

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**TIAGO BIGOLIN**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SISTEMA DE DUPLO CULTIVO  
MILHO-SOJA EM CLIMA SUBTROPICAL.**

**Porto Alegre, 2023**

**TIAGO BIGOLIN**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SISTEMA DE DUPLO CULTIVO  
MILHO-SOJA EM CLIMA SUBTROPICAL.**

Tese de doutorado apresentada ao Programa  
de Pós Graduação em Agronegócios da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Orientador: Prof. Dr. Edson Talamini**

**Porto Alegre, 2023**

**TIAGO BIGOLIN**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SISTEMA DE DUPLO CULTIVO  
MILHO-SOJA EM CLIMA SUBTROPICAL.**

Tese de doutorado apresentada ao Programa  
de Pós Graduação em Agronegócios da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Edson Talamini - Orientador  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

---

Dr. Heinrich Hasenack  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

---

Dr. Francisco Eliseu Aquino  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

---

Dr. Cimélio Bayer  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

---

Dr. Evandro Henrique Figueiredo Moura da Silva  
Universidade de São Paulo - USP

*Dedico esta tese a minha amada esposa Jaíne Juliane Mühl  
e à minha preciosa família*

## AGRADECIMENTOS

Nestes anos de doutorado, de muito estudo, esforço e empenho, gostaria de agradecer a algumas pessoas que me acompanharam e foram fundamentais para a realização de mais este sonho. Expresso aqui através de poucas, mas sinceras, palavras um pouco da importância que elas tiveram nesta conquista e expresso minha mais sincera gratidão a todas elas. Primeiramente, agradeço a Deus por sempre me mostrar o caminho certo. Gratidão pelos meus pais, sua presença e amor incondicional na minha vida sempre. Esta tese é a prova de que seus esforços pela minha educação valeram a pena. Agradeço à minha esposa Jaíne pelo apoio incondicional em todos os momentos e por estar ao meu lado sempre. Fico muito feliz em dividir meus dias com você. Sou grato a todos aos demais familiares, amigos e colegas por compreenderem as várias horas em que estive ausente por causa do desenvolvimento deste trabalho. Vocês são muito especiais para mim.

Agradeço à universidade federal do Rio Grande do Sul e ao programa de pós-graduação em agronegócios pela oportunidade a mim concedida. Agradecimento mais que especial ao meu orientador Edson Talamini pela sua dedicação e paciência durante o projeto. Seus conhecimentos fizeram grande diferença no resultado final deste trabalho e para a minha vida. A todos os professores e colegas pela oportunidade do convívio, troca de experiências e cooperação mútua durante estes anos. Menção honrosa aos colegas Cristiane, por me passar tranquilidade e compartilhar de sua experiência comigo e ao Sirineu pela parceria de várias, e várias, e várias, e várias horas de estrada juntos, muito papo e chimarrão, “andamos mais que notícia que notícia ruim” por este estado.

Agradecimento aos membros das bancas, tanto da qualificação quanto da banca final, pelas contribuições e sugestões para a melhoria da qualidade do trabalho. Menção especial ao professor Francisco Eliseu Aquino e a toda sua equipe do departamento de geografia da UFRGS por estarem sempre dispostos a ajudar e pelo auxílio, mais que especial, nas modelagens climáticas. Ao Colega Evandro H. F. Moura da Silva por dedicar seu tempo em me ensinar a trabalhar com os modelos de cultura e por estar sempre a disposição para tirar minhas dúvidas.

Obrigado a todos vocês!

“A força não provém da capacidade física. Provém de uma vontade indomável.”  
(Mahatma Gandhi)

"Acredite em milagres, mas não dependa deles."  
(Immanuel Kant)

## RESUMO

O sistema de duplo cultivo colocou o Brasil em uma posição de destaque como grande produtor mundial de soja e milho. Este posto pode estar ameaçado em futuro próximo. As mudanças climáticas tem relação direta com o crescimento e rendimento das culturas agrícolas. Além de afetar as culturas individualmente as mudanças climáticas podem interferir na dinâmica dos sistemas agrícolas. Assim, a presente tese tem como objetivo identificar os impactos das mudanças climáticas passadas e futuras no desenvolvimento e produtividade do milho e da soja e as implicações das mudanças climáticas na adoção do sistema de cultivo duplo milho-soja no clima subtropical. Para cumprir com os objetivos cinco artigos foram elaborados, compondo a estrutura da tese. O primeiro artigo busca realizar uma análise sistemática sobre os estudos que avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre as culturas do milho e da soja, considerando os impactos sob o sistema de duplo cultivo. O segundo avalia cenários de mudanças climáticas para a região subtropical brasileira. O terceiro e o quarto avaliam os impactos das mudanças climáticas sobre o milho e soja, respectivamente, cultivados em sistema duplo cultivo milho-soja na região subtropical. O quinto artigo sumariza as informações dos artigos anteriores, discutindo as adaptações e limitações do sistema duplo cultivo milho-soja na região de clima subtropical. Para modelar as variáveis climáticas futuras de interesse foi usado o modelo HadGEM2-CC do CMIP-5 para duas vias de concentração representativas (RCPs 4.5 e 8.5) e dois cortes temporais (meados e final do século). Os modelos CSM-CERES-Maize e CSM-CROPGRO-Soybean, acoplados à plataforma DSSAT, foram utilizados para simular o crescimento e a produtividade do milho e da soja em diferentes condições climáticas. Os resultados climáticos apontam para aumentos significativos na precipitação e na temperatura mínima, enquanto a temperatura máxima só apresenta uma clara tendência de aumento no cenário de maiores emissões de CO<sub>2</sub>. Os extremos climáticos de altas temperaturas máximas e mínimas devem aumentar enquanto o número de dias com geadas tende a diminuir. O sistema de duplo cultivo milho soja terá melhores condições climáticas para desenvolvimento no futuro. O aumento da temperatura mínima, da chuva, da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e a redução das geadas devem ser fatores decisivos para isto. A possível expansão deste sistema poderá mudar a dinâmica dos sistemas agrícolas e do agronegócio nestas regiões.

**Palavras-chave:** Plantio direto; sequestro de carbono; sustentabilidade; agricultura conservacionista.

## **ABSTRACT**

The double crop system placed Brazil in a prominent position as a major world producer of soybeans and corn. This position may be threatened in the near future. Climate change is directly related to the growth and yield of agricultural crops. In addition to affecting individual crops, climate change can interfere with the dynamics of agricultural systems. Thus, this thesis aims to identify the impacts of past and future climate change on the growth and yield of corn and soybeans and the implications of climate change on the adoption of the corn-soybean double crop system in the subtropical climate. To complete the objectives, five articles were elaborated, composing the structure of the thesis. The first article seeks to carry out a systematic analysis of the studies that evaluated the impact of climate change on corn and soybean crops, considering the impacts under the double cropping system. The second evaluates climate change scenarios for the Brazilian subtropical region. The third and fourth articles assess the impacts of climate change on corn and soybeans, respectively, grown in a corn-soybean double crop system in the subtropical region. The fifth article summarizes information from previous articles, discussing the adaptations and limitations of the corn-soybean dual cropping system in the subtropical climate region. To model the future climate variables, the CMIP-5 HadGEM2-CC model was used for two representative concentration pathways (RCPs 4.5 and 8.5) and two time slices (mid and late century). The CSM-CERES-Maize and CSM-CROPGRO-Soybean models, coupled to the DSSAT platform, were used to simulate corn and soybean growth and yield under different climatic conditions. The climatic results point to significant increases in precipitation and minimum temperature. While the maximum temperature only shows a clear upward trend in the scenario of higher CO<sub>2</sub> emissions. The climatic extremes of high maximum and minimum temperatures should increase while the number of days with frost tends to decrease. The double crop corn soybean system will have better climatic conditions for future development. The increase in the minimum temperature, rainfall, atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and the reduction of frosts should be decisive factors for this. The possible expansion of this system could change the dynamics of agricultural systems and agribusiness in these regions.

**Keywords:** No-tillage; carbon sink; climate-smart agriculture; sustainability.



## SUMÁRIO

<b>PROPOSTA DA TESE .....</b>	<b>11</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	11
1.2 OBJETIVO GERAL .....	18
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i> .....	18
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA .....	18
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
1.4.1 <i>Estrutura da tese</i> .....	20
<b>2. IMPACTS OF CLIMATE CHANGE SCENARIOS ON DOUBLE CROPPING SYSTEM OF SOYBEAN + CORN IN BRAZIL .....</b>	<b>23</b>
2.1 INTRODUCTION .....	24
2.2 MATERIALS AND METHODS.....	26
2.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	29
2.3.1 <i>Expected impacts of future climate changes on soybean</i> .....	31
2.3.2 <i>Expected impacts of future climate changes on corn</i> .....	36
2.3.3 <i>Expected impacts of future climate changes on the double-cropping system</i> ....	39
2.4 CONCLUSIONS .....	44
<b>3. CLIMATE CHANGE SCENARIOS AND THE CHANGES IN AGRICULTURAL CLIMATE VARIABLES IN SUBTROPICAL CLIMATE ZONE OF SOUTHERN BRAZIL.....</b>	<b>47</b>
3.1 INTRODUCTION .....	47
3.2 MATERIALS AND METHODS.....	49
3.2.1 <i>Study Site</i> .....	49
3.2.2 <i>The Representative Concentration Pathways (RCPs) and Global Climate Models (GCMs)</i> 50	
3.2.3 <i>Statistical Treatment of the Data</i> .....	52
3.3 RESULTS .....	53
3.3.1 <i>Changes in Maximum Temperature</i> .....	53
3.3.2 <i>Changes in minimum temperature</i> .....	57
3.3.3 <i>Changes in rainfall</i> .....	61
3.3.4 <i>Changes in solar radiation</i> .....	64
3.4 DISCUSSION .....	67
3.5 CONCLUSION.....	70
<b>4. IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON EARLY CORN CROP IN A SUBTROPICAL ZONE IN SOUTHERN BRAZIL.....</b>	<b>91</b>
4.1 INTRODUCTION .....	91
4.2 MATERIALS AND METHODS.....	93
4.2.1 <i>Climate Scenarios</i> .....	93
4.2.2 <i>Corn Crop Modeling</i> .....	95
4.2.3 <i>Corn data</i> .....	97
4.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	98
4.3.1 <i>Impact of climate change on yield of corn</i> .....	98
4.3.2 <i>Changes in temperature and early corn sowing</i> .....	103
4.3.3 <i>Changes in Rainfall and Solar Radiation and early corn sowing</i> .....	107
4.4 CONCLUSION.....	110
<b>5. IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON LATE SOYBEAN CROP IN A SUBTROPICAL ZONE ON SOUTHERN BRAZIL .....</b>	<b>114</b>
5.1 INTRODUCTION .....	114

5.2	MATERIALS AND METHODS.....	118
5.2.1	<i>Climate Scenarios</i> .....	118
5.2.2	<i>Crop Modeling</i> .....	119
5.2.3	<i>Soybean data</i> .....	121
5.3	RESULTS AND DISCUSSION.....	123
5.4	CONCLUSION.....	133
<b>6.</b>	<b>CLIMATE CHANGE IMPACTS AND CHALLENGES OF ADOPTING THE CORN-SOYBEAN DOUBLE CROPPING SYSTEM IN SUBTROPICAL CLIMATE ZONE ON SOUTHERN BRAZIL .....</b>	<b>140</b>
6.1	INTRODUCTION .....	140
6.2	MATERIALS AND METHODS.....	144
6.2.1	<i>Climate Scenarios</i> .....	144
6.2.2	<i>Crop Modeling</i> .....	145
6.3	RESULTS AND DISCUSSION.....	146
6.3.1	<i>Climate changes according to the future scenarios</i> .....	146
6.3.2	<i>Impacts of future climate change on early corn</i> .....	148
6.3.3	<i>Impacts of future climate change on late soybean</i> .....	151
6.3.4	<i>The corn-soybean double crop system</i> .....	153
6.3.5	<i>Challenges of the Corn-Soybean Double-Cropping System</i> .....	156
6.4	CONCLUSION.....	160
<b>7.</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES, PROPOSIÇÕES E LIMITAÇÕES.....</b>	<b>170</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>173</b>

## PROPOSTA DA TESE

### 1.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais vêm ocorrendo devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na composição do ar atmosférico, causando, entre outros, aumento da temperatura global, alteração na quantidade de chuvas e no padrão dos períodos chuvosos, tendência que deve se manter nas próximas décadas (MASSON-DELMOTTE et al. 2018). Em seu *report*, esta instituição, baseada em conjunto de modelos estipulou que, mesmo tomadas algumas ações de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, a temperatura média global irá aquecer 1.5 °C até o ano de 2100. No mesmo documento evidenciam que a temperatura média global aumentou aproximadamente 1 °C (entre 0,8 °C e 1,2 °C) desde o período pré-industrial até o ano de 2017 e pelo menos 20% deste aquecimento ocorreu após o início do século XXI, sendo 16 dos 17 anos mais quentes já registrados na série histórica desde o ano 1880 ocorreram neste século.

Alguns estudos mostram essa tendência no Brasil. Os conjuntos de dados analisados nas últimas quatro décadas mostram padrões de aquecimento estatisticamente significativos em quase todas as regiões do país, bem como uma redução nos dias úmidos consecutivos, um aumento nos dias secos consecutivos e uma redução na precipitação total anual. As projeções climáticas revelam padrões de aquecimento intensificado em cenários futuros com aumento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. As temperaturas médias para meados e final do século irão aumentar de 1,4 °C a 1,9 °C e 1,6 °C a 3,2 °C, respectivamente. Assim como a frequência de dias e noites quentes e a duração das ondas de calor, espera-se que aumente em todas as regiões até o final do século (Avila-Diaz et al., 2020).

