**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do milho no Brasil
com base em projeções de mudanças climáticas**

Tamires Teles de Souza

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Tamires Teles de Souza
Engenheira Agrônoma

**Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do milho no Brasil com
base em projeções de mudanças climáticas**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FÁBIO RICARDO MARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Souza, Tamires Teles de

Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do milho no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas / Tamires Teles de Souza. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2018.

90 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. *Ceres maize* 2. Produtividade 3. DSSAT I. Título

Aos meus queridos pais Ademir e Sirléia,
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos derramadas todos os dias da minha vida

A minha família, meus pais Ademir e Sirléia e minhas irmãs Laís e Priscilla, pelo incentivo e amor em todos os momentos.

Ao professor Fábio Ricardo Marin pela valiosa orientação, paciência e ensinamentos transmitidos, pelo exemplo de conduta profissional e pessoal e pela amizade.

Ao professor Felipe Gustavo Pilau pelos ensinamentos transmitidos e pela amizade

Aos professores das disciplinas cursadas durante a minha formação.

Ao Grupo de Experimentação e Pesquisa em Modelagem Agrícola-GEPEMA/AGRIMET, em especial a Vitor de Jesus Martins Bianchini pelo apoio na condução do experimento, pela amizade e troca de conhecimentos.

A Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, ao Departamento de Engenharia de Biossistemas e ao programa de pós graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade de realização do mestrado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento através do processo número 2016/06363-6.

A todas as amizades adquiridas e a todos que de alguma forma contribuíram para a execução e conclusão deste trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA A CULTURA DO MILHO	12
3.2. MILHO E OS ELEMENTOS CLIMÁTICOS	14
3.2.1. <i>Radiação solar e concentração de CO₂</i>	15
3.2.2. <i>Temperatura do ar</i>	17
3.2.3. <i>Água</i>	18
3.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADA EM PROCESSOS BIOFÍSICOS	18
3.4. MUDANÇAS CLIMÁTICAS	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	23
4.1.1. CLIMA	23
4.1.2. SOLO	24
4.2. INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	25
4.3. VARIÁVEIS DE PLANTA ANALISADAS	26
4.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DSSAT/CERES-MAIZE	27
4.5. CALIBRAÇÃO DO MODELO DSSAT/CERES-MAIZE	29
4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA	30
4.7. GERAÇÃO E SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS FUTUROS	30
4.8.1. SELEÇÃO DOS MODELOS DE CIRCULAÇÃO CLIMÁTICA GLOBAL (GCM's)	32
5. RESULTADOS	35
5.1. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DURANTE OS EXPERIMENTOS	35
5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA E CALIBRAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE	36
5.2.1. <i>Experimento de outono</i>	36
5.2.2. <i>Experimento de verão</i>	39
5.1. ANÁLISE DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS	42
5.1.1. PRIMEIRA SAFRA	42
5.1.2. SEGUNDA SAFRA	45
5.2. CENÁRIOS AGRÍCOLAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO	48
5.2.1. PRIMEIRA SAFRA	48
5.2.2. RISCO DE PRODUÇÃO PARA OS CENÁRIOS AGRÍCOLAS: MILHO DE PRIMEIRA SAFRA	53
5.2.3. SEGUNDA SAFRA	63
5.2.4. RISCO DE PRODUÇÃO PARA OS CENÁRIOS AGRÍCOLAS: MILHO DE SEGUNDA SAFRA	68
6. DISCUSSÃO	78
6.1. INCERTEZAS E LIMITAÇÕES	83
7. CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS	85

RESUMO

Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do milho com base em projeções de mudanças climáticas

O milho (*Zea mays*) é considerado como uma das culturas mais importantes cultivadas mundialmente devido a sua composição química, valor nutritivo e o seu potencial produtivo, apresentando assim, considerável relevância nos aspectos socioeconômicos. Diversos fatores interferem no desempenho da cultura e, dentre eles, o clima está entre aqueles que oferecem os maiores desafios para planejamento e manejo da cultura. Diante da importância da cultura no contexto nacional e mundial, é importante considerar as projeções futuras da produção do grão diante das mudanças climáticas e, conseqüentemente, na segurança alimentar nos próximos anos. Assim, avaliou-se neste estudo o impacto da mudança do clima sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura do milho, utilizando um modelo de crescimento de plantas, baseado em processos biofísicos. Para a calibração do modelo foram utilizados dados obtidos experimentalmente e a simulação de cenários de mudanças climáticas foi realizada de acordo com a abordagem do programa AgMIP. Trabalhou-se com o modelo CERES-MAIZE/DSSAT, e três modelos de circulação climática global (GCM's) regionalizados e dois cenários econômicos (ou de emissão) para o período 2040-2069 (representando 2050). Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que se as práticas de gestão se mantêm como presentes, o rendimento de milho deverá diminuir em meio do século, no entanto, a diminuição dos rendimentos reais pode não ser tão dramática quanto previsto nos casos em que apenas o fator climático é considerado. Para isso fatores econômicos e tecnológicos devem ser considerados para aumentar os rendimentos. O aumento da [CO₂] terá um efeito positivo sobre o crescimento do cultivo, mas não parece ser suficiente para compensar os efeitos negativos do clima futuro, notadamente o aumento da temperatura do ar.

Palavras-chave: *Ceres maize*; Produtividade; DSSAT; mudanças climáticas

ABSTRACT

Simulation of future agricultural scenarios for maize crop based on projections of climate change

Maize (*Zea mays*) is considered one of the most important crops cultivated worldwide due to its chemical composition, nutritional value and its productive potential, thus presenting considerable relevance in socioeconomic aspects. Several factors interfere in the performance of the crop and, among them, the climate is among those that offer the greatest challenges for crop planning and management. Given the importance of culture in the national and global context, it is important to consider the future projections of grain production in the face of climate change and, consequently, food security in the coming years. Thus, the impact of climate change on maize crop growth and development was evaluated in this study using a plant growth model based on biophysical processes. For the calibration of the model, data obtained experimentally were used and the simulation of climate change scenarios was performed according to the AgMIP program approach. We worked with the CERES-MAIZE / DSSAT model, and three regional climate circulation models (GCM's) and two economic (or emission) scenarios for the period 2040-2069 (representing 2050). Based on the results obtained, it can be concluded that if management practices remain as present, corn yields should decrease in the middle of the century, however, the decrease in real incomes may not be as dramatic as predicted in cases where that only the climatic factor is considered. For this economic and technological factors must be considered to increase incomes. The increase in [CO₂] will have a positive effect on crop growth, but it does not appear to be sufficient to compensate for the negative effects of future climate, notably the increase in air temperature..

Keywords: *Ceres maize*; yield; DSSAT; climate change

1. INTRODUÇÃO

O milho é considerado uma das culturas mais importantes do mundo, com excelente valor nutritivo e elevado potencial produtivo. Em razão disso, tem grande importância social e econômica, destacando-se entre as culturas que evidenciam crescimento expressivo em termos de consumo e produção nas últimas décadas. Apesar do crescimento vertiginoso do consumo mundial de milho nas últimas safras, a produção mundial avançou em maior escala. No contexto mundial, o Brasil se encontra na terceira posição no ranking de produtores, atrás dos EUA e China, que ocupam o primeiro e segundo lugares, respectivamente.

Diante dos fatores determinantes da produtividade de uma cultura agrícola, o clima merece destaque por ser o fator com maior variabilidade temporal e que controla a maior parte dos processos biofísicos da planta. Desse modo, a avaliação das incertezas do clima e a análise do impacto climático sobre o desempenho de culturas agrícolas tem ganhado cada vez mais atenção na literatura científica nos últimos anos, com o objetivo de subsidiar a tomada de decisões.

As mudanças climáticas podem afetar diretamente a segurança alimentar global pelas frustrações de produção, ocasionando limitações de disponibilidade local, aumentos de preços e a estabilidade de alimentos ao longo do tempo. As alterações climáticas, sem adaptação pelos produtores rurais influenciará fortemente sobre a produtividade das culturas agrícolas.

Para redução do impacto na produção agrícola, há uma necessidade de desenvolver soluções de gestão de culturas integradas para adaptação das variedades e sistemas produtivos para as novas condições climáticas. As respostas adaptativas a mudança no clima envolvem alterações quanto às práticas de conservação da água, manejo do solo e fertilidade, além de alterações nas práticas agronômicas com base nas projeções futuras esperadas.

Considerado como um dos métodos mais aceitos cientificamente na agricultura para a análise de impactos e mudanças climáticas, o uso de modelos de crescimento de plantas (MCC) baseiam-se em processos biofísicos (do inglês-*process based crop model*) que ocorrem nas culturas. Os MCC's são ferramentas renomadas na literatura científica para teste de hipóteses acadêmicas, avaliação de cenários futuros e impactos de mudanças climáticas na agricultura. Esses simulam dinamicamente o crescimento da cultura em uma escala de tempo diária baseada em descrições mecanicistas de processo, exigindo calibração dentro de limites realistas.

Atualmente, os modelos desenvolvidos para a simulação de crescimento de culturas acopladas na plataforma DSSAT têm sido utilizados para prever rendimentos de diferentes culturas. Entretanto, para demonstrar acuradamente como os rendimentos das culturas mudarão

em relação à mudança climática, é fundamental que sejam consideradas as variáveis climáticas e de solo. Para a cultura do milho, o modelo de simulação DSSAT/CERES-Maize simula estratégias de gestão complexas para uma ampla gama de condições do solo e é capaz de analisar as interações dessas estratégias com as condições ambientais. Assim, é possível estabelecer como hipótese para o presente trabalho que o impacto do clima futuro pode ser simulado com base em processos devidamente calibrados para a realidade brasileira.

Deste modo, a fim de contribuir para a manutenção da segurança alimentar para uma população crescente, os produtores de milho precisarão adaptar-se as estratégias atuais de produção, a fim de sustentar os níveis de produtividade. Com isso, é necessário planejar cuidadosamente o manejo da cultura através de estratégias que minimizem os impactos das mudanças do clima e, conseqüentemente, de modo eficiente orientar os agricultores a adaptar-se às novas condições.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Simular o desenvolvimento e crescimento da cultura do milho e avaliar o impacto das mudanças climáticas para locais estratégicos para a produção de milho no Brasil.

2.2. Objetivos Específicos

- Calibrar um modelo baseado em processo para estimativa do crescimento e desenvolvimento da cultura do milho e expressar o nível de incerteza alcançado;
- Simular, para locais adequadamente selecionados, o desempenho da cultura do milho ao longo de 30 anos, comparando a condição atual e, ao menos, três cenários de climas futuros.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Importância econômica a cultura do milho

Atualmente, o milho é considerado uma das culturas mais importantes cultivadas mundialmente, e isso se dá devido a sua composição química, valor nutritivo e o seu potencial produtivo (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000a; KRESOVIC et al., 2014). Segundo Wijewardana et al. (2016) o milho ocupa a terceira posição, em escala global, em termos de produção e, sua demanda deverá aumentar em torno de 45% no período de 1997 a 2020. No Brasil, o milho se destaca como o produto de maior volume produzido e o segundo maior valor de produção entre os grãos, perdendo apenas para a soja. Diante desses aspectos, a cultura do milho apresenta grande importância econômica devido à notoriedade no crescimento expressivo, assim como no consumo e produção (HIRAKURI E LAZZAROTTO, 2014).

O milho apresenta utilização intensa na alimentação humana e animal além do emprego como matéria-prima para uma série de aplicações industriais, incluindo a produção de bioetanol (ŽALUD et al., 2017). Diante do aspecto social o milho é considerado como um alimento de baixo custo, pela viabilidade de cultivo tanto em grande quanto em pequena escala (GALVÃO et al., 2014). Assim, a cultura se integra como uma das mais importantes atividades do cenário agrícola brasileiro, com considerável importância nos aspectos socioeconômicos (XAVIER et al., 2014).

A produção nacional de milho, em 2016/17, está distribuída nos estados de Mato Grosso, 26,9%, Paraná, 19,2%, Goiás, 10,6% Mato Grosso do Sul, 10,0%, Minas Gerais 8,4%, Rio Grande do Sul, 6,6% e São Paulo, 4,5%. A distribuição da produção total de milho por estado brasileiro é demonstrada na Figura 1.

Estes estados produtores de milho contam com uma produção estimada em 79,9 milhões de toneladas, no qual contribuem em torno 81,6% da produção nacional prevista em 2016/17. As exportações devem ser superiores a 25,5 milhões de toneladas em 2017 para 35,1 milhões de toneladas em 2026/27, podendo alcançar a 51,3 milhões de toneladas (MAPA, 2017). A previsão de área plantada segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2015) deve ter um acréscimo de 2,9% entre 2014/15 e 2024/25, passando de 15,2 milhões de hectares em 2014/15 para 15,6 milhões, podendo chegar a 21,4 milhões de hectares em 2024/25.

Figura 1. Estados responsáveis pela produção total anual média brasileira de milho por estado no Brasil.

A produção brasileira de milho, no entanto tem se caracterizado pela divisão da produção em duas épocas de plantio, o plantio de verão ou primeira safra e o plantio de safrinha ou segunda safra, que se refere ao milho de sequeiro. A previsão de produção de milho no Brasil para 2016/17 foi estimada em 92,8 milhões de toneladas, sendo 63,5 milhões correspondem ao milho de segunda safra e 30,3 milhões ao milho de primeira safra, com uma área plantada de 17,2 milhões de hectares em 2016/17 (MAPA, 2017). A distribuição da produção de safra de milho e a produção de safrinha de milho por estado brasileiro é demonstrada na Figura 2.

Segundo levantamento da CONAB (2017) a área estimada para plantio de milho, apresentou incremento nacional de 3,7% em relação ao ano de 2016, devido ao incentivo pelo forte aumento da Região Centro-Sul, que apresentaram incremento de 6,3%. Para o milho segunda safra, a Região Centro-Oeste é considerada como a principal produtora nacional, responsável pelo plantio de uma área de 7.664,7 mil hectares, representando um incremento de 13,6% em relação ao ano 2016.

a **b**

Figura 2. Estados responsáveis pela produção brasileira de primeira safra (a) e segunda safra (b) de milho no Brasil, no período de 2003-2015.

3.2. Milho e os elementos climáticos

O clima corresponde ao ambiente físico que dá sustentação ao crescimento e desenvolvimento das plantas (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017). Portanto, a diversidade climática é considerada como o principal fator de determinação das espécies vegetais, no qual é apontado como estreita relação entre o clima e as variações de adaptação das plantas no tempo e no espaço (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017). Os sistemas agrícolas são altamente vulneráveis à variabilidade do clima por este ser considerado o fator que oferece os maiores desafios para o correto manejo de culturas agrícolas é o principal fator responsável pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas no Brasil, além do impacto no controle de pragas e doenças (HOOGENBOOM, 2000; ASSIS, 2004; ASSIS et al., 2006; CHALLINOR et al., 2007).

Diversas análises da produção agrícola apontam alta correlação entre variações de safras das principais culturas e as condições meteorológicas e climáticas. Assim, a precipitação, temperatura do ar e radiação solar são as variáveis agrometeorológicas consideradas mais críticas associadas à produção agrícola (HOOGENBOOM, 2000). Assume-se com isso que, o rendimento de uma cultura agrícola é o produto da interação entre o genoma e, as condições ambientais em que a cultura é cultivada (PATRICK; COLYVAS, 2014). Portanto, para que haja um ideal crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que as variáveis climáticas estejam de acordo com as exigências da cultura (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000a).

A produtividade das culturas alimentares anuais é eminentemente sensível à variabilidade no clima (CHALLINOR et al., 2007). Apesar da grande habilidade fisiológica na conversão de carbono mineral em compostos orgânicos, a cultura do milho tem seus níveis de produtividade dependente das condições climáticas apresentando alta variabilidade anual e, a interferência dos fatores meteorológicos resulta em efeitos negativos e expressivos na economia brasileira (TAO; ZHANG, 2011; HIRAKURI E LAZZAROTTO, 2014).

3.2.1. Radiação solar e concentração de CO₂

A radiação solar é considerada a principal fonte de energia para os processos físicos e biológicos terrestres que ocorre na superfície da Terra, com destaque para o processo de fotossíntese, no qual a energia solar é fixada pelas plantas na forma de biomassa vegetal (BERGAMASCHI, 2017a). O processo fotossintético eficiente, no entanto, necessita de absorção de radiação solar, captação de CO₂ e liberação de O₂ para atmosfera (BERGAMASCHI, 2017a). Para a planta de milho, Cruz et al. (2008) destacam que aproximadamente 90% da matéria seca do milho provem da fixação do CO₂ através do processo fotossintético.

A radiação solar é apontada como um fator essencial para determinar a taxa fotossintética, normalmente representada através de uma função de resposta assintótica, com uma resposta linear a baixos níveis de luz (HOOGENBOOM, 2000). A radiação de valor fisiológico presentes no espectro usado na fotossíntese é absorvida, primariamente, pela clorofila e, em seguida, utilizadas nas transformações de CO₂ em carboidratos. Diante disso, a radiação é um dos parâmetros de extrema importância para a cultura do milho, sem a qual o processo fotossintético é inibido (CRUZ et al., 2008).

O aproveitamento de luz pelo milho é decisivamente influenciado pela distribuição espacial das plantas na área, pelo arranjo das folhas na planta, pela área foliar e pela inclinação solar. Neste sentido, o aproveitamento palpável do espectro solar pode ser incrementado pela melhor distribuição espacial de plantas na área, mediante combinação adequada entre o espaçamento entrelinhas e o número de plantas na linha. O rendimento dos grãos de uma cultura de milho pode ser expresso pela expressão 1:

$$Y = Ri.Ei.Ec.p \quad (1)$$

em que: R_i é a radiação incidente; E_i é a eficiência da interceptação da radiação incidente; E_c é a eficiência na conversão da radiação interceptada pela biomassa vegetal; p é a partição de fotoassimilados.

Vale ressaltar que o milho é uma espécie com metabolismo fotossintético C_4 classificado como àquele que apresenta a maior eficiência de uso da radiação solar dentre três subgrupos de plantas, de acordo com a enzima descarboxilativa. Portanto, adquire biomassa considerável sob abundância de nutriente e abastecimento de água em climas mais quentes das regiões tropicais e subtropicais (EDWARDS et al., 2010; BERGAMASCHI, 2014; CUI et al., 2017).

Uma redução de 30% a 40% da intensidade luminosa, por períodos longos, atrasa a maturação dos grãos ou pode ocasionar queda na produção (CRUZ et al., 2008). Em baixos níveis de radiação solar incidente, há redução na fotossíntese e esta pode se igualar as perdas por respiração. Nessa condição, típica de ambientes sombreados, a folha se encontra no ponto de compensação (PCL) o que significa que os ganhos pela fotossíntese se equivalem às perdas por respiração (BERGAMASCHI, 2017a).

