na busca por estudos brasileiros, houve diversidade de variáveis relatadas. No entanto, a maioria das variáveis não era comum a todos os estudos encontrados (Fig. 3A). Neste sentido, é necessário padronizar o número de variáveis que podem ser avaliadas. A variável mais estudada nos trabalhos foi a biomassa das plantas com 36 observações, seguido de açúcares solúveis com 27 e taxa de assimilação líquida com 22 estudos. As demais variáveis apresentaram frequência muito baixa nos estudos selecionados (Fig. 3A). Poucas observações

para cada variável podem influenciar negativamente o poder estatístico da meta-análise, uma vez que quanto maior o número amostral, maior será a consistência do resultado (HEDGES; PIGOTT, 2004). Nossas análises ilustram a diversidade de medidas que podem ser aplicadas futuramente em estudos meta-analíticos. Cabe salientar que necessitamos de mais estudos que envolvam maior número de variáveis em um número bem maior de espécies de plantas dos biomas brasileiros. Além disso, a padronização das variáveis utilizadas em experimentos com uma única espécie, permitiria futuras meta-análises mais confiáveis, proporcionando conclusões mais consistentes sobre como o efeito do CO_2 elevado influencia a fisiologia das plantas.

Este trabalho ilustra alguns desses parâmetros fisiológicos (Figura 4) que contêm as principais variáveis que trariam mais informações às futuras meta-análises de estudos brasileiros sobre os efeitos do eCO_2 nas plantas. As variáveis destacadas dentro da caixa vermelha são as que apresentam poucos dados relacionados às espécies (carbono, nitrogênio, razão carbono e nitrogênio, clorofila, área foliar, área específica foliar, proteína e produção de grãos). Já as variáveis destacadas em amarelo (taxa de assimilação líquida de CO_2, taxa máxima de transporte de elétrons, velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco, taxa de CO_2 intercelular e ambiental, respiração no escuro, taxa de transpiração foliar, condutância estomática, eficiência fotossintética do uso da água, açúcares solúveis, amido, biomassa, altura, número de folhas e diâmetro do caule) são as que possuem uma quantidade significativa de dados para um estudo meta-analítico. No entanto, não há estudos individuais suficientes para realizar uma meta-análise mais detalhada para verificar a influência dos moderadores na magnitude do efeito do elevado CO_2 nas espécies em clima tropical.

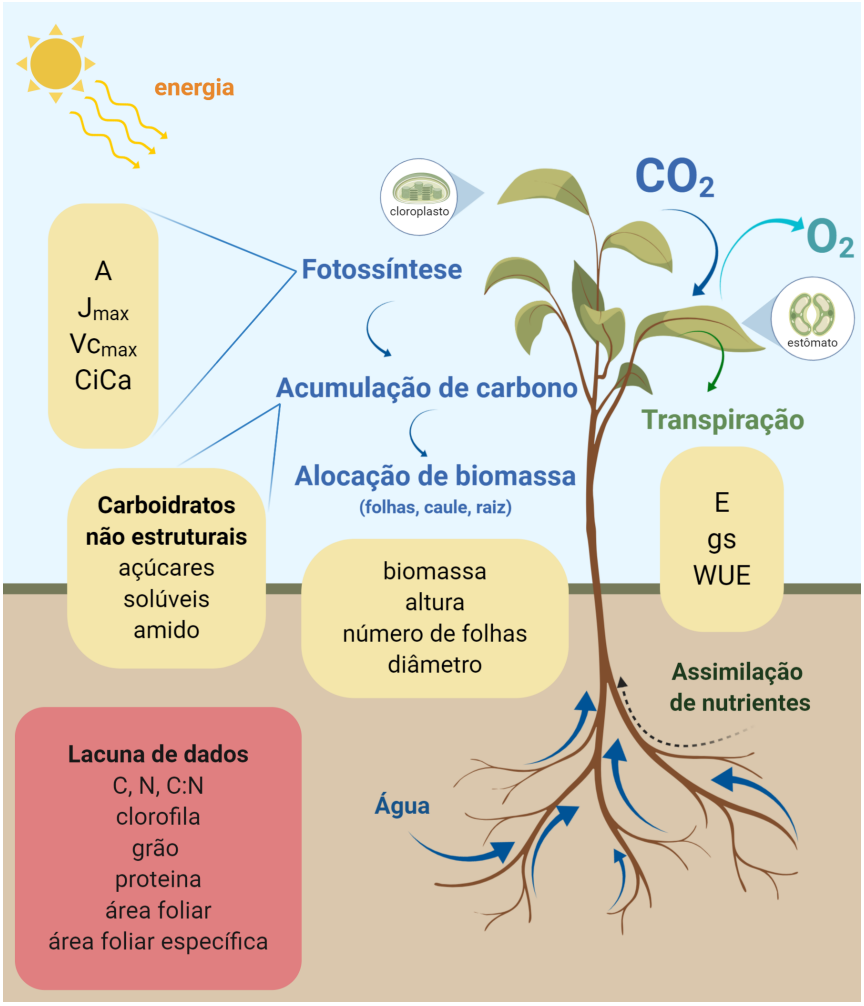

Figura 4. Variáveis fisiológicas que são comumente medidas em experimentos que buscam respostas das plantas às mudanças climáticas globais. As variáveis analisadas nos estudos brasileiros estão nas caixas amarelas e as variáveis na caixa vermelha não apresentaram um número estudos suficiente (número de estudos menor que cinco) para realização de uma meta-análise mais consistente, necessitando serem abordadas em estudos futuros. Legenda: taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}), velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}), taxa de CO_2 intercelular e ambiental (Ci/Ca), respiração no escuro (Rd), taxa de transpiração foliar (E), condutância estomática (gs), eficiência fotossintética do uso da água (WUE), razão carbono e nitrogênio (C/N), carbono (C), nitrogênio (N).

4. Conclusão

Neste estudo, foi realizado o levantamento da história das meta-análises globais dos efeitos do CO_2 e da temperatura nas plantas. Encontramos uma correlação (provavelmente envolvendo a divulgação dos relatórios do IPCC) entre esse tipo de análise e os eventos sociopolíticos que determinaram as metas de desenvolvimento sustentável do planeta. Chegamos a 36 estudos adequados para meta-análise, seguindo o procedimento descrito na Figura 1, que

incluiu revisão sistemática e busca de variáveis compartilhadas pelos estudos para que a análise estatística fosse possível.

Concluímos que o número de variáveis medidas em estudos brasileiros que permitem abordagens meta-analíticas é relativamente pequeno, impedindo interpretações mais profundas de como os mecanismos fisiológicos são afetados em geral. Abordagens que medem certas variáveis, como teores de C, N e parâmetros da área foliar, seriam uma ajuda mais significativa para avaliar o comportamento ecofisiológico das plantas e, assim, ajudar nas interpretações do comportamento do ecossistema.

Dada a importância dos biomas e da agricultura brasileira para o planeta, e a importância do uso da terra para os impactos das mudanças climáticas globais, concluímos que é urgente que mais estudos sejam realizados com espécies nativas e cultivadas nos neotrópicos para somar os esforços para mitigar e adaptar as florestas e a produção de alimentos aos impactos das mudanças climáticas globais. Uma meta-análise será, sem dúvida, crucial para entender tais impactos e para a tomada de decisões. O mais adequado é que a maioria dos estudos trouxessem uma infinidade de variáveis que podem permitir a utilização desse valioso método estatístico.

5. Referências bibliográficas

AGUIAR, S.; SANTOS, I. S.; ARÊDES, N.; SILVA, S. Redes-Bioma: Informação e Comunicação para ação sociopolítica em ecorregiões. Ambiente & Sociedade, v. 19, n. 3, p. 233–252, 2016.

AHN, S.; AMES, A. J.; MYERS, N. D. A review of meta-analyses in education: Methodological strengths and weaknesses. Review of Educational Research, v. 82, n. 4, p. 436–476, 2012.

AIDAR, M. P. M.; MARTINEZ, C. A.; COSTA, A. C.; COSTA, P. M. F.; DIETRICH, S. M. C.; BUCKERIDGE, M. S. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on the establishment of seedlings of Jatobá, *Hymenaea Courbaril* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). Biota Neotropica, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2002. https://doi.org/10.1590/S1676-06032002000100008.

AINSWORTH, E.A., LONG, S.P.: What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (face)? a meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New Phytol. V.165, n. 2, p. 351–372, 2005. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x

ARENQUE-MUSA, B. C.; GRANDIS, A.; POCIUS, O.; DE SOUZA, A. P.; BUCKERIDGE, M. S. Responses of *Senna reticulata*, a legume tree from the Amazonian floodplains, to elevated atmospheric CO_2 concentration and waterlogging. Trees, v. 28, n. 4, p. 1021–1034, ago. 2014. https://doi.org/10.1007/s00468-014-1015-0.

BAIG, S.; MEDLYN, B. E.; MERCADO, L. M.; ZAEHLE, S. Does the growth response of woody plants to elevated CO_2 increase with temperature? A model-oriented meta-analysis. Global Change Biology, v. 21, n. 12, p. 4303–4319, dez. 2015. https://doi.org/10.1111/gcb.12962.

BORENSTEIN, M. (ED.). Introduction to meta-analysis. Chichester, U.K: John Wiley & Sons, 2009.

BRAGA, M. R., AIDAR, M. P. M., MARABESI, M. A., & DE GODOY, J. R. L. Effects of elevated CO_2 on the phytoalexin production of two soybean cultivars differing in the resistance to stem canker disease. Environmental and Experimental Botany, v. 58, n. 1–3, p. 85–92, 2006. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.06.018

CLEVELAND, C. C; TOWNSEND, A. R.; TAYLOR, P.; ALVAREZ-CLARE, S.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CHUYONG, G.; DOBROWSKI, S. Z.; GRIERSON, P.; HARMS, K. E.; HOULTON, B. Z.; MARKLEIN, A.; PARTON, W.; PORDER, S.;

REED, S. C.; SIERRA, C. A.; SILVER, W. L.; TANNER, E. V. J.; WIEDER, W. R. (2011). Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: A pan-tropical analysis: Nutrients, climate and tropical NPP. Ecology Letters, v. 14, n. 9, 939–947. 2001. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01658.x

CO2.EARTH. CO_2 Earth: A Pro Oxygen Website. 2020. Disponível em: https://www.co2.earth. Acesso em: 27 ago. 2020.

COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. Global Change Biology, v. 15, n. 3, p. 601–612, 2009.

COOK, T. D. The potential and limitations of secondary evaluations. In: Educational evaluation: Analysis and responsibility. p. 155–235.

CURTIS, P. S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. Plant, Cell and Environment, v. 19, n. 2, p. 127–137, 1996.

CURTIS, P. S.; WANG, X. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology. Oecologia, v. 113, n. 3, p. 299–313, 1998.

DE FARIA, A. P.; FERNANDES, G. W.; FRANÇA, M. G. C. Predicting the impact of increasing carbon dioxide concentration and temperature on seed germination and seedling establishment of African grasses in Brazilian Cerrado: Climate Change and Grass Seed Germination. Austral Ecology, v. 40, n. 8, p. 962–973, dez. 2015.

DE GRAAFF, M; VAN GRAENIGEN, K.; SIX, J.; HUNGATE, B.; VAN KESSEL, C. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO_2: a meta-analysis. Global Change Biology, v. 12, n. 11, p. 2077–2091, nov. 2006. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01240.x.

DE OLIVEIRA, E. A. D. *et al*. Soil-nutrient availability modifies the response of young pioneer and late successional trees to elevated carbon dioxide in a Brazilian tropical environment. Environmental and Experimental Botany, v. 77, p. 53–62, abr. 2012.

OLIVEIRA, E. A. D., APPROBATO, A. U., LEGRACIE, J. R., MARTINEZ, C. A. Soil-nutrient availability modifies the response of young pioneer and late successional trees to elevated carbon dioxide in a Brazilian tropical environment. Environmental and Experimental Botany, v. 77, p. 53–62. 2002. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.11.003.

DE SOUZA, A. Mecanismos fotossintéticos e relação fonte-dreno em cana-de-açúcar cultivada em atmosfera enriquecida em CO_2. Universidade de São Paulo, 2011.

DE SOUZA, A. P., GASPAR, M., DA SILVA, E. A., ULIAN, E. C., WACLAWOVSKY, A. J., NISHIYAMA JR., M. Y., DOS SANTOS, R. V., TEIXEIRA, M. M., SOUZA, G. M., & BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO_2 increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. Plant, Cell & Environment, v. 31, n. 8, p. 1116–1127. 2008. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01822.x

EGGER, M.; SMITH, G. D.; SCHNEIDER, M.; MINDER, C. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. BMJ, v. 315, n. 7109, p. 629–634.1997. https://doi.org/10.1136/bmj.315.7109.629

GHINI, R.; LEOD, R. E. O. M.; TORRE NETO, A.; CARDOSO, D. C.; BETTIOL, W.; DE MORAIS, L. A. S.; VIQUE, B. Increased atmospheric carbon dioxide concentration: Effects on eucalypt rust (*Puccinia psidii*), C:N ratio and essential oils in eucalypt clonal plantlets. Forest Pathology, v. 44, n. 5, p. 409–416. 2014. https://doi.org/10.1111/efp.12117

GLASS, G. V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. Educational researcher, v. 5, n. 10, p. 3–8, 1976.

GUREVITCH, J. Meta-analysis: combining the results of independent experiments. Design and analysis of ecological experiments, 1993.

HARRISON, F. Getting started with meta-analysis. Methods in Ecology and Evolution, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2011.

HAWORTH, M.; MOSER, G.; RASCHI, A.; KAMMANN, C.; GRÜNHAGE, L.; MÜLLER, C. Carbon dioxide fertilisation and supressed respiration induce enhanced spring biomass production in a mixed species temperate meadow exposed to moderate carbon dioxide enrichment. Functional Plant Biology, v. 43, n. 1, p. 26–39, 2016.

HEDGES, L. V.; GUREVITCH, J.; CURTIS, P. S. THE META-ANALYSIS OF RESPONSE RATIOS IN EXPERIMENTAL ECOLOGY. Ecology, v. 80, n. 4, p. 1150–1156, jun. 1999.

HEDGES, L. V.; PIGOTT, T. D. The Power of Statistical Tests for Moderators in Meta-Analysis. Psychological Methods, v. 9, n. 4, p. 426–445, 2004.

HIGGINS, J. P. T. Measuring inconsistency in meta-analyses. BMJ, v. 327, n. 7414, p. 557–560, 6 set. 2003.

HIKOSAKA, K.; KINUGASA, T.; OIKAWA, S.; ONODA, Y.; HIROSE, T. Effects of elevated CO_2 concentration on seed production in C3 annual plants. Journal of Experimental Botany, v. 62, n. 4, p. 1523–1530, 2011. https://doi.org/10.1093/jxb/erq401

HÖHNE, N.; BLUM, H.; FUGLESTVEDT, J.; SKEIE, R. B.; KUROSAWA, A.; HU, G.; LOWE, J.; GOHAR, L.; MATTHEWS, B.; DE SALLES, A. C. N. Contributions of individual countries' emissions to climate change and their uncertainty. Climatic change, v. 106, n. 3, p. 359–391, 2011.

HOUGHTON, J. T.; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (EDS.). Climate change 2001: the scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15842biomas.html?=&t=o-que-e. Acesso em: 17 maio. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE; EDENHOFER, O. (EDS.). Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, NY: Cambridge University Press, 2014.

IPCC. Climate change: The IPCC Scientific Assessment. Disponível em: https://www.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/labs/ryanlab/pubs/Melillo_et_al_1990_IPCC1_WG1.PDF. Acesso em: 25 ago. 2020.

IPCC. Special report: Global Warming of 1.5ºC. Disponível em: https://www.ipcc.ch/sr15/. Acesso em: 25 ago. 2020.

IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM. Acesso em 17 ago. 2021.

JONES, A. G., SCULLION, J., OSTLE, N., LEVY, P. E., GWYNN-JONES, D. Completing the FACE of elevated CO_2 research. Environment International, v. 73, p. 252–258, 2014. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.021

KORICHEVA, J.; GUREVITCH, J.; MENGERSEN, K. Handbook of meta-analysis in ecology and evolution. Princeton University Press, 2013.

KÖRNER, C. Plant CO_2 responses: an issue of definition, time and resource supply. New phytologist, v. 172, n. 3, p. 393–411, 2006.

KÖRNER, C. Responses of humid tropical trees to rising CO_2. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, v. 40, p. 61–79, 2009.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. Plant physiological ecology. Springer Science & Business Media, 2008.

LEAKEY, A. D. B., URIBELARREA, M., AINSWORTH, E. A., NAIDU, S. L., ROGERS, A., ORT, D. R., LONG, S. P. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO_2 concentration in the absence of drought. Plant Physiology, 140(2), 779–790, 2006. https://doi.org/10.1104/pp.105.073957

LEI, X.; PENG, C.; TIAN, D.; SUN, J. Meta-analysis and its application in global change research. Chinese Science Bulletin, v. 52, n. 3, p. 289–302, 2007. https://doi.org/10.1007/s11434-007-0046-y

LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GØTZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A; CLARKE, M.; DEVEREAUX, P. J.; KLEIJNEN, J.; MOHER, D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. Journal of clinical epidemiology, v. 62, n. 10, p. e1–e34, 2009.

LIN, D.; XIA, J.; WAN, S. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis. New Phytologist, v. 188, n. 1, p. 187–198, out. 2010.