Essas mudanças afetaram e continuarão afetando o clima do país de diferentes formas as distintas regiões, incluindo a região sul do Brasil. O estudo de Berlato e Cordeiro (2017) reúne uma coletânea de artigos que pode ser discutida em duas partes. Uma tratando-se das mudanças climáticas que ocorreram no estado do Rio Grande do Sul e outra demonstrando e analisando possíveis cenários climáticos para a região Sudeste da América do Sul (SAS), a qual inclui a região sul do Brasil. Sobre este tema, os estudos baseados em modelos de previsões climáticas futuras sumarizados no estudo, indicam aumentos de temperatura semelhante as projeções globais do IPCC quando analisados os cenários otimistas de emissão de CO<sub>2</sub> e cortes temporais mais próximos. Quando analisados os cenários mais pessimistas e o corte temporal

até o final do século, a projeção de aumento de temperatura é de até 3 °C. As previsões indicam de neutralidade a leve aumento do índice pluviométrico para a região, novamente se acentuando no cenário mais pessimista e até o final do século, onde estão previstos aumentos entre 15 e 20% da precipitação anual.

O outro ponto abordado pelo estudo revisa 33 estudos primários sobre padrões climáticos históricos e como estes se modificaram nas últimas décadas no estado do Rio Grande do Sul e fornece algumas evidências significativas para esta discussão, entre as principais estão: a) houve aumento da temperatura média, influenciada pelo aumento das temperaturas mínimas, enquanto as máximas mantem-se estáveis, a maior parte ocorreu nos últimos 30 anos; b) aumento no número de noites quentes; c) redução no número de dias com geada; d) aumento da precipitação pluvial anual, se comparado o período de 1950-1979 e 1980-2009 houve aumento de 10% do volume de precipitação em todas as regiões do estado; e) o número de dias com precipitação também aumentou em todo o estado, especialmente na primavera e no verão; f) aumento da intensidade média da precipitação anual (mm/dia); g) a umidade relativa do ar aumentou em todo estado, especialmente na primavera e no verão; h) a insolação solar teve redução, em decorrência do aumento da nebulosidade, e i) a evapotranspiração de referência teve redução significativa, a exceção do outono. Os autores apontam a partir destas observações e de outros estudos em regiões temperadas do mundo que o aumento da temperatura e o período livre de geadas aumenta a estação de crescimento das culturas (Berlato e Cordeiro, 2017).

As mudanças climáticas projetadas para ocorrer nos próximos anos irão afetar diretamente a agricultura, podendo colocar a segurança alimentar global em risco, fato que tem chamado a atenção de muitos pesquisadores nos últimos anos (Dawson et al., 2016; Hasegawa et al., 2018; Molotoks et al., 2020). Essas mudanças impactam de forma diferente a produtividade dos cultivos agrícolas explorados comercialmente nas muitas regiões do mundo, podendo haver aumento ou redução dependendo da gravidade e do tipo dessas mudanças (Deryng et al., 2014; Khordadi et al., 2019; Leng e Hall, 2019; Liu et al., 2020b; Sultan e Gaetani, 2016; Ullah et al., 2019; Wang et al., 2020a).

Além de colocar a segurança alimentar em risco, as perdas de produtividade das culturas devido às mudanças climáticas afetarão a economia de vários países, principalmente dos menos desenvolvidos, que têm parte significativa de suas receitas na agricultura. As perdas anuais recentes causadas pelas mudanças climáticas, quando comparadas ao nível pré-industrial, representam US \$ 22,3 bilhões para o milho, 6,5 bilhões para a soja, 0,8 bilhão para o arroz e 13,6 para o trigo. As perdas de rendimento estão localizadas especialmente em baixas

latitudes (Iizumi et al., 2018). Para as mesmas culturas, o aumento de cada grau Celsius na temperatura média global reduziria, em média, os rendimentos globais do trigo em 6,0%, arroz em 3,2%, milho em 7,4% e soja em 3,1% (Zhao et al., 2017).

O Brasil ocupa lugar de destaque mundial como fornecedor de alimentos para o mundo, posicionando-se entre os principais exportadores de cereais, oleaginosas, frutas e proteína animal. O país é um dos maiores produtores mundiais de soja, na safra 21/22 foram cultivados 41,5 milhões de hectares e uma produção total de 125,5 milhões de toneladas. O país é o terceiro maior produtor de milho do mundo, cultivando na mesma safra aproximadamente 21,6 milhões de hectares e produzindo 112,8 milhões de toneladas (Conab, 2023). Devido as suas características fisiológicas essas culturas são amplamente adaptadas a todas as regiões produtoras de grãos do país.

Um dos principais motivos para os números expressivos de produção alcançados pelo Brasil nas culturas de soja e milho é a possibilidade de cultivar essas duas culturas dentro de uma mesma estação de crescimento, em um sistema intensivo de produção, denominado sistema de duplo cultivo. Neste sistema, a soja precoce é semeada no início da estação de cultivo (set./out.) e após sua colheita (jan./fev.), o milho é semeado na mesma área de terra. Para demonstrar as proporções que este sistema tomou na agricultura nacional, o milho produzido nesse sistema representa hoje 76% da produção total nacional, adicionando 85 milhões de toneladas na última safra nacional (Conab, 2023).

A temperatura na qual a soja melhor se adapta é entre 20 °C e 30 °C. A indução do florescimento somente ocorre com temperaturas acima dos 13 °C. O crescimento vegetativo é pequeno, quase nulo, em temperaturas menores ou iguais a 10 °C. Temperaturas acima dos 35 °C causam efeitos adversos no desenvolvimento da cultura, especialmente dos estágios reprodutivos e podem acelerar sua maturação. O ciclo da soja é regulado principalmente pela sua sensibilidade a duração do dia, denominado de fotoperíodo. A diferenciação dos meristemas vegetativos e reprodutivos inicia-se nos primeiros estágios de desenvolvimento e a velocidade com que ocorre é em função da sensibilidade da cultivar ao fotoperíodo. Cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o seu florescimento não ocorre. Quando exposta a fotoperíodos maiores (dias mais longos) a soja tende a alongar seu período vegetativo, o inverso ocorre quando é exposta a fotoperíodos menores (dias mais curtos), onde ocorre o encurtamento do período vegetativo e início do período reprodutivo mais rapidamente. Os estágios que a soja tem a maior necessidade hídrica é a germinação-emergência e floração-enchimento de grãos (Seixas et al., 2020).

O ciclo do milho é determinado pela quantidade acumulada de energia ou unidades calóricas necessárias a cada etapa do desenvolvimento. Esta soma se dá pela diferença entre a temperatura máxima, 30 °C, e temperatura mínima, 10 °C, em que ocorre o desenvolvimento da cultura. No entanto, a temperatura afeta de forma diferente o desenvolvimento do milho em função do seu estágio fenológico. A temperatura do solo ideal para a germinação é entre 25 °C e 30 °C, sendo que a temperatura inferior a 10 °C ou superior a 40 °C comprometem os processos normais de germinação. Os períodos reprodutivos podem ser acelerados com temperaturas médias acima dos 26 °C e retardadas abaixo dos 15 °C. Temperaturas acima dos 32°C prejudicam a polinização e acima dos 35 °C a composição e o enchimento dos grãos. Temperaturas noturnas acima dos 24 °C aumentam a respiração celular e conseqüentemente o gasto energético, diminuindo a produtividade. Quanto à necessidade hídrica, o período de maior necessidade é no período reprodutivo, desde o início da floração até a maturação, variando entre 5 a 7 mm diários (Landau et al., 2010).

No Brasil as lavouras de soja e milho poderão apresentar ganhos ou perdas de produtividade dependendo do tipo e da intensidade das mudanças climáticas, além da região que são cultivadas. O aumento da temperatura e a redução da precipitação têm sido apontadas como as principais causas das perdas na produtividade das lavouras destas culturas. Estudos anteriores apontam para efeitos compensatórios do aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico para algumas culturas comerciais, principalmente em plantas C3, como a soja, e poucos ou nenhum em plantas C4, como o milho (Chisanga et al., 2020; Gummadi et al., 2020; Jin et al., 2018; Liu e Basso, 2020; Rao e Rao, 2019; Sima et al., 2020; Sultan et al., 2019). Algumas regiões, com clima mais frio, podem se beneficiar com o aumento da temperatura, ou terão menos impactos negativos na produtividade dessas culturas. Enquanto as regiões mais quentes sofrerão as maiores perdas (Holzkämper, 2020; Qian et al., 2019 e Zimmermann et al., 2017). Desta forma, estudos regionalizados são necessários para melhor compreender a realidade de cada região.

Vários estudos tem demonstrado os efeitos que as mudanças climáticas terão sobre as culturas da soja e do milho no Brasil. De um modo geral a cultura do milho está projetada para diminuir consideravelmente, especialmente nas principais regiões produtoras como Centro Oeste, Matopiba e Brasil Central, Sul da Amazônia, Sudeste e Nordeste, alcançando perdas de até 80%, essas perdas são mais acentuadas no final do século e em cenários com maiores emissões de CO<sub>2</sub>. Enquanto na região Sul, não há concordância entre os autores, demonstrando a possibilidade tanto de pequenas perdas, até pequenos ganhos, em termos gerais seguindo uma tendência de neutralidade (Andrea et al., 2019, 2020; Brumatti et al., 2020; Camilo et al., 2018;

Ferreira e Miranda, 2020; Souza et al., 2019; Eulenstein et al., 2017; Fernandes et al., 2012; Hampf et al., 2020; Justino et al., 2013; Martins et al., 2019; Minuzzi e Lopes, 2015; Oliveira et al., 2018 e Travasso et al., 2006).

Para a soja, as projeções de produtividade futura avaliada sob cenários de mudanças climáticas apontam tendência de incremento, embora alguns poucos estudos assumam entre suas avaliações a possibilidade de perdas. Os ganhos de produtividade projetados são maiores nas regiões de clima tropical e nos cenários para o final do século com maiores emissões de CO<sub>2</sub>. Na região de clima subtropical os ganhos projetados são menores, entretanto, há uma maior concordância entre os autores sobre este aumento, na ordem de 30%. (Andrea et al., 2020; Battisti et al., 2018; Cera et al., 2017; Silva et al., 2020; Rio et al., 2016; Fernandes et al., 2012.; Hampf et al., 2020; Justino et al., 2013; Minuzzi et al., 2017; Pires et al., 2016; Travasso et al., 2006)

Além de afetar essas culturas individualmente as mudanças climáticas devem afetar também o sistema de produção destas culturas. Alguns autores se propuseram a estudar os impactos que as mudanças climáticas futuras terão sobre o sistema de duplo cultivo soja-milho nas condições brasileiras e observaram que a dinâmica deste sistema será afetada com implicações negativas que podem comprometê-lo. A projeção para a soja precoce semeada no início do período chuvoso é de produtividade reduzida. A produtividade aumenta com o atraso da semeadura e a semeadura de variedades de ciclo mais longo, porém, a adoção dessas técnicas que beneficiam a soja atrasa a semeadura do milho de segunda safra, reduzindo sua produtividade e até inviabilizando o sistema. O encurtamento e o atraso no início da estação chuvosa, a redução do volume de precipitação e o aumento da temperatura são apontados como as principais causas dessas mudanças no sistema (Andrea et al., 2019, 2020; Souza et al., 2019; Hampf et al., 2020; Justino et al., 2013; Minuzzi e Lopes, 2015; Pires et al., 2016).

O sistema de duplo cultivo soja-milho é amplamente adaptado e utilizado pelos produtores rurais desde a metade Norte do estado do Paraná até a região Norte do país, estando presente em todas as principais regiões produtoras no clima tropical. Entretanto, no estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, pertencentes ao clima subtropical, não é comum a implantação do sistema soja-milho utilizado no restante do país. Isso possivelmente ocorre pelas diferenças climáticas que há entre estas regiões, localizadas sob clima subtropical, e o restante do país, com maior parte do território localizado sob clima tropical, conforme descrito por Alvares et al. (2013).

A possibilidade do cultivo de duas culturas economicamente atrativas desperta o interesse dos produtores rurais em qualquer local. Entretanto, não é o sistema de duplo cultivo soja-milho, utilizado no restante do país, que tem despertado o interesse dos agricultores na região subtropical. Nas duas últimas décadas os produtores rurais do Rio Grande do Sul começaram a cultivar essas duas culturas em sucessão, porém em ordem inversa, semeando cultivares de milho com ciclos super ou hiper precoces logo após o período de geadas do inverno, geralmente em agosto, e imediatamente após sua colheita, em janeiro, semeia-se a soja, geralmente com ciclos mais tardios. Esse sistema vem ganhando mais adeptos a cada ano e tomando maiores proporções, entretanto ainda não há dados oficiais sobre o acompanhamento e evolução das áreas cultivadas sob este sistema (Contini et al., 2019).

O termo usualmente utilizado pelos produtores desta região para o sistema é “Soja Safrinha”, pelo fato de a soja ser cultivada fora da sua época preferencial e apresentar menor rendimento em relação à sua época preferencial de cultivo. Os autores Contini et al. (2019) denominaram este sistema de “safrinha invertida” fazendo uma analogia a inversão da “safrinha” do Centro Oeste, onde o milho é a cultura semeada fora de sua época ideal. Dadas as proporções que a “safrinha de milho” tomou no território nacional, este termo caiu em desuso, sendo substituído por “milho de segunda safra”. Os autores chamam a atenção para o sistema milho-soja no Sul do país em nota técnica publicada pela Embrapa e afirmam que “o caminho para a segunda safra de soja não tem volta e não demorará muito para ser oficializado por órgãos competentes”. Com isso tentam chamar a atenção das entidades competentes por monitorar e acompanhar o desenvolvimento das safras, a começarem a levantar dados sobre este sistema de cultivo. Para este estudo não será empregado o termo “safrinha invertida” e sim sistema de duplo cultivo milho-soja.