Na grande maioria das espécies C_4 multicelulares, como é o caso do milho, a anatomia foliar especializada chamada "anatomia Kranz" fornece a base estrutural para a assimilação eficiente de CO_2 . Portanto, o estabelecimento da fotossíntese C_4 inclui várias modificações bioquímicas e anatômicas que permite com que às plantas com esta via fotossintética concentre CO_2 no sítio ativo da Ribulose-bifosfato-carboxilaseoxigenase (Rubisco) do ciclo de Calvin e Benson (GOWIK; WESTHOFF, 2011). Assim, o ciclo fotossintético das espécies C_4 pode ter evoluído como um dos principais mecanismos de concentração de carbono utilizado pelas plantas terrestres, para compensar as limitações referentes a baixos níveis de CO_2 (TAIZ E ZEIGER, 2015).

O milho possui elevados índices produtivos ao combinar alta interceptação de radiação, área foliar e disponibilidade de água, quando sanada as demais demandas nutricionais. Além disso, as plantas C_4 exibem melhor eficiência de uso da água do que as plantas C_3 , devido aos processos que respondem ao enriquecimento da $[CO_2]$ nos quais são importantes devido a implicações na fotossíntese, uso de radiação eficiência, uso da água, captação e eficiência no uso de nutrientes (GOWIK; WESTHOFF, 2011; BASSU et al., 2014).

Segundo Abebe et al. (2016) elevado CO_2 atmosférico promove o crescimento das plantas através do efeito de fertilização e maior fotossíntese porém, esse efeito é mais pronunciado em culturas C_3 tais como trigo, e menos apreciável das culturas C_4 , como o milho

(GHANNOUM et al., 2001). Contudo, devido ao mecanismo de concentração de CO₂, nos níveis atuais de dióxido de carbono na troposfera (350µmol) as plantas C₄ se encontram saturadas. Assim sendo, futuros aumentos nos níveis de CO₂ na atmosfera não deverão favorecer as plantas C₄, como é o caso do milho (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002).

3.2.2. Temperatura do ar

A temperatura, considerada como fonte de energia térmica, é um fator climático que desempenha um papel fundamental na produção agrícola para o crescimento de culturas, em fases como emergência, florescimento e maturidade (HOU et al., 2014). Assim, as condições térmicas influenciam diversos processos vitais das plantas, desde a germinação à emergência pela temperatura do solo ao desenvolvimento fenológico e crescimento da planta pela temperatura do solo e do ar (BERGAMASCHI, 2017).

A maioria dos genótipos de milho não se desenvolve em temperaturas inferiores a 10 °C, considerada temperatura basal para a espécie, portanto, a temperatura constitui um dos fatores de produção mais importantes e decisivos para o desenvolvimento do milho (FANCELLI; DOURADO NETO, 1997, 2003). No período em que a temperatura é mais elevada, o processo metabólico é acelerado e, nos períodos mais frios, o metabolismo tende a diminuir. Essa oscilação ocorre dentro dos limites extremos de 10 °C e 30 °C. Temperaturas abaixo de 10 °C por períodos constantes, ocasionam crescimento quase nulo das plantas e, sob temperaturas acima de 30 °C por períodos longos, durante a noite, o rendimento dos grãos decresce, devido aos produtos metabólicos produzidos durante o dia (CRUZ et al., 2008; BERGAMASCHI, 2017b).

O desenvolvimento fenológico, o crescimento e a partição da biomassa, são diretamente afetados pela temperatura, pois o alongamento e encurtamento da fase vegetativa são fatores resultantes da disponibilidade de calor e não do número de horas de luz em que a planta está submetida (CRUZ et al., 2008; BASSU et al., 2014). A temperatura possui uma relação complexa no desempenho da cultura do milho, uma vez que a condição ótima varia com os diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento da planta. De acordo com Fancelli e Dourado-Neto (1997) o método mais satisfatório para determinar as etapas de desenvolvimento da cultura leva em consideração as exigências térmicas, designadas como graus-dia (GD).

Os processos de fotossíntese, respiração, transpiração e evaporação são funções diretas da energia disponível no ambiente, comumente designada por calor ao passo que o crescimento, desenvolvimento e translocação de fotoassimilados encontram-se ligados à disponibilidade

hídrica do solo, com seus efeitos mais pronunciados em condições de elevadas temperaturas em que a taxa de evapotranspiração é elevada (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000a). A temperatura e a precipitação são fatores meteorológicos que correspondem ao tempo de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho e, estes por sua vez são diretamente alterados pela mudança climática (LI et al., 2011).

A fotossíntese líquida tem aumento acentuado em baixas temperaturas, ocasionado por incrementos diferenciados nos processos de fotossíntese e respiração. Na temperatura ótima, a fotossíntese líquida é máxima e em temperaturas acima da ótima a assimilação líquida diminui, pois os gastos por respiração aumentam mais do que os gastos da fotossíntese. Assim, a fotossíntese líquida é positiva entre a temperatura base inferior (T_b) e temperatura base superior (T_B), e fora deste intervalo às plantas paralisam seu crescimento e passam a sofrer estresse térmico (BERGAMASCHI, 2017b).

3.2.3. Água

A água constitui um dos elementos mais importantes de seleção do tipo de vegetação que se desenvolve numa região (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000b). Assim, dentre os fatores que provocam maior impacto no rendimento das lavouras, as condições hídricas são as que mais afetam indiretamente muitos dos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas (SANS; GUIMARÃES, 2008; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009).

As espécies anuais de estação quente, como o milho, são indicadoras do impacto de estiagens, pois são cultivadas sem limitações térmicas, nas regiões tropicais e subtropicais (BERGAMASCHI, 2017c). Assim, o potencial de rendimento pode ser reduzido em consequência da insuficiência do abastecimento de água para satisfazer a demanda hídrica (GRASSINI; YANG; CASSMAN, 2009).

A agricultura convencional com produtividades mais próximas ao nível potencial tem seu rendimento limitado por água (PONTI; RIJK; VAN ITTERSUM, 2012). Quando o milho encontra déficits hídricos há um declínio na fotossíntese devido a uma redução na intercepção de luz, pois à medida que a expansão da folha é reduzida ou à medida que ocorre a senescência das folhas provoca danos no mecanismo fotossintético (BRUCE; EDMENADES; BARKER, 2002).

3.3. Modelagem e simulação baseada em processos biofísicos

O sistema agrícola é um conjunto de componentes que tem como propósito geral a produção de alimentos, fibras e energia, através de culturas e criação de gado, a partir dos recursos naturais da terra (JONES et al., 2016). Embora seja útil estudar sistemas agrícolas que caracterizam o sistema particular usando dados coletados em circunstâncias específicas, muitas vezes há a necessidade de um estudo dos componentes de sistema e suas interações, considerando a produção agrícola como um todo, levando em consideração os recursos naturais e os fatores humanos (JONES et al., 2016).

Para esse estudo, os modelos de crescimento de plantas (MCC) são amplamente utilizados em diversas aplicações e em vários países ao redor do mundo (SOLER; SENTELHAS; HOOGENBOOM, 2007). Os MCC's integram o conhecimento de agrometeorologia, física do solo, química do solo, fisiologia das culturas, criação de plantas e agronomia, em um conjunto de equações matemáticas para prever o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento, portanto, são fisiologicamente baseados no cálculo das relações entre as funções da planta e o meio ambiente (HOOGENBOOM, 2000).

A modelagem além de possibilitar a simulação de cenários diversos de manejo dos fatores de produção, permite o entendimento da dinâmica dos processos envolvidos no sistema, no qual estes modelos podem ser usados para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal, como a simulação do crescimento da planta e a previsão da produtividade (ASSIS et al., 2006; AMARAL, 2015). Portanto, considerando a ciência dos sistemas agrícolas um campo interdisciplinar, a utilização de modelos de crescimento de plantas permite o estudo do comportamento de sistemas complexos, assim como a previsão do desempenho global do sistema agrícola, para determinados propósitos (JONES et al., 2016).

De acordo com Hooogenboom (2000), os modelos podem ter aplicações tanto na semeadura como durante o crescimento e desenvolvimento da cultura, podendo essa informação ser usada ao nível das propriedades rurais ou de instituições governamentais para planejamento de políticas agrícolas. Com a utilização de modelos de culturas pode-se analisar e manipular um determinado sistema produtivo com muito mais facilidade e rapidez do que seria possível considerando toda a complexidade do sistema real (MARIN, 2014).

Os modelos de simulação de culturas podem simular as interações entre genótipo e ambiente, assim como o manejo adequado a ser utilizado, predizendo o funcionamento de um sistema de produção em resposta aos fatores que o influenciam (AMARAL, 2015). Os modelos baseados em processos simulam não apenas o estado final a biomassa e do rendimento da cultura, mas também geram informações a respeito dos principais processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da planta (JAMES; CUTFORTH, 1996).

Os MCC's baseiam-se em processos biofísicos (process based crop model, em inglês) que ocorrem nas culturas e são considerados um dos métodos mais aceitos cientificamente na agricultura para a análise de impactos e mudanças climáticas (Marin, 2014; Rosenzweig et al., 2013; Waongo, Laux, & Kunstmann, 2015). Assim, estes são ferramentas consagradas na literatura científica para teste de hipóteses acadêmicas, avaliação de cenários futuros e impactos de mudanças climáticas na agricultura (ROSENZWEIG et al., 2013).

Estes simulam dinamicamente o crescimento da cultura em uma escala de tempo diária baseada em descrições mecanicistas de processo e este inclui um grande número de parâmetros que não podem ser conhecidos com certeza e exigem calibração dentro de limites realistas (HOLZKAMPER et al., 2015). Portanto, a escolha do modelo agrícola e da técnica utilizada para a calibração deve ser criteriosa por ser crucial para o desenvolvimento da pesquisa e das conclusões obtidas sobre os impactos das mudanças climáticas (CHALLINOR; SMITH; THORNTON, 2013).

Os modelos desenvolvidos para a simulação de crescimento de culturas acoplado a plataforma DSSAT têm sido utilizados para prever rendimentos de diferentes culturas (NGWIRA; AUNE; THIERFELDER, 2014a), a exemplo do modelo DSSAT/CERES no qual se destaca para simulações de crescimento de gramíneas. O modelo de simulação DSSAT/CERES-MAIZE, acoplado a plataforma DSSAT simula estratégias de gestão complexas para a cultura do milho em uma ampla gama de condições do solo com capacidade de analisar as interações produtivas da planta com as condições ambientais (JONES; KINIRY; DYKE, 1986; FARHANGFAR et al., 2015).

Desse modo, o modelo DSSAT/CERES-MAIZE é um dos mais detalhados para prever os principais processos fisiológicos do milho, incluindo fotossíntese, respiração, acumulação e partição de biomassa, fenologia, extensão do crescimento de folhas, caules e raízes, extração de água do solo e evapotranspiração (GEDANKEN et al., 2003). O modelo também simula os estádios fenológicos e número de folhas do milho considerando a sensibilidade ao fotoperíodo e os efeitos da alta temperatura no número final das folhas (GEDANKEN et al., 2003; OLIVEIRA, 2015).

Os dados requeridos para a operação do modelo DSSAT/CERES-MAIZE incluem informações diárias de dados meteorológicos, dados de caracterização do solo e condições iniciais de teor de água e níveis de nitrogênio no solo. Dentre as informações de manejo acrescenta a data e profundidade de semeadura, população de plantas, variedade da cultura e quantidades e datas de aplicações de fertilizantes e de irrigação (CARDOSO; FARIA; FOLEGATTI, 2004).

3.4. Mudanças climáticas

O tema mudanças climáticas tem enorme importância no cenário mundial, pelas preocupações que manifesta relacionado às possíveis consequências na produção de alimentos, qualidade do ambiente e na vida das pessoas (BREGAMASCHI, 2017c). Para a metade do século, em 2050, estimativas apontam que a população mundial será de 9,4 bilhões de pessoas, portanto, será necessário incrementar em 60% a produção agrícola para suprir a demanda por alimentos (MARIN et al., 2016).

O clima global está modificando a uma taxa alarmante devido ao aumento emissão de gases de efeito estufa (GEE) como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) e, essas emissões podem causar alterações na aumentar a temperatura e alterar os padrões de precipitação (CHALLINOR et al., 2007; ABEBE et al., 2016). Porém, todas as projeções de mudanças climáticas estão sujeitas a incertezas decorrentes de limitações no conhecimento (CHALLINOR et al., 2007).

Considerando que os sistemas agrícolas são altamente vulneráveis à variabilidade do clima, por este ser considerado o fator que oferece os maiores desafios para o correto manejo de culturas agrícolas, os efeitos das mudanças climáticas terão impactos agrônômicos sobre os rendimentos das culturas e efeitos econômicos sobre a agricultura com relação a preços, produção, demanda, comércio, vantagem comparativa regional e bem-estar do consumidor (ASSIS et al., 2006; CHALLINOR et al., 2007; LI et al., 2011). Desse modo, para que haja ideal crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que as variáveis climáticas estejam de acordo com as exigências das culturas (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000a).

As estimativas do impacto das mudanças climáticas nos rendimentos das safras são frequentemente caracterizadas por grandes incertezas da representação física, biológica, e processos socioeconômicos (LENG, 2017). Portanto, os produtores de diversas partes terão que se adaptar aos recursos físicos, agrícolas, econômicos e sociais a fim de minimizar os impactos da variabilidade climática nos sistemas de produção de alimentos (CHALLINOR et al., 2007).

A área cultivada com grãos no país cresceu, e a expansão ocorreu em regiões de fronteira agrícola com limitações de solo e instabilidade climática (MARIN et al., 2016). Desse modo, diante da importância da cultura do milho, a avaliação das incertezas do clima merece destaque e o estudo do seu impacto ocasionado no setor agrícolas tem ganhado cada vez mais atenção nos últimos anos (LI et al., 2011; HOLZKAMPER et al., 2015).

Estudos realizados por Farhangfar et al, (2015) demonstraram sensibilidade da cultura do milho a seca no Irã, destacando que a combinação de alta temperatura e queda na umidade

do solo durante a formação e enchimento de grãos pode causar redução expressiva na produtividade da cultura. Esse exemplo serve para ilustrar que é razoável supor que o clima futuro carrega muitas incertezas e pode causar insegurança alimentar em algumas regiões, enquanto pode ocorrer aumento de produção em outras (LI et al., 2011; JOHNSTON et al., 2015).

As mudanças climáticas podem afetar a disponibilidade, o acesso, a utilização e a estabilidade de alimentos ao longo do tempo e esta mudança sem adaptação pelos produtores influenciará fortemente sobre a produtividade das culturas (WAONGO; LAUX; KUNSTMANN, 2015). Para redução do impacto das mudanças climáticas na produção agrícola, há uma necessidade de desenvolver soluções de gestão de culturas integradas para se adaptar ambas às variedades e sistemas para as mudanças climáticas de cultivo (NGWIRA et al, 2014).

Diante do impacto das mudanças climática na produção agrícola é imprescindível a compreensão do modo com que o crescimento e desenvolvimento do milho serão afetados, dado que o clima futuro pode ser diferente em muitas regiões de cultivo de milho, especialmente quanto à temperatura e [CO₂] (BASSU et al., 2014). Para isso, a tomada de decisões e conhecimento de técnicas adequadas é essencial para o correto manejo da cultura e, dentre elas destaca-se as previsões climáticas e, os modelos baseados em processos são, portanto, ferramentas essenciais para resolver essa questão (KLEMM; MCPHERSON, 2017).

As respostas adaptativas a mudança no clima exige mudança nas ações incrementais que incluem a melhoria de práticas de conservação da água, manejo do solo e fertilidade, além de alterações em épocas de plantio, seleção de cultivares e práticas agronômicas a serem adotadas pelos agricultores com base nas condições meteorológicas esperadas, assim como em alguns casos, mudanças que incluem o desenvolvimento de novos sistemas e tecnologias a nível regional (MA et al, , 2017; TAO et al, , 2014). Nas próximas décadas, é indispensável que as medidas de adaptação das espécies às mudanças climáticas sejam compatíveis com o ritmo das alterações do ambiente (BREGAMASCHI, 2017c).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área experimental

Para a consecução deste estudo foram realizados dois experimentos na área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) município de Piracicaba-SP, situado na latitude 22°42'30" S, longitude 47°38'30" W e altitude de 546 m (VILLA NOVA, 2003). O primeiro experimento, nomeado nesse documento de safra de outono foi conduzido no ano de 2016, com semeadura no dia 07 de maio, na Fazenda Areão, em uma área de 3 hectares, onde foi delimitada uma subárea para a implantação do experimento.

O segundo experimento, nomeado nesse documento de safra de verão, foi conduzido na safra agrícola 2016/2017, com semeadura no dia 31 de outubro de 2016, na área experimental localizada próximo ao Posto Meteorológico da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em uma área com aproximadamente 500 m², também delimitada uma subárea para a implantação do experimento.

4.1.1. Clima

Os dados meteorológicos utilizados durante a condução do experimento de outono e experimento de verão foram coletados usando sensores de estação meteorológica automática (CR1000, Campbell Sci. Inc.) instalado próximo a cada área experimental. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, ou seja, tropical úmido, com chuvas de verão e seca no inverno. O total de chuvas no mês mais seco (julho) é de 26 mm e do mês mais chuvoso (janeiro) 217 mm.

Anualmente, chove cerca de 1.270 mm e os meses mais secos são junho, julho e agosto. A temperatura média do mês mais quente (janeiro) é de 24,6 °C, e do mês mais frio (julho) de 17,3 °C, com média anual de 21,5 °C. A evapotranspiração total anual é de 1.541 mm, e a umidade relativa média anual é de 72,1%, fazendo com que a nebulosidade seja máxima no verão e mínima no inverno e com média anual de céu coberto de 0 a 10% (CERVELLINI, 1965).

Dentre as variáveis de entrada do modelo de simulação, dados meteorológicos foram registrados diariamente, precipitação (mm), temperatura mínima e temperatura máxima do ar (°C), e radiação solar global (W m⁻²).

4.1.2. Solo

O solo da área experimental do experimento de outono, instalado na Fazenda Areão é classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico e, o solo da área experimental do experimento de verão, instalado próximo ao posto meteorológico, é classificado como e Nitossolo Vermelho eutrófico (SANTOS, 2013). Foram realizadas análises de caracterização física (Tabela 1) e análise química: pH, matéria orgânica (M.O), macronutrientes, capacidade de troca de cátions (T) e saturação por bases (V) em ambas as áreas experimentais.

Tabela 1. Caracterização física do solo da área experimental na Fazenda Areão e da área experimental localizada próximo ao posto meteorológico – ESALQ/USP.