LINDSEY. Climate change: atmospheric carbon dioxide. Disponível em: https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide. Acesso em: 30 ago. 2020.

LLOYD, J.; FARQUHAR, G. D. 13 C discrimination during CO_2 assimilation by the terrestrial biosphere. Oecologia, v. 99, n. 3–4, p. 201–215, 1994.

LOCOSSELLI, G. M.; BRIENEN, R. J. W.; LEITE, M. DE S.; GLOOR, M.; KROTTENTHALER, S.; OLIVEIRA, A. A. DE, BARICHIVICH, J.; ANHUF, D.; CECCANTINI, G.; SCHÖNGART, J.; BUCKERIDGE, M. S. Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 117, n. 52, p. 33358–33364, 2020. https://doi.org/10.1073/pnas.2003873117

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point: Last chance for action. American Association for the Advancement of Science, 2019.

LUO, Y.; HUI, D.; ZHANG, D. Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. Ecology, v. 87, n. 1, p. 53–63, jan. 2006.

MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E.; GALBRAITH, D.; HUNTINGFORD, C.; FISHER, R.; ZELAZOWSKI, P.; SITCH, S.; MCSWEENEY, C.; MEIR, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 106, n. 49, p. 20610–20615, 2009.

REZENDE, F. M.; DE SOUZA, A. P.; BUCKERIDGE, M. S., FURLAN, C. M. Is guava phenolic metabolism influenced by elevated atmospheric CO_2? Environmental Pollution, v. 196, p. 483–488, 2015. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.028

MOLES, A. T.; PERKINS, S. E.; LAFFAN, S. W.; FLORES-MORENO, H.; AWASTHY, M.; TINDALL, M. L.; SACK, L.; PITMAN, A.; KATTGE, J.; AARSSEN, L. W.; ANAND, M.; BAHN, M.; BLONDER, B.; CAVENDER-BARES, J.; CORNELISSEN, J. H. C.; CORNWELL, W. K.; DÍAZ, S.; DICKIE, J. B.; FRESCHET, G. T.; BONSER, S. P. Which is a better predictor of plant traits: Temperature or precipitation? Journal of Vegetation Science, v. 25, n. 5, p. 1167–1180, 2014. https://doi.org/10.1111/jvs.12190

MRE. Ministério das Relações Exteriores do Brasil. Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente. Acesso em: 25 ago. 2020.

NAKAGAWA, S.; NOBLE, D. W.; SENIOR, A. M.; LAGISZ, M. Meta-evaluation of meta-analysis: Ten appraisal questions for biologists. BMC biology, v. 15, n. 1, p. 1–14, 2017.

NAKAGAWA, S.; SAMARASINGHE, G.; HADDAWAY, N. R.; WESTGATE, M. J.; O'DEA, R. E.; NOBLE, D. W.; LAGISZ, M. Research weaving: Visualizing the future of research synthesis. Trends in ecology & evolution, v. 34, n. 3, p. 224–238, 2019.

NAKAGAWA, S.; SANTOS, E. S. A. Methodological issues and advances in biological meta-analysis. Evolutionary Ecology, v. 26, n. 5, p. 1253–1274, set. 2012.

OLIVO, N.; MARTINEZ, C. A.; OLIVA, M. A. The Photosynthetic Response to Elevated CO_2 in High Altitude Potato Species (*Solanum curtilobum*). Photosynthetica, v. 40, n. 2, p. 309–313, 1 jun. 2002.

PALACIOS, C. J.; GRANDIS, A.; CARVALHO, V. J.; SALATINO, A.; BUCKERIDGE, M. S. Isolated and combined effects of elevated CO_2 and high temperature on the whole-plant biomass and the chemical composition of soybean seeds. Food Chemistry, 275, 610–617, 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.052

QUINTANA, D. S. From pre-registration to publication: a non-technical primer for conducting a meta-analysis to synthesize correlational data. Frontiers in psychology, v. 6, p. 1549, 2015.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 25 ago. 2020.

RAKOCEVIC, M.; MATSUNAGA, F. T. Variations in leaf growth parameters within the tree structure of adult *Coffea arabica* in relation to seasonal growth, water availability and air carbon dioxide concentration. Annals of Botany, v. 122, n. 1, p. 117–131, 28 jun. 2018.

RASOULI, H. R. The importance of meta-analysis in medical research. International Journal of Medical Reviews, v. 4, n. 4, p. 126–126, 2017.

RESCO DE DIOS, V. Intraspecific variation in juvenile tree growth under elevated CO_2 alone and with O_3: a meta-analysis. Tree Physiology, v. 36, n. 6, p. 682–693, jun. 2016.

RIBEIRO, W. A ordem ambiental internacional. Contexto, 2001.

ROY, J.; MOONEY, H. A.; SAUGIER, B. Terrestrial global productivity. Elsevier, 2001.

RUDDIMAN, W. F. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. Climatic change, v. 61, n. 3, p. 261–293, 2003.

SÁNCHEZ-MECA, J.; MARÍN-MARTÍNEZ, F. Meta-analysis in psychological research. International Journal of Psychological Research, v. 3, n. 1, p. 150–162, 2010.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M.; MILLER, H. IPCC fourth assessment report (AR4). Climate change. 2007.

STERNE, J. A. C.; EGGER, M. Funnel plots for detecting bias in meta-analysis. Journal of Clinical Epidemiology, v. 54, n. 10, p. 1046–1055, out. 2001.

STEVENS, N.; LEHMANN, C. E. R.; MURPHY, B. P.; DURIGAN, G. Savanna woody encroachment is widespread across three continents. Global Change Biology, v. 23, n. 1, p. 235–244, 2007. https://doi.org/10.1111/gcb.13409

TONG, G.; GUO, G. Meta-analysis in Sociological Research: Power and Heterogeneity. Sociological Methods & Research. 2019.

UNFCCC. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf. Acesso em: 25 ago. 2020.

UNFCCC. Statements on behalf of the group of G77 and China. Copenhagen. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf. Acesso em: 25 ago. 2020.

UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php. Acesso em: 25 ago. 2020.

VIECHTBAUER, W. Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. Journal of Statistical Software, v. 36, n. 3, 2010.

WAGNER, F.; ROSSI, V.; AUBRY-KIENTZ, M.; BONAL, D.; DALITZ, H.; GLINIARS, R.; STAHL, C.; TRABUCCO, A.; HÉRAULT, B. Pan-Tropical Analysis of Climate Effects on Seasonal Tree Growth. PLoS ONE, vol. 9, n. 3, p. 92337, 2014. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092337

WAND, S. J.; MIDGLEY, G. F.; JONES, M. H.; CURTIS, P. S. Responses of wild C4 and C3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO_2 concentration: A meta-analytic test of current theories and perceptions. Global Change Biology, v. 5, n. 6, p. 723–741, 1999.

WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, R. H.; Intergovernmental Panel on Climate Change (Orgs.). Climate change, 1995: Impacts, adaptations, and mitigation of climate change: scientific-technical analyses: contribution of working group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1996.

WICKHAM, H. Ggplot2: elegant graphics for data analysis. New York: Springer, 2009.

YAN, W.; ZHONG, Y.; SHANGGUAN, Z. Contrasting responses of leaf stomatal characteristics to climate change: a considerable challenge to predict carbon and water cycles. Global Change Biology, v. 23, n. 9, p. 3781–3793, 2017.

YAN, W.; ZHONG, Y.; SHANGGUAN, Z. Contrasting responses of leaf stomatal characteristics to climate change: a considerable challenge to predict carbon and water cycles. Global Change Biology, v. 23, n. 9, p. 3781–3793, set. 2017.

CAPÍTULO II:

Efeito do elevado CO_2 na fotossíntese, carboidratos e biomassa de árvores e herbáceas em clima tropical do Brasil: meta-análise

Janaina da Silva Fortirer, Adriana Grandis,
Camila de Toledo Castanho e Marcos Silveira Buckeridge.

Trabalho será submetido à *Global Change Biology.*

Resumo

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou desde a revolução industrial até a atualidade. O aumento de CO_2 na atmosfera pode resultar em alterações fisiológicas e bioquímicas, como alterar positiva ou negativamente o crescimento das plantas e mudar o metabolismo dos carboidratos. Embora o Brasil seja a nação mais rica em termos de armazenamento de carbono florestal e detentora da maior biodiversidade do planeta, experimentos sobre o efeito do elevado CO_2 (eCO_2) nas plantas em clima tropical não têm sido incluídos em meta-análises globais. O presente trabalho preenche esta lacuna, compilando a literatura produzida no Brasil com os seguintes objetivos: (I) estimar o tamanho do efeito geral do eCO_2 atmosférico sobre o crescimento vegetal (aumento de biomassa), fotossíntese e metabolismo dos carboidratos foliares, e (II) verificar se os efeitos do eCO_2 são influenciados pelo hábito de vida das espécies (arbóreas e herbáceas). Apontamos que se os efeitos do eCO_2 podem ser influenciados pelo hábito de vida das espécies (arbóreas e herbáceas). Realizamos uma meta-análise dos estudos brasileiros realizados para avaliar os efeitos do eCO_2 sobre plantas cultivadas e nativas, através de experimentos com câmaras de topo aberto (OTC) e *Free-air CO_2 Enrichment* (FACE). A exposição das plantas ao eCO_2 resultou no aumento médio significativo da biomassa (+30%), na taxa de assimilação líquida de CO_2 (+49%), eficiência fotossintética do uso da água (+116%), diminuição da condutância estomática (-23%) e também sobre os níveis açúcares solúveis totais (+7%) e amido (+58%). Não houve mudança nas respostas na taxa de transpiração (E), taxa de CO_2 intercelular por CO_2 atmosférico (Ci/Ca), taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) e velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}) em plantas expostas ao eCO_2. O hábito de vida alterou significativamente a resposta da biomassa em árvores e herbáceas. Nossos resultados corroboram o que foi previamente observado para plantas de clima temperado, oferecendo um banco de dados que poderá ser acrescido ao já existente e assim permitindo uma análise ainda mais ampla dos efeitos da elevação de CO_2 sobre as plantas no planeta.

Palavras-chave: elevado CO_2, fotossíntese, mudanças climáticas.

Abstract

The concentration of carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere has increased since the industrial revolution to the present. The increase in CO_2 in the atmosphere can result in physiological, biochemical changes, such as carbohydrate metabolism, and positively or negatively alter the plant growth. Although Brazil is the tropical richest nation in forest carbon and has the greatest biodiversity on the planet, the global meta-analyses did not include experiments on the effect of elevated CO_2 (eCO_2) on plants in a tropical climate. Therefore, the objectives of this work were: (I) to estimate the size of the general effect of atmospheric eCO_2 on photosynthesis, leaf carbohydrate metabolism, and plant biomass; and (II) to verify whether the effects of eCO_2 are influenced by the species' habit of life (trees and herbs). We performed a meta-analysis of Brazilian studies with open top chamber (OTC) or Free-air CO_2 enrichment (FACE) experiments with eCO_2 in plants. The exposure of plants to eCO_2 resulted in a significant average increase in biomass (+ 30%), total soluble sugars (+ 7%), starch (+ 58%), in the net CO_2 assimilation rate (+ 49%), photosynthetic efficiency water use (+ 116%), and decreased stomatal conductance (-23%). Significant changes were not observed in the transpiration rate response (E), intercellular CO_2 rate by atmospheric CO_2 (Ci/Ca), maximum electron transport rate (J_{max}), and maximum carboxylation speed of the Rubisco enzyme (Vc_{max}) in plants exposed to the eCO_2. The habit of life significantly altered the responses of biomass in trees and herbaceous. The results of this study can provide the most plausible estimates of the responses of plants in a tropical climate to eCO_2.

Keywords: elevated CO_2, photosynthesis, climate change.

1. Introdução

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentou de ~280 ppm para ~410 ppm desde a revolução industrial até a atualidade (CO2.EARTH, 2020; LINDSEY, 2019). Esse aumento de CO_2 se deve ao uso de combustíveis fósseis, desmatamento de florestas e mudanças no uso da terra (HOUGHTON; IPCC, 2001, 2014, 2021). A projeção do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), no cenário mais pessimista, é que em 2100 os níveis de CO_2 atinjam a marca de 1300 ppm (IPCC, 2014). O dióxido de carbono é um dos gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa que contribui para o aumento da temperatura e consequentemente resultam em mudanças climáticas globais (IPCC, 2014, 2021).

Com a alteração nas concentrações de gases que intensificam o efeito estufa, alternativas de mitigação podem ser utilizadas, como mecanismos de sequestro de CO_2. Uma das alternativas de captura do CO_2 atmosférico é encontrada na manutenção de florestas e plantio de árvores, pois são elas que assimilam o carbono e o armazenam principalmente na forma de celulose (DE GRAAFF *et al.*, 2006). O aumento do CO_2 atmosférico pode estimular a fotossíntese das plantas, o que resulta em um aumento da produtividade, permitindo que armazenem mais carbono ao longo da vida (KÖRNER, 2009). Nesse sentido, a manutenção e recuperação da vegetação terrestre é o principal meio de sequestrar carbono (NOBRE; NOBRE, 2002), sendo que as plantas tropicais e subtropicais alocam metade (52%) do carbono disponível na superfície terrestre na forma de biomassa (AINSWORTH; LONG, 2005; KÖRNER, 2009). Já espécies herbáceas, cultivadas e utilizadas em pastagens, cobrem uma área terrestre de 26% (MANNETJE, 2007) e em sua grande maioria são utilizadas como alimento para animais e seres humanos e não são tão eficientes no sequestro de carbono, pois são de produção anual. Há estudos que mostram que as mudanças climáticas podem influenciar diretamente essas espécies nativas de árvores e as espécies cultivadas no Brasil, sendo que o elevado CO_2 pode afetar negativamente a produção agrícola (DAMATTA *et al.*, 2010; IPCC, 2014).

O aumento de CO_2 na atmosfera pode resultar em mudanças nos processos fisiológicos das plantas, como a fotossíntese, o metabolismo dos carboidratos e o crescimento (ARENQUE *et al.*, 2014; GAMAGE *et al.*, 2018; GARCÍA-PALACIOS *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2010; NORBY *et al.*, 2016; RESCO DE DIOS *et al.*, 2016). Diversos experimentos que cultivam plantas e simulam o aumento futuro de carbono na atmosfera têm sido realizados. Uma das metodologias adotadas para aumentar o CO_2 atmosférico nesses experimentos é denominada FACE (*Free Air*

Carbon Enrichment), que permite o aumento de CO_2 em condições de campo sem alterar o microclima (AINSWORTH; LONG, 2021). O sistema FACE usa um anel com uma série de tubos de ventilação verticais ou horizontais que liberam jatos de ar enriquecido com CO_2 (eCO_2) e não usam estruturas de contenção (MCLEOD; LONG, 1999). Já o sistema OTC (*Open Top Chambers*) consiste em uma estrutura metálica, com paredes laterais transparentes e a parte superior com uma abertura que permite a renovação do ar enriquecido com CO_2, que é injetado e distribuído a partir de um tubo circular por ventiladores que garantem uma distribuição uniforme do dióxido de carbono dentro da câmara (AIDAR *et al*., 2002; DAMATTA *et al*., 2010; MACHACOVA, 2010). O sistema FACE possibilita o estudos de espécies arbóreas adultas (MACHACOVA, 2010), porém, possui alto custo de manutenção por conta do alto consumo de CO_2 durante o experimento (MACHACOVA, 2010). O uso de OTCs é a abordagem mais comum, mais simples e mais barata (MESSERLI *et al.*, 2015). Contudo a desvantagem desse sistema é a utilização apenas de arbóreas em fase juvenil do desenvolvimento, pois o diâmetro do OTC é geralmente menor que o FACE e também limita a altura máxima das plantas em uso. Nos sistemas de OTC, há também pode haver limitação do crescimento das plantas uma vez que são cultivadas em vasos (MACHACOVA, 2010). Por isto, é geralmente de grande importância que as plantas em estudo sejam avaliadas quanto aos efeitos produzidos pelo crescimento em vasos em relação ao crescimento no solo.

Uma análise com diversos experimentos em FACE ou OTC registrou que o eCO_2 resulta em um aumento na fotossíntese e redução da condutância estomática, taxa de respiração foliar no escuro, taxa de transpiração, na velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco e da taxa máxima de transporte de elétrons (AINSWORTH *et al.*, 2003; AINSWORTH; ROGERS, 2007; CURTIS, 1996; CURTIS; WANG, 1998; DE SOUZA *et al*., 2008; SILVA *et al*., 2012; YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2017).

Todo o sistema fotossintético das plantas é alterado em função do aumento do CO_2 atmosférico que diretamente altera a síntese de carboidratos (LAMBERS; CHAPIN III; PONS, 2008). Os carboidratos solúveis em geral aumentam nas plantas submetidas à elevada concentração de CO_2, levando a um acúmulo nas folhas (ARENQUE *et al*., 2014; PALACIOS, 2017). Esse acúmulo pode resultar em um aumento na taxa de crescimento e produtividade (AIDAR *et al.*, 2002; AINSWORTH; LONG, 2005; CAO *et al*., 2017).