Os sistemas de duplo-cultivo, tanto soja-milho nas regiões tropicais, quanto milho-soja na região Sul, consistem em aproveitar ao máximo a estação de crescimento para cultivar culturas economicamente atrativas. Na região tropical do Brasil a estação de cultivo, pensando-se em sistema de duplo cultivo soja-milho, é limitada pela duração da estação chuvosa. Enquanto isso na região Sul, que apresenta chuvas durante todos os meses do ano, pensando no sistema de duplo cultivo milho-soja, a estação de cultivo é limitada pelas baixas temperaturas do inverno e a possível ocorrência de geadas, ainda no caso da soja semeada como segunda cultura, pelo encurtamento do fotoperíodo no outono.

Com base nos estudos sobre mudanças climáticas e necessidades fisiológicas das culturas envolvidas é possível pressupor que o aumento de temperatura projetado nos cenários



futuros, principalmente a mínima, proporcionará o aumento da estação de crescimento e do período livre de geadas se comparado as condições climáticas atuais. Isso permitiria a semeadura do milho mais precocemente. Possibilitaria também a utilização de cultivares de soja com ciclos mais longos, estendendo seu ciclo por um maior período no campo sob menor risco da ocorrência de geadas e baixas temperaturas no final do outono. Quando semeada em épocas de menor fotoperíodo, como no caso do sistema de duplo cultivo milho-soja, a soja tende a encurtar seu ciclo, principalmente o período vegetativo. A utilização de cultivares de ciclo mais longo, aumentaria o tempo de permanência da cultura no campo, mesmo quando semeada em época marginal de cultivo, mais tempo no campo significa maior interceptação de radiação solar e maior produção de fotoassimilados, consequentemente maior produção de biomassa e grãos.

Este aumento futuro na temperatura também proporcionará melhores condições de germinação para o milho semeado na estação fria, assim como, melhores condições iniciais de desenvolvimento e o encurtamento do ciclo da cultura por atingir a soma térmica necessária em cada etapa de desenvolvimento mais rapidamente. Esse encurtamento do ciclo do milho resultará em semeadura antecipada da soja, dependendo do ciclo da cultivar de milho utilizada, a soja pode até mesmo ser semeada dentro do Zoneamento de Risco Agroclimático proposto para a maioria das regiões que é até 31 de dezembro. Isso resultaria em melhores condições de desenvolvimento e a possibilidade de financiamento do custeio destas lavouras. Outro possível benefício para a cultura do milho semeado precocemente é beneficiar-se dos maiores volumes de chuva, maior umidade relativa do ar e menor evapotranspiração que ocorrem na primavera (Matzenauer et al., 2007; Radin et al., 2017; Berlato e Cordeiro, 2017).

Além destes possíveis benefícios para o sistema de duplo cultivo milho-soja, o aumento anual da precipitação e a maior concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico projetados para ocorrer, trarão benefícios diretos para ambas as culturas, ante aos níveis atuais. Alguns pontos que podem pesar negativamente para as condições futuras são o aumento dos eventos climáticos extremos projetados para ocorrerem, como chuvas mais intensas, períodos secos mais prolongados, extremos de temperaturas máxima e mínima elevadas.

Exposto o contexto sobre as mudanças climáticas que ocorreram e continuarão ocorrendo e como estas afetam o desenvolvimento das culturas de milho e soja cultivados individualmente e em sistema de duplo cultivo, a questão base que norteia este estudo é: Poderão as mudanças climáticas futuras afetar as culturas de soja e milho e o sistema de duplo

cultivo milho-soja na região subtropical no Sul do Brasil e quais as possíveis implicações dessas mudanças para o agronegócio regional?

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar os impactos que as mudanças climáticas futuras terão sob o sistema de duplo cultivo milho-soja na região subtropical no Sul do Brasil apontando e discutindo as possíveis implicações dessas mudanças para o agronegócio regional.

### 1.2.1 *Objetivos específicos*

- a. Sistematizar o conhecimento científico sobre os impactos das mudanças climáticas futuras nas culturas da soja e milho e no sistema de duplo cultivo destas culturas no Brasil.
- b. Projetar as mudanças nas principais variáveis climáticas relacionadas à agricultura para região subtropical no Sul do Brasil sob diferentes cenários emissões futuras de gases de efeito estufa.
- c. Modelar a fenologia, produção e adaptações na data de semeadura para o milho sob cenários de mudanças climáticas futuras para a região subtropical no Sul do Brasil;
- d. Modelar a fenologia, produção e adaptações na data de semeadura para a soja sob cenários de mudanças climáticas futuras para a região subtropical no Sul do Brasil;
- e. Analisar a possibilidade de adaptação do sistema de duplo cultivo milho-soja às condições climáticas futuras na região subtropical no Sul do Brasil, discutindo possíveis implicações destas mudanças no agronegócio regional.

## 1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A possibilidade de cultivo de duas safras dentro de uma mesma estação de cultivo levou o Brasil a uma posição de destaque no cenário global da produção de alimentos. O país está entre os primeiros colocados no ranking de produtores e exportadores das culturas de soja e milho. Historicamente, a soja foi a cultura principal para os produtores brasileiros, esta é considerada economicamente atrativa, pois apresenta alta rusticidade e facilidade de adaptação as condições de clima e solo brasileiro, baixo risco, baixo custo e alta liquidez. No passado, a soja e o milho competiam pela mesma área de cultivo e os dados históricos referentes as áreas cultivadas com estas culturas no país demonstram a preferência pela soja.

O sistema de duplo cultivo soja-milho começou a ser implantado na região tropical nos anos 70, e, desde então, a área cultivada com milho no país tem aumentado. Na região Centro Oeste, principal adepta ao sistema, na média dos anos 90 foram cultivados 1,79 milhões de hectares de milho por safra. Na última década (2011-2020) este número aumentou para 6,87 milhões de hectares, quase quadruplicando a área nesta região, enquanto a média nacional aumentou 22% no mesmo período. Desde os anos 70 até os dias atuais, houve um incremento de 85 milhões de toneladas a safra nacional de milho, oriundo somente deste sistema, perfazendo 76% do total produzido no país (Conab, 2023). A grande aceitação deste sistema pelos agricultores impulsionou a área cultivada de milho nestas regiões.

A região subtropical úmida no Sul do Brasil possui uma série de condições climáticas peculiares, que a distingue das demais regiões do país. Estas características próprias interferem diretamente na agricultura e pecuária destes estados. Em condições normais os produtores rurais produzem uma cultura de verão, geralmente soja ou milho, com preferência para a soja, e uma cultura de inverno, no geral trigo, aveia, azevém ou canola, havendo ainda a integração com a pecuária durante o inverno. Em alguns casos, pelo fato de as opções para o inverno serem pouco atrativas economicamente para os produtores, alguns optam pelo pousio das áreas no inverno. O que faz com que um sistema de monocultivo ou sucessão de culturas seja utilizado na maioria das propriedades (Hirakuri et al., 2019). Nos dois estados mais ao Sul do país a área de soja aumentou 74% e a de milho reduziu 50% entre a década de 90 e os anos 2011/2020, demonstrando clara preferência dos agricultores pela soja neste período (Conab, 2023).

Havendo melhores condições climáticas para a implantação e desenvolvimento das culturas do milho e da soja possibilitando a condução do sistema de duplo cultivo milho-soja na região subtropical úmida no Sul do Brasil, há a tendência que o sistema tenha boa aceitação por parte dos produtores, vide como exemplo o caso da rápida expansão do sistema de duplo cultivo soja-milho nas regiões tropicais. Essa aceitação por parte dos produtores decorre em função das culturas da soja e milho proporcionarem boa rentabilidade por unidade de área. Os autores Contini et al. (2019) preocupados com a redução da área cultivada com milho na região Sul, expuseram que o sistema de duplo cultivo milho-soja pode ser um vetor para o aumento da área cultivada com milho nesta região.

Permanecendo no campo da suposição, apenas extrapolando a realidade dos fatos ocorridos na região Centro Oeste do país com o sistema soja-milho, onde atualmente mais da metade da área cultivada com soja é sobressemeada com milho de segunda safra. Supondo que algo semelhante ocorresse na região Sul do Brasil, com o sistema milho-soja, poderiam ser

acrescidos entorno de 6 milhões de hectares de milho, mantendo a área cultivada com soja. Esse número significaria aumento de 162,2% da área cultivada com milho nesta região. Com base na média de produtividade dos últimos 5 anos da Conab para a região sul, esta mudança acrescentaria 36,6 milhões de toneladas do grão a já mundialmente expressiva safra nacional, aumentando em 35,7% a quantidade produzida.

Vários pesquisadores tem demonstrado preocupação com os impactos que as mudanças climáticas futuras terão sobre o milho e a soja nesta região (Battisti et al., 2018; Cera et al., 2017; Rio et al., 2016; Travasso et al., 2006; Minuzzi et al., 2017; Pires et al., 2016; Brumatti et al., 2020; Ferreira e Miranda, 2020; Eulenstein et al., 2017; Fernandes et al., 2012; Camilo et al., 2018; Souza et al., 2019). Entretanto, ambos avaliaram as culturas individualmente, não supondo que essas mudanças climáticas também poderão afetar a duração da estação de crescimento destas culturas e conseqüentemente permitir a implantação de um novo sistema de cultivo, o qual, ainda que regionalizado já vem sendo utilizado por agricultores. Outros pesquisadores assumiram a utilização do sistema de duplo cultivo milho-soja Giménez et al. (2018) e Monzon et al. (2014) na Argentina, e Massigoge (2023) no Sul dos EUA, ambos em clima subtropical, suas avaliações foram financeiras, risco de quebra de safra e eficiência no uso da terra, sem considerar possíveis impactos das mudanças climáticas no sistema.

Nestas lacunas de pesquisa se insere este estudo, pretendendo melhor entender como os fenômenos climáticos afetam o sistema de duplo cultivo milho-soja em clima subtropical e como este deverá se comportar no futuro. Este estudo será o primeiro a abordar este tema e com isso propõe-se a trazer para a academia a discussão sobre este novo sistema, assim como, chamar a atenção das entidades responsáveis pelo monitoramento das safras agrícolas no país a acompanharem o seu comportamento e desenvolvimento, fornecendo dados para subsidiar novas pesquisas e avanços para a regulação do sistema.

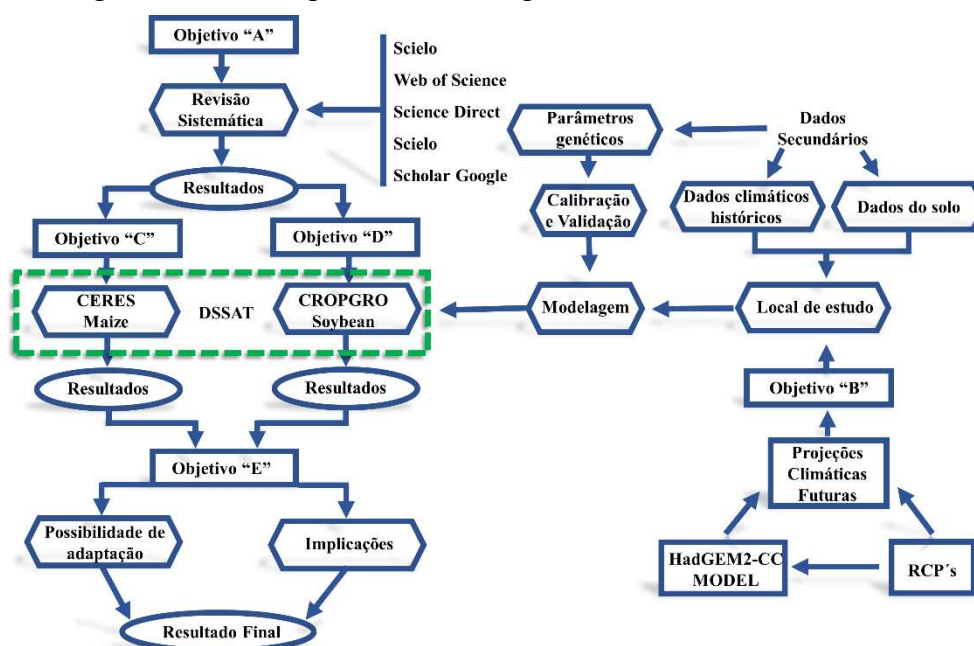
## 1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.4.1 *Estrutura da tese*

A estrutura geral da tese está ilustrada na Figura 1. Para alcançar o objetivo geral proposto para este estudo foram elencados cinco objetivos específicos. Para cumprir com cada um destes objetivos foi elaborado um artigo científico, os cinco artigos formam a estrutura geral da tese, além deste capítulo introdutório e um capítulo de fechamento e conclusões. O primeiro artigo trata de uma análise sistemática em torno do assunto, tem como objetivo levantar dados

atualizados sobre os impactos que as mudanças climáticas futuras projetadas para ocorrer terão sobre as culturas da soja e milho e seus sistemas de cultivo no Brasil. O artigo cumprirá também a função de fornecer o arcabouço teórico necessário para a construção da tese, apresentando resultados de pesquisas acerca do tema, assim como, os caminhos percorridos pelos pesquisadores para a obtenção dos resultados.