Profundidade m	CC cm ³ cm ³	PMP	ρ _s kg dm ⁻³	Argila	Silte %	Areia
Argissolo Vermelho eutrófico						
0-20	0,27	0,22	1,30	34,0	36,9	29,1
20-40	0,34	0,29	1,30	40,8	32,0	27,2
40-60	0,37	0,35	1,14	59,1	25,2	15,7
60-80	0,36	0,33	1,14	52,0	30,6	17,4
Nitossolo Vermelho eutrófico						
0-30	0,33	0,24	1,48	18,9	48,9	32,2
30-60	0,36	0,30	1,40	11,4	60,4	28,2
60-100	0,36	0,30	1,26	15,1	60,3	24,6
100-150	0,31	0,23	1,54	16,9	56,9	26,2

PMP: Ponto de murcha permanente (-1500 kPa); CC: Capacidade de campo (30 kPa)

Para estimar os valores de ponto de murcha permanente (-1500 kPa), capacidade de campo (-10kPa) e ponto de saturação do solo, foi utilizado o método de curva de retenção de água proposto por van Genuchten (1980) descrito através da equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^m} \quad (1)$$

em que: θ é o conteúdo de água no solo (cm³ cm⁻³), θ_s e θ_r é o conteúdo de água saturada residual do solo, respectivamente (cm³ cm⁻³), ψ é o valor do potencial mátrico (kPa), α (kPa⁻¹), n são parâmetros de ajuste da equação. Assumindo que $m=1-1/n$.

O DSSAT possui uma ferramenta para cadastramento de dados de perfil de solo, em que é possível inserir características físico-hídricas e químicas deste solo, além de estimar

valores de umidade por meio de equações de pedotransferência (VIANNA, 2014). Para o cadastramento do perfil de solo, foram utilizados os seguintes dados:

- i) Classificação e localização espacial;
- ii) Parâmetros de superfície: cor, drenagem, declividade, potencial de escoamento superficial e fator de fertilidade;
- iii) Características físico-hídricas do solo;
- iv) Características químicas do solo
- v) Fator de crescimento e distribuição radicular ao longo do perfil do solo.

4.2. Instalação e condução dos experimentos

Para a instalação dos experimentos com a cultura do milho, safra de outono e safra de verão, utilizou o espaçamento de plantio de 0,45 m entre linhas, com população de 66.000 plantas por hectare. A semeadura foi realizada utilizando cerca de 10% a mais do número de sementes em razão das possíveis falhas de germinação, ataque de pragas e outros fatores de redução de estande. Foi utilizado o híbrido P4285YH, selecionado entre o mais comercializado pelos produtores da região, com elevado potencial produtivo e adaptado às condições edafoclimáticas da região, além de ser considerado como uma excelente opção para silagem, qualidade de grãos e colmo, elevada produtividade estabilidade e sanidade foliar e, alta tolerância ao acamamento e quebramento.

O solo foi preparado de maneira convencional, sendo realizada uma aração a 30 cm de profundidade e, em seguida uma gradagem para destorroamento e nivelamento. A adubação mineral de plantio e cobertura foi realizada de acordo a análise do solo e Aguiar et. al. (2014) de modo a não permitir a ocorrência de estresses nutricional pelas plantas. A adubação de cobertura foi realizada no estádio V5 a V6 das plantas, ou seja, 5 a 6 folhas totalmente expandidas, com o adubo incorporado a 3 cm de profundidade. Durante o manejo do experimento, a cultura recebeu todos os tratos culturais necessários para que o genótipo expressasse seu máximo potencial produtivo, incluindo controle de pragas e doenças.

Os experimentos, safra de verão e safra de outono, foram realizados com dois tratamentos, irrigado e sequeiro, com 4 (quatro) repetições. As parcelas experimentais foram constituídas de quatro linhas com dimensões de 20 m de comprimento, sendo as duas centrais utilizadas para fins de avaliação. Foram selecionadas cinco plantas aleatoriamente nas parcelas experimentais, onde foram realizadas as avaliações biométricas ao longo de todo o ciclo da cultura.

No tratamento irrigado, o nível mínimo de umidade do solo foi estabelecido em 50% da CAD (capacidade de água total disponível do solo), com o intuito de garantir suprimento hídrico para a cultura. A irrigação realizada no experimento de outono, localizado na Fazenda Areão foi do tipo aspersão, via pivô central, e no experimento de verão, a irrigação ocorreu através de aspersores instalados no local, com manejo realizado de acordo com o balanço hídrico climatológico. Destaca-se, contudo que, o objetivo neste caso não foi avaliar o efeito da irrigação, mas sim conduzir a cultura sob duas condições de disponibilidade hídrica para fins de calibração do modelo de simulação.

4.3. Variáveis de planta analisadas

Durante o desenvolvimento da cultura do milho foram realizadas análises regulares e frequentes de crescimento desde a emergência até a colheita. Foram analisadas cinco plantas centrais de cada parcela em cada repetição e tratamento, sendo estas devidamente marcadas para observação e acompanhamento ao longo de todo o ciclo. O crescimento e o desenvolvimento da planta de milho foram analisados de acordo com o método descrito por Fancelli e Dourado-Neto (2000), registrando o estágio fenológico em número de dias (MOURICE et al., 2014).

A altura das plantas foi determinada pelo método descrito por Souza et al., (2013), através de medidas semanais da altura média de cinco plantas na parcela, em metros, com o auxílio de uma trena graduada, desde o nível do solo até o ponto de inserção da folha bandeira. O número de plantas acamadas foi determinado através da soma, na área útil da parcela, as plantas inclinadas, com formação de um ângulo inferior a 20° com o solo, sendo expresso em porcentagem (%) do estande acamado observado na área útil da parcela (SOUZA et al., 2013).

O índice de área foliar (IAF) foi medido semanalmente pelo processo de medida direta através do método utilizado por Mourice et al (2014). Esse método se dá na multiplicação do comprimento da folha (L) (m), medido da ponta da folha até o ponto anexado ao colarinho, largura da folha (W) (m), medida no ponto mais largo da folha, pelo fator de 0,75 (FERREIRA JUNIOR et al., 2014), conforme descrito na equação 2 e, dividido pela área de projeção da planta (m²).

$$LA = L.W.0,75 \quad (2)$$

Para determinação da massa vegetativa realizou-se a coleta destrutiva das plantas a aproximadamente a cada 21 dias, ao longo de todo o ciclo da cultura, com início sete dias após

a emergência das plantas. As amostras foram coletadas de modo aleatório na parcela experimental para evitar possíveis clarões entre as plantas tendo como preferência as extremidades da parcela, a fim de evitar que a retirada de várias plantas em sequência pudesse interferir no desenvolvimento das plantas avaliadas.

Foram retiradas cinco plantas de cada parcela experimental e, separadas em caule + folha fotossinteticamente ativa. As amostras foram devidamente identificadas e condicionadas em sacos de papel, pesadas em balança de precisão e, posteriormente levadas à estufa de circulação forçada de ar a 60° C por 72 horas. Após esse período, as amostras foram pesadas e convertidas para kg ha⁻¹.

A massa seca de espiga foi determinada através da coleta das espigas das plantas colhidas na parcela, secas em estufa de circulação forçada de ar a 60° C por 72 horas e pesadas em balança de precisão, obtendo a massa seca, em gramas (g) e posteriormente convertida para kg ha⁻¹. Esta análise foi realizada em cada parcela experimental, sendo feita a média final por parcela em cada tratamento e expressos em g m⁻². Para a fitomassa das plantas somou-se a massa seca vegetativa, massa seca do pendão (inflorescência masculina) da planta de milho e a massa seca de espigas.

A produtividade de grãos por hectare foi determinada no ponto de maturidade fisiológica, sendo colhidas 3 m de rua da cultura. Posteriormente as espigas foram colhidas manualmente, debulhadas com o auxílio de um debulhador e os grãos foram pesados. Foram retiradas amostras para a determinação da porcentagem de umidade. Os dados de produtividade de grãos foram corrigidos para umidade de 0% e expressos em kg ha⁻¹, utilizando a equação 3.

$$P0\% = [PG \times (1 - U)/100] \quad (3)$$

em que P0% é a produtividade de grãos (kg ha⁻¹) corrigida para a umidade de 0%; PG é a massa de grãos sem a correção.

4.4. Análise de sensibilidade do modelo DSSAT/CERES-Maize

A análise de sensibilidade foi realizada para averiguar as estimativas otimistas e pessimistas sobre as variáveis genéticas que tem impacto na etapa de calibração do modelo. Primeiramente, a análise de sensibilidade foi realizada no experimento de outono, no tratamento irrigado para analisar o comportamento dos coeficientes genéticos com ausência de estresse hídrico, para assim proceder com a calibração do modelo com características ótimas de crescimento e desenvolvimento.

Foi realizada análise de sensibilidade local, alterando-se o valor de uma variável e mantendo-se as demais restantes inalteradas e comparando-se o resultado em relação a uma condição padrão, o que proporciona avaliar variação nas variáveis de saída do modelo decorrentes de alterações nos dados de entrada. Para este experimento, avaliou-se o híbrido DKB 333 (ciclo normal) sobre qual o modelo DSSAT/CERES-Maize foi inicialmente desenvolvido, por apresentar características semelhantes ao híbrido utilizado na condução do experimento. Também se utilizou a ferramenta GLUE disponível na plataforma DSSAT para auxílio na análise de sensibilidade.

Para análise da sensibilidade do modelo, os parâmetros sofreram variação de $\pm 10\%$. A importância relativa dos parâmetros foi calculada com base no índice de sensibilidade absoluta, que foi convertido no índice de sensibilidade relativa (SALTELLI et al., 2007), conforme equações 4 e 5.

$$\sigma(y/k) = \frac{\delta y}{\delta k} \quad (4)$$

em que: $\sigma(y/k)$ é a sensibilidade absoluta, δy é a diferença entre os dados da variável de saída do modelo e δk é a diferença entre as variações do parâmetro de entrada.

$$\sigma r(y/k) = \delta \frac{(y/k) * k}{y} \quad (5)$$

em que: $\sigma r(y/k)$ é a sensibilidade relativa, $\sigma(y/k)$ é a sensibilidade absoluta, k é o valor do parâmetro padrão e y é o valor de saída da variável padrão.

Considerando que os coeficientes genéticos P1, P2 e P5 definem a fenologia da cultura, enquanto que G2 e G3 estão relacionados com a definição do rendimento do grão, podem-se observar comportamentos distintos dos coeficientes com relação aos dias após a semeadura e estádios fenológicos da cultura para as variáveis analisadas. Essa variação conduziu o trabalho para a etapa de calibração do modelo, sendo os coeficientes ajustados conforme os dados obtidos no campo (Tabela 2).

Tabela 2. Definição dos coeficientes genéticos do modelo DSSAT/CERES-Maize.

P1	Representa o tempo térmico desde a emergência das plântulas até o final da fase juvenil (expressa em graus dias acima da temperatura de base de 8 °C). Período no qual a planta não responde a alterações no fotoperíodo.
P2	Representa a sensibilidade ao fotoperíodo, dias de atraso na iniciação da floração masculina para cada hora de incremento do fotoperíodo em que o desenvolvimento prossegue a uma taxa máxima (que é considerada como 12,5 horas).
P5	Duração da etapa reprodutiva soma térmica desde a emergência do estigma na espiga até o ponto de maturidade fisiológica do grão (expressa em graus dias acima de uma temperatura de base de 8°C).
G2	Número máximo de grãos por planta.
G3	Taxa de enchimento do grão (mg dia ⁻¹) sob condições ótimas de crescimento.
PHINT	Representa o intervalo no tempo térmico (graus dias) entre as aparências sucessivas da ponta da folha. Intervalo de filocronos, ou seja, o tempo térmico decorrido entre o aparecimento de duas folhas sucessivas durante o período de crescimento vegetativo.

4.5. Calibração do modelo DSSAT/CERES-Maize

Avaliou-se apenas um modelo cientificamente consagrado para simulação da cultura do milho, ainda que a literatura recomende o uso de modelos em paralelo para redução da incerteza da simulação (ASSENG et al., 2013). O referido modelo utilizado é o DSSAT/CERES-Maize, agrupado em um Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Tecnologia (DSSAT) versão 4.6 (HOOGENBOOM et al., 2012).

O modelo DSSAT/CERES-Maize necessita ter seus coeficientes calibrados para produzir o crescimento e desenvolvimento do milho, ajustados às condições experimentais, considerando os valores médios dos parâmetros genéticos representativos da área experimental (OLIVEIRA, 2015). A calibração do modelo é dada pelo ajuste de parâmetros do sistema de modo que os resultados simulados cheguem a um nível pré-determinado, baseados em condições de campo, em que a calibração deve ser conduzida utilizando-se experimento definido, onde o solo e as condições agrometeorológicas são monitorados e o crescimento da cultura acompanhado detalhadamente (JAME e CUTFORTH, 1996).

Para a calibração do modelo, os dados experimentais foram ajustados em relação às simulações em Piracicaba/SP, sendo esta calibração utilizada para as simulações nas demais localidades. A calibração foi realizada manualmente por ajuste visual entre as curvas simuladas e os pontos de observações com base nos dois experimentos de campo, concomitantemente. Portanto, foi realizada apenas uma calibração para as simulações futuras de primeira safra e segunda safra de milho.

A calibração foi realizada com base nos coeficientes genéticos que são utilizados para aspectos genotípicos específicos do desenvolvimento do milho. Os coeficientes foram primeiramente calibrados em relação à fenologia e, posteriormente, o período juvenil e reprodutivo da cultura. Uma vez, os coeficientes fenológicos foram calibrados e, portanto, o número simulado de dias disponíveis para o enchimento de grãos, o rendimento coeficientes de componentes foram ajustados para representar com a maior precisão possível a produtividade de grãos ($t\ ha^{-1}$) e a fitomassa ($t\ ha^{-1}$).

4.6. Análise Estatística

A análise da calibração do modelo consiste em empregar critérios estatísticos para verificar o desempenho do modelo calibrado. Para isso, baseou-se nos seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2); raiz do erro quadrático médio (RMSE), média do erro absoluto (MAE), índice “d” de Willmott (WILLMOTT, 1982) e eficiência do modelo de Nash e Sutcliffe (1970).

4.7. Geração e simulação dos cenários futuros

A simulação dos cenários de mudanças climáticas baseou-se na abordagem de projeções climática futura utilizada pelo projeto AgMIP (www.agmip.org), sendo a geração das projeções feita com apoio da equipe responsável pelas pesquisas climáticas do projeto AgMIP-The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project – utilizando um algoritmo em linguagem “R” (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011) que permite criar cenários futuros baseados nos RCP’s, assim como utilizado por Pinto (2015).

Trabalhou-se com três modelos de circulação global da atmosfera (GCM’s) regionalizada e dois cenários econômicos (ou de emissão) (RCP 4.5 e RCP 8.5) para o local onde as simulações foram conduzidas, para o período 2040-2069 (representando 2050). Os cenários futuros foram criados para cada local selecionado no Brasil em 10 pontos de simulação espalhados pelo Brasil, de modo a abranger as localidades de importância para a produção de

milho no Brasil. Foram selecionados cenários de emissão do RCP 4.5 e 8.5 permitindo a comparação com a série da linha de base (série climática atual) constituída por uma série de 30 anos de dados diários em cada localidade.

O RCP 4.5 é desenvolvido pela equipe de modelagem MiniCAM no Joint Global Change Research Institute (JGCRI) do Laboratório Nacional do Pacífico Noroeste. É um cenário que assume a possibilidade de estabilização nas concentrações de gases de efeito estufa até 2100, pelo emprego de uma gama de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Os drivers do cenário e as opções de tecnologia são detalhados em Clarke et al. (2007). Detalhes adicionais sobre a simulação de uso do solo e emissões de carbono terrestre são dados por Wise et al (2009).

O RCP 8.5 é desenvolvido pela equipe de modelagem MESSAGE e pelo Quadro de Avaliação Integrado IIASA no Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA), na Áustria. É caracterizado pelo aumento das emissões de gases efeito estufa, levando a altos níveis de concentração de gases de efeito estufa. Os drivers do cenário subjacente e o caminho de desenvolvimento resultante são baseados no cenário A2r detalhado em Riahi et al. (2007).

Para as simulações futuras referentes à primeira safra de milho a semeadura foi realizada no dia quinze de outubro e para as simulações com a segunda safra de milho, as simulações foram em quinze de fevereiro. A data de semeadura foi definida de modo a coincidir com a época em que a maior parte dos produtores do país realiza o plantio, de acordo com a CONAB (2016).

4.8. Delimitação das zonas homogêneas (ZH)

Os MCP's operam em escala local e sua operação demanda recursos computacionais relativamente grandes. Devido a essa complexidade do sistema, a demanda por dados de entrada e o grande número de cenários a serem simulados é necessário limitar o numero de pontos de simulação. Portanto, a delimitação de zonas homogêneas foi necessária para alocação mais adequada dos pontos de simulação (PINTO, 2015).

A fim de manter o compromisso com a representatividade climática das áreas, utilizou-se a metodologia proposta por van WART et al, (2013) e de solo por Soares (2015). Para a simulação, foram selecionados 10 (dez) locais representativos da produção brasileira de milho com uma série climática disponível de 30 anos (Tabela 3).

Foram utilizados dados de produtividade obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponíveis no Sistema IBGE de recuperação automática Levantamento

Sistemática da Produção Agrícola (<http://www.sidra.ibge.gov.br/>), considerando o dado em escala regional contido em cada região homogênea apresentada.

Tabela 3. Zonas homogêneas selecionadas com base na importância produtiva de milho para o Brasil.

ZH	Município	Estado	Solo predominante
8801	Diamantino	Mato Grosso	Argissolo Vermelho amarelo
8601	Rondonópolis	Mato Grosso	Argissolo Vermelho-amarelo
7601	Corumbáiba	Goiás	Argissolo Vermelho-amarelo
8701	Porangatu	Goiás	Latossolo Vermelho-amarelo
6801	Guarapuava	Paraná	Latossolo bruno
7701	Londrina	Paraná	Nitossolo Vermelho
8401	Barreiras	Bahia	Latossolo Vermelho-amarelo
6701	Bagé	Rio Grande do Sul	Argissolo Vermelho-amarelo
9101	Santa Maria	Rio Grande do Sul	Gleissolo
6901	Antônio Carlos	Santa Catarina	Argissolo Vermelho-amarelo

4.8.1. Seleção dos modelos de circulação climática global (GCM's)

Os modelos de circulação climática global (GCM's) utilizados neste estudo foram gerados pela equipe responsável pela parte climática do projeto AGMIP. Os cenários foram gerados com base no método Delta no qual os dados diários observados foram ajustados com os desvios mensais de temperatura do ar (diferença entre média mensal do GCM futuro e a série de linha de base) e a porcentagem de variação e chuva de cada mês (MARIN, 2014). Dessa forma, produziu-se um cenário climático futuro que reflete as variações projetadas de variação de chuva e temperatura, bem como as alterações esperadas nos padrões sazonais. Destaca-se que não foram simuladas alterações na radiação solar.