Meta-análises apontam diferenças nas respostas das plantas de acordo com o hábito de vida (arbóreas ou herbáceas) (AINSWORTH; LONG, 2005; AINSWORTH; ROGERS, 2007). Nestes estudos foi mostrado que as espécies arbóreas são mais responsivas ao eCO_2 através do aumento de biomassa (AINSWORTH; LONG, 2005, 2021; AINSWORTH; ROGERS, 2007). No entanto, algumas herbáceas cultivadas, como cana-de-açúcar, soja, trigo e milho também respondem positivamente ao eCO_2 através de um aumento na produtividade (BUNCE, 2016; DE SOUZA *et al*., 2008; LEAKEY *et al*., 2012; PALACIOS *et al*., 2019; RUDORFF *et al.*, 1996). Portanto, esses efeitos precisam de maior quantidade de dados a fim de melhorar a compreensão das respostas fisiológicas de cada um desses grupos de plantas em função do eCO_2 (ANDERSON-TEIXEIRA *et al.*, 2016; LONG *et al.*, 2006; NORBY *et al.*, 2001).

A maioria dos trabalhos sobre o comportamento fisiológico das plantas sob elevado CO_2 foi realizada com espécies de clima temperado (ver AINSWORTH; LONG, 2005, 2021; CURTIS, 1996; CURTIS; WANG, 1998; HAWORTH *et al.*, 2016; WAND *et al.*, 1999; YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2017). Diversas meta-análises realizadas destacaram a importância de incluir experimentos que abordam o aumento do CO_2 em função das respostas das plantas tropicais (AINSWORTH; LONG, 2005, 2021; JONES *et al*., 2014; KÖRNER, 2009; LEAKEY *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2021). Uma meta-análise que reuniu todos os trabalhos realizados em FACE encontrou e incluiu apenas um estudo feito no Brasil com plantas de café (ZHANG *et al.*, 2021). No entanto, se considerarmos estudos realizados em OTCs, existem no Brasil diversos trabalhos que abordam o efeito do eCO_2 em plantas tropicais (ARENQUE *et al*., 2014; GHINI *et al.*, 2015; MELO *et al.*, 2018; MENDES DE REZENDE *et al.*, 2015; OLIVEIRA; SILVA; CARVALHO, 2016; RAKOCEVIC *et al*., 2016 e outros). Mesmo contendo diversos estudos brasileiros (FORTIRER *et al.*, 2020; e capítulo I) existe a necessidade de mais pesquisa nesta área, principalmente pela abundância de espécies e biomas, como também a necessidade de incluir mais variáveis fisiológicas para demonstrar com maior profundidade as respostas das plantas às mudanças climáticas.

O território brasileiro possui seis biomas distintos (Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pampas e Pantanal) (IBGE, 2021). Além disso, é a nação mais rica em carbono florestal (63 bilhões de toneladas) (FAO, 2010) e detentora da maior parcela de biodiversidade vegetal do planeta (56.000 espécies de plantas conhecidas) (UNEP-WCMC, 2010), o que denota a importância do país para o equilíbrio do clima e a produção de alimentos, tendo assim impacto

significativo sobre toda a economia global. Ao mesmo tempo, o Brasil é responsável por desmatar mais de 55 milhões de hectares entre os anos de 1990–2010 (FAO, 2010), sendo o desmatamento o principal fator de emissão de carbono do país (NOVAES *et al.*, 2017). Portanto, realizar uma meta-análise considerando o aumento de carbono atmosférico em espécies de plantas nativas e cultivadas no Brasil, tem grande relevância para auxiliar a desenhar melhores formas de adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade de plantas e a agricultura. O desafio que essa situação apresenta é exacerbado pela falta de meta-análises sobre as respostas das plantas ao elevado CO_2 em muitos biomas importantes, mas especialmente nos trópicos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma meta-análise sobre o efeito do eCO_2 sobre diversos parâmetros fisiológicos de plantas em clima tropical brasileiro. Nestas análises foi possível: (I) estimar o tamanho do efeito médio do elevado CO_2 atmosférico sobre a fotossíntese, metabolismo dos carboidratos foliar e na biomassa das plantas e (II) verificar se os efeitos do eCO_2 são influenciados pelo hábito de vida das espécies (arbóreas e herbáceas).

2. Metodologia

2.1. Busca na literatura

A pesquisa da literatura para a obtenção dos dados sobre o efeito do elevado CO_2 nas plantas foi realizada em três bases de dados (*Web of Science*, *Scielo* e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações) em março de 2019. Para cada base de dados foram utilizadas combinações de palavras-chave diferentes (Anexo 1) que resultaram em um total de 1.625 trabalhos (FORTIRER *et al.*, 2020). O conjunto de dados incluiu um total de 36 estudos realizados no Brasil que investigaram as respostas das plantas ao tratamento de elevado CO_2, contemplando 11 espécies arbóreas e 16 herbáceas (Tabela 1). Foram extraídos dados em três categorias de variável resposta: biomassa, carboidratos não estruturais (açúcares solúveis e amido) e fotossíntese, que inclui taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (gs), taxa de transpiração foliar (E), eficiência fotossintética do uso de água (EUA), respiração noturna (Rd), velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}), taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) e taxa de CO_2 intercelular e ambiental (Ci/Ca). A biomassa total de árvores e herbáceas foi obtida de acordo com os dados de biomassa fornecidos nos estudos. Para

os estudos que forneciam valores da biomassa total foi extraído apenas este dado. No entanto, alguns estudos não forneciam os valores de biomassa total e sim os valores de biomassa por órgão. Para esses, o valor da biomassa de cada órgão foi incluído como uma observação no conjunto de dados para o modelo meta-analítico. Para a extração dos dados de açúcares solúveis totais, cada açúcar (glicose, frutose, sacarose, rafinose e mio-inositol) foi considerado uma observação, assim como realizado para biomassa.

Para cada observação, foram coletados os valores de média, o desvio/erro padrão e o tamanho amostral sob elevado CO_2 e no tratamento controle (CO_2 ambiente). Para os dados que foram apresentados apenas em formato de figura foi utilizado o *WebPlotDigitizer* v4.1 (ROHATGI, 2020), para conversão em dados numéricos. Para os artigos que apresentavam apenas o valor do erro padrão, foi utilizada a equação: $SD=SE\sqrt{n}$, para calcular o valor do desvio padrão (sendo n o tamanho da amostra, SE o erro padrão e SD o valor do desvio padrão) (LUO; HUI; ZHANG, 2006).

Para os experimentos que realizaram medidas ao longo de um determinado período (análises temporais) foi considerado apenas o último dia de coleta, que representa o máximo de exposição dessas plantas ao elevado CO_2. A duração média dos experimentos foi de 188 dias. O tratamento de CO_2 ambiente variou entre 350 e 400 ppm, e o eCO_2 variou entre 550 e 1.000 ppm (Tabela 1). A exposição das plantas ao CO_2 foi em OTC ou FACE.

2.2. Meta-análise

Foi realizada uma meta-análise para avaliar as respostas das plantas ao eCO_2 em relação à biomassa total produzida, atividade fotossintética e carboidratos não estruturais. Para verificar as mudanças relativas dessas respostas entre o tratamento (eCO_2) versus controle (aCO_2 – concentração de CO_2 ambiente) foi calculado como tamanho de efeito a razão de resposta logarítmica *ln (RR)*, onde *Xe* é a média do grupo experimental/tratamento e *Xc* é a média do grupo controle (HEDGES; GUREVITCH; CURTIS, 1999):

$$\ln(RR) = \ln(Xe/Xc)$$

Os valores de *ln (RR)* maiores que zero indicam que o efeito do eCO_2 aumenta, enquanto valores negativos indicam o efeito do eCO_2 diminuiu em relação ao aCO_2. Em seguida, foi usado um modelo hierárquico de efeitos mistos para estimar a média e o intervalo de confiança de 95% (CI) do *ln (RR)* para cada tipo de variável resposta. Se o CI de 95% de uma variável resposta se sobrepõe a zero, o *ln (RR)* do tratamento não é significativamente diferente do controle (HEDGES; OLKIN, 2014). Além disso, a forma de vida da planta foi utilizada como variável preditora fixa enquanto as espécies foram consideradas como variáveis aleatórias para controlar a falta de independência de observações provenientes do mesmo estudo e/ou feito com a mesma espécie de planta (NAKAGAWA *et al*., 2017; NAKAGAWA; SANTOS, 2012). Para cada variável preditora foram consideradas no mínimo cinco observações. Em seguida, foi testada a heterogeneidade (I^2) (HIGGINS, 2003; NAKAGAWA *et al*., 2019; NAKAGAWA; SANTOS, 2012) para verificar a variação dos resultados entre os estudos. Para testar o viés de publicação, foi utilizado o teste de regressão de *Egger* (EGGER *et al.*, 1997). Quando o valor de intercepto na regressão de *Egger* é diferente de zero ($p < 0.05$) isto indica existência de viés, pois os resíduos do modelo e as variações do tamanho do efeito são assimétricos (STERNE; EGGER, 2006). As análises de viés para os modelos multinível foram conduzidas com os resíduos meta-analíticos (NAKAGAWA; SANTOS, 2012). As análises foram conduzidas com a utilização do pacote "*metafor"* (VIECHTBAUER, 2010) e os gráficos foram gerados com a utilização do pacote ggplot2 (WICKHAM, 2009), ambos no programa R versão 3.6.0 (R CORE TEAM, 2018).

Tabela 1. Espécies cultivadas sob diferentes concentrações atmosféricas de CO_2 (ambiente e elevado), classificadas de acordo com o hábito de vida (herbácea e arbórea) e tipo de via fotossintética. O critério para separação entre plantas herbáceas neste trabalho foi de plantas que não apresentam crescimento secundário. Em negrito são apresentados os resultados obtidos por teses ou dissertações. As letras maiúsculas ao lado das referências são as teses/dissertação com artigos publicados.

Espécies	CO_2 ambiente	Elevado CO_2	Grupo funcional	Via fotossintética	Experimento	Referência
Brachiara decumbens	390	550	herbácea	C4	FACE	**Abdalla, 2018**
Hymenaea courbaril	360	720	arbórea	C3	OTC	Aidar et al. 2002
Panicum maximum	390	600	herbácea	C4	FACE	**Approbato, 2015**
Senna reticulata	380	760	arbórea	C3	OTC	**Arenque-Musa, 2010**[A]
Senna reticulata	380	760	arbórea	C3	OTC	Arenque-Musa et al. 2014[A]
Senna reticulata	400	800	arbórea	C3	OTC	**Arenque-Musa, 2014**
Panicum maximum	400	600	herbácea	C4	FACE	**Bortolin, 2016**
Glycine max	360	720	herbácea	C3	OTC	Braga et al. 2006
Solanum lycopersicum	400	750	herbácea	C3	OTC	**Brito, 2016**
Panicum maximum	400	600	herbácea	C4	FACE	**Britto, 2016**
Hymenaea courbaril	360	720	arbórea	C3	OTC	**Costa, 2004**
Coffea sp.	390	550	arbórea	C3	FACE	DaMatta et al. 2015
Saccharum sp.	370	720	herbácea	C4	OTC	**De Souza, 2007**[B]
Saccharum sp.	370	720	herbácea	C4	OTC	De Souza et al. 2008[B]
Saccharum sp.	390	750	herbácea	C4	OTC	**De Souza, 2011**
Urochloa brizantha	360	550	herbácea	C4	OTC	Faria et al. 2015
Alchornea glandulosa	400	800	arbórea	C3	OTC	Fauset et al. 2019
Eucalyptus sp	380	700	arbórea	C3	FACE	**Fontes, 2017**
Coffea arabica	390	550	arbórea	C3	FACE	Ghini et al. 2015
Senna reticulata	380	760	arbórea	C3	OTC	**Grandis, 2010**
Glycine max	380	760	herbácea	C3	OTC	**Kretzschmar, 2007**[C]
Glycine max	380	760	herbácea	C3	OTC	Kretzschmar et al. 2009[C]
Glycine max	360	720	herbácea	C3	OTC	**Lobo, 2003**
Hymenaea courbaril	370	720	arbórea	C3	OTC	**Machado, 2007**
Hymenaea stigonocarpa	370	720	arbórea	C3	OTC	**Machado, 2007**
Hymenaea courbaril	380	760	arbórea	C3	OTC	**Mayorga, 2010**
Enterolobium contortisiliquum	380	700	arbórea	C3	OTC	**Melo, 2015**
Hymenaea stigonocarpa	380	700	arbórea	C3	OTC	**Melo, 2015**
Melinis minutiflora	380	700	herbácea	C4	OTC	**Melo, 2015**
Euterpe oleracea	380	760	herbácea	C3	OTC	**Mortari, 2015**
Vernonia herbacea	380	760	herbácea	C3	OTC	Oliveira et al. 2010
Cariniana legali	380	760	arbórea	C3	OTC	Oliveira et al. 2012
Croton urucurana	380	760	arbórea	C3	OTC	Oliveira et al. 2012
Viguiera discolor	380	760	herbácea	C3	OTC	Oliveira et al. 2013
Chrysolaena obovata	380	760	herbácea	C3	OTC	Oliveira et al. 2016
Melinis minutiflora	350	1000	herbácea	C4	OTC	**Oliveira, 2017**
Stylosantes capitata	350	1000	herbácea	C3	OTC	**Oliveira, 2017**
Solanum curtilobum	360	720	herbácea	C3	OTC	Olivo et. 2002
Solanum tuberosum	360	720	herbácea	C3	OTC	Olivo et. 2002
Solanum lycopersicum	400	750	herbácea	C3	OTC	**Pimenta, 2017**
Coffea arabica	390	590	arbórea	C3	FACE	Rakocevic et al. 2016
Coffea arabica	390	590	arbórea	C3	FACE	Rakocevic et al. 2018
Psidium guajava	390	780	arbórea	C3	OTC	Rezende et al. 2015
Baccharis dracunculifolia	360	720	arbórea	C3	OTC	Sá et al. 2014
Zea mays	380	700	herbácea	C4	OTC	**Silva, 2010**
Phaseolus vulgaris	380	700	herbácea	C3	OTC	**Silva, 2010**

3. Resultados

Neste trabalho, foram incluídos 36 estudos, que analisaram ao todo 27 espécies (11 árvores e 16 herbáceas) em sete diferentes localizações de áreas de estudo, os quais foram realizados em sistemas de OTC e quatro sistemas de FACE (Tabela 1). No total, foram analisados 11 tipos de variáveis resposta operacionais (Figura 1) distribuídas em três variáveis teóricas: fotossíntese, biomassa e carboidratos não estruturais. Para cada observação incluída, foi gerada uma estimativa de tamanho de efeito, resultando num total de 206 estimativas de tamanho de efeito, sendo 97 de espécies arbóreas e 109 de espécies herbáceas.

Para herbáceas, a biomassa das plantas foi a variável que teve maior número de observações, enquanto para as árvores o maior número de observações foi para açúcares solúveis (*AST*) (Figura 1). Parâmetros de eficiência no uso da água (*EUA*) e transpiração (E) são dados que derivam das medidas de assimilação líquida de CO_2 (*A*) e são muito importantes para a compreensão de aspectos da produtividade agrícola. Portanto houve proporcionalmente mais observações para herbáceas (25) do que para arbóreas (21). Algumas variáveis apresentaram mais medidas que outras, dependendo do hábito das plantas e das perguntas de cada trabalho (Figura 1). O número de espécies, experimentos OTC e FACE e observações individuais para cada resposta desta meta-análise são fornecidos no Anexo 2.

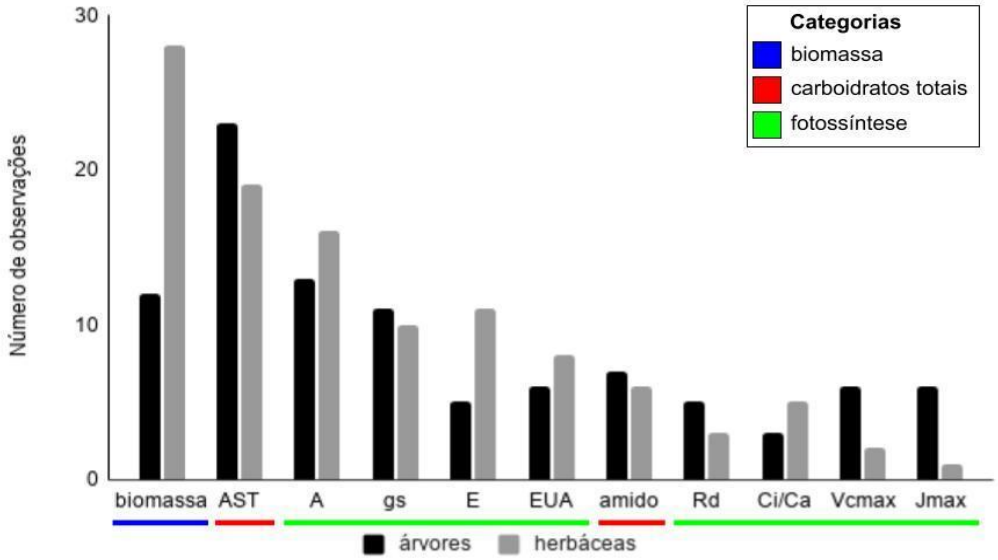

Figura 1. Número de observações para diferentes tipos de variáveis respostas operacionais de acordo com a hábito de vida (árvores e herbáceas), incluindo biomassa, açúcares solúveis totais (AST), taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (gs), taxa de transpiração foliar (E), eficiência fotossintética do uso de água (EUA), amido, respiração noturna (Rd), taxa de CO_2 intercelular e ambiente (Ci/Ca), velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}) e taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}).