Figura 1: Estrutura geral da tese e aspectos metodológicos



O artigo dois, que cumpre com o objetivo específico “b”, tem a função de avaliar o comportamento das principais variáveis climáticas relacionadas com as culturas agrícolas em diferentes cenários climáticos futuros. O modelo escolhido foi o HadGEM2-CC (BELLOUIN et al., 2011), com dados diários de superfície sobre precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e radiação solar incidente. Foram utilizados dados de entrada de emissões de gases de efeito estufa para cenários moderados e pessimistas, RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Os cortes temporais para metade e final do século foram escolhidos. Os dados climáticos gerados neste artigo tem a função de abastecer os modelos de cultura nos artigos subsequentes.

Os artigos três e quatro cumprem com a função de modelar os efeitos que as mudanças climáticas futuras terão sobre as culturas do milho (Objetivo específico “c”) e da soja (Objetivo específico “d”). Para alcançar tais objetivos, utilizou-se os modelos de cultura CERES-Maize e CSM-CROPGRO-Soybean, ambos disponibilizados pela plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). Esses modelos tem a capacidade de simular os

processos biofísicos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera a partir de um conjunto mínimo de dados requeridos. Através desta ferramenta serão simulados os impactos que as mudanças climáticas futuras terão sobre a produtividade e a fenologia destas culturas, assim como, avaliar estes impactos em diferentes épocas de semeadura utilizadas no estado.

Por final, o quinto objetivo específico cumpre com a função de sumarizar os resultados dos objetivos três e quatro e analisar a possibilidade de adaptação das culturas de milho e soja cultivados sob o sistema de duplo cultivo às mudanças climáticas futuras, avaliando se estas proporcionarão melhores condições de desenvolvimento às culturas quando comparadas as condições climáticas atuais. Para realizar esta análise foram avaliadas as produtividades nas épocas marginais de semeadura, específicas deste sistema, o milho no início da estação de cultivo e da soja com semeadura tardia, adequando as melhores épocas de semeadura para o sucesso do sistema. Para cumprir com o restante deste objetivo foi discutido possíveis implicações da expansão deste sistema em regiões de clima subtropical.

## 7. CONTRIBUIÇÕES, PROPOSIÇÕES E LIMITAÇÕES.

Ainda que pareça óbvio, o rendimento e desenvolvimento das culturas agrícolas está intimamente ligado às condições climáticas proporcionadas pelo ambiente, assim como, o futuro da segurança alimentar mundial. É amplamente discutido e aceito pela comunidade acadêmica a relação entre as atividades antropogênicas e as mudanças climáticas que presenciamos nas últimas décadas e as que estão por vir no futuro próximo. O Brasil opera como um dos principais *players* na produção mundial de alimentos, incluindo as *commodities* como a soja e o milho. Entretanto, este posto de destaque pode estar ameaçado se mantidas as previsões de mudanças climáticas. O sistema de duplo cultivo adaptado às condições climáticas da região tropical brasileira foi um dos grandes impulsionadores do crescimento de produção destas culturas neste século. Nesta região, o sistema de duplo cultivo poderá enfrentar dificuldades no futuro, haja vista que as previsões climáticas apontam para diminuição das chuvas e encurtamento da estação chuvosa associado ao aumento de temperatura que pode ser potencialmente danoso às culturas. Estas condições podem tornar mais difícil a exequibilidade de ambos os cultivos dentro da mesma estação de crescimento. É difícil imaginar e projetar todos os impactos derivados para as cadeias produtivas do agronegócio nacional.

Por outro lado, as projeções climáticas apontam para aumento das chuvas e da temperatura, especialmente a temperatura mínima, para a região de clima subtropical localizada na região Sul do Brasil. Ambas as mudanças tendem a aumentar a estação de crescimento das culturas de clima quente como a soja e o milho. Estas mudanças proverão melhores condições para que as duas culturas sejam cultivadas no mesmo ano, possivelmente emergindo um novo sistema de duplo cultivo. Nesta região, a estação de crescimento para culturas de verão são as baixas temperaturas do inverno, com ocorrência de geadas. O aumento da temperatura mínima permitirá um melhor desenvolvimento no milho semeado em agosto. Outro ponto importante será o suprimento mais adequado de água previsto para o futuro. Como visto anteriormente, o rendimento em condições de sequeiro é afetado frequentemente por déficits hídricos. É esperado que o rendimento do milho aumente em condições futuras. O sucesso do milho é fundamental a manutenção do sistema, visto que no sistema de duplo cultivo ele torna-se a cultura principal. O rendimento também será positivamente impactado pelo aumento da temperatura e das chuvas. Esta cultura conta ainda com os efeitos benéficos de aumento da fotossíntese líquida sob maiores concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Embora nesta região tradicionalmente sejam cultivadas duas culturas dentro do mesmo ano agrícola (uma no inverno e outra no verão), a aceitação das culturas de inverno por parte dos agricultores é menor em relação às de verão, desta forma muitas áreas acabam sendo subutilizadas no inverno. Outro ponto a destacar é a preferência dos agricultores por cultivar maior área de soja em detrimento ao milho no verão. Esta preferência pela soja tem feito com que muitas áreas tenham sido mantidas sob monocultivo ao longo dos anos, não seguindo preceitos técnicos estabelecidos para a boa condução do sistema de plantio direto. É possível que os maiores rendimentos despertem o interesse dos agricultores em adotar o sistema de duplo cultivo milho-soja, por serem duas culturas economicamente atrativas. O preço do milho deverá ser um dos principais indicadores da aceitação econômica deste sistema, sua relação com o preço da soja e do trigo será frequentemente confrontada. Neste sistema, a soja é tida como cultura secundária e é necessário verificar se a inserção do milho compensa os menores rendimentos esperados para a soja sob este sistema, ante ao sistema tradicional. A maior aceitação econômica do sistema de duplo cultivo milho-soja por parte dos agricultores poderia implicar em maior expansão da área de cultivo, desta forma, poderia ser um vetor para o aumento da área cultivada com milho na região.

A inserção do milho nos sistemas agrícolas poderia trazer alguns benefícios interessantes do ponto de vista técnico e ambiental, como: maior produção de grãos por unidade de área, produção de palhada de qualidade para o bom andamento do sistema de plantio direto, incorporação de carbono ao solo e diversificação de espécies de culturas. É importante que estudos de campo sejam realizados, considerando novos sistemas de rotação de culturas com a inclusão do duplo cultivo de milho-soja dentro de uma mesma estação. Na mesma direção é necessário a avaliação da disseminação de patógenos por restos culturais entre as áreas de soja safrinha e as de safra normal. É possível que ante uma expansão do sistema de duplo cultivo as datas de semeadura sejam limitadas até determinadas datas, da mesma forma, que a semeadura da soja em época normal seja realizada a partir de determinada data. A extensão do Zoneamento de Risco Agroclimático, normativa que limita a semeadura das culturas sob proteção do seguro agrícola subsidiado, deve ser repensada. Seria de fundamental importância para expansão do sistema de duplo cultivo se a semeadura da soja securitizada fosse permitida durante inteiramente ou parte de janeiro. Atualmente a semeadura pode ser realizada até o último dia de dezembro. A semeadura do milho já é permitida na maior parte do estado durante o mês de agosto. Embora a redução de geadas esteja prevista para reduzir, sua imprevisibilidade é continua. Não sendo conveniente a antecipação da semeadura.



Este estudo trouxe ineditismo por avaliar o impacto das mudanças climática além das culturas individualmente, considerando a interferência na dinâmica do sistema agrícola. Complementa também outros estudos que já avaliaram o sistema de duplo cultivo milho-soja em clima subtropical em outras regiões. Até o momento nenhum estudo havia considerado a possibilidade de surgimento e expansão relacionados às mudanças climáticas. É sugerido que novos estudos sejam realizados verificando a possibilidade de expansão do sistema de duplo cultivo pela região Sudeste da América Latina sob cenários de mudanças climáticas, região na qual este estudo foi realizado. Assim como, a possibilidade de implantação deste sistema em outros climas subtropicais ao redor do mundo, como já apontado anteriormente.

Todos os modelos, sejam eles quais forem, tem a capacidade de antecipar resultados e informações que dificilmente seriam obtidos tão rapidamente de outra forma. Entretanto, todos os modelos estão sujeitos a erros inerentes aos seus processos de simulação. Uma das principais limitações deste estudo está na utilização exclusiva de modelos, primeiro de clima e depois de culturas, para representar uma realidade e limitando-se a ela. Como citado anteriormente, experimentos de campo são necessários compreender todas as interações entre as variáveis climáticas e o desenvolvimento das culturas de milho e soja sob duplo cultivo. Para novos estudos com modelagens é sugerido que mais pontos em grade sejam utilizados para as modelagens climáticas. Quanto aos modelos de culturas, a calibração de novos genótipos tanto de soja quanto de milho é sugerida. Genótipos que atualmente estão sendo utilizados pelos agricultores para este sistema, principalmente genótipos de milhos hiper e super precoces.

## REFERÊNCIAS

- ABBASIAN, M.; MOGHIM, S.; ABRISHAMCHI, A. Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 135, p. 1465-1483, 2019.
- ABDULBAKI, A. S. *et al.* Rubisco and abiotic stresses in plants: current assessment. **Turkish Journal of Botany**, Ankara, v. 46, n. 6, p. 541-552, 2022.
- ABEBE, A. *et al.* Growth, yield and quality of maize with elevated atmospheric carbon dioxide and temperature in north–west India. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 218, p. 66-72, 2016.
- ACOCK, B.; ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 56-61, 1991.
- AHMED, M.; AHMAD, S. Carbon dioxide enrichment and crop productivity. *In*: HASANUZZAMAN, M. (ed.). **Agronomic crops**. Singapore: Springer, 2019. v. 2, p. 31-46.
- AINSWORTH, E. A. *et al.* A meta-analysis of elevated [CO<sub>2</sub>] effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, n. 8, p. 695-709, 2002.
- 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**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 27-49, 2021.
- AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. **New Phytologist**, Oxford, v. 165, n. 2, p. 351-372, 2005.
- ALLEN, L. H. *et al.* Elevated CO<sub>2</sub> increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 168, n. 16, p. 1909-1918, 2011.
- ALLEN, L. H. *et al.* Elevated temperature intensity, timing, and duration of exposure affect soybean internode elongation, mainstem node number, and pod number per plant. **The Crop Journal**, Amsterdam, v. 6, p. 148–161, 2018.
- ALLEN, L. H. *et al.* Response of vegetation to rising carbon dioxide: Photosynthesis, biomass, and seed yield of soybean. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, DC, v. 1, n. 1, p. 1-14, 1987.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; DIAS, H. B. Tropicalização interior do sudeste do Brasil: sistema de Köppen aplicado para detectar mudanças climáticas ao longo de 100 anos de dados meteorológicos observados. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 149, p.

ALVAREZ, C. *et al.* Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 142, p. 25-31, 2014.

ALVES, F. Q. G. *et al.* Qualidade fisiológica de híbridos de milho submetidos a diferentes temperaturas. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28., 2010, Goiânia. [Anais...]. Goiânia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010. p. 3714-3718.

AMADO, T. J. C. *et al.* Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, 2006.

AMBRIZZI, T. *et al.* The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, New York, v. 1436, n. 1, p. 98-120, 2019.

ANDRADE, F. H. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, p. 1-12, 1995.

ANDREA, M. C. S. *et al.* Assessment of climate change impact on double-cropping systems. **Applied Sciences**, Basel, v. 2, [art.] 544, 2020.

ANDREA, M. C. S. *et al.* Impacts of future climate predictions on second season maize in an agrosystem on a biome transition region in Mato Grosso state. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 2, p. 335-347, 2019.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, VA, v. 74, n. 1, p. 430-445, 1959.

ASSENG, S. *et al.* Crop modeling for climate change impact and adaptation. In: SADRAS, V. (ed.). **Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy**. 2nd. ed. London: Elsevier, 2015. p. 505-546.

AVILA-DIAZ, A. *et al.* Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 55, n. 5/6, p. 1403-1426, 2020.

BABEL, M. S.; TURYATUNGA, E. Evaluation of climate change impacts and adaptation measures for maize cultivation in the western Uganda agro-ecological zone. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 119, n. 1, p. 239-254, 2015.

BARBANO, M. T. *et al.* Temperatura base e soma térmica para cultivares de milho pipoca (*Zea mays*) no subperíodo emergência-florescimento masculino. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 11, n. 1, p. 79-84, 2003.

- BATTISTI, R. *et al.* Assessment of crop-management strategies to improve soybean resilience to climate change in Southern Brazil. **Crop and Pasture Science**, Collingwood, v. 69, n. 2, p. 154–162, 2018.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought tolerance of Brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 51, n. 2, p. 285-298, 2015.
- BAYER, C. *et al.* Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1/2, p. 101-109, 2000.
- BELLOUIN, N. *et al.* The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, Katlenburg-Lindau, v. 4, n. 3, p. 723-757, 2011.
- BELTRAN-PENÑA, A.; ROSA, L.; D’ODORICO, P. Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 15, n. 9, [art.] 095004, 2020.
- BEN-ASHER, J.; GARCIA Y GARCIA, A.; HOOGENBOOM, G. Effect of high temperature on photosynthesis and transpiration of sweet corn (*Zea mays* L. var. rugosa). **Photosynthetica**, Dordrecht, v. 46, n. 4, p. 595-603, 2008.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, p. 243-249, 2006.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.
- BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n. 2, p. 273-302, 2018.
- BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 5, p. 423-432, 2005.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 7, p. 119-125, 1999.
- BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de *Penman*, evaporação do tanque “classe A” e radiação solar global. **Agnomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 251-259, 1986.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 95 p. (Boletim Técnico, n. 7).