Com as séries históricas de cada estação modificada, os dados foram organizados em dois cenários de emissão e por modelo de circulação geral. Para as simulações das projeções cenárias futuras, com a CO₂ atmosférico concentração de 526 ppm e 628 ppm para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Os tratamentos foram replicados para cada estação e os resultados das simulações foram extraídos dos arquivos de saída dos modelos para avaliar o desempenho da cultura e produtividade nos cenários futuros. A linha de base das simulações foi constituída por uma série de 30 anos de dados diários, assumindo-se [CO₂] em torno de 373 ppm, de modo a representar o valor médio da série climática.

A seleção dos três modelos de circulação climática global (GCM's) utilizado no presente estudo baseou-se em cenários otimistas, prováveis de acontecerem e cenários pessimistas, tomando como os dados atuais como base a linha atual. Para cada ZH, analisou-se o padrão de desvio em relação à linha de base de cada um dos GCM's fornecido pelo CMIP5 através do algoritmo do AgMIP (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012) classificando-os como mínimo, médio e máximo, de acordo com o cenário climático futuro.

Classificaram-se como GCM's mínimo aqueles que demonstravam tendências de pequenas mudanças na temperatura do ar em relação ao clima atual, enquanto o médio e o máximo foram assim classificados por apontarem maiores desvios de temperatura em relação ao clima atual. Com as séries climáticas futuras criadas e formatadas, os dados foram organizados em dois cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5) e pelos modelos de circulação geral (Tabela 4).

Tabela 4. Descrição dos modelos de circulação global (GCM) selecionados para cada zona homogênea e sua classificação de acordo com o padrão de desvio em relação à linha de base.

Município	Desvio em relação à linha de base	GCM's	
		RCP 4.5	RCP 8.5
Diamantino-MT	Máximo	CanESM2	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	inmcm4	inmcm4
Rondonópolis/MT	Máximo	CanESM2	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	inmcm4	inmcm4
Corumbaituba/GO	Máximo	CanESM2	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	MRI-CGCM3	inmcm4
Porangatu/GO	Máximo	CSIRO-Mk3-6-0	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	inmcm4	inmcm4
Guarapuava/PR	Máximo	CanESM2	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	MIROC5	MRI-CGCM3
Londrina/PR	Máximo	CanESM2	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	NorESM1-M	MIROC5
Barreiras/BA	Máximo	MIROC-ESM	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	inmcm4	inmcm4
Bagé/RS	Máximo	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-MR
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	MIROC5	MIROC5
Santa Maria/RS	Máximo	IPSL-CM5A-MR	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	MIROC5	MIROC5
Antônio Carlos/SC	Máximo	CanESM2	CanESM2
	Médio	BNU-ESM	BNU-ESM
	Mínimo	MRI-CGCM3	inmcm4

5. RESULTADOS

5.1. Condições meteorológicas durante os experimentos

O estudo conduzido na safra de outono apresentou ciclo médio de 167 dias, período caracterizado em função do número de dias desde a semeadura até a maturidade fisiológica ou colheita (LUIZ GADIOLI et al., 2000). Os valores diários de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e precipitação (mm) ocorrida durante a condução do experimento estão apresentados na Figura 3a.

Durante o experimento de outono, observou-se temperatura média de 19,2 °C com variação entre 1,1 °C temperatura mínima, no mês de junho em que houve predominância de temperatura mínima abaixo de 10 °C, e temperatura máxima 38,5 °C observada no mês de outubro. A precipitação acumulada no período em que o experimento foi conduzido foi de 432 mm, sendo esta quantidade inferior à exigida para adequado crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, que varia entre é de 350-550 mm (FANCELLI e DOURADO-NETO, 2008).

O estudo conduzido na safra de verão, próximo ao posto meteorológico da ESALQ/USP apresentou ciclo de 146 dias. No entanto, apesar da utilização do mesmo material genético, o ciclo da planta foi inferior ao observados no experimento de outono podendo ser ocasionado devido a temperaturas superiores, pois, segundo Bergamaschi e Bergonci (2017) temperaturas elevadas aceleram o metabolismo vegetal, enquanto as baixas o reduzem e prolongam o ciclo das plantas. Os valores diários de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e precipitação (mm) durante a condução do experimento estão apresentados na Figura 3b.

No período do experimento conduzido na safra de verão, a temperatura média do ar foi de 24,0 °C com variação entre 11,5 °C na temperatura mínima e 33,5 °C na temperatura máxima. A precipitação total no período foi de 819 mm, quantidade superior à exigida pela cultura do milho, que segundo Fancelli e Dourado-Neto (2008) é de 350-550 mm quando cultivado no verão, portanto, na safra de verão não houve déficit hídrico no período do experimento.

Figura 3. Variação temporal da temperatura, chuva e radiação solar durante o ciclo da cultura do milho, referente ao experimento conduzido na safra de outono (a) e na safra de verão (b).

5.2. Análise estatística e calibração do modelo CERES-MAIZE

Primeiramente a calibração foi realizada com base no experimento de outono em cultivo irrigado, cadastrado na plataforma DSSAT, para analisar o comportamento dos coeficientes genéticos com ausência de stress hídrico. Posteriormente calibração dos coeficientes genéticos do modelo CERES-MAIZE foi realizada com base no experimento de outono e verão, em cultivo irrigado e sequeiro, concomitantemente.

5.2.1. Experimento de outono

A análise estatística referente ao experimento de outono (Tabela 5) indicou um ajuste satisfatório entre os dados medidos e simulados pelo modelo CERES-MAIZE, apresentando

boa precisão e acurácia. O índice *d* apresentou valores próximos a 1, o que indica uma perfeita concordância entre os valores observados e simulados.

O índice EF indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados e, para isso, quanto mais próximo de 1, mais similares são os valores previstos pelo modelo aos observados experimentalmente. Portanto, o desempenho do modelo em relação à média observada nos dados experimentais apresentou valores adequados.

Tabela 5. Análise estatística da calibração do modelo DSSAT/CERES-Maize referente ao experimento de outono, Irrigado e Sequeiro, instalado na Fazenda Areão, com semeadura em 07 de maio de 2016, Piracicaba-SP.

Variável analisada	Média		BIAS	RMSE	MAE	d	EF
	Observado	Simulado					
IRRIGADO							
Índice de Área Foliar	1,49	1,83	0,339	0,700	0,528	0,90	0,68
Altura de Planta	0,81	1,08	0,274	0,397	0,275	0,90	0,61
Massa vegetativa	3185	2824	-361,442	776,883	554,892	0,98	0,95
Fitomassa	4130	2902	-1228,360	2319,035	1421,640	0,91	0,77
SEQUEIRO							
Índice de Área Foliar	0,77	0,87	0,099	0,234	0,223	0,96	0,88
Altura de Planta	0,56	0,52	-0,044	0,148	0,123	0,97	0,89
Massa vegetativa	1506	1713	207,132	430,220	254,132	0,98	0,92
Fitomassa	1800	1734	-66,668	206,009	149,932	0,99	0,99

Após o processo de calibração do modelo DSSAT/CERES-Maize, pode-se observar os dados obtidos no experimento de campo, com e sem irrigação em comparação com os dados simulados pelo modelo. Com base nos resultados, para o índice de área foliar pode-se observar que o modelo apresentou superestimativa de 0,34 (Figura 4a) e de 0,1 (Figura 5a) para o cultivo em condições de irrigação e sequeiro, respectivamente, com base nos dados experimentais. Para a análise da altura de plantas, o modelo DSSAT/CERES-Maize superestimou os valores em 0,27 em cultivo irrigado (Figura 4b), porém, houve subestimativa de 0,04 (Figura 5b) em torno de 100 dias após semeadura, para o cultivo de sequeiro.

Com relação à análise de massa vegetativa de plantas, pode-se observar que o modelo subestimou os valores em cultivo irrigado em 361 kg ha⁻¹ (Figura 4c) e procedeu de modo inverso para o cultivo de sequeiro (Figura 5c), demonstrando valores inferiores ao observado em condições experimentais em 207 kg ha⁻¹. Para Fitomassa, o modelo DSSAT/CERES-Maize subestimou os dados em média de 1.228 kg ha⁻¹ no cultivo irrigado, mesmo demonstrando um acréscimo aos 110 dias (Figura 4d). Já para o cultivo de sequeiro (Figura 5d), observou-se subestimativa em média de 66 kg ha⁻¹, visto aos 120 dias. Assim, é razoável supor para os dados

obtidos experimentalmente que, apesar do ajuste satisfatório do modelo DSSAT/CERES-Maize para o presente estudo.

Figura 4. Variação temporal das simulações de crescimento do milho e dados experimentais coletados no experimento de outono, para índice de área foliar (a) e altura de planta (b) massa seca vegetativa (c) e fitomassa (d), Irrigado, semeado em 07 de maio de 2016 em Piracicaba, SP.

Figura 5. Variação temporal das simulações de crescimento do milho e dados experimentais coletados no experimento de outono, para índice de área foliar (a) e altura de planta (b) massa seca vegetativa (c) e fitomassa (d), Sequeiro, semeado em 07 de maio de 2016 em Piracicaba, SP.

5.2.2. Experimento de verão

Para o experimento de verão, irrigado e sequeiro foi observado ajuste satisfatório entre os dados obtidos em condições experimentais e observados pelo modelo DSSAT/CERES-Maize (Tabela 6). O índice d e o índice EF apresentaram valores próximos a 1, o que indica uma perfeita concordância entre os valores observados e simulados, exceto para a variável altura de planta que apresentou valores de EF igual a 0,71 em cultivo irrigado e 0,66 para cultivo de sequeiro.

Para altura de planta e fitomassa o modelo DSSAT/CERES-Maize apontou subestimativa para a altura de planta e fitomassa no tratamento irrigado e para altura de planta, massa seca vegetativa e fitomassa no tratamento sequeiro.

Tabela 6. Análise estatística da calibração do modelo referente ao experimento de verão, Irrigado e Sequeiro, instalado próximo ao posto meteorológico, com semeadura em 31 de outubro de 2016, Piracicaba-SP.

Variável analisada	Média		BIAS	RMSE	MAE	d	EF
	Observado	Simulado					
IRRIGADO							
Índice de Área Foliar	3,54	3,58	0,037	0,452	0,377	0,99	0,96
Altura de Planta	1,36	1,17	-0,184	0,230	0,413	0,89	0,71
Massa vegetativa	6800	6902	102,447	1481,749	1300,220	0,98	0,93
Fitomassa	11487	8409	-3077,708	3854,252	3077,708	0,96	0,87
SEQUEIRO							
Índice de Área Foliar	3,03	3,26	0,233	0,644	0,515	0,98	0,93
Altura de Planta	1,34	1,14	-0,200	0,575	0,480	0,86	0,66
Massa vegetativa	6937	6839	-97,652	1883,252	190,985	0,97	0,87
Fitomassa	11366	8409	-2956,818	3585,718	2956,818	0,96	0,88

Com base nos dados obtidos experimentalmente e simulados através do DSSAT/CERES-Maize, para a análise do índice de área foliar (IAF) das plantas, observou-se que o modelo superestimou em 0,04 (Figura 6a) para cultivo irrigado e em 0,23 para cultivo de sequeiro (Figura 7a). Para altura de planta, o resultado observado foi inverso, sendo observado subestimativa de 0,19 (Figura 6b) para cultivo irrigado e em 0,2 (Figura 7b), principalmente em torno de 50 dias após semeadura. Assim, as plantas simuladas pelo modelo DSSAT/CERES-Maize apresentaram porte reduzido quando comparadas com as plantas experimentais.

Com relação aos dados obtidos de massa vegetativa de plantas, pode-se observar que o modelo superestimou os valores em cultivo irrigado (Figura 6c) em 102 kg ha⁻¹ e procedeu de modo inverso para o cultivo de sequeiro (Figura 7c), demonstrando valores inferiores de 98 kg ha⁻¹ em relação ao observado em condições experimentais. Essa mesma repercussão foi observado para o experimento de outono. Para a análise da fitomassa, o modelo DSSAT/CERES-Maize subestimou os dados em ambos o sistemas de cultivo, irrigado em média de 3.078 kg ha⁻¹ (Figura 6d) enquanto que para o cultivo em sequeiro a subestimativa em média de 2.957 kg ha⁻¹ (Figura 7d).

Figura 6. Variação temporal das simulações de crescimento do milho e dados experimentais coletados no experimento de outono, para índice de área foliar (a) e altura de planta (b) massa seca vegetativa (c) e fitomassa (d), Irrigado, semeado em 31 de outubro de 2016 em Piracicaba, SP.

Figura 7. Variação temporal das simulações de crescimento do milho e dados experimentais coletados no experimento de outono, para índice de área foliar (a) e altura de planta (b) massa seca vegetativa (c) e fitomassa (d), Sequeiro, semeado em 31 de outubro de 2016 em Piracicaba, SP.

5.1. Análise dos cenários climáticos futuros

5.1.1. Primeira safra

Os dados meteorológicos futuros simulados em dez municípios ao longo de 30 anos, referente à primeira safra de milho, foram obtidos através da semeadura realizada no dia 15 (quinze) do mês de outubro, no qual compreende a época recomendada para o plantio, segundo a (CONAB, 2017). Com base na Tabela 7, pode-se observar a média da variação climática, em mm e °C, e a variação relativa (%) para os cenários estudados.

Ao caracterizar os cenários, de modo geral, nota-se que houve queda na precipitação e aumento na temperatura do ar para o RCP 4.5 e RCP 8.5. Com relação aos GCM's analisados, o GCM máximo foi o cenário em que os valores de temperatura do ar e precipitação mais se distanciaram da linha atual, sendo considerado pessimista enquanto o GCM mínimo foi otimista, com alterações reduzidas.

Tabela 7. Média da caracterização climática futura em relação ao clima atual.

	GCM mínimo			GCM médio			GCM máximo		
	RCP 4.5								
	PP	Tmáx	Tmín	PP	Tmáx	Tmín	PP	Tmáx	Tmín
	(mm)	(°C)	(°C)	(mm)	(°C)	(°C)	(mm)	(°C)	(°C)
Variação relativa (%)	-0.6	2.9	4.9	-10.7	6.4	7.6	-16.4	10.7	11.0
Variação (mm ou °C)	-0.2	0.8	1.0	-83.3	1.8	1.6	-119.9	3.1	2.3
	RCP 8.5								
	PP	Tmáx	Tmín	PP	Tmáx	Tmín	PP	Tmáx	Tmín
	(mm)	(°C)	(°C)	(mm)	(°C)	(°C)	(mm)	(°C)	(°C)
	(mm)	(°C)	(°C)	(mm)	(°C)	(°C)	(mm)	(°C)	(°C)
Variação relativa (%)	-2.4	4.8	8.3	-11.0	8.7	11.1	-23.9	16.0	15.8
Variação (mm ou C)	-19.5	1.4	1.7	-86.3	2.5	2.3	-182.7	4.5	3.2

A caracterização meteorológica individual de cada município é demonstrada na Tabela 8. Para quantificar a diferença entre os dados e analisar o quanto a variação absoluta representa no valor de grandeza na linha de base, foi realizada a análise de variação relativa para cada localidade e esta é apresentada na Tabela 9.

De acordo com a porcentagem de variação dos dados meteorológicos futuros com relação à linha de base, observou-se aumento da temperatura do ar para todos os cenários e municípios analisados. Para a precipitação, apenas os municípios localizados na região Sul do país apresentaram acréscimo no cenário RCP 4.5 e GCM mínimo e o município de Bagé-RS apontou aumento na precipitação para o GCM máximo em RCP 4.5e RCP 8.5.

Tabela 8. Média atual e variações introduzidas por cada modelo de circulação geral da atmosfera (GCM) utilizado para a geração do cenário RCP 4.5 e RCP 8.5 ao longo do ciclo da planta de milho cultivado na primeira safra.

Município	Atual			GCM mínimo			GCM médio			GCM máximo		
	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)
RCP 4.5												
Diamantino-MT	850.38	28.28	22.12	818.26	29.32	23.20	797.26	30.29	23.77	599.47	32.54	24.70
Rondonópolis-MT	771.42	29.38	22.50	761.36	30.34	23.68	712.80	31.50	24.24	557.68	33.28	24.98
Corumbaitaba-GO	581.38	31.05	24.02	571.20	32.24	25.26	553.62	33.07	25.67	424.13	35.39	27.11
Porangatu-GO	1028.39	27.83	21.44	978.24	28.66	22.51	849.30	29.96	23.27	978.24	28.66	22.51
Guarapuava-PR	864.33	24.73	16.50	869.69	25.18	17.51	779.90	26.22	17.89	754.89	27.18	18.66
Londrina-PR	726.58	27.70	19.95	754.01	28.72	20.52	664.00	29.35	21.39	547.41	31.59	22.38
Barreiras-BA	759.66	28.33	21.08	717.34	29.15	22.04	512.68	30.62	22.95	666.27	31.18	23.42
Bagé-RS	586.62	26.99	17.16	611.10	27.63	18.07	525.69	28.29	18.43	675.59	28.62	19.00
Santa Maria-RS	609.66	28.00	18.25	625.96	28.66	19.14	578.80	29.35	19.53	524.13	30.19	20.26
Antônio Carlos-SC	570.86	29.92	21.93	640.52	30.67	23.08	542.43	31.68	23.44	422.86	34.13	24.49
RCP 8.5												
Diamantino-MT	850,38	28,28	22,12	793.84	29.80	23.88	772.01	31.03	24.48	593.60	33.57	25.59
Rondonópolis-MT	771,42	29,38	22,50	733.54	30.86	24.27	696.92	32.18	24.95	540.91	34.21	25.70
Corumbaitaba-GO	581,38	31,05	24,02	547.86	32.80	26.08	538.45	33.88	26.36	407.47	36.42	27.90
Porangatu-GO	1028,39	27,83	21,44	941.93	29.37	23.24	832.65	30.72	24.22	687.15	32.18	24.55
Guarapuava-PR	864,33	24,73	16,50	924.67	26.33	18.34	808.96	26.78	18.49	722.58	28.66	19.55
Londrina-PR	726,58	27,70	19,95	720.94	28.90	21.51	621.07	30.06	22.07	521.31	33.45	23.43
Barreiras-BA	759,66	28,33	21,08	698.69	29.67	22.75	509.60	31.32	23.80	484.56	32.63	24.17
Bagé-RS	586,62	26,99	17,16	617.94	27.77	18.32	580.04	28.64	18.90	653.60	29.32	19.74
Santa Maria-RS	609,66	28,00	18,25	647.39	28.83	19.48	624.61	29.71	20.19	519.33	31.70	21.22
Antônio Carlos-SC	570,86	29,92	21,93	527.74	31.54	23.99	502.01	32.55	24.18	391.34	35.38	25.40

Tabela 9. Porcentagem no aumento na chuva, temperatura máxima e temperatura mínima quando comparado à média dos cenários futuros média com a média na linha de base.