3.1. Parâmetros fotossintéticos são estimulados em plantas em clima tropical sob elevado CO_2

A estimativa média em todas as espécies apresentou um aumento na taxa de assimilação líquida de CO_2 (+49%) e na eficiência do uso da água (+116%) em função do eCO_2 (Figura 2, Tabela 2). Enquanto que a condutância estomática e a taxa de transpiração apresentaram uma diminuição em eCO_2 de 23% e 22%, respectivamente (Tabela 2), o eCO_2 não apresentou efeito nas respostas fotossintéticas para Rd, Ci/Ca, E, J_{max} e Vc_{max}, para todas as espécies (Efeito total) (Tabela 2).

Tabela 2. Variáveis operacionais com as estimativas médias dos modelos meta-analíticos separadas por categorias de fotossíntese, carboidratos e biomassa, entre todas as espécies (todos) e divididas pelo hábito de vida (árvores e herbáceas). O número de observações/tamanhos de efeito é representado por (*k*). Estimativas médias com intervalo máximo e mínimo (*CI*). O valor da estimativa média está representado em porcentagem. E o p-valor abaixo de 0.05 é considerado significativo pelo método meta-analítico.

Variáveis		k	Média (LnRR)	Lower CI (2.5%)	Upper CI (97.5%)	% mudança	p-valor
Fotossíntese							
	total	29	0.40	0.27	0.53	49%	**< 0.00**
A	árvores	13	0.36	0.16	0.55	43%	**0.00**
	herbáceas	16	0.38	0.23	0.53	46%	**< 0.00**
	total	21	-0.27	-0.48	-0.06	-23%	**0.01**
gs	árvores	11	-0.11	-0.44	0.21	-10%	0.50
	herbáceas	10	-0.36	-0.67	-0.05	-30%	**0.02**
	total	8	-0.14	-0.36	0.07	-13%	0.20
Rd	árvores	5	-0.24	-0.47	-0.01	-21%	**0.03**
	total	3	0.08	-0.21	0.39	9%	0.56
	total	16	-0.25	-0.49	-0.02	-22%	0.10
E	árvores	5	-0.33	-0.78	0.11	-28%	0.14
	herbáceas	11	-0.22	-0.50	0.05	-20%	0.11
	total	14	0.77	0.44	1.09	116%	**< 0.00**
EUA	árvores	6	0.54	0.12	0.96	73%	**0.01**
	herbáceas	8	0.90	0.51	1.29	148%	**< 0.00**
	total	8	-0.02	-0.10	0.05	-2%	0.56
Ci/Ca	árvores	3	-0.07	-0.18	0.02	-7%	0.15
	herbáceas	5	0.03	-0.06	0.12	3%	0.50
Jmax	total	7	-0.12	-0.31	0.06	-11%	0.18
Vcmax	total	8	-0.20	-0.46	0.05	-18%	0.12
Carboidratos							
	total	42	0.06	0.01	0.12	7%	**0.00**
AST	árvores	23	0.06	-0.00	0.14	7%	0.07
	herbáceas	19	0.06	-0.00	0.14	6%	0.07
	total	13	0.46	0.17	0.75	58%	**0.00**
Amido	árvores	7	0.57	0.19	0.96	78%	**0.00**
	herbáceas	6	0.31	-0.12	0.75	36%	0.16
Biomassa							
	total	40	0.14	0.03	0.26	30%	**0.01**
	árvores	12	0.30	0.11	0.48	62%	**0.00**
	herbáceas	28	0.06	-0.06	0.19	22%	0.33

Quando separadas por grupos, as árvores e herbáceas apresentaram respostas similares (p = 0.8668, Tabela 3) de incremento da *A*, em 43% e 46%, respectivamente (Figura 2a, Tabela 2). De forma semelhante, o hábito de vida também não foi significativo para diferenciar as respostas de árvores e herbáceas ao eCO_2 para gs (p = 0.2704, Tabela 3). Contudo, separadamente a resposta de *gs* ao eCO_2 nas herbáceas foi significativa e reduziu em 30% (p = 0.0215), enquanto as árvores apresentaram apenas uma tendência de redução, devido principalmente pela alta variância dos dados (Tabela 2 e Figura 2b).

Tabela 3. Análise do moderador para verificar a influência do hábito de vida entre árvores e herbáceas no tamanho do efeito do elevado CO_2 nas plantas.

Variáveis	p-valor
Fotossíntese	
A	0.8668
gs	0.2704
E	0.1087
EUA	0.4002
Rd	0.0858
Ci/Ca	0.1332
Jmax	-
Vcmax	-
Carboidratos	
AST	0.9657
Amido	0.3741
Biomassa	**0.0389**

A respiração no escuro sob eCO_2 nas árvores diminuiu 21%, mas nas herbáceas não houve um efeito do eCO_2 em Rd (Figura 2c, Tabela 2). O hábito de vida não diferenciou as respostas de Rd entre árvores e herbáceas expostas ao eCO_2 (p = 0.0858, Tabela 3). A transpiração foliar entre árvores e herbáceas não apresentou diferenças em função do eCO_2 (p = 0.1087, Tabela 3) com diminuição média de -28% e -20%, respectivamente (Figura 2d, Tabela 2). O hábito de vida também não foi significativo (p = 0.4002, Tabela 3) na resposta de eficiência do uso da água (*EUA*) ao eCO_2. As herbáceas tiveram um aumento médio em EUA de +148% quando submetidas ao eCO_2 (Figura 2d, Tabela 2), enquanto as árvores tiveram um aumento de aproximadamente +73% (Figura 2d, Tabela 2). A exposição de plantas ao eCO_2 diminui a taxa de transpiração (E) tanto para árvores quanto para herbáceas, com -28% e -20%, respectivamente

(Figura 2d, Tabela 2). No entanto, não houve diferença nas respostas de *E* ao eCO_2 para o hábito de vida (p = 0.1087, Tabela 3). A resposta da taxa *Ci/Ca* nas árvores e nas herbáceas não foram significativas (p = 0.1332, Tabela 3, Figura 2f). A quantidade de dados para algumas das variáveis (*Rd*, *E* e *Ci/Ca*) foi relativamente menor, dificultando as análises estatísticas. É, portanto, necessário que mais estudos que pesquisem o efeito do eCO_2 a respeito dessas variáveis para que futuras meta-análises possam incluir tais dados e proporcionar uma análise mais consistente.

Plantas tropicais submetidas ao elevado CO_2 apresentaram diminuição de Vc_{max} (-17%) e J_{max} (-9%) (Figura 2g-h). No entanto, a velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}) e a taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) foram representativas apenas para o conjunto de todas as plantas, sem categorização, pois as herbáceas apresentaram apenas n = 2, 1 e as árvores n = 6, 6 respectivamente para Vc_{max} e J_{max}. Foram poucos os estudos que contemplaram esse tipo de informação, uma vez que exige medidas mais complexas como curvas de resposta ao CO_2 (A-Ci). O agrupamento de todos os dados encontrados para espécies que possuem esses dados foi mais robusto.

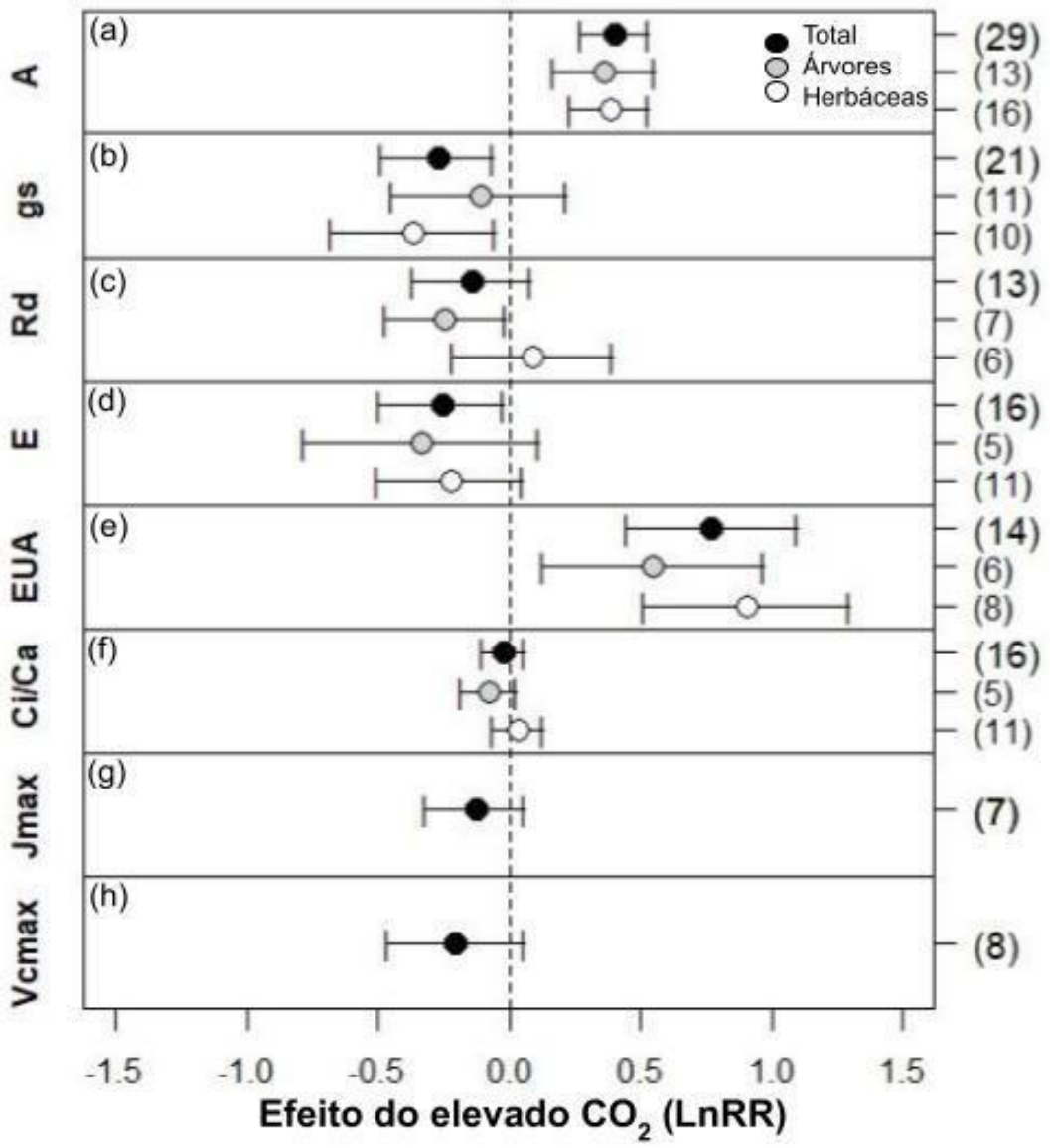

Figura 2. (a) Respostas da taxa de assimilação líquida ao CO_2 (*A*), **(b)** condutância estomática (gs), **(c)** taxa de respiração foliar no escuro (*Rd*), **(d)** taxa de transpiração (*E*), **(e)** eficiência fotossintética do uso da água (*EUA*), **(f)** taxa de CO_2 intercelular por CO_2 atmosférico (*Ci/Ca*), **(g)** taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) e **(h)** velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (Vc_{max}) ao elevado CO_2 em comparação ao CO_2 ambiente. De acordo com o efeito total e o hábito de vida (árvores e herbáceas). Os círculos representam a média e as barras representam ±95% intervalos de confiança (CI). Valores que não sobrepõem ao zero possuem diferença significativa ($\alpha < 0.05$). Os números entre parênteses representam o número de observações.

3.2. O amido é o carboidrato não estrutural que aumenta a concentração em folhas em plantas sob elevado CO_2

Observamos que o elevado CO_2 não contribuiu para alterações nas concentrações de açúcares solúveis totais nas folhas (AST) para todas as plantas analisadas (Figura 3, Tabela 2).

Respostas similares foram verificadas ao fazer a análise por hábito de vida (p = 0.9657), denotando que não há diferenças significativas em nenhum caso (Figura 3). Além dos açúcares solúveis, outro carboidrato não estrutural é o amido (Figura 3). Porém, no universo de dados obtidos neste trabalho, o amido foi relativamente menos representativo. Para o amido, houve um aumento significativo de 58% nas folhas do total de plantas expostas ao eCO_2. Apesar de não ter havido diferenças significativas entre as respostas do amido em eCO_2 em árvores e herbáceas (p = 0.3741, Tabela 3), as arbóreas examinadas neste estudo parecem apresentar teor proporcionalmente maior de amido nas folhas. O resultado para herbáceas é dúbio, uma vez que a variabilidade foi muito alta.

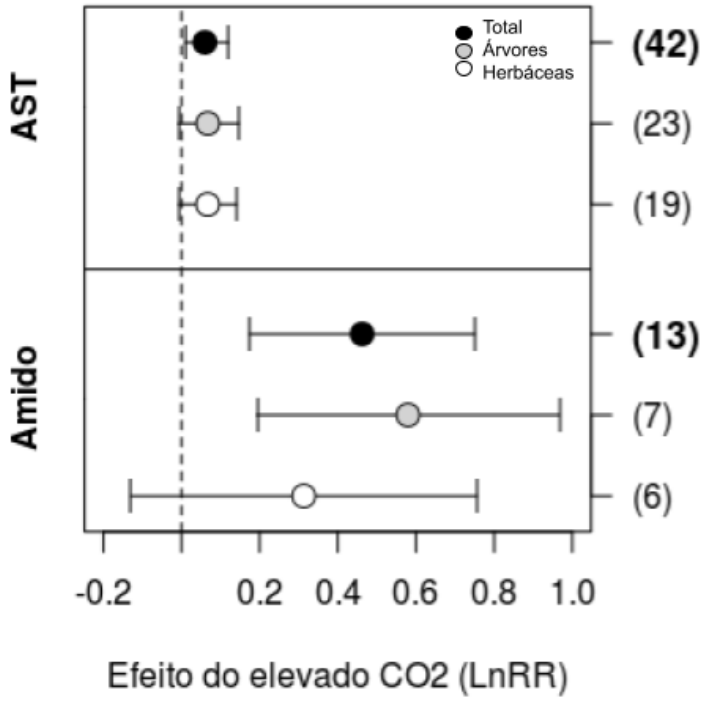

Figura 3. Respostas dos açúcares solúveis foliar (AST) e amido foliar ao elevado CO_2 em relação ao efeito total e de acordo com o hábito de vida (árvores e herbáceas). Os círculos representam a média e as barras representam ±95% intervalos de confiança (CI). Valores que não sobrepõem ao zero possuem diferença significativa (α <0.05). Os números entre parênteses representam o número de observações.

3.3. A biomassa aumenta em resposta ao elevado CO_2 e é diferente entre árvores e herbáceas

A análise do efeito do elevado CO_2 considerando conjuntamente árvores e herbáceas mostrou um aumento médio na biomassa total de 16% sob elevado CO_2 em relação ao ambiente

(Figura 4). No entanto, esse efeito difere entre árvores e herbáceas (p= 0.0034, Tabela 2). As árvores jovens apresentaram efeito positivo do eCO_2 sobre seu crescimento, com aumento médio de 35% da biomassa. Por outro lado, a resposta das herbáceas não foi significativa (Figura 4). Além disso, mesmo que o número de observações para árvores seja menor que o total de observações para herbáceas, as árvores apresentaram um aumento significativo na biomassa quando expostas ao eCO_2 (Figura 4). Por outro lado, as herbáceas tiveram maior quantidade de espécies (16) analisadas em comparação às árvores, com sete (Anexo 2). Então, essa maior variedade de espécies no grupo das herbáceas pode ter influenciado na variância dos tamanhos de efeito na meta-análise.

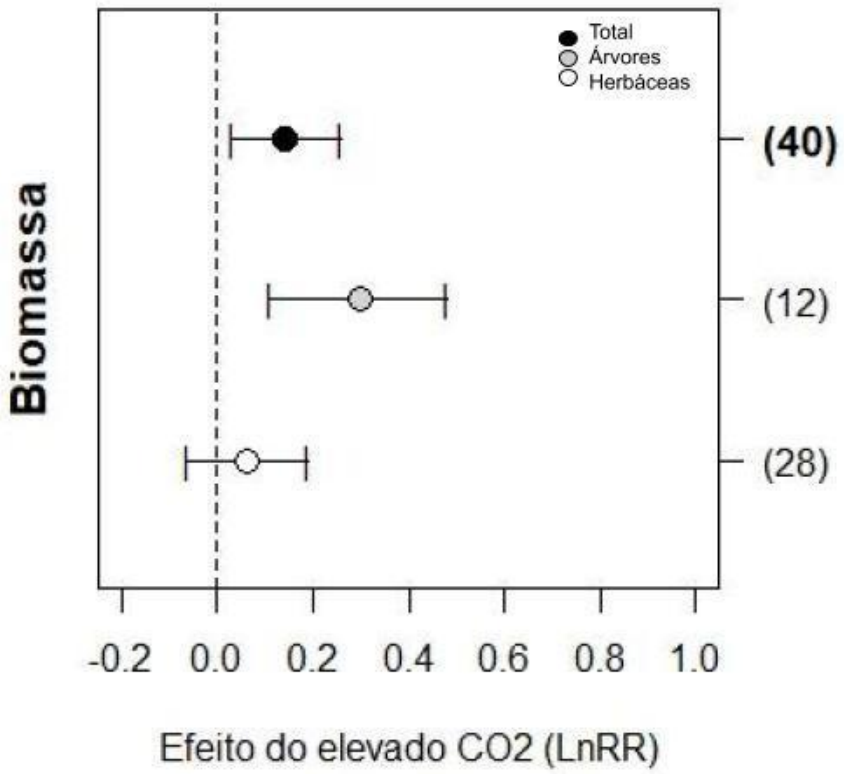

Figura 4. Respostas da biomassa total ao elevado CO_2 em relação ao efeito total e o hábito de vida (árvores e herbáceas). Os círculos pretos representam a média e as barras representam ±95% intervalos de confiança (CI). Valores que não sobrepõem ao zero possuem diferença significativa (α <0.05). Os números entre parênteses representam o número de observações.