- BERLATO, M. A.; SUTILI, V. R. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência-pendoamento e emergência-espigamento de três cultivares de milho (*Zea mays* L.). *In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO*, 11., 1976, Piracicaba, SP. **Anais [...]**. Piracicaba: Departamento de Genética da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1978. p. 523-527.
- BERNACCHI, C. J. *et al.* Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO<sub>2</sub>] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. **Plant Physiology**, Rockville, v. 143, n. 1, p. 134-144, 2007.
- BIRCH, C. J.; HAMMER, G. L.; RICKERT, K. J. Temperature and photoperiod sensitivity in five cultivars of maize (*Zea mays*) until tasseling initiation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 93-107, 1998.
- BISHOP, K. A. *et al.* Is there potential to adapt soybean (*Glycine max* Merr.) to future [CO<sub>2</sub>]? An analysis of the yield response of 18 genotypes in free-air CO<sub>2</sub> enrichment. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 38, n. 9, p. 1765-1774, 2015.
- BOJANIC, A. H. The rapid agricultural development of Brazil in the last 20 years. **Euro Choices**, Banbury, v. 16, n. 1, p. 5-10, 2017.
- BOOTE, K. J. Improving soybean cultivars for adaptation to climate change and climate variability. *In: YADAV, S. S. et al. (ed.). Crop adaptation to climate change*. Ames: Wiley, 2011. cap. 17, p. 370-395.
- BOOTE, K. J. *et al.* Elevated temperature and CO<sub>2</sub> impacts on pollination, reproductive growth, and yield of several globally important crops. **Journal of Agricultural Meteorology**, [Tokyo], v. 60, n. 5, p. 469-474, 2005.
- BOOTE, K. J. *et al.* Modeling sensitivity of grain yield to elevated temperature in the DSSAT crop models for peanut, soybean, dry bean, chickpea, sorghum, and millet. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 100, p. 99-109, 2018.
- BOOTE, K. J.; MÍNGUEZ, M. I.; SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of Faba bean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 743-756, 2002.
- BOOTE, K. J.; PICKERING, N. B.; ALLEN, L. H. Plant modeling: advances and gaps in our capability to project future crop growth and yield in response to global climate change. *In: ALLEN, L. H. et al. (ed.) Advances in carbon dioxide effects research*. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1997. p. 179-228.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. *In: PEART, R. M.; CURRY, R. B. (ed.) Agricultural systems modeling and simulation*. New York: Marcel Dekker, 1998. p. 651-692.
- BOULANGER, J. P.; MARTINEZ, F.; SEGURA, E. C. Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 1: temperature mean state and seasonal cycle in South America. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 27, p. 233-259, 2006.

BOULANGER, J. P.; MARTINEZ, F.; SEGURA, E. C. Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 2: precipitation mean state and seasonal cycle in South America. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 28, p. 255–271, 2007.

BOWES, G. Growth at elevated CO<sub>2</sub>: photosynthetic responses mediated through Rubisco. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 14, n. 8, p. 795-806, 1991.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SPA/MAPA N° 188, de 23 de maio de 2022. Aprova o Zoneamento Agrícola de Risco Climático – ZARC para a cultura do milho 1ª safra no estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2022/2023. **Diário Oficial da União: Seção 1**, Brasília, DF, 25 maio 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/safra-vigente/rio-grande-do-sul/word/PORTN188MILHO1SAFRARS.retifica.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

BRUMATTI, L. M.; PIRES, G. F.; SANTOS, A. B. Challenges to the adaptation of double cropping agricultural systems in Brazil under changes in climate and land cover. **Atmosphere**, Basel, v. 11, n. 12, [art.] 1310, [1–15], 2020.

BUBANS, V. E. *et al.* Relative maturity group and its relationships with the non preferential sowing season of soybean. **Agronomy Science and Biotechnology**, Londrina, v. 7, p. 1-14, 2021.

BUNCE, J. A. Limitations to soybean photosynthesis at elevated carbon dioxide in free-air enrichment and open top chamber systems. **Plant Science**, Clare, v. 226, p. 131-135, 2014.

BUNCE, J. A. Response of respiration of soybean leaves grown at ambient and elevated carbon dioxide concentrations to day-to-day variation in light and temperature under field conditions. **Annals of Botany**, Oxford, v. 95, n. 6, p. 1059-1066, 2005.

BUNCE, J. A. Responses of soybeans and wheat to elevated CO<sub>2</sub> in free-air and open top chamber systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 186, p. 78-85, 2016.

BUNCE, J. A. Use of the response of photosynthesis to oxygen to estimate mesophyll conductance to carbon dioxide in water-stressed soybean leaves. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 32, n. 7, p. 875-881, 2009.

BURROUGHS, C. H. *et al.* Reductions in leaf area index, pod production, seed size, and harvest index drive yield loss to high temperatures in soybean. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 74, n. 5, p. 1629-1641, 2023.

CAIRNS, J. E. *et al.* Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. **Food Security**, Dordrecht, v. 5, p. 345-360, 2013.

CALEGARI, A. *et al.* Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 4, p. 1013-1019, 2008.

CÂMARA, G. M. S. *et al.* Influence of photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 149-154, 1997.

CAMILO, J. A. *et al.* Impact of climate change on maize grown in the Brazilian cerrado. *In*: ASABE 2018 ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2018, St. Joseph. **Proceedings of the [...]**. St. Joseph: ASABE, 2018. [Abstract 1800967].

CAMPBELL, W. J.; ALLEN, L. H.; BOWES, G. Effects of CO<sub>2</sub> concentration on rubisco activity, amount, and photosynthesis in soybean leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 88, n. 4, p. 1310-1316, 1988.

CANTARERO, M.; CIRILO, A.; ANDRADE, F. Night temperature at silking affects set in maize. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 3, p. 703–710, 1999.

CAPRISTO, P. R.; RIZZALLI, R. H.; ANDRADE, F. H. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 4, p. 1111-1118, 2007.

CARIDE, C.; PIÑEIRO, G.; PARUELO, J. M. How does agricultural management modify ecosystem services in the argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 154, p. 23-33, 2012.

CAVALCANTI, I. F.; CAMILLONI, I.; AMBRIZZI, T. Escenarios climáticos regionales. *In*: BARROS, V.; CLARKE, R.; DIAS, P. S. (ed.). **El cambio climático en la Cuenca del Plata**. Buenos Aires: CONICET, 2006.

CERA, J. C. *et al.* Soybean yield in future climate scenarios for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 52, n. 6, p. 380–392, 2017.

CHEIKH, N. C.; JONES, R. J. Disruption of kernel growth and development by heat stress: role of cytokinin/ABA balance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 106, p. 45–51, 1994.

CHEN, Y.; DEL GENIO, A. D. Evaluation of tropical cloud regimes in observations and a general circulation model. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 32, p. 355-369, 2009.

CHISANGA, C. B. *et al.* Projecting maize yield under local-scale climate change scenarios using crop models: Sensitivity to sowing dates, cultivar, and nitrogen fertilizer rates. **Food and Energy Security**, Malden, v. 9, n. 4, [art.] e231, 2020.

CHISANGA, C. B.; PHIRI, E.; CHINENE, V. R. N. Evaluating APSIM-and-DSSAT-CERES-Maize models under rainfed conditions using zambian rainfed maize cultivars. **Nitrogen**, Basel, v. 2, n. 4, p. 392–414, 2021.

CHOI, D. H. *et al.* Phenology and seed yield performance of determinate soybean cultivars grown at elevated temperatures in a temperate region. **PLoS One**, San Francisco, v. 11, n. 11, [art.] e0165977, 2016.

CHOU, S. C. *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5

downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, Irvine, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014a.

CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, Irvine, v. 3, n. 5, p. 438, 2014b.

CICCHINO, M. *et al.* Heat stress in field-grown maize: Response of physiological determinants of grain yield. **Crop Science**, Madison, v. 50, p. 1438–1448, 2010.

CLARKE, L. *et al.* **Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations**: sub - report 2.1A of synthesis and assessment product 2.1 by the U.S. climate change science program and the subcommittee on global change research. Washington, DC.: Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, 2007. 154 p.

COMMURI, P. D.; JONES, R. J. High temperatures during endosperm cell division in maize: a genotypic comparison under in vitro and field conditions. **Crop Science**, Madison, v. 41, n. 4, p. 1122-1130, 2001.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Séries Históricas. **Milho total (1º, 2º e 3º safras)**. Brasília, DF: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/910-Milho>. Acesso em: 25 jan. 2023.

CRAFTS-BRANDER, S. J.; SALVUCCI, M. E. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. **Plant Physiology**, Rockville, v. 129, p. 1773– 1780, 2002.

CRAFTS-BRANDNER, S. J.; LAW, R. D. Effect of heat stress on the inhibition and the recovery of the ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation state. **Planta**, Basel, v. 212, p. 67–74, 2000.

CURTIS, P. G. *et al.* Classifying drivers of global forest loss. **Science**, Washington, DC, v. 361, n. 6407, p. 1108-1111, 2018.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. **Nature Climate Change**, London, v. 3, n. 1, p. 52-58, 2013.

DAWSON, T. P.; PERRYMAN, A. H.; OSBORNE, T. M. Modelling impacts of climate change on global food security. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 134, n. 3, p. 429–440, 2016.

DE VILLA, B. *et al.* Effects of minimum and maximum limits of solar radiation and its temporal and geographic interactions. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 14, n. 8, p. 173-178, 2022.

DENMEAD, O. T.; SHAW, R. H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, p. 272–274, 1960.

DERYNG, D. *et al.* Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 9, n. 3, [art.] 034011, 2014.



- DI FENZA, M. *et al.* Transcriptomic response of maize primary roots to low temperatures at seedling emergence. **PeerJ**, Corte Madera, v. 5, [art.] e2839, 2017.
- DI MAURO, G. *et al.* Exploring soybean management options for environments with contrasting water availability. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 205, n. 3, p. 274-282, 2019.
- DI PAOLA, A.; VALENTINI, R.; SANTINI, M. An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 96, n. 3, p. 709–714, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7359>. Acesso em: dia mes ano.
- DIAS, L. C. *et al.* Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, Oxford, v. 22, n. 8, p. 2887-2903, 2016.
- DJANAGUIRAMAN, M. *et al.* Soybean pollen anatomy, viability and pod set under high temperature stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 199, n. 3, p. 171-177, 2013.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, T. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Rome: FAO, 1975. 194 p. (Riego y Drenaje, n. 24).
- DOURADO-NETO, D. *et al.* Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 46–50, 1998.
- DRAG, D. W. *et al.* Soybean photosynthetic and biomass responses to carbon dioxide concentrations ranging from pre-industrial to the distant future. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 71, n. 12, p. 3690-3700, 2020.
- DU, Y. *et al.* Effect of drought stress at reproductive stages on growth and nitrogen metabolism in soybean. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 2, [art.] 302, 2020.
- DUBREUIL, V. *et al.* Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, New York, v. 39, p. 1446–1456, 2019.
- DUPUIS, I.; DUMAS, C. Influence of temperature stress on in vitro fertilization and heat shock protein synthesis in maize (*Zea mays* L.) reproductive tissues. **Plant Physiology**, Rockville, v. 94, n. 2, p. 665-670, 1990.
- ECK, H. V.; MATHERS, A. C.; MUSICK, J. T. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 17, n. 1, p. 1-16, 1987.
- ENGINEER, C. B. *et al.* CO<sub>2</sub> sensing and CO<sub>2</sub> regulation of stomatal conductance: advances and open questions. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 2, p. 16–30, 2016.

ERGO, V. V. *et al.* Heat and water stressed field-grown soybean: a multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 148, p. 1-11, 2018.

EULENSTEIN, F. *et al.* Regionalization of maize responses to climate change scenarios, N use efficiency and adaptation strategies. **Horticulturae**, Basel, v. 3, n. 1, [art.] 9, 2017.

FANCELLI, A. L. **Influência do desfolhamento no desempenho de plantas e de sementes de milho (*Zea mays* L.)**. 1988. 172 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento de Agricultura, 1997. 174 p.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja. 2007. 9 p. (Circular Técnica, 48).

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009. cap. 15, p. 261-278.

FELEKE, H. G.; SAVAGE, M. J.; TESFAYE, K. Calibration and validation of APSIM–Maize, DSSAT CERES–Maize and AquaCrop models for Ethiopian tropical environments. **South African Journal of Plant and Soil**, Pretoria, v. 38, n. 1, p. 36–51, 2021.

FERNANDES, E. *et al.* **Climate change and agriculture in Latin America, 2020-2050**: projected impacts and response to adaptation strategies. Washington, DC: World Bank, 2012.

FERREIRA, A. O. *et al.* Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 65-74, 2013.

FERREIRA, A. S. *et al.* Minimum optimal seeding rate for indeterminate soybean cultivars grows in the tropics. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 2092–2102, 2020.

FERREIRA, D. B.; RAO, V. B. Recent climate variability and its impacts on soybean yields in Southern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 105, p. 83–97, 2011.

FERREIRA, N. C. R.; MIRANDA, H. J. Projected changes in corn crop productivity and profitability in Parana, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 23, p. 3236–3250, 2020.

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados – MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 666-672, 2008.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. 4. ed. Passo Fundo: UPF, 2008. 749 p.

FOLLMANN, D. N. *et al.* Linear relations among traits in off-season soybean. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 40, n. 1, p. 213-221, 2017.

FONTANA, D. C. Determinação da evapotranspiração. *In*: BERGAMASCHI, H. (coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1992. p. 48-61.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food outlook - biannual report on global food markets**. Rome: FAO, 2019.

FRACHEBOUD, Y. *et al.* Chlorophyll fluorescence as a selection tool for cold tolerance of photosynthesis in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, n. 338, p. 1533-1540, 1999.

FRANCHINI, J. C. *et al.* Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.

FRANK, S. *et al.* Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 12, n. 10, [art.] 105004, 2017.