Município	GCM mínimo			GCM médio			GCM máximo		
	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
RCP 4.5									
Diamantino-MT	-3.8	3.7	4.9	-6.2	7.1	7.5	-29.5	15.1	11.7
Rondonópolis-MT	-1.3	3.2	5.2	-7.6	7.2	7.7	-27.7	13.3	11.0
Corumbaba-GO	-1.8	3.8	5.2	-4.8	6.5	6.9	-27.0	14.0	12.9
Porangatu-GO	-4.9	3.0	5.0	-17.4	7.6	8.5	-4.9	3.0	5.0
Guarapuava-PR	0.6	1.8	6.1	-9.8	6.0	8.4	-12.7	9.9	13.1
Londrina-PR	3.8	3.7	2.9	-8.6	6.0	7.3	-24.7	14.1	12.2
Barreiras-BA	-5.6	2.9	4.6	-32.5	8.1	8.9	-12.3	10.1	11.1
Bagé-RS	4.2	2.4	5.3	-10.4	4.8	7.4	15.2	6.1	10.7
Santa Maria-RS	2.7	2.4	4.8	-5.1	4.8	7.0	-14.0	7.8	11.0
Antônio Carlos-SC	12.2	2.5	5.2	-5.0	5.9	6.9	-25.9	14.1	11.6
RCP 8.5									
Diamantino-MT	-6.6	5.4	8.0	-9.2	9.7	10.7	-30.2	18.7	15.7
Rondonópolis-MT	-4.9	5.0	7.9	-9.7	9.5	10.9	-29.9	16.4	14.2
Corumbaba-GO	-5.8	5.6	8.6	-7.4	9.1	9.8	-29.9	17.3	16.2
Porangatu-GO	-8.4	5.5	8.4	-19.0	10.4	13.0	-33.2	15.6	14.5
Guarapuava-PR	7.0	6.5	11.2	-6.4	8.3	12.0	-16.4	15.9	18.5
Londrina-PR	-0.8	4.3	7.8	-14.5	8.5	10.6	-28.3	20.8	17.5
Barreiras-BA	-8.0	4.7	7.9	-32.9	10.6	12.9	-36.2	15.2	14.7
Bagé-RS	5.3	2.9	6.8	-1.1	6.1	10.1	11.4	8.6	15.0
Santa Maria-RS	6.2	3.0	6.8	2.5	6.1	10.6	-14.8	13.2	16.3
Antônio Carlos-SC	-7.6	5.4	9.4	-12.1	8.8	10.2	-31.4	18.2	15.8

5.1.2. Segunda safra

Os dados meteorológicos futuros simulados em nove municípios ao longo de 30 anos, referente à segunda safra de milho, foram obtidos através da semeadura realizada no dia 15 (quinze) do mês de janeiro, época recomendada atualmente para o plantio, que varia entre os meses de janeiro a abril, período compreendido logo após o cultivo da soja precoce. A média da variação climática em mm e °C e a variação relativa (%), de acordo com cada cenário analisado são demonstradas na Tabela 10.

Ao caracterizar os cenários, de modo geral, pode-se observar redução na precipitação em todos os cenários, exceto para o GCM mínimo no RCP 4.5. Redução intensa na incidência de chuvas foi observada no RCP 8.5, principalmente para o GCM máximo. Em relação à temperatura do ar, pode-se observar aumento, exceto no GCM mínimo no RCP 8.5. Para os demais cenários analisados, foram observados elevação na temperatura, sendo esta mais acentuada no GCM máximo em ambos RCP's.

Tabela 10. Caracterização climática do clima futuro em relação ao clima atual para a segunda safra de milho, com semeadura em 15 de janeiro.

	GCM mínimo			GCM médio			GCM máximo		
				RCP 4.5					
	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
Variação relativa (%)	5.9	3.0	6.1	-7.9	7.7	11.7	-15.0	13.4	17.2
Variação (mm ou C)	34.6	0.8	1.1	-55.9	1.9	2.0	-97.7	3.5	3.0
				RCP 8.5					
	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
Variação relativa (%)	-10.2	-2.1	-1.2	-11.9	2.0	3.4	-25.1	10.3	9.9
Variação (mm ou C)	-81.2	-0.5	-0.1	-100.0	0.6	0.8	-194.5	3.0	2.1

A caracterização meteorológica individual dos municípios é demonstrada na Tabela 11. Para a análise dos percentuais, assim como realizado para a primeira safra de milho, foi feita a análise da variação relativa para quantificar a diferença entre os dados e o quanto a variação absoluta representa na linha de base que representa em forma de percentual as variações na precipitação e temperatura do ar nos cenários futuros.

A variação relativa para o cultivo de segunda safra é demonstrado na Tabela 12. Ao caracterizar os municípios pode-se observar aumento na precipitação no RCP 4.5 e GCM mínimo para todas as localidades, exceto para o município de Bagé-RS que houve redução de 2,1%. Para o RCP 8.5 houve redução na precipitação para todas as localidades, exceto para o município de Guarapuava-PR no GCM mínimo e GCM médio, Bagé-RS em todos os GCM's e Santa Maria nos GCM's médio e mínimo.

Tabela 11. Média atual e variações introduzidas por cada modelo de circulação geral da atmosfera (GCM) utilizado para a geração do cenário RCP 4.5 e RCP 8.5 ao longo do ciclo da planta de milho cultivado na segunda safra.

Município	Atual			GCM mínimo			GCM médio			GCM máximo		
	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	PP (mm)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)
RCP 4.5												
Diamantino-MT	716.49	27.74	21.40	730.07	28.32	22.48	711.46	29.28	22.87	517.35	32.17	24.22
Rondonópolis-MT	644.26	28.75	21.59	666.22	29.34	22.68	638.46	30.30	22.99	499.60	32.73	24.31
Corumbá-MS	578.56	29.45	22.80	656.10	30.54	24.13	560.35	31.13	24.30	454.62	34.23	26.07
Porangatu-GO	785.89	27.91	21.09	806.36	28.40	22.11	702.13	29.24	22.43	806.36	28.40	22.11
Guarapuava-PR	870.65	21.53	12.67	1025.70	22.06	13.90	772.40	23.62	15.05	808.04	23.91	15.66
Londrina-PR	561.02	25.84	18.13	600.69	27.26	18.82	491.09	28.00	20.24	494.26	29.76	21.47
Barreiras-BA	555.65	27.65	20.54	608.78	27.95	21.57	508.97	28.97	22.01	579.12	29.93	22.42
Bagé-RS	789.57	21.99	13.34	772.95	22.56	14.23	707.00	24.43	16.11	703.39	25.32	16.99
Santa Maria-RS	735.96	23.87	14.93	747.34	24.53	15.91	633.31	26.60	17.90	607.59	27.29	18.53
Antônio Carlos-SC	478.54	28.32	20.55	467.12	29.60	22.15	441.78	30.26	22.25	390.20	33.27	23.96
RCP 8.5												
Diamantino-MT	850.38	28.28	22.12	718.27	28.69	22.94	737.85	29.97	23.72	511.98	33.04	24.93
Rondonópolis-MT	771.42	29.38	22.50	656.82	29.70	23.10	635.16	31.01	23.82	495.76	33.75	25.07
Corumbá-MS	581.38	31.05	24.02	529.06	31.03	24.30	571.53	31.99	25.24	442.28	35.39	26.88
Porangatu-GO	1028.39	27.83	21.44	806.09	28.67	22.59	701.68	30.02	23.10	654.52	31.39	23.71
Guarapuava-PR	864.33	24.73	16.50	901.83	23.25	14.93	807.34	24.14	15.64	713.13	25.48	16.62
Londrina-PR	726.58	27.70	19.95	466.03	28.03	20.45	474.38	28.81	21.07	484.10	31.29	22.40
Barreiras-BA	759.66	28.33	21.08	593.60	28.42	22.05	525.52	29.76	22.72	496.82	31.21	23.23
Bagé-RS	586.62	26.99	17.16	691.65	23.68	15.34	716.97	24.90	16.63	646.59	26.17	18.17
Santa Maria-RS	609.66	28.00	18.25	686.99	25.61	17.00	612.70	27.20	18.66	524.31	29.78	20.23
Antônio Carlos-SC	570.86	29.92	21.93	402.40	30.38	22.16	431.96	31.23	23.14	366.41	34.39	24.80

Tabela 12. Variação percentual no volume anual de chuvas, temperatura máxima e temperatura mínima oriunda dos cenários climáticos futuros em relação à linha de base.

Município	GCM mínimo			GCM médio			GCM máximo		
	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	PP (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
RCP 4.5									
Diamantino-MT	1.9	2.1	5.0	-0.7	5.6	6.9	-27.8	16.0	13.2
Rondonópolis-MT	3.4	2.1	5.1	-0.9	5.4	6.5	-22.5	13.8	12.6
Corumbá-GO	13.4	3.7	5.8	-3.1	5.7	6.6	-21.4	16.2	14.4
Porangatu-GO	2.6	1.8	4.9	-10.7	4.8	6.4	2.6	1.8	4.9
Guarapuava-PR	17.8	2.5	9.7	-11.3	9.7	18.8	-7.2	11.1	23.6
Londrina-PR	7.1	5.5	3.8	-12.5	8.4	11.6	-11.9	15.2	18.4
Barreiras-BA	9.6	1.1	5.0	-8.4	4.8	7.1	4.2	8.2	9.2
Bagé-RS	-2.1	2.6	6.7	-10.5	11.1	20.8	-10.9	15.1	27.3
Santa Maria-RS	1.5	2.8	6.6	-13.9	11.4	19.9	-17.4	14.3	24.1
Antônio Carlos-SC	7.6	4.5	7.8	-7.7	6.8	8.3	-18.5	17.5	16.6
RCP 8.5									
Diamantino-MT	-15.5	1.5	3.7	-13.2	6.0	7.2	-39.8	16.8	12.7
Rondonópolis-MT	-14.9	1.1	2.7	-17.7	5.5	5.9	-35.7	14.9	11.4
Corumbá-GO	-9.0	-0.1	1.2	-1.7	3.0	5.1	-23.9	14.0	11.9
Porangatu-GO	-21.6	3.0	5.4	-31.8	7.9	7.8	-36.4	12.8	10.6
Guarapuava-PR	4.3	-6.0	-9.5	-6.6	-2.4	-5.2	-17.5	3.0	0.7
Londrina-PR	-35.9	1.2	2.5	-34.7	4.0	5.6	-33.4	13.0	12.3
Barreiras-BA	-21.9	0.3	4.6	-30.8	5.0	7.8	-34.6	10.2	10.2
Bagé-RS	17.9	-12.3	-10.6	22.2	-7.7	-3.1	10.2	-3.0	5.9
Santa Maria-RS	12.7	-8.5	-6.8	0.5	-2.8	2.2	-14.0	6.4	10.8
Antônio Carlos-SC	-29.5	1.5	1.0	-24.3	4.4	5.5	-35.8	14.9	13.1

5.2. Cenários agrícolas de produtividade de milho

5.2.1. Primeira safra

Com base no estudo realizado com a produtividade de milho cultivado na primeira safra, pode-se observar que houve redução nos rendimentos do grão para o período de simulação em todos os cenários futuros analisados (Figura 8). De modo geral, para o RCP 4.5 e RCP 8.5, percentuais proeminentes de redução foi observada no GCM máximo onde houve um expressivo aumento na temperatura do ar e queda acentuada na precipitação para a maioria das localidades. Nestes cenários, em que houve redução expressiva no rendimento, os percentuais foram entre 4-42% para cultivo irrigado e de 5-55% para cultivo em sequeiro, com os maiores percentuais observados para o RCP 8.5.

Dentre os cenários futuros que apresentou percentuais relativamente baixos de queda nos rendimentos, entre os RCP's e GCM's, foi o RCP 4.5 e GCM mínimo, considerado como

um cenário futuro comparativamente otimista, mantendo-se próximo à linha atual, com percentuais de redução em torno de 4-8% para cultivo irrigado e de 0-5% para cultivo de sequeiro.

De modo geral, dentre todos os GCM's analisados, para o RCP 4.5, a redução foi de 4-25% em cultivo irrigado e de 0-29% para cultivo de sequeiro. Já para o RCP 8.5 a redução foi entre 8-42% em cultivo irrigado e de 5-55% em cultivo de sequeiro. Desse modo, em cenários com ausência de irrigação e ocorrência do aumento na temperatura, a queda no rendimento de milho é mais pronunciada, evidenciando que as práticas de irrigação podem ser uma alternativa para minimizar o efeito da temperatura consequentemente a queda de produtividade.

Figura 8. Variação percentual nos rendimentos de grão de milho, primeira safra, em comparação com a linha de base.

Comparando os rendimentos de milho da linha de base com os rendimentos nos cenários futuros, pode-se observar o desempenho para RCP 4.5 (Figura 9) e RCP 8.5 (Figura 10) em cada município estudado. Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017) em termos de área colhida a região Nordeste apresenta o maior percentual em produção de milho primeira safra do país, responsável por um percentual de 80,7%, seguido pela região Sudeste (61,6%), Norte (56,3%), Sul (41,5%) e por fim a região Centro-Oeste (4,74%). Assim, as regiões analisadas no presente estudo foram caracterizadas com base na representatividade de produtividade em cada região com uma série histórica consistente de dados meteorológicos.

No município de Barreiras-BA, região nordeste do país, o rendimento médio foi em torno de 6.500 kg ha^{-1} (108 sc ha^{-1}) na linha de base para cultivo irrigado e de 6.270 kg ha^{-1} (104 sc ha^{-1}) para cultivo de sequeiro enquanto que, segundo o levantamento do IBGE (2017b) a produtividade média por hectare para a região é de 6.500 kg ha^{-1} (108 sc ha^{-1}). Desse modo, o modelo DSSAT/CERES-Maize apresentou um ajuste satisfatório ao simular o cenário atual para a região.

Para o município acima citado, no cenário RCP 4.5 e GCM mínimo, houve redução de 1-2% nos rendimentos de milho em relação à linha de base, para cultivo irrigado e sequeiro, enquanto o GCM máximo apontou redução de 12% para cultivo irrigado e 8% para cultivo de sequeiro. No cenário RCP 8.5 e GCM máximo, as perdas foram de 31% em cultivo irrigado e 36% no cultivo de sequeiro. Já para o GCM mínimo, o percentual de redução foi de 5% para irrigado e 2% para cultivo de sequeiro.

Na região Sul do país, ao simular os dados atuais, a linha de base apontou rendimento médio de 8.200 kg ha^{-1} (136 sc ha^{-1}) para cultivo irrigado e de 6.500 kg ha^{-1} (108 sc ha^{-1}) para cultivo de sequeiro. Com isso, pode-se observar que os dados apresentaram variação de produtividade entre os sistemas de manejo. De acordo com o levantamento realizado pelo IBGE (2017) a produtividade média estimada para a região é de 7.000 kg ha^{-1} (116 sc ha^{-1}).

Para as simulações futuras realizadas no estado do Paraná os municípios de Guarapuava e Londrina demonstraram redução nos rendimentos nos cenários futuros para o período de cultivo analisado. Contudo, redução acentuada foi observada em Londrina para o RCP 8.5 nos GCM's máximo e médio, principalmente em cultivo de sequeiro.

Em Guarapuava houve redução de 2% para o GCM mínimo e 10% para o GCM máximo no cultivo irrigado e, em sequeiro o percentual de redução foi de 0,4% no GCM mínimo e de 13% no GCM máximo, ambos para o RCP 4.5. No RCP 8.5 a redução foi de 6% para o GCM mínimo e de 17% para o GCM máximo em cultivo irrigado, enquanto que no cultivo de sequeiro os percentuais de redução nos rendimentos foram de 5% no GCM mínimo e de 21% para o GCM máximo.

As simulações realizadas no município de Londrina apontaram redução de 3% para o GCM mínimo e 22% para o GCM máximo, no RCP 4.5 e cultivo irrigado enquanto no sequeiro o percentual foi de 27% no GCM máximo. Para o RCP 8.5, GCM máximo no cultivo irrigado a redução foi de 48% e no cultivo de sequeiro 54%.

No Rio Grande do Sul, o município de Bagé e Santa Maria também apontou redução nos rendimentos para alguns cenários. Para o RCP 4.5, no sistema de cultivo irrigado o percentual de queda mostrou-se em 1% ($1-3 \text{ sc ha}^{-1}$) para o GCM mínimo e 12-16% ($15-20 \text{ sc}$

ha⁻¹) para o GCM máximo. Em Bagé, sob cultivo de sequeiro foram observados aumento de 22% nos rendimentos para o GCM mínimo e queda de 1% no GCM máximo. No município de Santa Maria houve aumento de 10% para o GCM mínimo e redução de 28% no GCM máximo.

No cenário RCP 8.5, em Bagé houve redução em 16% nos rendimentos para o GCM máximo e queda de 4%, no GCM mínimo em cultivo irrigado. Em sequeiro, observou-se redução de 12% para o GCM mínimo. Já no município de Santa Maria, houve redução acentuada nos rendimentos em percentual de 41% para o GCM máximo e queda de 5% no GCM mínimo, em cultivo irrigado. Em sequeiro, houve redução de 57% para o GCM máximo sem redução nos rendimentos para o GCM mínimo.

O município de Antônio Carlos-SC, o cenário RCP 4.5 apontou redução nos rendimentos em 8% para o GCM mínimo e 43% para o GCM máximo, em cultivo irrigado. Já para o cultivo de sequeiro, a redução foi acentuada para o GCM máximo, com percentual de 64% e para o GCM mínimo foi reduzido em 1%. No cenário RCP 8.5, foi observada redução acentuada nos rendimentos acima de 60% em cultivo de sequeiro, para o GCM máximo, enquanto que para o GCM mínimo a redução foi de 9% irrigado e 5% sequeiro.

As simulações realizadas na região Centro-Oeste do país apontaram rendimento médio de aproximadamente 6.500 kg ha⁻¹ (108 sc ha⁻¹) para a linha de base em cultivo irrigado e de 6.270 kg ha⁻¹ (104 sc ha⁻¹) para cultivo de sequeiro. Esses rendimentos, no entanto, são inferiores a média indicada pelo levantamento do IBGE (2017) equivalente a 7.524 kg ha⁻¹ (125 sc ha⁻¹) por hectare. Contudo, as simulações futuras realizadas na região apontaram redução nos rendimentos no cultivo de primeira safra para a região.