3.4. Heterogeneidade e viés de publicação

A heterogeneidade em nossos modelos analíticos foi alta (I^2 > 75, Tabela 4) para A, gs, Rd, E, EUA, Ci/Ca, AST, amido e biomassa. O alto grau de heterogeneidade indica que existe

variação nas respostas entre os estudos das variáveis analisadas para o efeito do eCO_2. Contudo, houve pouca variação para J_{max} e Vc_{max}, sendo que a heterogeneidade foi bem baixa ($I^2 \sim 0$) (Tabela 4). Esses resultados demonstram que as variáveis J_{max} e Vc_{max} respondem de maneira similar ao eCO_2 em diferentes espécies. Posteriormente foi realizada uma análise de heterogeneidade com o moderador hábito de vida no modelo meta-analítico para verificar a heterogeneidade que não foi explicada pelo modelo (Tabela 4). No entanto, a análise de heterogeneidade com o moderador também resultou em alta heterogeneidade, evidenciando que existem outros fatores não analisados neste estudo que influenciam na variação da estimativa de efeito entre os estudos.

Usando a amostragem de variância como um preditor, os resultados da regressão de *Egger* não implicaram em assimetria dos resíduos do modelo meta-analítico. Portanto, não foram encontradas evidências de viés de publicação para as variáveis A, gs, Rd, E, EUA, Ci/Ca, AST, amido e biomassa (Tabela 4). No entanto, o teste de *Egger* identificou um viés de publicação para as variáveis J_{max} e Vc_{max} (Tabela 4). Este viés de publicação pode ter sido influenciado pelo baixo número de estudos incluídos para essas variáveis.

Tabela 4. Teste de *Egger* para verificar o viés de publicação na meta-análise e Teste de Heterogeneidade para verificar a variação das estimativas médias entre os estudos.

	Teste Egger	Teste Heterogeneidade	
Variáveis	p-valor	I^2 sem moderador	I^2 com moderador
A	0,822	93,04	84,26
gs	0,838	91,84	90,02
Rd	0,359	93,65	92,42
E	0,6539	93,82	93,01
EUA	0,715	93,2	92,91
CiCa	0,739	89,75	88,24
Jmax	**0,04463**	< 0.0001	-
Vcmax	**0,02826**	< 0.0001	-
AST	0,937	79,27	76,81
Amido	0,2887	92,11	91,78
Biomassa	0,6259	97,33	96,61

Quando o intercepto não é significativamente diferente de zero, sugere-se ausência de viés de publicação. Valores de I^2 até 25% são considerados com baixa heterogeneidade, de 25 a 50% intermediárias e maiores que 75% são considerados com alta heterogeneidade.

4. Discussão

4.1. Assimilação fotossintética é maior em elevado CO_2 e semelhante entre herbáceas e árvores

A exposição ao eCO_2 estimulou significativamente a taxa de assimilação líquida de CO_2 (*A*) melhorando a eficiência do uso de água (*EUA*), devido à diminuição da condutância estomática (gs) e por fim reduzindo a estimativa média da taxa de transpiração foliar (*E*) para todas as observações analisadas neste estudo (Figura 2). Meta-análises anteriores utilizaram grande quantidade de observações e mostraram resultados semelhantes (AINSWORTH; LONG, 2005; CURTIS, 1996). Após a análise do efeito total do eCO_2, as espécies foram categorizadas de acordo com o hábito de vida e, para todas as variáveis analisadas de fotossíntese, as respostas ao eCO_2 entre árvores e herbáceas foi semelhante (Tabela 3).

A fotossíntese é um dos principais processos para o aumento no crescimento das plantas em eCO_2 (WANG *et al.*, 2012). Tanto as árvores jovens (+43%), quanto herbáceas (+46%), apresentaram um aumento significativo na taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) em resposta ao eCO_2 (Tabela 2). Houve uma diminuição de gs de 23% para todas as espécies, o que é consistente com os resultados encontrados (AINSWORTH; LONG, 2005; AINSWORTH;

ROGERS, 2007; CURTIS, 1996; DRAKE; GONZÀLEZ-MELER; LONG, 1997; LONG *et al.,* 2006. Em árvores da região europeia, essa redução foi similar, chegando a -21% (MEDLYN *et al*., 2001). Por outro lado, o estudo de CURTIS & WANG (1998) não encontrou diferenças significativas na condutância estomática em espécies arbóreas ao eCO_2. Além disso, resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho de resposta gs ao eCO_2 foram verificados para árvores e herbáceas (WANG *et al.*, 2012). A resposta de gs ao eCO_2 é importante para modelagem de ecossistemas e fluxo de água (WANG *et al*., 2012) e verificar se há similaridade entre espécies de clima tropical e temperado pode auxiliar na elaboração de modelos que predizem os efeitos das mudanças climáticas da vegetação em clima tropical.

O eCO_2 aumenta a concentração de CO_2 intracelular nas folhas (ZHANG *et al.*, 2021), que por sua vez, é necessário para manter a pressão de CO_2 dentro do mesófilo sempre menor do que a pressão parcial atmosférica de CO_2 (DRAKE; GONZÀLEZ-MELER; LONG, 1997). Para regular essa pressão de CO_2 no mesófilo, as plantas fecham seus estômatos levando à diminuição de gs e consequentemente reduzem a transpiração (SABAN; CHAPMAN; TAYLOR, 2019; ZHANG *et al.*, 2021). Isto ocorre principalmente em condições de elevada temperatura e baixa disponibilidade hídrica (VARGA *et al.*, 2017). Ao aumentar a concentração de CO_2 no mesófilo e diminuir gs, há um aumento da eficiência do uso da água, que foi significativo tanto em árvores quanto em herbáceas tropicais examinadas neste trabalho (Figura 2d). No entanto, o declínio no *gs* não reduziu a fotossíntese em plantas submetidas ao eCO_2, limitando o fluxo de carbono, pois manteve as taxas Ci/Ca semelhantes ao CO_2 ambiente (Figura 2). Para plantas de milho - uma gramínea herbácea – cultivadas em eCO_2, também não foram observadas diferenças em Ci/Ca, mesmo com diferenças na taxa de assimilação líquida de CO_2 em plantas expostas ao eCO_2 em comparação ao CO_2 ambiente (LEAKEY *et al.*, 2006).

O aumento significativo de *EUA* foi encontrado em todas as plantas expostas ao eCO_2 resultam em uma menor perda de água por carbono assimilado (Figura 2e). Maiores taxas fotossintéticas em alto CO_2 melhoram a EUA, definida como a razão entre a absorção de carbono e a perda de água (LAMBERS; CHAPIN III; PONS, 2008; ZISKA; BUNCE, 2006). Outros fatores, como estresse hídrico e aumento de temperatura, podem influenciar a *EUA* em árvores e herbáceas em função do eCO_2. Contudo, é possível verificar que menores quantidades de água no solo previstas pela mudança nos níveis de precipitação, podem contribuir para o aumento do ganho de carbono e na produtividade primária líquida (LEAKEY *et al.*, 2012). Além disto, tais

efeitos talvez sejam independentes do hábito das plantas, já que a *E* não apresentou mudanças quando analisadas em plantas expostas ao elevado CO_2 (Figura 2d). Estudos demonstram que foi observada a redução em E nas plantas expostas ao eCO_2 e ao déficit hídrico, pelo efeito indireto que o CO_2 pode proporcionar na redução da condutância estomática (LEAKEY *et al.*, 2009). Contudo, plantas expostas ao eCO_2, geralmente, reduzem a condutância e com isso reduzem a perda de água por transpiração (AINSWORTH; ROGERS, 2007), mantendo elevadas as taxas de assimilação líquida de CO_2 (Figura 2a). Recentemente, BENCKE e colaboradores (2019) demonstraram que, fisiologicamente, a elevação do CO_2 tem a capacidade de reverter os efeitos do estresse hídrico e também da temperatura. Portanto, evidências se acumulam fortalecendo a hipótese de que um aumento da taxa fotossintética como consequência da elevação do CO_2 poderá ter algum efeito protetor contra estresses, falta d'água e temperatura – conforme PALACIOS *et al*. (2019), gerados pelas mudanças climáticas sobre as plantas.

As plantas produzem ATP por meio da oxidação do açúcar reduzido construído durante a fotossíntese e o utilizam para processos de manutenção e desenvolvimento (TAIZ; ZEIGER, 2013). Esse processo metabólico dos fotoassimilados é conhecido como respiração e aumenta quando a planta é exposta às condições desfavoráveis (BISBIS; GRUDA; BLANKE, 2018). Por outro lado, observamos para as árvores tropicais jovens que, em condições favoráveis como o aumento do nível de CO_2 atmosférico, a respiração no escuro diminuiu (Figura 2c). A respiração deve ser preferencialmente menor em relação a fotossíntese para favorecer bons rendimentos, de forma que a fotossíntese diurna deve exceder a respiração no escuro (MATTOS *et al.*, 2014; MORETTI *et al*., 2010). Dessa forma, espera-se que em cenários futuros, as plantas tropicais apresentem uma respiração noturna reduzida, aumentando a eficiência da produtividade líquida de ganho de carbono (MATTOS *et al.*, 2014; PEET; WOLFE, 2000). CURTIS (1996) contemplando apenas estudos com árvores sob eCO_2 verificou uma redução de Rd em eCO_2. Neste trabalho, a diminuição nas taxas de respiração foliar no escuro em árvores expostas ao eCO_2 pode explicar as maiores concentrações de amido foliar nas espécies arbóreas em alto CO_2. Além da disponibilidade de ATP, a disponibilidade de carboidrato controla diretamente as taxas respiratórias (WILLIAMS; FARRAR, 1990).

A taxa máxima de transporte de elétrons (J_{max}) e a velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco ($Vc_{max)}$ apresentaram uma tendência de diminuição de ~12% e 18%, respectivamente (Figura 2g-h) o que condiz ao observado por (AINSWORTH; LONG, 2005)

Contudo, a diminuição Vc_{max} ocorre à medida que o CO_2 aumenta (LONG; DRAKE, 1992). Também foi observado que a diminuição da atividade e/ou quantidade de Rubisco podem diminuir a Vc_{max} (DRAKE; GONZÀLEZ-MELER; LONG, 1997; SAXE; ELLSWORTH; HEATH, 1998). Porém, essa tendência de redução da taxa de carboxilação não foi proporcional a diminuição na assimilação de carbono, principalmente para as plantas sob eCO_2 (Figura 2a). Além disso, uma diminuição significativa de 10% tanto para J_{max} quanto para Vc_{max} foi relatada para espécies florestais europeias cultivadas no campo sob elevado CO_2 (MEDLYN *et al.*, 1999). Esses resultados demonstram que as respostas de J_{max} e Vc_{max} foram semelhantes para espécies florestais europeias e para as espécies em clima tropical do Brasil.

4.2. Amido é o carboidrato não estrutural que mais se acumula nas folhas de plantas submetidas ao elevado CO_2

A taxa de assimilação pode exceder a capacidade de dreno do crescimento, levando ao acúmulo de um excesso de carboidratos não estruturais, como açúcares solúveis e amido nas folhas (STITT, 1991). Esta alteração promove o aumento do conteúdo de carboidratos não estruturais nas folhas das plantas (KÖRNER, 1995). Os açúcares solúveis e o amido aumentaram em todas as plantas crescidas sob eCO_2 (Figura 2). Contudo, o aumento do amido de 58% foi o principal componente dos carboidratos não estruturais da folha (Figura 3). O aumento da concentração de amido, geralmente, é o principal elemento responsável pelo aumento de carboidratos totais não estruturais em plantas expostas ao eCO_2 (SAXE; ELLSWORTH; HEATH, 1998). Entre árvores e herbáceas em eCO_2 essa diferença não é observada, mostrando um comportamento semelhante que possa ser explicada pela grande variação dos dados devido a diversidade de espécies incluídas nesta meta-análise (TRETHEWEY; SMITH, 2000) e horário de coleta de dados entre os estudos. Durante o dia os níveis de amido aumentam devido a fotossíntese, enquanto à noite, quando não há produção de fotoassimilados, os níveis de amido diminuem para suprir a demanda de substrato nos processos metabólicos da planta (STITT, 1991). Além disso, as espécies variam muito na quantidade de armazenamento de amido (POORTER; KITAJIMA, 2007). Apesar de existirem outras meta-análises que pesquisaram as respostas dos açúcares solúveis e amido em eCO_2, aumento de O_3 ou estresse hídrico (AINSWORTH; LONG, 2005; KORICHEVA; OKSANEN, 2007), este é o primeiro trabalho que

contempla as respostas dos açúcares solúveis e amido ao eCO_2 de acordo com o hábito de vida para árvores e herbáceas.

4.3. O efeito do elevado CO_2 na biomassa é maior em árvores do que em herbáceas

O aumento da taxa de assimilação que resultou em um aumento de amido foliar culminou em um aumento de 30% na biomassa total das plantas em resposta ao eCO_2 (Figura 4). O acúmulo de biomassa foi significativamente diferente para árvores e herbáceas ($p = 0.0389$, Figura 4, Tabela 3). Enquanto para as árvores o eCO_2 resultou em aumento de 62% (Figura 4), nas herbáceas não houve efeito significativo sobre o acúmulo de biomassa. Esses dados corroboram resultados encontrados em outros estudos (AINSWORTH; LONG, 2005; CURTIS; WANG, 1998). O aumento da fotossíntese, impulsionado por eCO_2, pode aumentar a biomassa (ZHANG *et al.*, 2021), mas não é uma correlação simples e linear com a fotossíntese. Há outros fatores que influenciam o processo e os dados das meta-análises referidas neste trabalho, bem como a nossa própria meta-análise, indicam o mesmo. Ou seja, há também a síntese de carboidratos pelo aumento na taxa de assimilação líquida de CO_2 (Figura 2a) e a diminuição da respiração (LAMBERS; CHAPIN III; PONS, 2008). O aumento na eficiência no uso da água não deixa de ser um fator importante para as diferenças observadas na biomassa final obtidas nos experimentos em eCO_2. Isto porque o melhor manejo da água pela planta evita impacto sobre o processo fotossintético, levando a maiores acúmulos de carbono na forma de carboidratos estruturais, que são efetivamente incorporados na biomassa.

O efeito do eCO_2 sobre árvores e ausente em plantas herbáceas pode estar relacionado à idade jovem de muitas das árvores nos experimentos FACE e OTC (AINSWORTH; LONG, 2005; WANG *et al.*, 2012). Além disso, a maioria dos experimentos com espécies arbóreas foi conduzida em experimentos OTCs, que em geral registram uma resposta de crescimento maior (DE GRAAFF *et al.*, 2006). Quando as árvores são cultivadas individualmente, enquanto são jovens e não há restrições na produção de área foliar, podem ocorrer respostas mais intensas ao CO_2 (NORBY *et al.*, 1999). Portanto, deve-se ter cuidado ao extrapolar as respostas de crescimento observadas em árvores na fase jovem para um período de tempo mais longo do que a duração da exposição de eCO_2 nos experimentos (NORBY *et al.*, 1999). Para obter informações de longo prazo sobre as respostas das plantas ao CO_2 elevado, são necessários experimentos de com maior duração e conduzidos em condições naturais. Tais informações

poderão ser obtidas com a realização do projeto AmazonFACE que tem como objetivo mensurar o efeito do eCO_2 na floresta amazônica com experimentos FACE (LAPOLA; NORBY, 2018). Por outro lado, os experimentos com OTC mostram com clareza o potencial de resposta das plantas arbóreas jovens ao eCO_2, ajudando a modelar sistemas florestais em desenvolvimento e seus respectivos potenciais de sequestro de carbono.

No presente trabalho foram incluídas espécies em clima neotropical que podem apresentar um crescimento maior devido às condições do clima ou a genética de cada espécie (RESCO DE DIOS *et al.*, 2016). Contudo, ainda é incerto se o aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2) fará com que as florestas cresçam mais rápido e armazenem mais carbono (KÖRNER, 2009). De forma geral, está bem claro que são necessários mais estudos, o mais breve possível, para obter informações e realizar projeções de respostas de plantas em clima tropical ao eCO_2.

4.4. As respostas das plantas em clima tropical no Brasil se assemelham às respostas em clima temperado

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que as respostas das plantas ao eCO_2 em clima tropical no Brasil são consistentes com aquelas na escala global (que predominantemente incluíram estudos em clima temperado) (CURTIS; WANG, 1998; MEDLYN *et al.*, 1999; WANG *et al.*, 2012). Embora mais experimentos tenham sido incluídos em meta-análises em escala global em plantas temperadas, este estudo indica que o padrão das espécies segue a mesma direção de estimativa de efeito ao eCO_2. Essa semelhança dos resultados entre clima temperado e o de clima tropical no Brasil sugere que quando construídos modelos para predição de respostas das plantas às mudanças climáticas, poderíamos esperar que, de maneira geral, em ambiente tropical estas sejam bastante similares ao que já foi observado para o ambiente temperado em relação apenas ao aumento de CO_2.