FRIERO, I. *et al.* Transcriptomic and hormonal analysis of the roots of maize seedlings grown hydroponically at low temperature. **Plant Science**, Clare, v. 326, [art.] 111525, 2023.

FU, T.; HA, B.; KO, J. Simulation of CO<sub>2</sub> enrichment and climate change impacts on soybean production. **International Agrophysics**, Lublin, v. 30, n. 1, p. 25-37, 2016.

GALON, L. *et al.* Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha (MA), v. 4, n. 3, 18-38, 2010.

GASS, T. *et al.* Cold tolerance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) during the reproductive phase. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 5, n. 1/2, p. 71-88, 1996

GE, T. *et al.* Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 34, p. 1043-1053, 2012.

GIBBS, H. K. *et al.* Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 107, n. 38, p. 16732-16737, 2010.

GIBSON, L. R.; MULLEN, R. E. Influence of day and night temperature on soybean seed yield. **Crop Science**, Madison, v. 36, n. 1, p. 98-104, 1996.

GIMÉNEZ, V. D.; MICHELOUD, J. R.; MADDONNI, G. Á. Climatic constraints for the maize-soybean system in the humid subtropical region of Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 134, p. 753-767, 2018.

GODFRAY, H. C. J. *et al.* Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, Washington, DC, v. 327, n. 5967, p. 812-818, 2010.

GONG, C. *et al.* A review of adaptable variations and evolution of photosynthetic carbon assimilating pathway in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants. **Journal of Plant Ecology**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 206-221, 2009.

GRIFFIN, J. J.; RANNEY, T. G.; PHARR, D. M. Heat and drought influence photosynthesis and water relations, and soluble carbohydrates of two ecotypes of redbud (*Cercis canadensis*). **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, VA, v. 129, p. 497–502, 2004.

GRIMM, A.; NATORI, A. Climate change and interannual variability of precipitation in South America. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 33, n. 19, [art.] 19706, 2006.

GROTE, U. *et al.* Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 4, [art.] 617009, 2021.

GUMMADI, S. *et al.* Simulating adaptation strategies to offset potential impacts of climate variability and change on maize yields in Embu Country, Kenya. **PLoS One**, San Francisco, v. 15, n. 11, [art.] e0241147, 2020. Disponível em:

HAFEEZ, Y. *et al.* Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) Merr. under drought stress. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 49, p. 7–13, 2017.

HAMILTON, E.W. *et al.* Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and growth temperature on the tolerance of photosynthesis to acute heat stress in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> species. **Journal of Integrative Plant Biology**, Carlton South, v. 50, p. 1375-1387, 2008.

HAMPF, A. C. *et al.* Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. **Agricultural Systems**, Barking, v. 177, [art.] 102707, 2020.

HAN, Y. *et al.* Effects of regulated deficit irrigation and elevated CO<sub>2</sub> concentration on the photosynthetic parameters and stomatal morphology of two maize cultivars. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 42, p. 2884–2892, 2022.

HAO, X. *et al.* Effects of open-air elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on yield quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 80-84, 2014.

HASEGAWA, T. *et al.* Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature Climate Change**, London, v. 8, n. 8, p. 699–703, 2018.

HATFIELD, J. L. *et al.* Climate impacts on agriculture: implications for crop production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 351-370, 2011.

HATFIELD, J. L. Increased temperatures have dramatic effects on growth and grain yield of three maize hybrids. **Agricultural & Environmental Letters**, Hoboken, v. 1, n. 1, [art.] 150006, 2016.

HATFIELD, Jerry L.; DOLD, Christian. Climate change impacts on corn phenology and productivity. *In*: AMANULLAH; FAHAD, S. (ed.). **Corn: production and human health in changing climate**. London: IntechOpen, 2018. v. 95.

HAWKESFORD, M. J. *et al.* Prospects of doubling global wheat yields. **Food and Energy Security**, Malden, v. 2, n. 1, p. 34-48, 2013.

HAWKINS, E. *et al.* Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s. **Global Change Biology**, Oxford, v. 19, n. 3, p. 937-947, 2013.

HE, H. *et al.* Regional gap in maize production, climate and resource utilization in China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 254, [art.] 107830, 2020.

HEINO, M. *et al.* Increased probability of hot and dry weather extremes during the growing season threatens global crop yields. **Scientific Reports**, London, v. 13, [art.] 3583, 2023.

HERRERO, Maria Pilar; JOHNSON, R. R. High temperature stress and pollen viability of maize. **Crop science**, Madison, v. 20, n. 6, p. 796-800, 1980.

HESKETH, J. D.; MYHRE, D. L.; WILLEY, C. R. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 13, p. 250–254, 1973.

HOLZKÄMPER, A. Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 237, [art.] 106202, 2020.

HOSSAIN, Z.; KHATOON, A.; KOMATSU, S. Soybean proteomics for unraveling abiotic stress response mechanism. **Journal of Proteome Research**, Washington, DC, v. 12, n. 11, p. 4670-4684, 2013.

HU, X. *et al.* Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. **Anthropocene**, Oxford, v. 34, [art.] 100291, 2021.

HULME, M.; SHEARD, N. **Climate change scenarios for Brazil**. Norwich: Climatic Research Unit, 1999.

HUME, D. J.; JACKSON, A. K. H. Pod formation in soybean at low temperatures. **Crop Science**, Madison, v. 21, p. 933-937, 1981.

IIZUMI, T. *et al.* Crop production losses associated with anthropic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. **International Journal of Climatology**, New York, v. 38, n. 14, p. 5405–5417, 2018.

JAIN, M. *et al.* Water deficit stress effects and responses in maize. *In*: HASANUZZAMAN, M. *et al.* (ed.). **Plant abiotic stress tolerance: agronomic, molecular and biotechnological approaches**. Cham: Springer, 2019. p. 129-151.

JIANG, R. *et al.* Modelling adaptation strategies to reduce adverse impacts of climate change on maize cropping system in Northeast China. **Scientific Reports**, London, v. 11, n. 1, [art.] 810, 2021.

- JIN, K. *et al.* Strategies for manipulating Rubisco and creating photorespiratory bypass to boost C3 photosynthesis: Prospects on modern crop improvement. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 46, n. 2, p. 363-378, 2023.
- JIN, Z. *et al.* drought and diminishing benefits of elevated carbon dioxide for soybean yields across the US Midwest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 24, n. 2, p. e522–e533, 2018.
- JONES, J. W. *et al.* Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, Barking, v. 155, p. 240-254, 2017.
- JONES, J. W. *et al.* The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235–265, 2003.
- JONES, R. J.; QUATTAR, S.; CROOKSTON, R. K. Thermal environment during endosperm cell division and grain filling in maize: effects on kernel growth and development *in vitro*. **Crop Science**, Madison, v. 24, n. 1, p. 133-137, 1984.
- JUMRANI, K.; BHATIA, V. S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, New Delhi, v. 25, n. 3, p. 667-681, 2019.
- JUSTINO, F. *et al.* Mean and interannual variability of maize and soybean in Brazil under global warming conditions. **American Journal of Climate Change**, Irvine, v. 2, n. 4, p. 237–253, 2013.
- KANTOLIC, A. G.; SLAFER, G. A. Development and seed number in indeterminate soybean as affected by timing and duration of exposure to long photoperiods after flowering. **Annals of Botany**, London, v. 99, n. 5, p. 925–933, 2007.
- KAUSHAL, N. *et al.* Food crops face rising temperatures: an overview of responses, adaptive mechanisms, and approaches to improve heat tolerance. **Cogent Food & Agriculture**, Abingdon, v. 2, [art.] 1134380, 2016.
- KAZMI, D. H. *et al.* Statistical downscaling and future scenario generation of temperatures for Pakistan Region. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 120, n. 1/2, p. 341–350, 2015.
- KELLNER, J. *et al.* Response of maize biomass and soil water fluxes on elevated CO2 and drought—From field experiments to process-based simulations. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, n. 9, p. 2947-2957, 2019.
- KETTLER, B. A. *et al.* High night temperature during maize post-flowering increases night respiration and reduces photosynthesis, growth and kernel number. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 208, n. 3, p. 335-347, 2022.
- KHORDADI, M. J. *et al.* Climate change impacts and adaptation for crop management of winter wheat and maize in the semi-arid region of Iran. **Irrigation and Drainage**, Chichester, v. 68, n. 5, p. 841-856, 2019.

KIMBALL, B. A. Crop responses to elevated CO<sub>2</sub> and interactions with H<sub>2</sub>O, N, and temperature. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 31, p. 36-43, 2016.

KINIRY, J. R. Maize physics development. *In*: HANKS, J.; RITCHIE, J.T. (ed.). **Modeling plant and soil systems**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1991. (Agronomy Monographs, 31). p. 55-71.

KOGO, B. K. *et al.* Modelling impacts of climate change on maize (*Zea Mays*, L.) growth and productivity: a review of models, outputs and limitations. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, Irvine, v. 7, n. 8, p. 76–95, 2019.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimate. *In*: KÖPPEN, W.; R. GEIGER, R. (ed.). **Handbuch der klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936. v. 1, pt C, p. 1–44.

KÖPPEN, Wladimir. Versuch einer klassifikation der klimate, vorzugsweise nach ihren beziehungen zur pflanzenwelt. **Geographische Zeitschrift**, Wiesbaden, v. 6, n. 11. H, p. 593-611, 1900.

KOŚCIELNIAK, J.; JANOWIAK, F.; KURCZYCH, Z. Increase in photosynthesis of maize hybrids (*Zea mays* L.) at suboptimal temperature (15° C) by selection of parental lines on the basis of chlorophyll a fluorescence measurements. **Photosynthetica**, Dordrecht, v. 43, n. 1, p. 125-134, 2005.

KOTECKI, A.; LEWANDOWSKA, S. **Studia nad Uprawą soi Zwyczajnej (*Glycine max* (L.) Merrill) w Południowo-Zachodniej Polsce**. Wrocław: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, 2020. 226 p.

KRONENBERG, L. *et al.* Rethinking temperature effects on leaf growth, gene expression and metabolism: diel variation matters. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 44, p. 2262–2276, 2020.

LANA, M. A. *et al.* Regionalization of climate scenarios impacts on maize production and the role of cultivar and planting date as an adaptation strategy. **Regional Environmental Change**, Berlin, v. 16, n. 5, p. 1319–1331, 2016.

LEAKEY, A. D. *et al.* Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> crops. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 70, p. 781-808, 2019.

LEMICHHANE, J. R. *et al.* Analysis of soybean germination, emergence, and prediction of a possible northward establishment of the crop under climate change. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 113, [art.] 125972, 2020.

LENG, G.; HALL, J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 654, p. 811–821, 2019.

LENNARD, C. J. *et al.* On the need for regional climate information over Africa under varying levels of global warming. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 13, n. 6, [art.] 060401, 2018.

- LI, D. *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 129, p. 105-112, 2013.
- LI, W.; FU, R.; DICKINSON, R. E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 111, [art.] D02111, 2006.
- LI, X. *et al.* Deficit irrigation provokes more pronounced responses of maize photosynthesis and water productivity to elevated CO<sub>2</sub>. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 195, p. 71-83, 2018.
- LIN, T. *et al.* The influence of high night temperature on yield and physiological attributes of Soybean cv. Fukuyutaka. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 24, n. 3, p. 267-278, 2021.
- LIN, X. *et al.* Molecular mechanisms for the photoperiodic regulation of flowering in soybean. **Journal of Integrative Plant Biology**, Carlton South, v. 63, p. 981–994, 2020.
- LIN, Y.; WU, W.; GE, Q. CERES-Maize model-based simulation of climate change impacts on maize yields and potential adaptive measures in Heilongjiang Province, China. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 95, n. 14, p. 2838–2849, 2015.
- LIU, G. Z. *et al.* Reducing maize yield gap by matching plant density and solar radiation. **Journal of Integrative Agriculture**, Hoboken, v. 20(2), p. 363-370, 2021.
- LIU, L.; BASSO, B. Impacts of climate variability and adaptation strategies on crop yields and soil organic carbon in the US Midwest. **PLOS One**, San Francisco, v. 15, n. 1, [art.] e0225433, 2020.
- LIU, L. *et al.* Effects of CO<sub>2</sub> concentration and temperature on leaf photosynthesis and water use efficiency in maize. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, Beijing, v. 36, n. 5, p. 122-129, 2020a.
- LIU, M. *et al.* Responses of crop growth and water productivity to climate change and agricultural water-saving in arid region. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 703, [art.] 134621, 2020b.
- LIU, Y. *et al.* Impacts of 1.5 and 2.0°C global warming on rice production across China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 284, [art.] 107900, 2020c.
- LIZASO, J. I. *et al.* Impact of high temperatures in maize: phenology and yield components. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 216, p. 129-140, 2018.
- LOBELL, D. B. *et al.* Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. **Nature Climate Change**, London, v. 1, n. 1, p. 42-45, 2011.
- LOBELL, D. B.; ASSENG, S. Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 12, n. 1, [art.] 015001, 2017.



LOBELL, D. B.; BURKE, M. B. (ed.). **Climate change and food security: adapting agriculture to a warmer world**. Dordrecht: Springer, 2009.

LOBELL, D. B.; BURKE, M. B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 1443–1452, 2010.

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

LOBOGUERRERO, A. M. *et al.* Food and earth systems: priorities for climate change adaptation and mitigation for agriculture and food systems. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 5, [art.] 1372, 2019.

LUO, Q. Temperature thresholds and crop production: a review. **Climate Change**, Dordrecht, v. 109, p. 583–598, 2011.

MA, Y.; TAN, R.; ZHAO, J. Chilling tolerance in maize: insights into advances—Toward physio-biochemical responses' and QTL/genes' identification. **Plants**, Basel, v. 11, n. 16, [art.] 2082, 2022.