Para as simulações realizadas nos municípios de Diamantino-MT e Rondonópolis-MT, o cenário RCP 4.5, apresentou redução de 31-32%, equivalente a 26-27 sc ha⁻¹ para o GCM máximo enquanto que, para o GCM mínimo, percentual de 5-6%, para os sistemas de cultivo irrigado e sequeiro. No RCP 8.5, em cultivo irrigado houve redução de 57-59% para o GCM máximo enquanto que para o GCM mínimo a redução foi de 7-9% em cultivo irrigado.

Para o estado de Goiás, as simulações foram realizadas nos municípios de Corumbá e Porangatu. Em Corumbá-GO, o cenário RCP 4.5 apresentou redução de 70% para o GCM máximo enquanto que para o GCM mínimo, a redução foi de 12% em cultivo irrigado. No cultivo de sequeiro, o GCM máximo apontou redução drástica com um percentual de 82% GCM máximo e no GCM mínimo, a redução foi de 13%. No cenário RCP 8.5, em cultivo irrigado, apresentou redução de 23% em cultivo irrigado e sequeiro, para o GCM mínimo.

O município de Porangatu-GO, no entanto, apesar de ter demonstrado redução nos rendimentos, estes foram sucintos aos resultados observados em Diamantino. O cenário RCP

4.5 apontou redução de 3% para o GCM máximo e GCM mínimo, em cultivo irrigado e sequeiro. No cenário RCP 8.5 apresentou redução de 24% para o GCM máximo em cultivo irrigado e de 23% em sequeiro, enquanto que para o GCM mínimo, o percentual foi de 6% e um percentual de 5% em cultivo de sequeiro.

Figura 9. Produtividade de grãos para RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e sequeiro (b).

Figura 10. Produtividade de grãos para RCP 8.5 em cultivo irrigado (a) e sequeiro (b).

5.2.2. Risco de produção para os cenários agrícolas: milho de primeira safra

A título de exemplo foram utilizadas as mesmas localidades analisadas no item anterior e tomou a referência para comparação o percentual de 80% de probabilidade de ocorrência.

No estado da Bahia, no município de Barreiras (Figura 11), para as simulações no período analisado, o modelo projetou redução de 14% nos rendimentos para o cenário RCP 4.5 e de 27% no RCP 8.5, ambos para o GCM máximo em sistema de cultivo irrigado. Para o GCM mínimo, as perdas foram em torno de 3% no RCP 4.5 e de 8% no RCP 8.5 e cultivo irrigado.

Riscos elevados de redução nos rendimentos foram observados em cultivo de sequeiro, principalmente no GCM máximo e RCP 8.5.

Figura 11. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Barreiras-BA, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

No Paraná, município de Guarapuava (Figura 12), em RCP 4.5 e GCM máximo os cenários de produtividade de milho primeira safra foram desfavoráveis, com aumento acentuado na temperatura do ar. No GCM máximo houve queda de 10% e no GCM mínimo redução de 15%, ambos para cultivo irrigado e sequeiro. No RCP 8.5, o GCM máximo apontou redução de 9% para cultivo irrigado e 11% para cultivo de sequeiro, enquanto no GCM mínimo a redução foi de 16% para ambos os sistemas de cultivo.

Figura 12. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Guarapuava-PR, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Em Londrina-PR (Figura 13) a 80% de probabilidade observou que houve que para o RCP 4.5 e GCM máximo o modelo projetou redução de produtividade de 20% em cultivo irrigado e sequeiro e para o GCM mínimo a redução nos rendimentos foi de 1% para cultivo irrigado e aumento de 1% em cultivo de sequeiro. No RCP 8.5, GCM máximo, o modelo projetou drástica redução nos rendimentos, com percentuais de 27% para sistema irrigado e 30% para sistema de sequeiro.

Figura 13. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Londrina-PR, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (b) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o estado do Rio Grande do Sul, para o município de Bagé-RS (Figura 14), no RCP 4.5 RCP 8.5 no GCM máximo o modelo projetou risco de redução de 14% em cultivo irrigado e de 9-10% em cultivo de sequeiro para ambos os cenários. Para o GCM mínimo, o modelo houve queda de 1% para cultivo irrigado e 16% para cultivo de sequeiro, em RCP 4.5. No RCP 8.5 e GCM mínimo, as reduções foram de 1% cultivo irrigado e 5% no cultivo de sequeiro.

Figura 14. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Bagé-RS, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (b) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o município de Santa Maria-RS (Figura 15), no RCP 4.5 GCM máximo observou-se redução de 16% em cultivo irrigado e 6% em cultivo de sequeiro enquanto que para o GCM mínimo houve queda de 4% para cultivo irrigado e aumento de 7% no cultivo de sequeiro. Para o RCP 8.5, o GCM máximo apontou redução de 27-28% para ambos para cultivo irrigado e sequeiro e para as simulações no GCM mínimo o modelo projetou baixo risco de queda nos rendimentos.

Figura 15. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Santa Maria-RS, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (b) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Em Antônio Carlos-SC (Figura 16) o, para o RCP 4.5 e GCM máximo observou-se redução de 31% em cultivo irrigado e de 36% em cultivo de sequeiro. Já para o RCP 8.5 redução observada foi mais acentuada, com um percentual médio de 44% (56-57 sc ha⁻¹) em sistema irrigado e sequeiro. Para o GCM mínimo, RCP 4.5 observou-se redução de 9% em cultivo de sequeiro e de 5% em cultivo de sequeiro e para o RCP 8.5 a redução foi de 9% em cultivo irrigado e 6% para cultivo de sequeiro.

Figura 16. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Antônio Carlos-RS, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o Município de Diamantino-MT (Figura 17) o modelo projetou risco de produção de milho na região principalmente para o GCM máximo. Para o RCP 4.5, o GCM máximo demonstrou uma redução nos rendimentos de 15% para os cultivos irrigado e sequeiro, em comparação com a linha de base e, para o RCP 8.5 a redução foi de 34 % e 7% em cultivo irrigado e sequeiro, respectivamente. Para o GCM médio e GCM mínimo, no entanto, os cenários foram favoráveis, sendo observado um acréscimo e torno de 4% para ambos os sistemas cultivos, no RCP 4.5.

Figura 17. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Diamantino-MT, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o município de Rondonópolis-MT (Figura 18), o modelo projetou risco de produção de milho baseado cenário atual, principalmente no GCM máximo. Porém este foi mais evidente para esta região quando comparado a Diamantino-MT. Redução em torno de 21% foi observada no RCP 4.5 e de 31% para o RCP 8.5 ambos no GCM máximo, em ambos os sistemas de cultivo, explicitando assim a interferência na temperatura do ar em rendimentos satisfatórios de milho. Para o RCP 4.5, GCM médio e GCM mínimo, observou-se redução de 1% e 4% respectivamente, em ambos os sistemas de cultivo. Para o RCP 8.5, GCM médio e GCM mínimo, observou-se redução de 7% e 5%, respectivamente, em ambos os sistemas de cultivos.

Figura 18. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Rondonópolis-MT, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

No estado de Goiás, para as condições do município de Corumbáiba (Figura 19), o GCM máximo apresentou redução drástica nos rendimentos de milho, principalmente no RCP 8.5. Para o RCP 4.5 GCM máximo foi observado redução de 36% para cultivo irrigado de 42% em cultivo de sequeiro. No RCP 8.5 a redução foi, em média, de 61% para ambos os sistemas de cultivo. Para o GCM médio e mínimo, observou-se redução de 10% e 9% para o RCP 4.5 e de 21% e 18% para RCP 8.5, para os dois sistemas de cultivo.

Figura 19. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Corumbáiba-GO, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para a região de Porangatu-GO (Figura 20), apesar de serem observada redução nos rendimentos, estes foram inferiores ao observados em Corumbáiba-GO. Para o RCP 4.5 e GCM máximo foi observado redução de 6% em cultivo irrigado e de 3% em cultivo de sequeiro. Já no RCP 8.5 a redução nos rendimentos foi, em média, de 14,9% em cultivo irrigado e de 20% em cultivo de sequeiro. Para o RCP 4.5 GCM mínimo, observou-se redução de 5% para cultivo irrigado e 3% para cultivo de sequeiro. No RCP 8.5, GCM mínimo cultivo de sequeiro houve redução de 7% e de 8% no cultivo irrigado.

Figura 20. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de primeira safra, para o município de Porangatu-GO, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

5.2.3. Segunda safra

Ao comparar os rendimentos de milho segunda safra com os rendimentos nos cenários futuros, de modo geral, pode-se notar queda nos rendimentos para o RCP 8.5 no GCM máximo em cultivo irrigado e, principalmente no cultivo de sequeiro, conforme demonstrado na Figura 21. Assim, pode-se dizer que o percentual mais elevado de perdas foi nos cenários em que houve um expressivo aumento na temperatura do ar e queda acentuada na incidência de chuvas. Nestes cenários em que houve redução expressiva nos rendimentos, os percentuais sucederam de 24-41% para cultivo irrigado e de 47-54% para cultivo em sequeiro.

De modo geral, o GCM máximo apresentou redução no rendimento dos grãos entre 24-41% no RCP 4.5 e 47-54% no RCP 8.5 para ambos os cultivos, irrigado e sequeiro. Para o GCM mínimo, em média, observou-se incremento no rendimento de grãos, com percentuais em torno de 1-5% para RCP 4.5 e de 0-2% para RCP 8.5 para cultivo irrigado e sequeiro.

No cenário RCP 4.5 e GCM mínimo houve acréscimo nos rendimentos em percentuais de 1% no cultivo irrigado e 5% no cultivo de sequeiro. Porém, no RCP 8.5 não foram observadas alterações nos rendimentos no cultivo irrigado e acréscimo de 2% nos rendimentos em cultivo de sequeiro. Desse modo, em cenários com ausência de irrigação não foi fator limitante de produtividade, considerando o aumento na temperatura do ar.

Figura 21. Variação nos rendimentos de grão de milho, segunda safra de milho, com base em cada RCP, em cultivo irrigado (I) e sequeiro (S).

Comparando os rendimentos de milho segunda safra da linha de base com os rendimentos nos cenários futuros pode-se observar o desempenho para o cenário RCP 4.5 (Figura 22) e para o RCP 8.5 (Figura 23) em cada município estudado. Segundo os dados do IBGE (2017) em termos de área colhida a região Centro-Oeste apresenta o maior percentual em área de milho na segunda safra do país, sendo responsável por um percentual de 95,26 da sua produção total, seguido pela região Sul (58,49), Sudeste (38,38), Norte (43,68) e por fim a região Nordeste (19,23).

As simulações realizadas na região Centro-Oeste do país apontaram rendimento médio de aproximadamente de 6.300 kg ha⁻¹ (105 sc ha⁻¹) para a linha de base em cultivo

irrigado e de 5.700 kg ha⁻¹ (95 sc ha⁻¹) para cultivo de sequeiro. Esses rendimentos, no entanto, são superiores a média indicada pelo levantamento do IBGE (2017) equivalente a 3.852 kg.ha⁻¹ (64 sc ha⁻¹) por hectare. As simulações futuras realizadas na região apontaram redução nos rendimentos no cultivo de segunda safra para a região.

Vale destacar que segundo a CONAB (2017), no ano de 2017, o estado do Mato Grosso atingiu recorde de rendimento, de 6.212 kg ha, número 55,3% superior aos 3.999 kg ha da safra 2015/16. Esse aumento ocorreu em função da ocorrência de chuvas regulares após a janela ideal de plantio e a disponibilidade de insumos, que permitiu a semeadura do cereal até o final de março.

Os municípios de Diamantino-MT e Rondonópolis-MT apontaram, acentuada redução nos rendimentos para o GCM máximo em cultivo irrigado e sequeiro. No RCP 4.5 e GCM máximo a redução foi em média de 69% para cultivo irrigado e em sequeiro. No GCM mínimo, a redução média foi de 7% em cultivo irrigado e de 5% em cultivo de sequeiro. No RCP 8.5 e GCM máximo, a produtividade de grãos foi severamente afetada e, no GCM mínimo as perdas foram de 11% no cultivo irrigado e de 8% em sequeiro.

Para o estado de Goiás, as simulações foram realizadas nos municípios de Corumbáiba e Porangatu. Em Corumbáiba-GO, com o aumento acentuado na temperatura do ar, especificamente no GCM máximo, segunda as simulações, o local é severamente afetado, com comprometimento total dos rendimentos. Contudo no cenário RCP 4.5 no GCM mínimo houve redução de 10% no cultivo irrigado e 7% no cultivo de sequeiro. No RCP 8.5 a redução foi de 18% em ambos os sistemas de cultivo.

Em Porangatu, o cenário RCP 4.5 apontou redução de 6% para o GCM máximo e GCM mínimo, e aumento de 1% em cultivo de sequeiro e irrigado. Para o RCP 8.5 houve redução de 49% para GCM máximo e 10% para GCM mínimo, em cultivo irrigado. No sequeiro, a redução foi de 32% para GCM máximo e aumento de 1% para GCM mínimo.

Para a região sul do país, a linha de base apresentou rendimento médio em torno de 6.000 kg.ha⁻¹ para cultivo irrigado e 5.500 kg.ha⁻¹ para cultivo de sequeiro. Destaca-se que os dados de rendimento da linha de base apresentaram-se superior a média de produtividade para a região que, segundo o levantamento do IBGE (2017) a produtividade por hectare para a região é de 4.897 kg ha⁻¹. A Região Sul do país, segunda maior produtora nacional, tem o Paraná como único representante, com produtividade estimada em 5.711 kg/ha, com aumento de 12,2% em relação à safra anterior. Contudo, destaca-se que na safra anterior houve perdas devido à estiagem e geadas (CONAB, 2017).

Para município de Guarapuava-PR e Bagé-RS, foram observado acréscimo na produtividade de grãos para todos cenários simulados, demonstrando assim, condições favoráveis de cultivo de milho segunda safra na região. O município de Santa Maria apontou acréscimo nos para todos os GCM's apenas para o RCP 4.5

Para o município de Guarapuava, no RCP 4.5, em cultivo irrigado, observou-se aumento de 44% foram observados no GCM máximo e 30% no GCM mínimo. Em cultivo de sequeiro, observou-se acréscimo de 45% (68 sc ha⁻¹) para GCM máximo e de 33% para GCM mínimo. Para o RCP 8.5, em cultivo irrigado, houve aumento de 44% para GCM máximo e 40% para GCM mínimo em cultivo irrigado e para cultivo de sequeiro 44% (65 sc ha⁻¹) para GCM máximo e de 43% (62 sc ha⁻¹) para GCM mínimo.

Para o município de Bagé, no RCP 4.5 em cultivo irrigado, observou-se aumento de 32% foram observados no GCM máximo e 20% no GCM mínimo, enquanto que cultivo de sequeiro observou-se acréscimo de 33% (42 sc ha⁻¹) para GCM máximo e de 21% para GCM mínimo. Para o RCP 8.5 houve aumento de 29-31% (34-45 sc ha⁻¹) para GCM máximo e GCM mínimo os sistemas de cultivo irrigado e sequeiro.

As simulações realizadas no município de Santa Maria-RS apontaram aumento de 6% no GCM máximo e 9% no GCM mínimo enquanto que, em cultivo de sequeiro, observou-se acréscimo de 10% para GCM máximo e de 12% para GCM mínimo. Para o RCP 8.5, em cultivo irrigado, houve redução de 4% para GCM máximo e aumento de 15% (23 sc ha⁻¹) para GCM mínimo em cultivo irrigado e redução de 2% e para cultivo de sequeiro 19% para GCM máximo e aumento de 28% para GCM mínimo.

O município de Londrina-PR, em cultivo irrigado, observou-se redução de 28% no GCM máximo e 6% no GCM mínimo enquanto que em cultivo de sequeiro, observou-se redução de 11% para GCM máximo e aumento de 2% para GCM mínimo. Para o RCP 8.5, em cultivo irrigado, houve redução de 49% para GCM máximo e redução de 13% para GCM mínimo enquanto que em cultivo de sequeiro observou-se queda de 27% para GCM máximo e 14% para o GCM mínimo.

As simulações realizadas em Antônio Carlos-RS apontaram redução drástica no GCM máximo enquanto que no GCM mínimo houve queda de 13% no RCP 4.5 e 20% no RCP 8.5, ambos em cultivo irrigado. Para o cultivo de sequeiro, houve redução em torno de 9% para RCP 4.5 e 34% para RCP 8.5.

Figura 22. Produtividade de grãos para segunda safra em RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e sequeiro (b).

Figura 23. Produtividade de grãos para segunda safra em RCP 8.5 em cultivo irrigado (a) e sequeiro (b).

5.2.4. Risco de produção para os cenários agrícolas: milho de segunda safra

A título de exemplo foram utilizadas as mesmas localidades analisadas no item anterior e tomou a referência para comparação o percentual de 80% de probabilidade de ocorrência. Em Diamantino-MT (Figura 24) a 80% de probabilidade de ocorrência de redução de rendimentos foi elevado, em comparação ao rendimento no sul do país (Figura 24), no cultivo de segunda safra. O modelo projetou risco de produção mais acentuada, sendo claramente observado para o GCM máximo, demonstrando a interferência no aumento da temperatura do ar para alcance

de produtividades satisfatórias. Para o RCP 4.5 o GCM máximo demonstrou uma redução nos rendimentos em 60% em comparação com a linha de base e para o RCP 8.5 a redução foi de 70% para os cultivos irrigado e sequeiro. Para o RCP 4.5 GCM médio e GCM mínimo, observou-se redução de 18% e um acréscimo de 1% respectivamente, e em ambos os cultivos. Já para o RCP 8.5 observou-se redução de 25% GCM médio e 7% em GCM mínimo, para ambos os cultivos.

Figura 24. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Diamantino-MT, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o município de Rondonópolis-MT (Figura 25) foram observadas perdas de rendimentos em todos os cenários analisados. Para o RCP 4.5 GCM máximo em cultivo irrigado, o modelo projetou redução de 33% (39 sc ha^{-1}) enquanto que no RCP 8.5, GCM

máximo as perdas foram superiores, com um percentual de redução de 45% para cultivo irrigado sequeiro. No RCP 4.5 e GCM médio, as perdas foram de 19% enquanto para o RCP 8.5 as foram de 22% em cultivo irrigado e sequeiro, respectivamente. Já no GCM mínimo, o modelo projetou redução 12% para o RCP 4.5 e 11% para o RCP 8.5, para irrigado e sequeiro.