No Brasil, relativamente poucos experimentos são realizados com eCO_2 em plantas dos biomas Pantanal, Caatinga, Cerrado e Pampas (Tabela 1). Recomendamos que experimentos futuros se concentrem em plantas desses biomas, pois eles também podem fornecer informações importantes sobre as respostas das plantas ao eCO_2 (FORTIRER *et al.*, 2020), uma vez que esses biomas sofrem períodos de falta de água e elevadas temperaturas (AGUIAR *et al.*, 2016). Além disso, as plantas desses biomas possuem grande capacidade de absorção de carbono (KÖRNER,

2009) para mitigação das mudanças climáticas. Por outro lado, um contraponto a este argumento é que a similaridade entre espécies neotropicais de biomas similares talvez seja bem menor do que a similaridade entre espécies neotropicais e temperadas. Isto poderia indicar que os dados desse trabalho possivelmente refletem o comportamento fisiológico das espécies neotropicais como um todo e poderiam, portanto, ser incorporados e comparados com outras meta-análises feitas com espécies temperadas.

Estabelecer experimentos de longo prazo para verificar o efeito do eCO_2 nas plantas ao longo do tempo no Brasil ajudaria a compreender melhor as respostas da vegetação em diferentes climas ao eCO_2. A maioria dos experimentos com eCO_2 em árvores foi conduzida por não mais do que um ano. Visto que as respostas da vegetação às mudanças climáticas são fortemente reguladas por processos de longo prazo (LUO *et al*., 2011), para compreender as respostas das plantas ao eCO_2, experimentos de longo prazo devem ser encorajados. Nesse sentido, a compreensão dos processos de longo prazo é essencial para testar e restringir modelos que simulem as consequências do aumento do eCO_2 na vegetação.

5. Conclusões

Concluímos que o efeito médio do elevado CO_2 atmosférico aumenta a taxa de assimilação líquida ao CO_2, a eficiência fotossintética do uso da água, biomassa, açúcares solúveis e amido. Contudo, o efeito médio do elevado CO_2 diminuiu a condutância estomática.

Este estudo também demonstrou que o hábito de vida é importante para a resposta da biomassa ao efeito do eCO_2. Árvores jovens em crescimento acumulam mais biomassa comparado às plantas herbáceas quando expostas ao eCO_2.

Além disso, para melhorar nossa compreensão preditiva das respostas das plantas tropicais ao eCO_2, os resultados deste estudo precisam ser usados como referência para adequar os modelos regionais ou globais.

6. Referências bibliográficas

AGUIAR, S., SANTOS, I. D. S., ARÊDES, N., SILVA, S. Redes-Bioma: Informação e Comunicação para ação sociopolítica em ecorregiões. Ambiente & Sociedade, v. 19, n. 3, p. 233–252, 2016.

AIDAR, M. P. M., MARTINEZ, C. A., COSTA, A. C., COSTA, P. M. F., DIETRICH, S. M. C., BUCKERIDGE, M. S. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on the establishment of seedlings of Jatobá, Hymenaea Courbaril L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). Biota Neotropica, v. 2, n. 1, 1–10, 2002. https://doi.org/10.1590/S1676-06032002000100008

AINSWORTH, E. A., DAVEY, P. A., HYMUS, G. J., OSBORNE, C. P., ROGERS, A., BLUM, H., NÖSBERGER, J., LONG, S. P. (2003). Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with Lolium perenne grown for 10 years at two nitrogen fertilization levels under Free Air CO_2 Enrichment (FACE): Photosynthetic acclimation of L. perenne to elevated CO_2. Plant, Cell & Environment, v. 26, n. 5, p. 705–714, 2002. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01007.x

AINSWORTH, ELIZABETH A., LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New phytologist, v. 165, n. 2, p. 351–372, 2005.

AINSWORTH, ELIZABETH A., LONG, S. P. 30 years of free‐air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? Global Change Biology, v. 27, n. 1, p. 27–49, 2021. https://doi.org/10.1111/gcb.15375

AINSWORTH, ELIZABETH A., ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO_2: Mechanisms and environmental interactions: Photosynthesis and stomatal conductance responses to rising CO_2. Plant, Cell & Environment, v. 30, n. 3, p. 258–270, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x

ANDERSON-TEIXEIRA, K. J., WANG, M. M. H., MCGARVEY, J. C., LEBAUER, D. S. Carbon dynamics of mature and regrowth tropical forests derived from a pantropical database (TropForC-db). Global Change Biology, v. 22, n. 5, p. 1690–1709. https://doi.org/10.1111/gcb.13226

ARENQUE, B. C., GRANDIS, A., POCIUS, O., DE SOUZA, A. P., BUCKERIDGE, M. S. Responses of Senna reticulata, a legume tree from the Amazonian floodplains, to elevated atmospheric CO_2 concentration and waterlogging. Trees, v. 28, n. 4, p. 1021–1034, 2014. https://doi.org/10.1007/s00468-014-1015-0

BENCKE, M. M., DE SOUZA, A. P., RIBEIRO-ALVES, M., SCHMITZ, J. F., BUCKERIDGE, M. S., ALVES-FERREIRA, M. Elevated CO_2 Improves Soybean Growth and Mitigates the Impact of Water Deficit. 280, 283–296, 2019.

BISBIS, M. B., GRUDA, N., BLANKE, M. Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality – A review. Journal of Cleaner Production, v. 170, p. 1602–1620, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224

BUNCE, J. A. Responses of soybeans and wheat to elevated CO_2 in free-air and open top chamber systems. Field Crops Research, v. 186, p. 78–85, 2016. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.11.010

CAO, Y., JIANG, M., XU, F., LIU, S., & MENG, F. The effects of elevated CO_2 (0.5%) on chloroplasts in the tetraploid black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). Ecology and Evolution, v. 7, n. 24, n. 10546–10555, 2017. https://doi.org/10.1002/ece3.3545

CO2.EARTH. (2020). CO2 Earth: A Pro Oxygen Website. https://www.co2.earth. Acesso em: 27 ago. 2020.

CURTIS, P. S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. Plant, Cell and Environment, v. 19, n. 2, p. 127–137, 1996. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00234.x

CURTIS, PETER S., WANG, X. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology. Oecologia, v. 113, n. 3, p. 299–313, 1998.

DAMATTA, F. M., GRANDIS, A., ARENQUE, B. C., BUCKERIDGE, M. S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. Food Research International, v. 43, n. 7, p. 1814–1823, 2010. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.11.001

DE GRAAFF, M.-A., VAN GROENIGEN, K.-J., SIX, J., HUNGATE, B., VAN KESSEL, C. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO_2: A meta-analysis. Global Change Biology, v. 12, n. 11, p. 2077–2091, 2006. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01240.x

DE SOUZA, A. P., GASPAR, M., DA SILVA, E. A., ULIAN, E. C., WACLAWOVSKY, A. J., NISHIYAMA JR., M. Y., DOS SANTOS, R. V., TEIXEIRA, M. M., SOUZA, G. M., BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO_2 increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. Plant, Cell & Environment, v. 31, n. 8, p. 1116–1127, 2008. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01822.x

DRAKE, B. G., GONZÀLEZ-MELER, M. A., LONG, S. P. MORE EFFICIENT PLANTS: A Consequence of Rising Atmospheric CO_2? Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, v. 48, n. 1, p. 609–639, 1997. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.609

EGGER, M., SMITH, G. D., SCHNEIDER, M., MINDER, C. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. BMJ, v. 315, n. 7109, p. 629–634, 1997. https://doi.org/10.1136/bmj.315.7109.629

FAO. (2010). Global Forest Resources. Main Report. Forestry Paper Food and Agriculture Organization.

FORTIRER, J. DA S., GRANDIS, A., DE TOLEDO CASTANHO, C., BUCKERIDGE, M. S. Importance of Meta-analysis in Studies Involving Plant Responses to Climate Change in Brazil. In J. C. Setubal & W. M. Silva (Orgs.), Advances in Bioinformatics and Computational Biology, v. 12558, p. 221–234, 2020. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65775-8_21

GAMAGE, D., THOMPSIN, M., SUTHERLAND, M., HIROTSU, N., MAKINO, A., SENEWEERA, S. New insights into the cellular mechanisms of plant growth at elevated atmospheric carbon dioxide concentrations, v. 41, n. 6, p. 1233–1246, 2018. https://doi.org/10.1111/pce.13206

GARCÍA-PALACIOS, P., VANDEGEHUCHTE, M. L., SHAW, E. A., DAM, M., POST, K. H., RAMIREZ, K. S., SYLVAIN, Z. A., DE TOMASEL, C. M., WALL, D. H. Are there links between responses of soil microbes and ecosystem functioning to elevated CO_2, N deposition and warming? A global perspective. Global Change Biology, v. 21, n. 4, p. 1590–1600, 2015. https://doi.org/10.1111/gcb.12788

GHINI, R., TORRE-NETO, A., DENTZIEN, A. F. M., GUERREIRO-FILHO, O., IOST, R., PATRÍCIO, F. R. A., PRADO, J. S. M., THOMAZIELLO, R. A., BETTIOL, W., DAMATTA, F. M. Coffee growth, pest and yield responses to free-air CO_2 enrichment.

Climatic Change, v. 132, n. 2, p. 307–320, 2015. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1422-2

HAWORTH, M., MOSER, G., RASCHI, A., KAMMANN, C., GRÜNHAGE, L., MÜLLER, C. Carbon dioxide fertilisation and supressed respiration induce enhanced spring biomass production in a mixed species temperate meadow exposed to moderate carbon dioxide enrichment. Functional Plant Biology, v. 43, n. 1, p. 26–39, 2016.

HEDGES, L. V., GUREVITCH, J., CURTIS, P. S. THE META-ANALYSIS OF RESPONSE RATIOS IN EXPERIMENTAL ECOLOGY. Ecology, v. 80, n. 4, p. 1150–1156, 1999. https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1150:TMAORR]2.0.CO;2

HEDGES, L. V., OLKIN, I. Statistical Methods for Meta-Analysis. Elsevier Science. 2014. http://qut.eblib.com.au/patron/FullRecord.aspx?p=1901162. Acesso em: 27 ago. 2020.

HIGGINS, J. P. T. Measuring inconsistency in meta-analyses. BMJ, v. 327, n. 7414, p. 557–560, 2003. https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557

HOUGHTON, J. T. & INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Orgs.). Climate change 2001: The scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2001.

IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. , EDENHOFER, O. (Orgs.). Cambridge University Press. 2014.

IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM. Acesso em 17 ago. 2021.

JONES, A. G., SCULLION, J., OSTLE, N., LEVY, P. E., GWYNN-JONES, D. Completing the FACE of elevated CO_2 research. Environment International, v. 73, p. 252–258, 2014. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.021

KÖRNER, C. (1995). Leaf Diffusive Conductances in the Major Vegetation Types of the Globe. In E.-D. Schulze & M. M. Caldwell (Orgs.), Ecophysiology of Photosynthesis. p. 463–49, 1995. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79354-7_22

KÖRNER, C. Responses of humid tropical trees to rising CO_2. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, v. 40, p. 61–79, 2009.

LAMBERS, H., CHAPIN III, F. S., PONS, T. L. Plant physiological ecology. Springer Science & Business Media, 2008.

LAPOLA, D. M., NORBY, R. J. Amazon-FACE: Assessing the effects of increased atmospheric CO_2 on the ecology and resilience of the Amazon forest. Science Plan and Implementation Strategy, 2018.

LEAKEY, A. D. B., AINSWORTH, E. A., BERNACCHI, C. J., ROGERS, A., LONG, S. P., ORT, D. R. Elevated CO_2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. Journal of Experimental Botany, v. 60, n. 10, p. 2859–2876, 2009. https://doi.org/10.1093/jxb/erp096

LEAKEY, A. D. B., AINSWORTH, E. A., BERNACCHI, C. J., ZHU, X., LONG, S. P., ORT, D. R. Photosynthesis in a CO_2-Rich Atmosphere. In J. J. Eaton-Rye, B. C. Tripathy, & T. D. Sharkey (Orgs.), Photosynthesis, v 34, p. 733–768, 2012. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1579-0_29

LEAKEY, A. D. B., URIBELARREA, M., AINSWORTH, E. A., NAIDU, S. L., ROGERS, A., ORT, D. R., LONG, S. P. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO_2 concentration in the absence of drought. Plant Physiology, v. 140, n. 2, p. 779–790, 2006. https://doi.org/10.1104/pp.105.073957

LEE, M., MANNING, P., RIST, J., POWER, S. A., MARSH, C. A global comparison of grassland biomass responses to CO 2 and nitrogen enrichment. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 365, n. 1549, p. 2047–2056, 2010. https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0028

LINDSEY. Climate change: Atmospheric carbon dioxide. 2019. https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide. Acesso em: 27 ago. 2020.

LONG, S. P., DRAKE, B. G. Chapter 4—Photosynthetic CO_2 assimilation and rising atmospheric CO_2 concentrations. In N. R. Baker & H. Thomas (Orgs.), Crop Photosynthesis, p. 69–103, 1992. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89608-7.50011-3

LONG, S. P., ZHU, X.-G., NAIDU, S. L., ORT, D. R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? Plant, Cell and Environment, v. 29, n. 3, p. 315–330, 2006. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x

LUO, Y., HUI, D., ZHANG, D. Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. Ecology, v. 87, n. 1, p. 53–63, 2006. https://doi.org/10.1890/04-1724

LUO, Y., MELILLO, J., NIU, S., BEIER, C., CLARK, J. S., CLASSEN, A. T., DAVIDSON, E., DUKES, J. S., EVANS, R. D., FIELD, C. B., CZIMCZIK, C. I., KELLER, M., KIMBALL, B. A., KUEPPERS, L. M., NORBY, R. J., PELINI, S. L., PENDALL, E., RASTETTER, E., SIX, J., TORN, M. S. Coordinated approaches to quantify long-term ecosystem dynamics in response to global change: Long-term global change experiments. Global Change Biology, v. 17, n. 2, p. 843–854, 2011. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02265.x

MACHACOVA, K. Open top chamber and free air CO_2 enrichment—Approaches to investigate tree responses to elevated CO_2. IForest - Biogeosciences and Forestry, v. 3, n. 4, p. 102–105, 2010. https://doi.org/10.3832/ifor0544-003

MATTOS, L. M., MORETTI, C. L., JAN, S., SARGENT, S. A., LIMA, C. E. P., FONTENELLE, M. R. Chapter 19—Climate Changes and Potential Impacts on Quality of Fruit and Vegetable Crops. In P. Ahmad & S. Rasool (Orgs.), Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance. p. 467–486, 2014. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800876-8.00019-9

MCLEOD, A. R., LONG, S. P. Free-air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) in Global Change Research: A Review. In Advances in Ecological Research, v. 28, p. 1–56, 1999. Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60028-8

MEDLYN, B. E., BADECK, F.-W., DE PURY, D. G. G., BARTON, C. V. M., BROADMEADOW, M., CEULEMANS, R., DE ANGELIS, P., FORSTREUTER, M., JACH, M. E., KELLOMÄKI, S., LAITAT, E., MAREK, M., PHILIPPOT, S., REY, A., STRASSEMEYER, J., LAITINEN, K., LIOZON, R., PORTIER, B., ROBERNTZ, P., JSTBID, P. G. Effects of elevated CO_2 on photosynthesis in European forest species: A meta-analysis of model parameters: Photosynthetic acclimation to elevated CO_2. Plant, Cell & Environment, v. 22, n. 12, p. 1475–1495, 1999. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00523.x

MEDLYN, B. E., BARTON, C. V. M., BROADMEADOW, M. S. J., CEULEMANS, R., ANGELIS, P. D., FORSTREUTER, M., FREEMAN, M., JACKSON, S. B.,

KELLOMÄKI, S., LAITAT, E., REY, A., ROBERNTZ, P., SIGURDSSON, B. D., STRASSEMEYER, J., WANG, K., CURTIS, P. S., JARVIS, P. G. Stomatal Conductance of Forest Species after Long-Term Exposure to Elevated CO_2 Concentration: A Synthesis. The New Phytologist, v. 149, n. 2, p. 247–264, 2001.

MELO, N. M. J., ROSA, R. S. E. G., PEREIRA, E. G., SOUZA, J. P. Rising CO_2 changes competition relationships between native woody and alien herbaceous Cerrado species. Functional Plant Biology, v. 45, n. 8, p. 854, 2018. https://doi.org/10.1071/FP17333

REZENDE, F. M., DE SOUZA, A. P., BUCKERIDGE, M. S., FURLAN, C. M, Is guava phenolic metabolism influenced by elevated atmospheric CO_2? Environmental Pollution, v. 196, p. 483–488, 2015. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.028

MENDES DE SÁ, C. E., NEGREIROS, D., FERNANDES, G. W., DIAS, M. C., FRANCO, A. C. Carbon dioxide-enriched atmosphere enhances biomass accumulation and meristem production in the pioneer shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae). Acta Botanica Brasilica, v. 28, n. 4, p. 646–650. https://doi.org/10.1590/0102-33062014abb3329

MESSERLI, J., BERTRAND, A., BOURASSA, J., BÉLANGER, G., CASTONGUAY, Y., TREMBLAY, G., BARON, V., SEGUIN, P. Performance of Low-Cost Open-Top Chambers to Study Long-Term Effects of Carbon Dioxide and Climate under Field Conditions. Agronomy Journal, v. 107, n. 3, p. 916–920. https://doi.org/10.2134/agronj14.0571

MORETTI, C. L., MATTOS, L. M., CALBO, A. G., SARGENT, S. A. Climate changes and potential impacts on postharvest quality of fruit and vegetable crops: A review. Food Research International, v. 43, n. 7, p. 1824–1832, 2010. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.10.013

NAKAGAWA, S., NOBLE, D. W., SENIOR, A. M., LAGISZ, M. Meta-evaluation of meta-analysis: Ten appraisal questions for biologists. BMC biology, v. 15, n. 1, p. 1–14, 2017.