MA, Y.; WU, Y.; SONG, X. Seasonal responses of maize growth and water use to elevated CO<sub>2</sub> based on a coupled device with climate chamber and weighing lysimeters. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 741, [art.] 140344, 2020.

MAGRIN, G. O. *et al.* Central and South America. *In*: BARROS, V. R. *et al.* (ed.). **Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability**. Part B: regional aspects: contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 1499-1566.

MAKOWSKI, D. *et al.* Quantitative synthesis of temperature, CO<sub>2</sub>, rainfall, and adaptation effects on global crop yields. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 115, [art.] 126041, 2020.

MALHI, Y.; MEIR, P.; BROWN, S. Forests, carbon and global climate. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 360, n. 1797, p. 1567-1591, 2002.

MAO, T. *et al.* Association mapping of loci controlling genetic and environmental interaction of soybean flowering time under various photo-thermal conditions. **BMC Genomics**, London, v. 18, [art.] 415, 2017.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 35, p. 1073–1097, 2010.

MARENGO, J. A. Future change of climate in South America in the late 21st century: the CREAS Project. **Atmospheric Sciences. Section of AGU Newsletter**, [s. l.], v. 3, n. 2, [art.] 5, 2009.

- MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 232–239, 2013.
- MARKELZ, R. J. C.; STRELLNER, R. S.; LEAKEY, A. D. B. Impairment of C4 photosynthesis by drought is exacerbated by limiting nitrogen and ameliorated by elevated [CO<sub>2</sub>] in maize. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 9, p. 3235–3246, 2011.
- MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 216, p. 339–350, 2019.
- MASSIGOGE, I. *et al.* Exploring avenues for agricultural intensification: a case study for maize-soybean in the Southern US region. **Agricultural Systems**, Barking, v. 204, [art.] 103539, 2023.
- MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (ed.). **Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. [Geneva]: IPCC, 2021.
- MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (ed.). **Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. [Geneva]: IPCC, 2018.
- MATHEW, J. P. *et al.* Differential response of soybean yield components to the timing of light enrichment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 1156–1161, 2000.
- MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n. 2, p. 331-341, 2017.
- MEAD, R.; WILLEY, R. The concept of a ‘land equivalent ratio’ and advantages in yields from intercropping. **Experimental agriculture**, Cambridge, v. 16, n. 3, p. 217-228, 1980.
- MEEHL, G. *et al.* The WCRP CMIP3 Multi-model data set: a new era in climate change research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 88, p. 1383–1394, 2007.
- MEIRA, C. *et al.* Morphological traits and yield components of second-crop soybeans in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Faisalabad, v. 19, p. 81-88, 2016.
- MENG, F. C. *et al.* Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and irrigation on photosynthetic parameters and yield of maize in Northeast China. **PloS One**, San Francisco, v. 9, n. 8, [art.] e105898, 2014.

- MESSINA, C. D. *et al.* Radiation use efficiency increased over a century of maize (*Zea mays* L.) breeding in the US corn belt. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 73, n. 16, p. 5503-5513, 2022.
- MINUZZI, R. B.; FREDERICO, C. A.; SILVA, T. G. F. Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for Southern Brazil. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 64, n. 6, p. 567–573, 2017.
- MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Agronomic performance of maize in different climatic scenarios in the Central West of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 8, p. 734–740, 2015.
- MOLOTOKS, A.; SMITH, P.; DAWSON, T. P. Impacts of land use, population, and climate change on global food security. **Food and Energy Security**, Malden, v. 10, n. 1, [art.] e261, 2020.
- MONTEIRO, A. F. M. *et al.* Climate change impacts on evapotranspiration in Brazil: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, [p. 1-16], 17 Jan. 2022.
- MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 695-697, 1996.
- MONZÓN, J. P. *et al.* Maize–soybean intensification alternatives for the Pampas. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 162, p. 48-59, 2014.
- MOURTZINIS, S.; ORTIZ, B. V.; DAMIANIDIS, D. Climate change and ENSO effects on Southeastern US climate patterns and maize yield. **Scientific Reports**, London, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016.
- MURRAY-TORTAROLO, G. N.; JARAMILLO, V. J.; LARSEN, J. Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 253, p. 124-131, 2018.
- NABIZADEH, E.; BANIFAZEL, M.; TAHERIFARD, E. The effects of plant growth promoting on some of traits in maize (cv. S.C.704) under drought stress condition. **European Journal of Experimental Biology**. London, v. 2, n. 4, p. 875–881, 2012.
- NAKAGAWA, A. C. S. *et al.* High temperature during soybean seed development differentially alters lipid and protein metabolism. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 23, n. 4, p. 504–512, 2020.
- NEIFF, N. *et al.* High temperatures around flowering in maize: effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. **Crop Science**, Madison, v. 56, n. 5, p. 2702–2712, 2016.
- NEUPANE, D. *et al.* Does climate change affect the yield of the top three cereals and food security in the world? **Earth**, Basel, v. 3, n. 1, p. 45-71, 2022.
- NOVELLI, L. E.; CAVIGLIA, O. P.; MELCHIORI, R. J. M. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 167, p. 254-260, 2011.

- NOVELLI, L. E.; CAVIGLIA, O. P.; PIÑEIRO, G. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 128-136, 2017.
- OLESEN, J. E. *et al.* Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 34, p. 96–112, 2011.
- OLIVEIRA, L. A.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R. A. C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 201, p. 199–206, 2018.
- OSBORNE, T. M.; WHEELER, T. R. Evidence for a climate signal in trends of global crop yield variability over the past 50 years. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 8, [art.] 024001, 2013.
- PACHAURI, R. K. *et al.* (ed.). **Climate change 2014: synthesis report: contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
- PAN, D. **Soybean responses to elevated temperature and doubled CO<sub>2</sub>**. 1996. Thesis (Doctoral) – University of Florida, Gainesville, 1996.
- PARENT, B. *et al.* Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 115, n. 42, p. 10642-10647, 2018.
- PARENT, B.; TARDIEU, F. Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. **New Phytologist**, Oxford, v. 194, p. 760–774, 2012.
- PARKES, B.; SULTAN, B.; CIAIS, P. The impact of future climate change and potential adaptation methods on Maize yields in West Africa. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 151, n. 2, p. 205–217, 2018.
- PARRY, M. A. J. *et al.* Prospects for increasing photosynthesis by overcoming the limitations of Rubisco. **The Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 145, n. 1, p. 31-43, 2007.
- PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. Comparative ecophysiology of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1984.
- PELTONEN-SAINIO, Pirjo *et al.* Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. **Agricultural and Food Science**, Jokioinen, v. 18, n. 3/4, p. 171-190, 2009.
- PENDRILL, F. *et al.* Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 56, p. 1-10, 2019.
- PHALAN, B. *et al.* How can higher-yield farming help to spare nature? **Science**, Washington, DC, v. 351, n. 6272, p. 450-451, 2016.

- PHALAN, B. *et al.* Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. **Science**, Washington, DC, v. 333, n. 6047, p. 1289-1291, 2011.
- PILAU, F. G. *et al.* Impact of ENSO-related rainfall variability on soybean yield in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 30, [art.] e027115, 2022.
- PIRES, G. F. *et al.* Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 228/229, p. 286-298, 2016.
- PULLIN, A. S.; STEWART, G. B. Guidelines for systematic review in conservation and environmental management. **Conservation Biology**, Malden, v. 20, n. 6, p. 1647-1656, 2006.
- PUTEH, A. *et al.* Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seed yield response to high temperature stress during reproductive growth stages. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 7, n. 10, p. 1472–1479, 2013.
- QIAN, B. *et al.* Climate change impacts on Canadian yields of spring wheat, canola and maize for global warming levels of 1.5 °C, 2.0 °C, 2.5 °C and 3.0 °C. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 14, n. 7, [art.] 074005, 2019.
- QIAO, Y. *et al.* Elevated CO<sub>2</sub> and temperature increase grain oil concentration but their impacts on grain yield differ between soybean and maize grown in a temperate region. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 666, p. 405-413, 2019.
- QU, M. N.; BUNCE, J. A.; SHI, Z. S. Does elevated CO<sub>2</sub> protect photosynthesis from damage by high temperature via modifying leaf water status in maize seedlings? **Photosynthetica**, Dordrecht, v. 52, n. 2, p. 211-216, 2014.
- QU, Y.; MUELLER-CAJAR, O.; YAMORI, W. Improving plant heat tolerance through modification of Rubisco activase in C<sub>3</sub> plants to secure crop yield and food security in a future warming world. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 74, n. 2, p. 591-599, 2023.
- RADIN, B. *et al.* Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento de plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 9, n. 1-2, p. 7-16, 2003.
- RAO, C. S.; RAO, P. J. Integrated assessment of climate change impacts on maize crop in North Coastal Region of Andhra Pradesh, India. *In*: RAO, P.; RAO, K.; KUBO, S. (ed.). **Proceedings of International Conference on Remote Sensing for Disaster Management**. Cham: Springer, 2019. (Springer Series in Geomechanics and Geoengineering). p. 699–705.
- RATTALINO EDREIRA, J. I. *et al.* Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 123, n. 2, p. 62-73, 2011.

RATTALINO EDREIRA, J. I.; OTEGUI, M. E. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 130, p. 87-98, 2012.

RAY, D. K. *et al.* Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, London, v. 6, n. 1, [art.] 5989, 2015.

REDDY, A. R.; RASINENI, G. K.; RAGHAVENDRA, A. S. The impact of global elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and plant productivity. **Current Science**, Bangalore, v. 99, n. 1, 46-57, 2010.

REICH, P. B. *et al.* Unexpected reversal of C 3 versus C 4 grass response to elevated CO<sub>2</sub> during a 20-year field experiment. **Science**, Washington, DC, v. 360, n. 6386, p. 317-320, 2018.

RENATO, Natalia dos Santos *et al.* Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 28, p. 382-388, 2013.

RIAHI, K. *et al.* 8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, n. 1, p. 33-57, 2011.

RIO, A. *et al.* Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, New York, v. 36, n. 11, p. 3664-3672, 2016.

ROBERTS, M. J. *et al.* Comparing and combining process-based crop models and statistical models with some implications for climate change. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 12, n. 9, [art.] 095010, 2017.

RODRIGUES, O. *et al.* Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, p. 431-437, 2001.

ROSENZWEIG, C. *et al.* The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 170, p. 166-182, 2013.

ROSSO, F. *et al.* Trends and decadal variability in air temperature over Southern Brazil. **American Journal of Environmental Engineering**, Rosemead, v. 5, p. 85-95, 2015.

ROWHANI, P. *et al.* Climate variability and crop production in Tanzania. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, p. 449-460, 2011.

RUIZ-VERA, U. M. *et al.* Canopy warming accelerates development in soybean and maize, offsetting the delay in soybean reproductive development by elevated CO<sub>2</sub> concentrations. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 41, n. 12, p. 2806-2820, 2018.

SADDIQUE, C. B. *et al.* Downscaling of CMIP5 models output by using statistical models in a data scarce mountain environment (Mangla Dam Watershed), Northern Pakistan. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, Berlin, v. 55, p. 719-735, 2019.

- SADDIQUE, Q. *et al.* Effects of elevated air temperature and CO<sub>2</sub> on maize production and water use efficiency under future climate change scenarios in Shaanxi Province, China. **Atmosphere**, Basel, v. 11, n. 8, [art.] 843, 2020.
- SADEGHIPOUR, O.; ABBASI, S. Soybean response to drought and seed inoculation. **World Applied Sciences Journal**, Faisalabad, v. 17, n. 1, p. 55-60, 2012.
- SAGE, R. F. Variation in the *k* cat of Rubisco in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants and some implications for photosynthetic performance at high and low temperature. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 53, n. 369, p. 609-620, 2002.
- SAGE, R. F.; KUBIEN, D. S. The temperature response of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> photosynthesis. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 30, n. 9, p. 1086-1106, 2007.
- SAH, R. P. *et al.* Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, Washington, DC, v. 10, n. 1, p. 1-15, 2020.
- SALEM, M. A. *et al.* Pollen-based screening of soybean genotypes for high temperature. **Crop Science**, Madison, v. 47, p. 219–231, 2007.
- SÁNCHEZ, B.; RASMUSSEN, A.; PORTER, J. R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. **Global Change Biology**, Oxford, v. 20, p. 408–417, 2014.
- SANTACHIARA, G.; LBORRÁS, L.; ROTUNDO, J. L. Physiological processes leading to similar yield in contrasting soybean maturity groups. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 158-167, 2017.
- SANTOS, D. J. *et al.* Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C. **Sustainability in Debate**, Brasília, DF, v. 11, n. 3, p. 74-90, dez. 2020.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p.
- SCHAUBERGER, B. *et al.* Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. **Nature Communications**, London, v. 8, [art.] 13931, 2017.
- SCHOPER, John B. *et al.* Plant factors controlling seed set in maize: the influence of silk, pollen, and ear-leaf water status and tassel heat treatment at pollination. **Plant Physiology**, Rockville, v. 83, n. 1, p. 121-125, 1987.
- SENTELHAS, P. C. *et al.* Clima e produtividade da soja: efeitos nas produtividades potencial, atingível e real clima e produtividade. **Boletim de Pesquisa**, Rondonópolis, p. 1-5, jan, 2015.
- SETIYONO, T. D. *et al.* Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, n. 2/3, p. 257–271, 2007.

SHARKEY, T. D. Evaluating the role of Rubisco regulation in photosynthesis of C3 plants. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, London, v. 323, n. 1216, p. 435-448, 1989.