Figura 25. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Rondonópolis-MT, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (b) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

No estado de Goiás, para as condições do município de Corumbáiba (Figura 26), o GCM máximo apresentou redução drástica nos rendimentos de milho para o RCP 4.5, com um percentual de redução de 42% em cultivo irrigado. Para o RCP 8.5, no entanto, o modelo não projetou queda de rendimentos, demonstrando um leve acréscimo de 1% para cultivo irrigado e de 2% para o cultivo de sequeiro. Para RCP 4.5, GCM médio houve queda de 15% e 14% para cultivo irrigado e sequeiro, respectivamente. No GCM mínimo, também foram observado

redução nos rendimentos, com percentuais de 13 % de redução nos rendimentos em cultivo irrigado e sequeiro.

Figura 26. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Corumbá-GO, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para a região de Porangatu-GO (Figura 27), apesar de serem observadas reduções nos rendimentos, estes foram inferiores aos observados em Corumbá, assim como observado na primeira safra de milho. Para o RCP 4.5 GCM máximo foi observado redução de 4% em cultivo irrigado e acréscimo de 2% em cultivo de sequeiro. Para o RCP 8.5 redução foi de 26% em cultivo irrigado e de 22% em cultivo de sequeiro. Para o GCM mínimo o modelo projetou risco de 4% em cultivo irrigado e 3% no cultivo de sequeiro, no RCP 4.5 e RCP 8.5.

Figura 27. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Porangatu-GO, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

No Paraná, para o município de Guarapuava (Figura 28), o modelo projetou cenário favorável de produção de milho segunda safra para a região apesar do aumento da temperatura do ar. Para o RCP 4.5 GCM máximo foi observado aumento de 25% e para o RCP 8.5, o acréscimo foi de 17% ambos para os sistemas de cultivo irrigado e sequeiro. Para o GCM médio o modelo projetou aumento de 1% no RCP 4.5 e de 6% para o RCP 8.5 para cultivo irrigado e sequeiro. Portanto, o aumento da temperatura não foi um fator limitante de rendimentos de milho para a região de Guarapuava, mas sim um cenário favorável para o cultivo de milho segunda safra na região.

Figura 28. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Guarapuava-PR, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Em Londrina-PR (Figura 29) o modelo projetou redução de produtividade a 80% quando comparado com o município de Guarapuava, para o período analisado. Para o RCP 4.5 e GCM máximo foi observado redução de 22% (35 sc ha⁻¹) cultivo irrigado e 18% (25 sc ha⁻¹) em cultivo de sequeiro. No RCP 8.5, GCM máximo, o modelo projetou redução de 32% para sistema irrigado e 27% para sistema de sequeiro. No GCM mínimo, RCP 8.5, houve redução de 10 % para irrigado e 15% para sequeiro.

Figura 29. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Londrina-PR, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (b) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o estado do Rio Grande do Sul, para o município de Bagé-RS (Figura 30), os modelos simularam situações altamente favoráveis de cultivo de milho safrinha. No RCP 4.5 e GCM máximo observou-se aumento de 36% em cultivo irrigado e de 45% em cultivo de sequeiro enquanto que para o RCP 8.5 os acréscimos foram de 35% em cultivo irrigado e de 42% em cultivo de sequeiro. Para o GCM mínimo, no entanto, foram observado aumento de 19% e 25% para o RCP 4.5 em cultivo irrigado e sequeiro, respectivamente e para o RCP 8.5, houve aumento de 35% para cultivo irrigado e 42% para cultivo de sequeiro.

Figura 30. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Bagé-RS, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Para o município de Santa Maria (Figura 31), o cenário para milho na segunda safra também foram favoráveis, exceto para o GCM máximo no RCP 8.5. Para o RCP 4.5 GCM máximo observou-se aumento de 5% em cultivo irrigado e 8% em cultivo de sequeiro enquanto que no RCP 8.5 houve redução de 2% em cultivo irrigado e 6% em cultivo de sequeiro. Para o RCP 4.5 GCM médio, o modelo projetou aumento de 9% e 14% e, para o RCP 8.5 houve aumento de 5% e 10% para cultivo irrigado e sequeiro respectivamente. Para o GCM mínimo, observou aumento de 13% e aumento de 9% para o RCP 4.5 e para RCP 8.5 houve aumento de 18% e aumento de 22% para cultivo irrigado e sequeiro respectivamente. Esse ganho de rendimento provavelmente ocorreu com o aumento na incidência e chuvas acréscimo na temperatura que foram favoráveis na região.

Figura 31. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Santa Maria-RS, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (c) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

Em Antônio Carlos-SC (Figura 32), para o RCP 4.5 GCM máximo foi observado redução de 32% em cultivo irrigado e 35% em cultivo de sequeiro e, para o RCP 8.5 redução drástica de um percentual de 47% em sistema irrigado e de 50% em sistema de sequeiro. Para o GCM médio observou-se redução de 18-20% para ambos os sistemas de cultivo em RCP 4.5 enquanto que para o RCP 8.5 o modelo projetou redução de 20-24% para cultivo irrigado e de 24% para cultivo em sequeiro.

Figura 32. Probabilidade acumulada de produtividade de milho de segunda safra, para o município de Antônio Carlos-RS, para o RCP 4.5 em cultivo irrigado (a) e em cultivo de sequeiro (b) e para o RCP 8.5 (b) em cultivo irrigado (c) e em cultivo de sequeiro (d) de acordo com a linha de base, GCM máximo, GCM médio e GCM mínimo.

6. DISCUSSÃO

De modo geral, com base nos resultados obtidos através das simulações realizadas em cultivo de milho primeira safra para o Brasil, para a região Norte, nos cenários futuros de baixa emissão, RCP 4.5, em que houve com aumento da temperatura máxima em 3°C e temperatura mínima em 2°C o modelo apontou redução de produtividade em torno de 8-12% da produtividade atual em condições irrigadas e sequeiro. No cenário de baixa emissão, com aumento de 1°C a redução na produtividade foi em torno de 1-2% da produtividade e em cenário de alta emissão, RCP 8.5, a redução foi de 2-5% para os cultivos irrigado e sequeiro. Com o aumento de 3°C na temperatura máxima e de 2°C na temperatura mínima, em cenário de alta emissão, as perdas foram de 31% em cultivo irrigado e 36% em cultivo de sequeiro. Vale destacar que a precipitação mínima observada no cenário mais pessimista foi de 484 mm enquanto que no cenário otimista foi de 759 mm.

Para as simulações realizadas na região sul do país, em cenários de baixa emissão, nos município do estado do Paraná e Santa Catarina foi observado redução de rendimento em torno de 1-8% com o aumento da temperatura em 1°C em cultivo irrigado e sequeiro, porém, nos municípios do Rio Grande do Sul houve queda de 1-2% em cultivo irrigado e aumento de 10-22% no cultivo de sequeiro. No Rio Grande do Sul cenários de baixa emissão, em que houve aumento de 2°C os rendimentos caíram em 12-16% em cultivo irrigado e 1-28% no cultivo de sequeiro. Com o aumento de 4°C na temperatura máxima e de 3°C na temperatura mínima no cenário de alta emissão, houve redução nos rendimentos de 17% no cultivo irrigado e 21% em sequeiro no município de Guarapuava-PR e 41% em cultivo irrigado e 57% em sequeiro em Santa Maria-RS.

Na região Centro-oeste, em cenário de baixa emissão, o aumento de 1°C ocasionou redução de 3-12% nos rendimentos em cultivo irrigado e 5-13% no cultivo de sequeiro, considerando uma precipitação entre 547-941 mm. Ainda nos cenário de baixa emissão, o acréscimo de 2°C ocasionou redução de 6-12% nos rendimentos em cultivo irrigado e 5-13% no cultivo irrigado, com uma precipitação entre 553-849 mm. Nos cenários de alta emissão, o aumento de 3°C provocou redução de 13-35% para cultivo irrigado e sequeiro.

Dos 10 (dez) locais simulados para produção em primeira safra de milho, em sequeiro e irrigado, observou-se tendência de queda na produtividade para todos os locais. Quanto ao risco climático, observou-se aumento do risco no Centro-oeste e Nordeste enquanto os municípios da região Sul tiveram queda no risco climático reduzido.

Nas simulações realizadas com a segunda safra de milho para o Brasil, na região Centro-oeste o aumento de 1°C, em cenário de baixa emissão, RCP 4.5, ocasionou redução de 6-10% nos rendimentos em cultivo irrigado e 1-8% no cultivo sequeiro, considerando uma precipitação entre 529-806 mm. Ainda em RCP 4.5, com o acréscimo de 2°C na temperatura máxima e 1°C na temperatura mínima os rendimentos reduziram 15-40% no cultivo irrigado em torno de 1-32% no cultivo de sequeiro, e precipitação acima de 560 mm. E, com o acréscimo de 4°C na temperatura máxima e 3°C na temperatura mínima os rendimentos reduziram acima de 50% em ambos os cultivos. Perdas drásticas de produtividade foram observadas nos cenários de alta emissão, RCP 8.5.

Para as simulações realizadas na região sul do país, com o aumento na temperatura em 1°C, no cenário de baixa emissão, observou que houve aumento nos rendimentos em torno de 32% para cultivo irrigado e 30% no cultivo de sequeiro e, em cenário de alta emissão, o acréscimo nos rendimentos foi de 40% em cultivo irrigado e 43% em cultivo de sequeiro, ambos para o município de Guarapuava-PR. Em Bagé-RS o acréscimo foi de 20-21% no cultivo de irrigado e 29-21% no cultivo de sequeiro. No município de Santa Maria, também foram observados aumento nos rendimentos, estes, porém foram inferiores ao município de Bagé. Londrina-PR e Antônio Carlos apresentaram redução nos rendimentos.

Dos 9 (nove) locais simulados para produção em segunda safra em sequeiro, observou-se tendência de queda na produtividade para os locais no Centro-Oeste e Nordeste e incremento na produtividade para os locais no Sul do País, principalmente em Guarapuava-PR, Bagé-RS e Santa-Maria-RS.

Ao considerar a redução nos rendimentos de milho para primeira e segunda safra, a precipitação durante o ciclo da cultura de primeira safra e segunda safra, foi adequada à quantidade exigida pela cultura no qual compreende a quantia de 350-550 mm (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000b). Em cultivo irrigado a redução nos rendimentos foi inferior ao observado no cultivo de sequeiro, o que se pode ponderar que os rendimentos de milho irrigado sustentado com chuva respondem positivamente aumento de temperatura (LENG, 2017).

O milho é relativamente tolerante ao déficit hídrico durante a fase vegetativa, porém demonstra extrema sensibilidade com queda no rendimento de grãos, se esse déficit ocorrer na fase reprodutiva (SANTOS; CARLESSO, 1998). O pólen é muito sensível a altas temperaturas, portanto, falhas ocasionadas por alta temperatura também pode ser atribuída à fertilização de ovo, principalmente ao desenvolvimento anormal de tecidos reprodutivos masculinos, considerável mais sensível ao estresse térmico do que os tecidos reprodutivos femininos (DUPUIS; DUMAS, 1990).

Reduções no rendimento são observadas se o déficit hídrico ocorrer entre a antese e o início de enchimento de grãos, pois a recuperação da capacidade produtiva da cultura não poderá ocorrer de forma satisfatória, uma vez que os eventos reprodutivos são muito mais rápidos do que os verificados durante o crescimento vegetativo (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017).

Visto que a precipitação e a temperatura do ar são fatores considerados determinantes no adequado desempenho produtivo da cultura de milho e estes são claramente alterados pela mudança no clima ficou evidente que nos cenários de aumento da temperatura do ar houve acentuada interferência na produtividade de grãos na região (LI et al., 2011).

Nas regiões onde a temperatura do ar é elevada, no cultivo de primeira safra e segunda safra, como exemplo na região Centro-oeste e Nordeste do país a produtividade de grãos apontou redução evidente nos cenários futuros. Já no cultivo de segunda safra para as regiões do Sul do país, onde a temperatura é reduzida, a queda nos rendimentos de milho foram inferiores ou apontaram aumento nos rendimentos devido à necessidade da planta em acumular soma térmica, além de ter sido observado incremento na precipitação, o que tornou as condições de cultivo de milho favoráveis.

Diante dos resultados obtidos, a redução da produtividade, portanto, esta relacionada com o aumento da temperatura em diversas regiões do país, pois, de acordo com Fancelli, inúmeras evidências apontam a temperatura como um dos fatores de produção mais importantes e decisivos ao desenvolvimento do milho, embora a água e os demais componentes climáticos exerçam diretamente sua influência no processo. Assim, sugere que o milho cultivado sob o aumento de temperaturas médias teriam efeitos negativos na produtividade principalmente no período de enchimento de grãos (HATFIELD, 2016).

A temperatura é responsável pelo tempo de crescimento e desenvolvimento da planta e esta afeta diretamente o desenvolvimento fenológico assim como a partição da biomassa, pois o alongamento e o encurtamento da fase vegetativa são fatores resultantes da disponibilidade de calor (soma térmica) (GARCIA et al., 2008; LI et al., 2011; BASSU et al., 2014). Assim, conforme observado neste estudo, o rendimento de grãos tende a diminuir com a elevação da temperatura com correlações significativamente negativas com as temperaturas médias do estágio de emergência até a maturidade fisiológica (SHIM; LEE; LEE, 2017).

Para o período de 1980-2010, em estudos realizados em junho, julho e agosto, Leng (2017) observou que houve relação negativa na variação interanual de rendimento do milho com a temperatura em grande parte dos EUA, especialmente no meio-oeste do Corn Belt, porém, uma associação positiva de produção de milho à temperatura é encontrada em áreas

como Kansas e Nebraska, no qual foram aplicadas práticas de irrigação. Estudos realizados por Hatfield (2016) demonstraram que temperaturas mais quentes causaram uma rápida taxa de fenologia desenvolvimento em três híbridos de milho analisados com um aumento em 4 °C na temperatura ambiente. Assim, temperaturas elevadas podem causar lesões por calor e distúrbios fisiológicas nas plantas, resultando em redução de rendimento (JOHKAN et al., 2016).

Considerando que elevados índices de produtividade de grãos é o resultado da interação entre o potencial genético das cultivares, da tecnologia disponibilizada para o suprimento de suas necessidades e do ambiente, os desvios projetados quanto à produtividade sugerem uma relação com a duração do ciclo, pois devido à elevação da temperatura, a cultura tende a atingir seu requerimento de energia mais cedo para completar seu ciclo. De modo que no momento em que a temperatura é mais elevada, o processo metabólico é mais acelerado, porém, a eficiência no uso da água na produtividade por água evapotranspirada tende a aumentar desde que a redução na duração do ciclo não seja pequena (MINUZZI; LOPES, 2016; BERGAMASCHI, 2017c).

Considerando aumentos contínuos na temperatura do ar espera-se que ocorram impactos negativos na produção de milho (HATFIELD, 2016) desse modo, a duração do ciclo adequado para cada localidade deve ser particularmente levada em consideração também devem ser considerado na escolha no cultivar. O cultivar é responsável por, pelo menos 50% da produtividade de uma lavoura, a sua escolha correta, assim como os aspectos relacionados às características do sistema produtivo devem ser levados em consideração, como, por exemplo, as características e destinos da produção de milho para grãos ou silagem.

Em uma mesma espécie, genótipos precoces têm temperaturas cardeais mais baixas que os tardios e isso permitem que uma mesma espécie seja cultivada em condições térmicas variadas, em diferentes locais e épocas do ano. Assim, híbridos precoces passaram a serem cultivados em regiões que eram consideradas inaptas por insuficiência térmica, nos planaltos das regiões Sul e Sudeste do Brasil. O surgimento de genótipos superprecoces também possibilitou antecipar semeaduras no Sul do Brasil, assim como o cultivo de segunda safra no período de verões-outono em temperaturas relativamente baixas (BERGAMASCHI, 2017b).

No Brasil, a espécie de milho apresenta comportamento fotoneutro visto que o alongamento ou encurtamento é resultante da disponibilidade de calor e não do número de horas de luz. Todavia, a redução de 30 a 40% da intensidade luminosa ocasiona na cultura de milho atraso na maturação dos grãos, principalmente em materiais de ciclos tardios que se mostram mais sensíveis a deficiência de luz (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000b).

A ocorrência de temperaturas elevadas prevalecentes no período noturno (superior a 24°C) provoca consumo energético elevado em função do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados, além de contribuir para redução do ciclo da planta (ampliação da soma térmica), bem como sua área foliar e resultando na queda de produtividade (FANCELLI; DOURADO NETO, 2003). Durante período de preenchimento de grãos, no entanto, a exposição a as temperaturas noturnas reduziram o período de enchimento de grãos aumentando a taxa de senescência. Exposição de híbridos de milho a temperaturas acima de 30 °C durante o estágio de polinização reduz o número de espigas (HATFIELD, 2016).

Portanto, como o aquecimento global é projetado para acelerar o ciclo da planta assim, alta temperatura afetará todos os processos determinantes do rendimento de milho (SHIM; LEE; LEE, 2017). Consequentemente, a disponibilidade de água das precipitações durante o verão quente, desempenha um papel importante na determinação rendimento de milho (LI et al., 2011).

No período de 1980- 1995, Leng (2017) observou uma relação positiva em irrigação sob os rendimentos de milho, porém no período 1995-2010, os rendimentos tornaram-se negativos, indicando a perda dos efeitos benéficos de temperatura em rendimentos irrigados. Li et. al., (2011) verificou-se que um aumento da temperatura e da precipitação tem um efeito significativamente melhor nos rendimentos de milho em China média em comparação com o meio-oeste dos Estados Unidos. Portanto, o aumento da temperatura não afetará a produtividade de milho safrinha na região, ocasionando incremento no percentual de rendimentos na região Centro-Oeste. Estudos realizados em Zimbábue, África relataram queda em torno de 2-5% no rendimento de milho para a região e, aponta que medida de adaptação como rotação de cultura pode ser alternativa para minimização do impacto de redução nos rendimentos (NGWIRA; AUNE; THIERFELDER, 2014b).

Para as simulações futuras, devido ao aumento da concentração [CO₂] atmosférico, simulou a produtividade de milho para cada localidade em seus respectivos RCP's a fim de verificar o efeito do aumento do gás no percentual produtivo das plantas. As comparações foram realizadas base na linha de base e posteriormente, feita a variação relativa para assim, verificar o percentual de interferência da [CO₂] em plantas de milho. Pode-se observar que para o experimento irrigado e sequeiro o aumento na [CO₂] ocasionou redução nas perdas de produtividade para os locais simulados, para todos os GCM's analisados, provavelmente devido ao "efeito fertilização" que o gás ocasiona como incremento nos rendimentos (LI et al., 2011).

Temperaturas elevadas favorecem as atividades metabólicas da planta milho, ao fixar mais CO₂ e perder mais água por transpiração através do fechamento estomático parcial em alto

déficit de pressão de vapor (DPV), considerado como um mecanismo fisiológico da planta para o controle e uso mais eficiente da água disponível (YANG et al., 2012; SOUZA et al., 2017).