NAKAGAWA, S., SAMARASINGHE, G., HADDAWAY, N. R., WESTGATE, M. J., O'DEA, R. E., NOBLE, D. W., LAGISZ, M. Research weaving: Visualizing the future of research synthesis. Trends in ecology & evolution, v. 34, n. 3, p. 224–238, 2019.

NAKAGAWA, S., SANTOS, E. S. A. Methodological issues and advances in biological meta-analysis. Evolutionary Ecology, v. 26, n. 5, p. 1253–1274, 2012. https://doi.org/10.1007/s10682-012-9555-5

NOBRE, C. A., NOBRE, A. D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. Estudos Avançados, v. 16, n.45, p. 81–90, 2002. https://doi.org/10.1590/S0103-40142002000200006

NORBY, R. J., WULLSCHLEGER, S. D., GUNDERSON, C. A., JOHNSON, D. W., CEULEMANS, R. Tree responses to rising CO_2 in field experiments: Implications for the future forest. Plant, Cell and Environment, v. 22, n. 6, p. 683–714, 1999. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00391.x

NORBY, RICHARD J., COTRUFO, M. F., INESON, P., O'NEILL, E. G., CANADELL, J. G. (2001). Elevated CO_2, litter chemistry, and decomposition: A synthesis. Oecologia, v.127, n. 2, p. 153–165, 2001. https://doi.org/10.1007/s004420000615

NORBY, RICHARD J., DE KAUWE, M. G., DOMINGUES, T. F., DUURSMA, R. A., ELLSWORTH, D. S., GOLL, D. S., LAPOLA, D. M., LUUS, K. A., MACKENZIE, A. R., MEDLYN, B. E., PAVLICK, R., RAMMIG, A., SMITH, B., THOMAS, R., THONICKE, K., WALKER, A. P., YANG, X., ZAEHLE, S. Model-data synthesis for the next generation of forest free-air CO_2 enrichment (FACE) experiments. New Phytologist, v. 209, n. 1, p. 17–28, 2016. https://doi.org/10.1111/nph.13593

NOVAES, R. M. L., PAZIANOTTO, R. A. A., BRANDÃO, M., ALVES, B. J. R., MAY, A., FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S. Estimating 20-year land-use change and derived CO_2 emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. Global Change Biology, v. 23, n. 9, p. 3716–3728, 2017. https://doi.org/10.1111/gcb.13708

OLIVEIRA, V. F., SILVA, E. A., CARVALHO, M. A. M. Elevated CO_2 Atmosphere Minimizes the Effect of Drought on the Cerrado Species Chrysolaena obovata. Frontiers in Plant Science, 7, 2016. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00810

PALACIOS, C. E. J. Efeito do déficit hídrico e CO_2 elevado sobre substâncias fenólicas e ligninas do sorgo var. BRS 330, 2017.

PALACIOS, C. J., GRANDIS, A., CARVALHO, V. J., SALATINO, A., BUCKERIDGE, M. S. Isolated and combined effects of elevated CO_2 and high temperature on the whole-plant

biomass and the chemical composition of soybean seeds. Food Chemistry, v. 275, p. 610–617, 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.052

PEET, M. M., WOLFE, D. W. Crop ecosystem responses to climatic change: Vegetable crops. In K. R. Reddy & H. F. Hodges (Orgs.), Climate change and global crop productivity. p. 213–243, 2000. CABI. https://doi.org/10.1079/9780851994390.0213

POORTER, L., KITAJIMA, K. Carbohydrate storage and light requirements of tropical moist and dry forest tree species. Ecology, v.88, n. 4, p. 1000–1011, 2007. https://doi.org/10.1890/06-0984

R CORE TEAM. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/ Acesso em: 27 ago. 2020.

RAKOCEVIC, M., FERRANDES, R., EDUARDO RIBEIRO MARCHIORI, P., RIBEIRO, R. V. Estimating the canopy architecture and photosynthesis of *Coffea Arabica* L. Plants cultivated under long-term elevated air CO_2 concentration. 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA), p. 175–182, 2016. https://doi.org/10.1109/FSPMA.2016.7818304

RESCO DE DIOS, V., MEREED, T. E., FERRIO, J. P., TISSUE, D. T., VOLTAS, J. Intraspecific variation in juvenile tree growth under elevated CO_2 alone and with O_3: A meta-analysis. Tree Physiology, v. 36, n. 6, p. 682–693, 2016. https://doi.org/10.1093/treephys/tpw026

REZENDE, F. M. Efeito da atmosfera enriquecida com CO_2 em mudas de *Psidium guajava* L. cv. Pedro Sato [Tese]. Universidade de São Paulo. 2013.

ROHATGI, A. WebPlotDigitizer (4.1.) [Computer software]. 2020.

RUDORFF, B. F. T., MULCHI, C. L., DAUGHTRY, C. S. T., LEE, E. H. Growth, radiation use efficiency, and canopy reflectance of wheat and corn grown under elevated ozone and carbon dioxide atmospheres. Remote Sensing of Environment, v. 55, n. 2, p. 163–173, 1996. https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00208-1

SABAN, J. M., CHAPMAN, M. A., & TAYLOR, G. FACE facts hold for multiple generations; Evidence from natural CO_2 springs. Global Change Biology, v. 25, n. 1, p. 1–11, 2019. https://doi.org/10.1111/gcb.14437

SAXE, H., ELLSWORTH, D. S., HEATH, J. Tree and forest functioning in an enriched CO_2 atmosphere. New Phytologist, v. 139, n. 3, p. 395–436, 1998. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1998.00221.x

SILVA, J. B. L. DA, FERREIRA, P. A., PEREIRA, E. G., COSTA, L. C., MIRANDA, G. V. Development of experimental structure and influence of high CO_2 concentration in maize crop. Engenharia Agrícola, v. 32, n. 2, p. 306–314, 2012. https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000200010

STERNE, J. A. C., EGGER, M. Regression Methods to Detect Publication and Other Bias in Meta-Analysis. In H. R. Rothstein, A. J. Sutton, & M. Borenstein (Orgs.), Publication Bias in Meta-Analysis. p. 99–110, 2006. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/0470870168.ch6

STITT, M. Rising CO_2 levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. Plant, Cell and Environment, v.14, n. 8, p. 741–762, 1991. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01440.x

MANNETJE, L. Climate change and grasslands through the ages: An overview. Grass and Forage Science, v. 62, n. 2, p. 113–117, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00574.x

TAIZ, L., ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal, v. 5, 2013.

TRETHEWEY, R. N., SMITH, A. M. Starch Metabolism in Leaves. In R. C. Leegood, T. D. Sharkey, & S. von Caemmerer (Orgs.), Photosynthesis, v. 9, p. 205–231, 2000. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-48137-5_9

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME WORLD CONSERVATION MONITORING CENTRE. UNEP-WCMC Species Database. Cambridge. 2010.

VARGA, B., VIDA, G., VARGA-LÁSZLÓ, E., HOFFMANN, B., VEISZ, O. Combined Effect of Drought Stress and Elevated Atmospheric CO_2 Concentration on the Yield Parameters and Water Use Properties of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science, v. 203, n. 3, p. 192–205, 2017. https://doi.org/10.1111/jac.12176

VIECHTBAUER, W. Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. Journal of Statistical Software, v. 36, n. 3, 2010. https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03

WAND, S. J., MIDGLEY, G. F., JONES, M. H., CURTIS, P. S. Responses of wild C4 and C3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO_2 concentration: A meta-analytic test of current theories and perceptions. Global Change Biology, v. 5, n. 6, p. 723–741, 1999.

WANG, D., HECKATHORN, S. A., WANG, X., PHILPOTT, S. M. A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO_2. Oecologia, v. 169, n. 1, p. 1–13, 2012. https://doi.org/10.1007/s00442-011-2172-0

WICKHAM, H. Ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer. 2009.

WILLIAMS, J. H. H., FARRAR, J. F. Control of barley root respiration, v. 79, n. 2, p. 259–266, 1990.

YAN, W., ZHONG, Y., SHANGGUAN, Z. Contrasting responses of leaf stomatal characteristics to climate change: A considerable challenge to predict carbon and water cycles. Global Change Biology, v. 23, n. 9, p. 3781–3793, 2017. https://doi.org/10.1111/gcb.13654

ZHANG, J., DENG, L., JIANG, H., PENG, C., HUANG, C., ZHANG, M., ZHANG, X. The effects of elevated CO_2, elevated O_3, elevated temperature, and drought on plant leaf gas exchanges: A global meta-analysis of experimental studies. Environmental Science and Pollution Research, v. 28, n. 12, p. 15274–15289, 2021. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11728-6

ZISKA, L. H., BUNCE, J. A. Plant Responses to Rising Atmospheric Carbon Dioxide. In J. I. L. Morison & M. D. Morecroft (Orgs.), Plant Growth and Climate Change. p. 17–47, 2006. Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1002/9780470988695.ch2

Referência bibliográfica dos trabalhos utilizados na meta-análise

ABDALLA, A. L. F. Quantificação e caracterização da biomassa produzida em condições de simulação de aumento da concentração de CO_2 atmosférico no sistema agropastoril [Tese]. Universidade de São Paulo. 2018

AIDAR, M. P. M., MARTINEZ, C. A., COSTA, A. C., COSTA, P. M. F., DIETRICH, S. M. C., BUCKERIDGE, M. S. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on the establishment of seedlings of Jatobá, Hymenaea Courbaril L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). Biota Neotropica, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2002. https://doi.org/10.1590/S1676-06032002000100008

APPROBATO, A. U. Análises fisiológicas e bioquímicas da forrageira tropical *Panicum maximum* Jacq. (Poaceae) cultivada em elevado CO_2 atmosférico e aquecimento [Tese]. 2015

ARENQUE, B. C., GRANDIS, A., POCIUS, O., DE SOUZA, A. P., BUCKERIDGE, M. S. Responses of Senna reticulata, a legume tree from the Amazonian floodplains, to elevated atmospheric CO_2 concentration and waterlogging. Trees, v. 28, n. 4, p. 1021–1034. https://doi.org/10.1007/s00468-014-1015-0

ARENQUE-MUSA, B. C. Metabolismo de carboidratos da espécie amazônica *Senna reticulata* sob cultivo em alto CO_2 [Dissertação]. Universidade de São Paulo. 2010.

ARENQUE-MUSA, B. C. Papel do metabolismo de carboidratos nas respostas ecofisiológicas da árvore amazônica *Senna reticulata* cultivada sob diferentes estresses abióticos [Dissertação]. Universidade de São Paulo. 2014.

BORTOLIN, L. H. G. C. Simulação do clima de 2050 em campo e seus efeitos sobre o crescimento de forrageiras [Tese]. Universidade Federal de São Carlos. 2016.

BRAGA, M. R., AIDAR, M. P. M., MARABESI, M. A., GODOY, J. R. L. Effects of elevated CO_2 on the phytoalexin production of two soybean cultivars differing in the resistance to stem canker disease. Environmental and Experimental Botany, v. 58, n. 1–3, p. 85–92, 2006. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.06.018

BRITO, F. A. L. Alterações no crescimento e no metabolismo de plantas de tomate em resposta à salinidade são atenuadas pela elevada concentração de dióxido de carbono [Dissertação]. Universidade Federal de Viçosa. 2016.

BRITTO DE ASSIS PRADO, C. H., HAIK GUEDES DE CAMARGO-BORTOLIN, L., CASTRO, É., MARTINEZ, C. A. Leaf Dynamics of Panicum maximum under Future

Climatic Changes. PLOS ONE, v. 11, n. 2, 2016. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149620

COSTA, P. M. F. Efeitos da alta concentração de CO_2 sobre o crescimento e o estabelecimento de plântulas do jatobá de mata *Hymenaea courbaril.* Var. Stilbocarpa (Heyne)Lee & Langenheim (Leguminosae,Caesalpinioideae,Detarieae). 2004.

DAMATTA, F. M., GODOY, A. G., MENEZES-SILVA, P. E., MARTINS, S. C. V., SANGLARD, L. M. V. P., MORAIS, L. E., TORRE-NETO, A., GHINI, R. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO_2 enrichment conditions: Disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical imitations. Journal of Experimental Botany, v. 67, n. 1, p. 341–352, 2016. https://doi.org/10.1093/jxb/erv463

FARIA, A. P., FERNANDES, G. W., FRANÇA, M. G. C. Predicting the impact of increasing carbon dioxide concentration and temperature on seed germination and seedling establishment of African grasses in Brazilian Cerrado: Climate Change and Grass Seed Germination. Austral Ecology, v. 40, n. 8, p. 962–973, 2015. https://doi.org/10.1111/aec.12280

OLIVEIRA, E. A. D., APPROBATO, A. U., LEGRACIE, J. R., MARTINEZ, C. A. Soil-nutrient availability modifies the response of young pioneer and late successional trees to elevated carbon dioxide in a Brazilian tropical environment. Environmental and Experimental Botany, v. 77, p. 53–62, 2012. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.11.003

DE SOUZA, A. P. Mecanismos fotossintéticos e relação fonte-dreno em cana-de-açúcar cultivada em atmosfera enriquecida em CO_2 [Tese]. Universidade de São Paulo. 2011.

DE SOUZA, A. P. GASPAR, M., DA SILVA, E. A., ULIAN, E. C., WACLAWOVSKY, A. J., NISHIYAMA JR., M. Y., DOS SANTOS, R. V., TEIXEIRA, M. M., SOUZA, G. M., BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO_2 increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. Plant, Cell & Environment, v. 31, n. 8, p. 1116–1127, 2008. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01822.x

DE SOUZA, A.P. (2007). A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: Efeitos de uma atmosfera enriquecida de CO_2 sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de Saccharum ssp. Universidade estadual de Campinas.

FAUSET, S., OLIVEIRA, L., BUCKERIDGE, M. S., FOYER, C. H., GALBRAITH, D., TIWARI, R., GLOOR, M. Contrasting responses of stomatal conductance and photosynthetic capacity to warming and elevated CO_2 in the tropical tree species Alchornea glandulosa under heatwave conditions. Environmental and Experimental Botany, v. 158, p. 28–39, 2019. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.030

FONTES, L. F. P. Respostas ecofisiológicas em árvores jovens de eucalipto ao enriquecimento atmosférico de CO_2 e aquecimento em MINIFACE e MINI T-FACE [Tese]. Universidade Federal de Viçosa. 2017.

GHINI, R., TORRE-NETO, A., DENTZIEN, A. F. M., GUERREIRO-FILHO, O., IOST, R., PATRÍCIO, F. R. A., PRADO, J. S. M., THOMAZIELLO, R. A., BETTIOL, W., DAMATTA, F. M. Coffee growth, pest and yield responses to free-air CO_2 enrichment. Climatic Change, v. 132, n. 2, p. 307–320, 2015. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1422-2

GRANDIS, A. Respostas fotossintéticas e de crescimento da espécie amazônica *Senna reticulata* sob elevada concentração de CO_2 [Dissertação]. Universidade de São Paulo. 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15842biomas.html?=&t=o-que-e. Acesso em: 17 maio. 2021.

KRETZSCHMAR, F. DOS S., AIDAR, M. P. M., SALGADO, I., & BRAGA, M. R. (2009). Elevated CO_2 atmosphere enhances production of defense-related flavonoids in soybean elicited by NO and a fungal elicitor. Environmental and Experimental Botany, v. 65, n. 2–3, p. 319–329, 2009. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.10.001

KRETZSCHMAR, F. S. Influência de atmosfera enriquecida em CO_2, do radical óxido nítrico e de eliciadores fúngicos na produção de fitoalexinas em plântulas de soja [Tese]. Universidade Estadual de Campinas. 2007.

LOBO, F. A. Alterações na assimilação e metabolismo do carbono em plantas de soja sob condições de atmosfera enriquecida com CO_2 [Tese]. Universidade Federal de Viçosa. 2003.

MACHADO, M. R. Estudo bioquímico e da estrutura foliar de plântulas de jatobá da mata (*Hymenaea courbaril* L.) e do cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.) expostas à concentração elevada de CO_2 [Tese]. Universidade Estadual de Campinas. 2007.

MAYORGA, A. Y. Desenvolvimento e efeito da concentração atmosférica de CO_2 e da temperatura em plantas juvenis de *Hymenaea courbaril* L., jatobá. 2010

MELO, N. M. J. Respostas ecofisiológicas de plantas ocorrentes no cerrado frente à elevada concentração de CO_2. Universidade Federal de Viçosa. 2015.

REZENDE, F. M., DE SOUZA, A. P., BUCKERIDGE, M. S., FURLAN, C. M. Is guava phenolic metabolism influenced by elevated atmospheric CO_2? Environmental Pollution, v. 196, p. 483–488, 2015. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.028

MENDES DE SÁ, C. E., NEGREIROS, D., FERNANDES, G. W., DIAS, M. C., FRANCO, A. C. Carbon dioxide-enriched atmosphere enhances biomass accumulation and meristem production in the pioneer shrub *Baccharis dracunculifolia* (Asteraceae). Acta Botanica Brasilica, v. 28, n. 4, p. 646–650, 2014. https://doi.org/10.1590/0102-33062014abb3329

MORTARI, L. C. Efeitos de uma atmosfera enriquecida com CO_2 sobre a fotossíntese, o crescimento e o metabolismo de carboidratos do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). 2012.