SHARMA, R. K. *et al.* Impact of recent climate change on corn, rice, and wheat in southeastern USA. **Scientific Reports**, London, v. 12, n. 1, p. 16928, 2022.

SIEBERS, M. H. *et al.* Heat waves imposed during early pod development in soybean (*Glycine max*) cause significant yield loss despite a rapid recovery from oxidative stress. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, p. 3114–3125, 2015.

SIEBERS, M. H. *et al.* Simulated heat waves during maize reproductive stages alter reproductive growth but have no lasting effect when applied during vegetative stages. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 240, p. 162–170, 2017.

SIEBERT, S.; WEBBER, H.; REZAEI, E. E. Weather impacts on crop yields - Searching for simple answers to a complex problem. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 12, [art.] 081001, 2017.

SILVA, E. H. F. M. *et al.* Impact assessment of soybean yield and water productivity in Brazil due to climate change. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 129, [art.] 126329, 2021.

SILVA, Stefania D. **Calibração e avaliação do modelo csm ceres-maize para cultivares crioulas e melhoradas de milho**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SILVA, V. P. R. *et al.* Soybean yield in the Matopiba region under climate changes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 1, p. 8–14, 2020.

SIMA, M. W. *et al.* Field and model assessments of irrigated soybean responses to increased air temperature. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, n. 6, p. 4849–4860, 2020.

SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. A. G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 698-704, 1996.

SINGH, A. *et al.* Growth phase-specific evaporative demand and nighttime temperatures determine Maize (*Zea Mays* L.) yield deviations as revealed from a long-term field experiment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 308, [art.] 108543, 2021.

SIONIT, N.; STRAIN, B. R.; FLINT, E. P. Interaction of temperature and CO2 enrichment on soybean: photosynthesis and seed yield. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 67, n. 3, p. 629-636, 1987.

SISTI, C. P. *et al.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.



- SKANSI, M. *et al.* Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, New York, v. 100, p. 295–307, 2013.
- SOBA, D. *et al.* Effects of elevated [CO<sub>2</sub>] on photosynthesis and seed yield parameters in two soybean genotypes with contrasting water use efficiency. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 178, [art.] 104154, 2020.
- SONG, Q. *et al.* Decomposition analysis on soybean productivity increase under elevated CO<sub>2</sub> using 3-D canopy model reveals synergistic effects of CO<sub>2</sub> and light in photosynthesis. **Annals of Botany**, Oxford, v. 126, n. 4, p. 601-614, 2020.
- SONG, W. *et al.* Analyzing the effects of climate factors on soybean protein, oil contents, and composition by extensive and high-density sampling in China. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 64, n. 20, p. 4121-4130, 2016.
- SOUZA, P. I.; EGLI, D. B.; BRUENING, W. P. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 5, p. 807-812, 1997.
- SOUZA, T. T. *et al.* Longer crop cycle lengths could offset the negative effects of climate change on brazilian maize. **Bragantia**, v. 78, n. 4, p. 622–631, 2019.
- STANIAK, M. *et al.* Seeds quality and quantity of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars in response to cold stress. **Agronomy**, Basel, v. 11, [art.] 520, 2021.
- STEVENSON, J. R. *et al.* Green Revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 110, n. 21, p. 8363-8368, 2013.
- STÖCKLE, C. O.; KEMANIAN, A. R. Can crop models identify critical gaps in genetics, environment, and management interactions? **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, [art.] 737, 2020.
- STRASSBURG, B. B. N. *et al.* When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 28, p. 84-97, 2014.
- STUCH, B.; ALCAMO, J.; SCHALDACH, R. Projected climate change impacts on mean and year-to-year variability of yield of key smallholder crops in Sub-Saharan Africa. **Climate and Development**, London, v. 13, n. 3, p. 268-282, 2021.
- SULTAN, B.; GAETANI, M. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, [art.] 1262, 2016.
- SULTAN, B.; PARKES, B.; GAETANI, M. Direct and indirect effects of CO<sub>2</sub> increase on crop yield in West Africa. **International Journal of Climatology**, New York, v. 39, n. 4, p. 2400–2411, 2019.

- TACARINDUA, C. R. *et al.* The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 154, p. 74-81, 2013.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 93, n. 4. p. 485–498, 2012.
- TENORIO, F. M. *et al.* Co-ordination between primordium formation and leaf appearance in soybean (*Glycine max*) as influenced by temperature. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 210, p. 197–206, 2017.
- TERAMURA, A. H.; SULLIVAN, J. H.; ZISKA, L. H. Interaction of elevated ultraviolet-B radiation and CO<sub>2</sub> on productivity and photosynthetic characteristics in wheat, rice, and soybean. **Plant Physiology**, Rockville, v. 94, n. 2, p. 470-475, 1990.
- THOMAS, J. F.; RAPER, C. D. Effect of day and night temperature during floral induction on morphology of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 6, p. 893-898, 1978.
- THOMAS, J. F.; RAPER, C. D. Morphological response of soybeans as governed by photoperiod, temperature, and age at treatment. **Botanical Gazette**, Chicago, v. 138, n. 3, p. 321-328, 1977.
- THOMAS, J. M. G. **Impact of elevated temperature and carbon dioxide on development and composition of soybean seed**. 2001. Thesis (Doctoral) - University of Florida, Gainesville, 2001.
- THOMEY, M. L. *et al.* Yield response of field-grown soybean exposed to heat waves under current and elevated [CO<sub>2</sub>]. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, p. 4352–4368, 2019.
- THOMSON, A. M. *et al.* RCP 4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, n.1, p. 77–94, 2011.
- TILMAN, D. *et al.* Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. **Nature**, London, v. 546, n. 7656, p. 73-81, 2017.
- TILMAN, D. *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.
- TOVJANIN, M. *et al.* Modeling the impact of climate change on yield, water requirements, and water use efficiency of maize and soybean grown under moderate continental climate in the Pannonian lowland. **Időjárás**, Budapest, v. 123, n. 4, p. 409-576, 2019.
- TRAVASSO, M. I. *et al.* **Adaptation measures for maize and soybean in Southeastern South America**. Washington, DC: AIACC, 2006. (AIACC Working Papers, n. 28).
- TSIMBA, R. *et al.* The effect of planting date on maize grain yields and yield components. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 150, p. 135-144, 2013.

- ULLAH, A. *et al.* Assessing climate change impacts on pearl millet under arid and semi-arid environments using CSM-CERES-Millet model. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 26, n. 7, p. 6745–6757, 2019.
- VANAJA, M. *et al.* Elevated temperature and moisture deficit stress impact on phenology, physiology and yield responses of hybrid maize. **Journal of Agrometeorology**, Gujarat, v. 19, p. 295–300, 2017.
- VAZIRIMEHR, M. R. *et al.* Seed priming effect on the number of rows per ear, grain weight and economic yield corn in Sistan region. **International Journal of Biosciences**, [Dhaca], v.4, n. 4, p. 87–91, 2014.
- VERA, C. *et al.* Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 33, n. 13, [art.] L13707, 2006.
- VILLORIA, N. B.; BYERLEE, D.; STEVENSON, J. The effects of agricultural technological progress on deforestation: what do we really know? **Applied Economic Perspectives and Policy**, Hoboken, v. 36, n. 2, p. 211-237, 2014.
- VITAL, R. G. *et al.* Metabolic, physiological and anatomical responses of soybean plants under water deficit and high temperature condition. **Scientific Reports**, London, v. 12, n. 1, [art.] 16467, 2022.
- VOGEL, E. *et al.* The effects of climate extremes on global agricultural yields. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 14, n. 5, [art.] 054010, 2019.
- VU, J. C. V. *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 68-76, 1997.
- WALLACH, D. *et al.* **Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment**. London: Academic Press, 2018.
- WANG, F. *et al.* Effects of elevated temperature and [CO<sub>2</sub>] on growth and yield of maize under intercropping with peanut. **Acta Agronomica Sinica**, Amsterdam, v. 47, n. 11, p. 2220-2231, 2021.
- WANG, X. *et al.* Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments. **Nature Sustainability**, London, v. 3, n. 11, p. 908–916, 2020a.
- WANG, X. *et al.* Physiological response of soybean plants to water deficit. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, [art.] 809692, 2022.
- WANG, Y. *et al.* Reduction in seed set upon exposure to high night temperature during flowering in maize. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 169, n. 1, p. 73–82, 2020b.
- WANG, Y.; LIU, S.; SHI, H. Comparison of climate change impacts on the growth of C3 and C4 crops in China. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 74, [art.] 101968, 2023.

WATANABE, S.; HARADA, K.; ABE, J. Genetic and molecular bases of photoperiod responses of flowering in soybean. **Breeding Science**, Tokyo, v. 61, n. 5, p. 531-543, 2012.

WATSON, J. E. M. *et al.* The exceptional value of intact forest ecosystems. **Nature Ecology & Evolution**, London, v. 2, n. 4, p. 599–610, 2018.

WERNDL, C. On defining climate and climate change. **The British Journal for the Philosophy of Science**, Chicago, v. 67, n. 2, p. 337–364, 2016.

WHEELER, T.; VON BRAUN, J. Climate change impacts on global food security. **Science**, Washington, DC, v. 341, p. 508–513, 2013.

WHITE, J. W. *et al.* Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 3, p. 357-368, 2011.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. **Progress in Physical Geography**, London, v. 21, n. 4, p. 530-548, 1997.

WILD, M. *et al.* Evaluation of downward longwave radiation in general circulation models. **Journal of Climate**, Boston, v. 14, n. 15, p. 3227-3239, 2001.

WREGGE, M. S. *et al.* **Atlas climático da região sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012.

WRIGHT, A. L.; HONS, F. M. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 2, p. 507-513, 2004.

WU, J. *et al.* Effects of chilling stress on morphological, physiological, and biochemical attributes of silage corn genotypes during seedling establishment. **Plants**, Basel, v. 11, n. 9, [art.], 1217, 2022.

WU, T. *et al.* of the independent and interactive photo thermal effects on soybean flowering. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 4, p. 622–632, 2015.

XAVIER, A. *et al.* Stationary and non-stationary detection of extreme precipitation events and trends of average precipitation from 1980 to 2010 in the Paraná River basin, Brazil. **International Journal of Climatology**, New York, v. 40, p.1197–1212, 2020.

XU, M. *et al.* The soybean-specific maturity gene E1 family of floral repressors controls night-break responses through down-regulation of FLOWERING LOCUS T orthologs. **Plant Physiology**, Rockville, v. 168, p. 1735–1746, 2015.

XU, Q. *et al.* (2022). Insights into soybean with high photosynthetic efficiency. *In*: LAM, H-M. *et al.* (ed.). **Soybean physiology and genetics**. [Cham]: Elsevier, 2022. (Advances in Botanical Research Book Series). p. 121-151.

- YANG, B. *et al.* Effects of climate change on corn yields: spatiotemporal evidence from geographically and temporally weighted regression model. **International Journal of Geo-Information**, Basel, v. 11, n. 8, [art.] 433, 2022.
- YANG, L. *et al.* Effects of high night temperature on soybean yield and compositions. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, [art.] 1065604, 2023.
- YANG, W. Y. *et al.* Critical photoperiod measurement of soybean genotype in different maturity groups. **Cropping Science**, Madison, v. 59, n. 5, p. 2055–2061, 2019a.
- YANG, Y. *et al.* Maize grain yield by matching maize growth and solar radiation. **Scientific Reports**, London, v. 9, n. 1, [art.] 3635, 2019b.
- YANG, Y. *et al.* Solar radiation effects on dry matter accumulations and transfer in maize. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, [art.] 727134, 2021a.
- YANG, Y. S. *et al.* effect of solar radiation change on the maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 20, n. 2, p. 482-493, 2021b.
- YIN, L. *et al.* How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? **Climate Dynamics**, Berlin, v. 41, p. 3127-3143, 2013.
- YU, T. *et al.* A meta analysis of low temperature tolerance QTL in maize. **Electronic Journal of Biotechnology**, Valparaíso, v. 58, p. 82-91, 2022.
- ZANON, A. *et al.* Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 74, p. 279–290, 2015a.
- ZANON, A. *et al.* Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, Campinas, v. 74, p. 400–411, 2015b.
- ZANON, A.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.
- ZHANG, L. *et al.* Warming decreases photosynthates and yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] in the north China plain. **Crop Journal**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 139–146, 2016.
- ZHANG, L.; WANG, R.; HESKETH, J. D. Effects of photoperiod on growth and development of soybean floral bud in different maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 944–948, 2001.
- ZHANG, Y. *et al.* Negative effects of heat stress on maize yield were compensated by increasing thermal time and declining cold stress in northeast China. **International Journal of Biometeorology**, New York, v. 66, p. 2395–2403, 2022.

ZHAO, C. *et al.* Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, DC, v. 114, n. 35, p. 9326–9331, 2017.

ZHAO, J. *et al.* Increased utilization of lengthening growing season and warming temperatures by adjusting sowing dates and cultivar selection for spring maize in Northeast China. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 67, 12-19, 2015.

ZHOU, X. *et al.* Recent advances in the analysis of cold tolerance in maize. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, [art.] 866034, 2022.

ZHU, P. *et al.* Dissecting the nonlinear response of maize yield to high temperature stress with model-data integration. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, n. 7, p. 2470-2484, 2019.

ZIMMERMANN, A. *et al.* Climate change impacts on crop yields, land use and environment in response to crop sowing dates and thermal time requirements. **Agricultural Systems**, Baking, v. 157, p. 81-92, 2017.

ZISKA, L. H. The impact of elevated CO<sub>2</sub> on yield loss from a C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> weed in field-grown soybean. **Global Change Biology**, Oxford, v. 6, n. 8, p. 899-905, 2000.

ZOTARELLI, L. *et al.* Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 132, p. 185-195, 2012.