Elevada [CO₂] promoverá o crescimento das plantas através da fertilização efeito e fotossíntese aprimorada. Porém, o efeito positivo do CO₂ sobre o crescimento da planta é mais pronunciado nas culturas C₃ como o trigo, e menos notável em culturas C₄ como o milho (GHANNOUM et al., 2001). Elevada temperatura juntamente com o aumento da [CO₂] terá uma grande influência na produção de grãos alimentares dependendo dos locais. Como exemplo, o aumento de temperatura em 1,0-2,0 °C em regiões tropicais e subtropicais países como a produção de grãos alimentares da Índia são projetados para diminuir até 30% (JOHKAN et al., 2016). Assim, o crescimento e a produtividade do milho provavelmente serão afetados por CO₂ atmosférico elevado e temperatura.

Os impactos das mudanças climáticas na produtividade agrícola estão ligados a efeitos positivos do aumento do dióxido de carbono (CO₂) e a efeitos negativos de crescente temperatura, variáveis do tempo e incidência de precipitação (HATFIELD, 2016). Assim, a associação do aumento do risco climático com a queda nas médias de produtividade indica um potencial negativo para a cultura do milho caso os cenários climáticos sejam confirmados.

6.1. Incertezas e limitações

É importante destacar que a projeção futura se trata de cenários e não de previsões e, assim devem ser encaradas. Utilizando a abordagem do projeto AgMIP, este trabalho avança no sentido de reduzir a incerteza de análises associadas à modelagem agrícola. Contudo, sabe-se que a utilização de modelos carrega uma série de simplificações.

Uma melhoria a ser avaliada para futuros estudos está relacionada ao possível efeito da radiação solar e da umidade relativa sobre o desenvolvimento e crescimento de milho, visto que os cenários aqui utilizados não consideram estas duas variáveis meteorológicas, desconsiderando essa fonte de variação no clima futuro.

7. CONCLUSÕES

Os cenários futuros simulados indicam uma tendência geral de queda na produtividade do milho e aumento do risco climático para a maioria das localidades, supondo que o sistema de produção mantenha-se no modo atual.

Estratégias de manejo como cultivares tolerantes a seca, preparo do solo, época de semeadura adubação adequadas e controle de pragas e doenças são ações que podem minimizar quedas de produtividade.

É possível simular o impacto das mudanças climáticas futuras sobre o crescimento e o desenvolvimento do milho com modelos baseados em processos devidamente calibrados.

Nesta pesquisa, os resultados obtidos no estudo podem ser usados como subsídio à elaboração de políticas e programas de adaptação prevenção de problemas avançados. Para assegurar o aumento contínuo do milho no futuro, estudos e pesquisas adicionais, bem como eficientes políticas ambientais e ações são necessárias.

REFERÊNCIAS

- ABEBE, A.; PATHAK, H.; SINGH, S. D.; BHATIA, A.; HARIT, R. C.; KUMAR, V. Growth, yield and quality of maize with elevated atmospheric carbon dioxide and temperature in north–west India. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 218, p. 66–72, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880915301493>>.
- AGUIAR, A. T. de E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S.; CASTRO, C. E. F. de. Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas. **Instituto Agronômico de Campinas**, n. 7, p. 452, 2014.
- AMARAL, T. A. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar Tese Desempenho de genótipos de milho utilizados pela agricultura familiar no Território Zona Sul do RS : o modelo CERES-Maize no auxílio à tomada de decis.** 2015. Universidade Federal de Pelotas, 2015.
- ASSENS, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; RÖTTER, R. P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P. K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MÜLLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. E.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J. W.; WILLIAMS, J. R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p. 827–832, 2013. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/finder/10.1038/nclimate1916>>.
- ASSIS, J. P. de. **Modelo estocástico para estimação de produtividade potencial de milho em Piracicaba-SP.** 2004. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2004.
- ASSIS, J. P.; NETO, D. D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N.; BONNECARRÈRE, R. A. G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 731–737, 2006.
- AUGUSTO, F.; SOARES, D. A. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Zonas edafoclimáticas homogêneas das principais regiões de cana-de- açúcar do Brasil Felipe Augusto de Andrade Soares Piracicaba 2015 Piracicaba. 2015.
- BASSU, S.; BRISSON, N.; DURAND, J. L.; BOOTE, K.; LIZASO, J.; JONES, J. W.; ROSENZWEIG, C.; RUANE, A. C.; ADAM, M.; BARON, C.; BASSO, B.; BIERNATH, C.; BOOGAARD, H.; CONIJN, S.; CORBEELS, M.; DERYNG, D.; DE SANCTIS, G.; GAYLER, S.; GRASSINI, P.; HATFIELD, J.; HOEK, S.; IZAURRALDE, C.; JONGSCHAAP, R.; KEMANIAN, A. R.; KERSEBAUM, K. C.; KIM, S. H.; KUMAR, N. S.; MAKOWSKI, D.; MÜLLER, C.; NENDEL, C.; PRIESACK, E.; PRAVIA, M. V.; SAU, F.; SHCHERBAK, I.; TAO, F.; TEIXEIRA, E.; TIMLIN, D.; WAHA, K. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2301–2320, 2014.
- BERGAMASCHI, H. **O milho e o clima.** [s.l: s.n.]
- BERGAMASCHI, H. Radiação solar. In: **As plantas e o clima: Princípios e aplicações.** GUAÍBA: AG ed. [s.l: s.n.]p. 25–82.
- BERGAMASCHI, H. Temperatura do ar. In: **As plantas e o clima: Princípios e aplicações.** [s.l: s.n.]p. 137–182.
- BERGAMASCHI, H. Água. In: **As plantas e o clima: Princípios e aplicações.** [s.l: s.n.]p. 257–308.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima - Princípios e aplicações.** Guaíba ed. [s.l: s.n.]
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. In: **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico**

na produção agrícola. [s.l: s.n.]p. 407–423.

BRUCE, W. B.; EDMEADES, G. O.; BARKER, T. C. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 366, p. 13–25, 2002.

CARDOSO, C. O.; FARIA, R. T. D. E.; FOLEGATTI, M. V. Aplicação do modelo Ceres-maize na análise de estratégias de irrigação para milho “safrinha” em Londrina-PR. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 24, n. 1, p. 37–45, 2004.

CERVellini, A. Estimativa Da Distribuição Da Energia. 1965.

CHALLINOR, A. J.; SMITH, M. S.; THORNTON, P. Use of agro-climate ensembles for quantifying uncertainty and informing adaptation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 2–7, 2013.

CHALLINOR, A.; WHEELER, T.; GARFORTH, C.; CRAUFURD, P.; KASSAM, A. Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. **Climatic Change**, v. 83, n. 3, p. 381–399, 2007.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; SANTANA, D. P. Manejo da cultura do milho. In: **A cultura do milho**. [s.l: s.n.]p. 171–195.

CUI, T.; HE, K.; CHANG, L.; ZHANG, X.; XUE, J.; LIU, J. QTL mapping for leaf area in maize (*Zea mays* L.) under multi-environments. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 4, p. 800–808, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095311916615241>>.

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**, v. 94, n. 2, p. 665–670, 1990.

EDWARDS, E. J.; OSBORNE, C. P.; STROMBERG, C. A. E.; SMITH, S. A.; BOND, W. J.; CHRISTIN, P. A.; COUSINS, A. B.; DUVAL, M. R.; FOX, D. L.; FRECKLETON, R. P.; GHANNOUM, O.; HARTWELL, J.; HUANG, Y.; JANIS, C. M.; KEELEY, J. E.; KELLOGG, E. A.; KNAPP, A. K.; LEAKEY, A. D. B.; NELSON, D. M.; SAARELA, J. M.; SAGE, R. F.; SALA, O. E.; SALAMIN, N.; STILL, C. J.; TIPPLE, B. The Origins of C4 Grasslands: Integrating Evolutionary and Ecosystem Science. **Science**, v. 328, n. 5978, p. 587–591, 2010.

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. [s.l: s.n.]

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **No Title**. [s.l: s.n.]

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Milho: Ecofisiologia e rendimento. In: **Tecnologia da produção de milho**. [s.l: s.n.]p. 157–170.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho: estratégias de manejo para alta produtividade**. [s.l: s.n.]

FARHANGFAR, S.; BANNAYAN, M.; KHAZAEI, H. R.; BAYGI, M. M. Vulnerability assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 13, p. 37–51, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.03.006>>.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. De; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; SOUZA, R. C. De; NETO, R. A. D. A. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas Radiation use efficiency in corn crop in Alagoas. p. 322–328, 2014.

GALVÃO, J. C. C.; GLAUCO, V. M.; TROGELLO, E.; FRITSCHÉ-NETO, R. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 61, p. 819–828, 2014.

GARCIA, C. J.; MATTOSO, J. M.; DUARTE, O. J.; CRUZ, C. J.; PADRÃO, A. G. Aspectos Econômicos da produção e Utilização do Milho. In: **A cultura do milho**. [s.l: s.n.]p. 23–41.

GEDANKEN, A.; MANTOVANI, E. C.; MANTOVANI, B. H. M.; COSTA, L. C.; SANS, L. M. A.; FREITAS, P. S. L. De. Utilização do modelo Ceres-Maize na avaliação de estratégias de irrigação na cultura do milho em duas regiões do Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 439–447, 2003a. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2057>>.

GEDANKEN, A.; MANTOVANI, E. C.; MANTOVANI, B. H. M.; COSTA, L. C.; SANS, L. M. A.; FREITAS, P. S. L. De. Utilização do modelo Ceres-Maize na avaliação de estratégias de irrigação na cultura do milho em duas regiões do Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 439–447, 2003b.

GHANNOUM, O.; CAEMMERER, S. Von; ZISKA, L. H.; CONROY, J. P. The growth response of C4 plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant Cell and Environment**, v. 23, n. 1, p. 931–942, 2001.

GOWIK, U.; WESTHOFF, P. The Path from C3 to C4 Photosynthesis. **Plant Physiology**, v. 155, n. 1, p. 56–63, 2011. Disponível em: <<http://www.plantphysiol.org/cgi/doi/10.1104/pp.110.165308>>.

GRASSINI, P.; YANG, H.; CASSMAN, K. G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. In: **Agricultural and Forest Meteorology**. [s.l.: s.n.]149p. 1254–1265.

HATFIELD, J. L. Increased Temperatures Have Dramatic Effects on Growth and Grain Yield of Three Maize Hybrids. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 1, n. 1, p. 0, 2016a.

HATFIELD, J. L. Increased Temperatures Have Dramatic Effects on Growth and Grain Yield of Three Maize Hybrids. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 1, n. 1, p. 0, 2016b. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/acl/abstracts/1/1/150006>>.

HIRAKURI E LAZZAROTTO. O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. **Embrapa Soja, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, p. 70 p., 2014.

HOLZKAMPER, A.; CALANCA, P.; HONTI, M.; FUHRER, J. Projecting climate change impacts on grain maize based on three different crop model approaches. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214–215, p. 219–230, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.263>>.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. v. 103, p. 137–157, 2000.

HOU, P.; LIU, Y.; XIE, R.; MING, B.; MA, D.; LI, S.; MEI, X. Field Crops Research Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. v. 158, p. 55–64, 2014.

JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Crop growth models for decision support systems. **Can J Plant Sci**, v. 76, n. 1, p. 9–19, 1996.

JOHKAN, M.; ODA, M.; MARUO, T.; SHINOHARA, Y. World â€™s largest Science , Technology & Medicine Open Access book publisher c. **Intech**, v. 6, p. 111–133, 2016.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; DYKE, P. T. **CERES-Maize : a simulation model of maize growth and development**. [s.l.: s.n.]

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; CHARLES, H.; GODFRAY, J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240–254, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>>.

KLEMM, T.; MCPHERSON, R. A. The development of seasonal climate forecasting for agricultural producers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 384–399, 2017.

KRESOVIC, B.; MATOVIC, G.; GREGORIC, E.; DJURICIN, S.; BODROZA, D. Irrigation as a climate change impact mitigation measure: An agronomic and economic assessment of maize production in Serbia. **Agricultural Water Management**, v. 139, p. 7–16, 2014.

LENG, G. Evidence for a weakening strength of temperature-corn yield relation in the United States during 1980–2010. **Science of the Total Environment**, v. 605–606, p. 551–558, 2017.

LI, X.; TAKAHASHI, T.; SUZUKI, N.; KAISER, H. M. The impact of climate change on maize yields in the

United States and China. **Agricultural Systems**, v. 104, n. 4, p. 348–353, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2010.12.006>>.

LUIZ GADIOLI, J.; DOURADO-NETO, D.; GARCÍA GARCÍA, A.; DEL VALLE BASANTA, M. **Caracterização fenológica de milho TEMPERATURA DO AR, RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO E CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA ASSOCIADA À SOMA CALÓRICA 1 AIR TEMPERATURE, MAIZE YIELD AND PHENOLOGICAL CHARACTERIZATION ASSOCIATED TO HEAT UNITSScientia Agricola**. [s.l: s.n.].

MA, L.; AHUJA, L. R.; ISLAM, A.; TROUT, T. J.; SASEENDRAN, S. A.; MALONE, R. W. Modeling yield and biomass responses of maize cultivars to climate change under full and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 88–98, 2017.

MARIA, H.; PINTO, S. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros Piracicaba. 2015.

MARIN, F. R. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos Fábio Ricardo Marin Engenheiro Agrônomo Piracicaba – SP**. 2014. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil Agronomic performance of maize in different climatic scenarios in the Central West of Brazil. p. 734–740, 2016.

MOURICE, S. K.; RWEYEMAMU, C. L.; TUMBO, S. D.; AMURI, N. Maize Cultivar Specific Parameters for Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Application in Tanzania. n. March, p. 821–833, 2014.

NASH, E.; SUTCLIFFE, V. PART I- A DISCUSSION OF PRINCIPLES * The problem of determining river flows from rainfall , evaporation , and other factors , occupies a central place in the technology of applied hydrology . It is not only the essential problem of flood forecasting but a. v. 10, p. 282–290, 1970.

NGWIRA, A. R.; AUNE, J. B.; THIERFELDER, C. DSSAT modelling of conservation agriculture maize response to climate change in Malawi. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 85–94, 2014a.

NGWIRA, A. R.; AUNE, J. B.; THIERFELDER, C. Soil & Tillage Research DSSAT modelling of conservation agriculture maize response to climate change in Malawi. **Soil & Tillage Research**, v. 143, p. 85–94, 2014b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.05.003>>.

OLIVEIRA, L. A. De. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” **Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários futuros : aplicação dos modelos DSSAT / CANEGRO e CERES-MAIZE Luciano Alves de Oliveira Piracicaba**. 2015. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2015.

PATRICK, J. W.; COLYVAS, K. Crop yield components – photoassimilate supply- or utilisation limited-organ development? **Functional Plant Biology**, v. 41, n. 9, p. 893, 2014. Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/?paper=FP14048>>.

PONTI, T. de; RIJK, B.; VAN ITTERSUM, M. K. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. **Agricultural Systems**, v. 108, p. 1–9, 2012.

ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P.; ANTLE, J. M.; NELSON, G. C.; PORTER, C.; JANSSEN, S.; ASSENG, S.; BASSO, B.; EWERT, F.; WALLACH, D.; BAIGORRIA, G.; WINTER, J. M. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 166–182, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>>.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.;

TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis. The Primer**. [s.l.: s.n.]

SANS, L. M. A.; GUIMARÃES, D. P. Zoneamento Agrícola - Riscos climáticos para a cultura do milho. In: **A cultura do milho**. [s.l.: s.n.]p. 517.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit Hídrico E Os Processos Morfológico E Fisiológico Das Plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287–294, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43661998000300287&lng=pt&tlng=pt>.

SANTOS, H. G. Dos. **Sistema Brasileiro De Classificação De Solos**. 3. ed. [s.l.: s.n.]

SHIM, D.; LEE, K. J.; LEE, B. W. Response of phenology- and yield-related traits of maize to elevated temperature in a temperate region. **Crop Journal**, v. 5, n. 4, p. 305–316, 2017.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy**, v. 27, n. 2–4, p. 165–177, 2007.

SOUZA, T. T.; BIANCHINI, V. J. M.; VIANNA, M. dos S.; MARIN, F. R. Revista Brasileira de Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1275–1291, 2017.

SOUZA, T. T.; PEREIRA, L. A. R.; JUNIOR, E. V. E.; FILHO, E. B. F. L. **Influência do glifosato nas características agrônômicas de plantas de milho com o gene RR5^a Jornada Científica e Tecnológica e 2º Simpósio de Pós-Graduação do IFSULDEMINAS**. [s.l.: s.n.].

TAO, F.; ZHANG, S.; ZHANG, Z.; RÖTTER, R. P. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift. **Global Change Biology**, v. 20, n. 12, p. 3686–3699, dez. 2014. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25044728>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

TAO, F.; ZHANG, Z. Impacts of climate change as a function of global mean temperature: Maize productivity and water use in China. **Climatic Change**, v. 105, n. 3–4, p. 409–432, 2011.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485–498, 2012.

VAN GENUCHTEN, M. . **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**, 1980. .

VAN WART, J.; VAN BUSSEL, L. G. J.; WOLF, J.; LICKER, R.; GRASSINI, P.; NELSON, A.; BOOGAARD, H.; GERBER, J.; MUELLER, N. D.; CLAESSENS, L.; VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**, v. 143, p. 44–55, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>>.

VIANNA, M. dos S. **Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para a sua minimização em diferentes regiões brasileiras**. 2014. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, 2014.

VILLA NOVA, N. . **Dados meteorológicos do Município de Piracicaba**Piracicaba: ESALQ/Departamento de Ciências Exatas, 2003. .

WAONGO, M.; LAUX, P.; KUNSTMANN, H. Adaptation to climate change: The impacts of optimized planting dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 205, p. 23–39, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.006>>.

WILLMOTT, C. **Some comments on the evaluation of model performance****Bulletin of the American Meteorological Society**, 1982. . Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2)>.

XAVIER, D. A.; FURTADO, G. D. F.; SOUSA JÚNIOR, J. R.; SOUSA, J. R. M.; ANDRADE, E. M. G. Produção

de fitomassa do milho sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada Biomass. p. 144–148, 2014.

YANG, Z.; SINCLAIR, T. R.; ZHU, M.; MESSINA, C. D.; COOPER, M.; HAMMER, G. L. Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapour pressure deficit. v. 78, p. 157–162, 2012.

ŽALUD, Z.; HLAVINKA, P.; PROKEŠ, K.; SEMERÁDOVÁ, D.; BALEK JAN; TRNKA, M. Impacts of water availability and drought on maize yield – A comparison of 16 indicators. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 126–135, 2017.