OLIVEIRA, V. F., SILVA, E. A., ZAIDAN, L. B. P., CARVALHO, M. A. M. Effects of elevated CO_2 concentration and water deficit on fructan metabolism in Viguiera discolor Baker: High CO_2 and water deficit affect fructan metabolism. Plant Biology, v. 15, n. 3, p. 471–482, 2013. https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00654.x

OLIVEIRA, VANESSA F., SILVA, E. A., CARVALHO, M. A. M. Elevated CO_2 Atmosphere Minimizes the Effect of Drought on the Cerrado Species Chrysolaena obovata. Frontiers in Plant Science, 7.2016. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00810

OLIVO, N., MARTINEZ, C. A., OLIVA, M. A. The Photosynthetic Response to Elevated CO_2 in High Altitude Potato Species (*Solanum curtilobum*). Photosynthetica, v. 40, n. 2, p. 309–313, 2002. https://doi.org/10.1023/A:1021370429699

PIMENTA, T. M. Aspectos anatômicos e fisiológicos de plantas de tomate associados à inibição da biossíntese de giberelinas e à elevada concentração de dióxido de carbono [Dissertação]. Universidade Federal de Viçosa. 2017.

RAKOCEVIC, M., FERRANDES, R., EDUARDO RIBEIRO MARCHIORI, P., RIBEIRO, R. V. Estimating the canopy architecture and photosynthesis of *Coffea arabica* L. Plants cultivated under long-term elevated air CO_2 concentration. 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization

and Applications (FSPMA), p. 175–182, 2016. https://doi.org/10.1109/FSPMA.2016.7818304

RAKOCEVIC, M., MATSUNAGA, F. T. Variations in leaf growth parameters within the tree structure of adult *Coffea arabica* in relation to seasonal growth, water availability and air carbon dioxide concentration. Annals of Botany, v. 122, n. 1, p. 117–131, 2018. https://doi.org/10.1093/aob/mcy042

SILVA, J. B. L. Respostas das culturas de feijão submetido ao estresse hídrico e de milho em atmosfera enriquecida com CO_2 [Tese]. Universidade Federal de Viçosa. 2010.

Conclusão final

Neste estudo foi realizado o levantamento histórico das meta-análises globais dos efeitos do elevado CO_2 e da temperatura nas plantas. Encontramos uma correlação positiva entre a produção científica e os eventos sociopolíticos que determinaram as metas de desenvolvimento sustentável do planeta. Também argumentamos que uma melhor integração dos dados teria relevância significativa para os relatórios nacionais. Desta forma, esperamos que estratégias meta-analíticas possam ser utilizadas para a tomada de decisão nacional, complementando análises globais como as do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Sintetizamos quantitativamente o conhecimento atual sobre o efeito de eCO_2 na vegetação brasileira. Para tanto, realizamos uma meta-análise com 36 estudos (artigos ou teses/dissertações) incluídos a partir de uma revisão sistemática. Verificamos que o efeito médio do elevado CO_2 atmosférico aumenta a taxa de assimilação líquida ao CO_2, biomassa, açúcares solúveis e amido. Além de diminuir a eficiência fotossintética do uso da água e a condutância estomática. Este estudo também demonstrou que o hábito de vida influencia a resposta da biomassa ao efeito do eCO_2, sendo que as árvores jovens em crescimento acumulam mais biomassa comparado às plantas herbáceas quando expostas ao eCO_2.

A meta-análise foi uma metodologia estatisticamente rigorosa para integrar resultados de pesquisas primárias sobre o efeito das mudanças climáticas na vegetação. Identificamos que o número de algumas variáveis (C, N e área foliar) comumente medidas em experimentos que analisam as respostas das plantas às mudanças climáticas não estão presentes em número suficiente de estudos para realizar uma meta-análise. Destacamos a importância de que mais estudos sejam realizados com espécies nativas e cultivadas em clima neotropical para melhorar nossa compreensão preditiva das respostas das plantas tropicais ao eCO_2.

Anexos

Anexo 1. Estratégias utilizadas em cada base de dados com diferentes combinações de palavras-chave. Asteriscos representam quaisquer letras que foram utilizados como complementos das palavras. Esta pesquisa foi realizada pela última vez em 25 de março de 2019 e retornou 1.625 estudos que foram analisados quanto à elegibilidade para a meta-análise.

Web of Science	TOPIC:("elevated CO2" OR "increas* CO2" OR "CO2 enrichment" OR "rising CO2" OR "high* CO2") AND TOPIC:(plant* OR tree* OR wood* OR shrub* OR grass* OR forest* OR herbaceous OR crop*)
Scielo	("elevated CO2" OR "increas* CO2" OR " CO2 enrichment" OR "rising CO2" OR "high* CO2")
BDTD	("elevated CO2" OR "increase CO2" OR "increased CO2" OR "CO2 enrichment" OR "rising CO2" OR "high CO2" OR “CO2 elevado” OR “CO2 aumentado” OR “aumento de CO2” OR “enriquecimento de CO2” OR “CO2

Anexo 2. Descrição dos trabalhos incluídos na meta-análise com o local do repositório, código de identificação (ID), nome da espécie, hábito de vida (HV), CO_2 ambiente (aCO2), CO_2 elevado (eCO2), tipo de sistema FACE ou OTC, variável mensurada e tamanho do efeito (ln(R)).

Repositório	ID	Espécies	HV	aCO2	eCO2	FACE/OTC	Váriavel	ln (R)
BDTD	2	*Hymenaea courbaril*	árvore	360	720	OTC	biomassa	0,185
BDTD	3	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	0,213
BDTD	3	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	0,172
BDTD	3	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	0,309
BDTD	6	*Hymenaea stigonocarpa*	árvore	380	700	OTC	biomassa	-0,140
BDTD	6	*Melinis minutiflora*	herbácea	380	700	OTC	biomassa	0,412
BDTD	6	*Enterolobium contortisiliquum*	árvore	380	700	OTC	biomassa	0,584
BDTD	11	*Zea mays*	herbácea	380	700	OTC	biomassa	-0,022
BDTD	11	*Phaseolus vulgaris*	herbácea	380	700	OTC	biomassa	-0,228
BDTD	12	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	biomassa	0,000
BDTD	14	*Melinis minutiflora*	herbácea	350	1000	OTC	biomassa	-0,014
BDTD	14	*Stylosantes capitata*	herbácea	350	1000	OTC	biomassa	-0,337
BDTD	16	*Brachiara decumbens*	herbácea	390	550	FACE	biomassa	-0,007
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	biomassa	0,166
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	biomassa	0,317
BDTD	20	*Panicum maximum*	herbácea	380	600	FACE	biomassa	-0,145
BDTD	20	*Panicum maximum*	herbácea	380	600	FACE	biomassa	-0,068
BDTD	20	*Stylosanthes capitata*	herbácea	380	600	FACE	biomassa	-0,295
BDTD	21	*Glycine max*	herbácea	360	720	OTC	biomassa	0,232
BDTD	22	*Eucalyptus sp*	árvore	380	700	FACE	biomassa	0,202
BDTD	23	*Panicum maximum*	herbácea	380	600	FACE	biomassa	-0,046
Scielo	28	*Baccharis dracunculifolia*	árvore	360	720	OTC	biomassa	1,124
Scielo	28	*Baccharis dracunculifolia*	árvore	360	720	OTC	biomassa	0,923
Scielo	28	*Baccharis dracunculifolia*	árvore	360	720	OTC	biomassa	0,679
WOS	30	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	-0,307
WOS	30	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	-0,206
WOS	30	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	-0,185
WOS	30	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	biomassa	-0,213
WOS	31	*Glycine max*	herbácea	360	720	OTC	biomassa	0,068
WOS	33	*Urochloa brizantha*	herbácea	360	727	OTC	biomassa	0,279
WOS	33	*Urochloa decumbens*	herbácea	360	727	OTC	biomassa	0,081
WOS	33	*Megathyrsus maximus*	herbácea	360	727	OTC	biomassa	-0,067
WOS	35	*Croton urucurana*	árvore	380	760	OTC	biomassa	0,322
WOS	35	*Cariniana legalis*	árvore	380	760	OTC	biomassa	0,262
WOS	39	*Psidium guajava*	árvore	390	780	OTC	biomassa	0,067
WOS	41	*Saccharum ssp*	herbácea	370	720	OTC	biomassa	0,420
WOS	41	*Saccharum ssp*	herbácea	370	720	OTC	biomassa	0,511
WOS	41	*Saccharum ssp*	herbácea	370	720	OTC	biomassa	0,234
WOS	43	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	biomassa	0,238
WOS	44	*Vernonia herbácea*	herbácea	380	760	OTC	biomassa	0,285
WOS	46	*Panicum maximum*	herbácea	380	600	FACE	biomassa	0,024
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	biomassa	0,000
WOS	54	*Viguiera discolor*	herbácea	380	760	OTC	biomassa	-0,555
WOS	54	*Viguiera discolor*	herbácea	380	760	OTC	biomassa	0,934

Continua…

BDTD	3	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	A	-0,205
BDTD	4	*Saccharum sp*	herbácea	390	750	OTC	A	0,256
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	A	0,638
BDTD	11	*Zea mays*	herbácea	380	700	OTC	A	0,208
BDTD	11	*Phaseolus vulgaris*	herbácea	380	700	OTC	A	-0,447
BDTD	12	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	A	0,682
BDTD	13	*Poincianella micultiv arhylla*	árvore	400	800	OTC	A	0,964
BDTD	15	*Hymenaea courbaril*	árvore	380	760	OTC	A	0,145
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	A	0,386
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	A	0,282
BDTD	21	*Glycine max*	herbácea	360	720	OTC	A	2,495
BDTD	22	*Eucalyptus sp*	árvore	380	700	FACE	A	0,211
Scielo	27	*Hymenaea courbaril*	árvore	360	720	OTC	A	0,500
WOS	38	*Coffea arabica*	árvore	390	590	FACE	A	1,188
WOS	41	*Saccharum ssp*	herbácea	370	720	OTC	A	0,276
WOS	42	*Coffea arabica*	árvore	390	550	FACE	A	0,550
WOS	44	*Chrysolaena obovata*	herbácea	380	760	OTC	A	0,808
WOS	44	*Vernonia herbácea*	herbácea	380	760	OTC	A	0,495
WOS	45	*Solanum tuberosum*	herbácea	360	720	OTC	A	0,429
WOS	45	*Solanum curtilobum*	herbácea	360	720	OTC	A	0,457
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	A	0,682
WOS	54	*Viguiera discolor*	herbácea	380	760	OTC	A	0,344
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	Ci/Ca	0,034
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	Ci/Ca	0,141
WOS	41	*Saccharum ssp*	herbácea	370	720	OTC	Ci/Ca	0,043
WOS	42	*Coffea arabica*	árvore	390	550	FACE	Ci/Ca	-0,157
WOS	45	*Solanum curtilobum*	herbácea	360	720	OTC	Ci/Ca	-0,065
BDTD	3	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	E	-0,278
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	E	-1,494
BDTD	9	*Saccharum sp*	herbácea	370	720	OTC	E	-0,348
BDTD	12	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	E	-0,211
BDTD	15	*Hymenaea courbaril*	árvore	380	760	OTC	E	-0,805
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	E	-0,213
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	E	0,049
BDTD	21	*Glycine max*	herbácea	360	720	OTC	E	-0,459
BDTD	22	*Eucalyptus sp*	árvore	380	700	FACE	E	-0,031
WOS	44	*Vernonia herbácea*	herbácea	380	760	OTC	E	-0,142
WOS	45	*Solanum tuberosum*	herbácea	360	720	OTC	E	-0,165
WOS	45	*Solanum curtilobum*	herbácea	360	720	OTC	E	-0,193
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	E	-0,211
WOS	54	*Viguiera discolor*	herbácea	380	760	OTC	E	-0,712
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	EUA	0,451
BDTD	9	*Saccharum sp*	herbácea	370	720	OTC	EUA	0,647
BDTD	15	*Hymenaea courbaril*	árvore	380	760	OTC	EUA	0,914
BDTD	21	*Glycine max*	herbácea	360	720	OTC	EUA	1,894
WOS	38	*Coffea arabica*	árvore	390	590	FACE	EUA	-0,102
WOS	42	*Coffea arabica*	árvore	390	550	FACE	EUA	0,675

Continua…

WOS	44	*Vernonia herbácea*	herbácea	380	760	OTC	EUA	0,714
WOS	45	*Solanum tuberosum*	herbácea	360	720	OTC	EUA	0,598
WOS	45	*Solanum curtilobum*	herbácea	360	720	OTC	EUA	0,650
WOS	54	*Viguiera discolor*	herbácea	380	760	OTC	EUA	1,001
BDTD	4	*Saccharum sp*	herbácea	390	750	OTC	gs	-0,754
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	gs	0,000
BDTD	9	*Saccharum sp*	herbácea	370	720	OTC	gs	-0,431
BDTD	12	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	gs	-0,368
BDTD	13	*Poincianella micultiv arhylla*	árvore	400	800	OTC	gs	-0,236
BDTD	15	*Hymenaea courbaril*	árvore	380	760	OTC	gs	-0,606
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	gs	0,000
BDTD	21	*Glycine max*	herbácea	360	720	OTC	gs	-0,442
BDTD	22	*Eucalyptus sp*	árvore	380	700	FACE	gs	0,069
WOS	38	*Coffea arabica*	árvore	390	590	FACE	gs	0,754
WOS	41	*Saccharum ssp*	herbácea	370	720	OTC	gs	-0,431
WOS	42	*Coffea arabica*	árvore	390	550	FACE	gs	-0,146
WOS	44	*Vernonia herbácea*	herbácea	380	760	OTC	gs	-0,405
WOS	45	*Solanum tuberosum*	herbácea	360	720	OTC	gs	-0,875
WOS	45	*Solanum curtilobum*	herbácea	360	720	OTC	gs	-0,801
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	gs	-0,368
WOS	54	*Viguiera discolor*	herbácea	380	760	OTC	gs	-0,579
BDTD	3	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	Jmax	-0,019
BDTD	13	*Poincianella microphylla*	árvore	400	800	OTC	Jmax	0,112
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	Jmax	0,085
WOS	29	*Croton urucurana*	árvore	380	760	OTC	Jmax	-0,068
WOS	29	*Cariniana legali*	árvore	380	760	OTC	Jmax	-0,582
WOS	32	*Coffea spp*	árvore	390	550	FACE	Jmax	-0,082
WOS	37	*Alchornea glandulosa*	árvore		800	OTC	Jmax	-0,039
BDTD	4	*Saccharum sp*	herbácea	390	750	OTC	Rd	-0,284
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	Rd	-0,573
BDTD	13	*Poincianella micultiv arhylla*	árvore	400	800	OTC	Rd	0,213
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	Rd	0,315
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	Rd	0,030
BDTD	22	*Eucalyptus sp*	árvore	380	700	FACE	Rd	-0,096
WOS	36	*Coffea arabica*	árvore	390	590	FACE	Rd	-0,126
BDTD	13	*Poincianella micultiv arhylla*	árvore	400	800	OTC	Vcmax	-0,112
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	Vcmax	-0,026
WOS	29	*Croton urucurana*	árvore	380	760	OTC	Vcmax	-0,165
WOS	32	*Coffea spp*	árvore	390	780	FACE	Vcmax	-0,136
WOS	37	*Alchornea glandulosa*	árvore	380	800	OTC	Vcmax	0,029
BDTD	1	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	glicose	-0,673
BDTD	1	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	frutose	-0,427
BDTD	1	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	sacarose	0,166
BDTD	2	*Hymenaea courbaril*	árvore	360	720	OTC	AST	-0,111
BDTD	30	*Senna reticulata*	árvore	400	800	OTC	glicose	0,192
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	glicose	0,217
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	frutose	0,186
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	sacarose	1,125

Continua…

BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	rafinose	-0,189
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	mio-inositol	0,092
BDTD	11	*Saccharum sp*	herbácea	370	720	OTC	glicose	0,076
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	glicose	-0,002
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	frutose	-0,082
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	sacarose	-0,123
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	glicose	0,045
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	frutose	0,213
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	sacarose	0,146
BDTD	23	*Panicum maximum*	herbácea	380	600	FACE	AST	0,139
WOS	28	*Psidium guajava*	árvore	390	780	OTC	AST	0,124
WOS	32	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	sacarose	0,190
WOS	32	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	frutose	-1,347
WOS	32	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	glicose	-1,006
WOS	32	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	mio-inositol	-0,514
WOS	32	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	rafinose	0,179
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	glicose	-0,029
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	frutose	0,070
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	sacarose	0,093
BDTD	1	*Senna reticulata*	árvore	380	760	OTC	amido	0,902
BDTD	2	*Hymenaea courbaril*	árvore	360	720	OTC	amido	0,103
BDTD	7	*Euterpe oleracea*	árvore	380	760	OTC	amido	1,387
BDTD	17	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	amido	0,580
BDTD	18	*Solanum lycopersicum*	herbácea	400	750	OTC	amido	0,375
BDTD	23	*Panicum maximum*	herbácea	380	600	FACE	amido	-0,216
WOS	28	*Psidium guajava*	árvore	390	780	OTC	amido	0,586
WOS	32	*Glycine max*	herbácea	380	800	OTC	amido	-0,013
WOS	53	*Glycine max*	herbácea	380	760	OTC	amido	0,267