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

Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e
estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões
brasileiras

Fabiani Denise Bender

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2017

Fabiani Denise Bender
Bacharel em Meteorologia

Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2017

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

Bender, Fabiani Denise

Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras / Fabiani Denise Bender. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPG r 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

182 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Cenários de mudanças climáticas 2. Milho 3. Modelos de culturas 4. Estratégias de manejo I. Título

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, pelo apoio incondicional e incentivo durante toda a minha jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas, pelos ensinamentos, confiança depositada e por todo apoio técnico e científico imensuráveis na condução do presente trabalho, que contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional em mais esta etapa.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Departamento de Engenharia de Biosistemas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade de realização do doutorado.

Ao Dr. Claas Nendel e Phillip Parker pela orientação no período de doutoramento sanduíche no ZALF, Alemanha.

Aos colegas da “Cúpula”, pelo auxílio prestado, pelos momentos de descontração e pelas trocas de experiência compartilhadas.

Aos amigos que esta jornada me proporcionou, pelo apoio e momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Aos professores e demais funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas pelos ensinamentos transmitidos e apoio dado na condução do presente projeto.

A todos que de alguma maneira contribuíram na minha formação tanto pessoal quanto profissional, dando suporte para a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

A todos, muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
Referências	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. A cultura do milho no Brasil	15
2.2. Necessidade térmica e hídrica do milho	16
2.3. Variabilidade climática e produtividade de milho no Brasil	18
2.4. Cenários climáticos futuros	22
2.5. Mudanças climáticas e impactos na agricultura	25
2.6. Modelos de simulação de culturas	27
2.6.1. Modelo DSSAT/CERES- <i>Maize</i>	28
2.6.2. Modelo MONICA	29
Referências	30
3. PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE DADOS METEOROLÓGICOS E CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS, EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS.....	37
Resumo	39
Abstract	40
3.1. Introdução	38
3.2. Material e métodos	43
3.2.1. Localidades analisadas e dados meteorológicos	43
3.2.2. Preenchimento de falhas nos dados meteorológicos	44
3.2.2.1. Modelos de estimação de radiação solar global	44
3.2.2.2. Preenchimento de falhas com base em dados de grade	47
3.2.2.3. Preenchimento alternativo	48
3.2.2.4. Avaliação dos modelos de estimação de radiação solar global e métodos de preenchimento	48
3.2.3. Climatologia e balanço hídrico	49
3.2.4. Cenários Futuros	50
3.2.4.1. Incertezas e MCGs utilizados	51
3.3. Resultados e discussão	52
3.3.1. Preenchimento de falhas nos dados meteorológicos	52
3.3.1.1. Modelos de estimação de radiação solar global	52
3.3.1.2. Preenchimento de falhas com base em dados de grade	58

3.3.1.3. Preenchimento Alternativo	61
3.3.2. Climatologia das localidades analisadas	62
3.3.1. Cenários futuros	65
3.3.1.1. Incertezas e MCGs utilizados	72
3.4. Conclusões	73
Referências	74
4. AJUSTE E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA CULTURA DO MILHO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS.....	81
Resumo	83
Abstract	83
4.1. Introdução	82
4.2. Material e métodos	85
4.2.1. Modelos de simulação	85
4.2.2. Dados de ensaios	86
4.2.3. Dados meteorológicos	88
4.2.4. Dados de solo	88
4.2.5. Calibração e avaliação dos modelos de simulação da cultura do milho	89
4.2.6. Índices estatísticos utilizados na avaliação dos modelos de simulação ajustados	89
4.2.7. Análise de sensibilidade	90
4.2.7.1. Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES- <i>Maize</i> e MONICA às variações dos elementos climáticos	91
4.2.7.2. Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES- <i>Maize</i> e MONICA às variações da adubação nitrogenada	92
4.2.7.3. Avaliação da análise de sensibilidade	93
4.3. Resultados e discussões	94
4.3.1. Calibração e validação dos modelos DSSAT/CERES- <i>Maize</i> e MONICA para a estimação da produtividade do milho	94
4.3.2. Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES- <i>Maize</i> e MONICA para a estimação da produtividade do milho	98
4.4. Conclusões	105
Referências	105
5. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE DO MILHO SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MANEJO AGRÍCOLA EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS	113
Resumo	113
Abstract	113
5.1. Introdução	114

5.2. Material e Métodos	117
5.2.1. Modelo de simulação	117
5.2.2. Locais de estudo	118
5.2.3. Dados solos	119
5.2.4. Dados meteorológicos e cenários climáticos	121
5.2.5. Simulações dos impactos do clima futuro na produtividade do milho	123
5.2.6. Simulação e avaliação de estratégias de manejo para mitigação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade do milho	124
5.2.6.1. Data de semeadura	124
5.2.6.2. Ciclo da cultivar	125
5.2.6.3. Irrigação	126
5.2.6.4. Adubação nitrogenada	126
5.2.6.5. Simulações da produtividade do milho sob a combinação das estratégias manejo para mitigação dos impactos das mudanças climáticas	127
5.2.7. Avaliação geral dos resultados	128
5.3. Resultados e discussão	129
5.3.1. Simulações dos impactos do clima futuro na produtividade do milho	129
5.3.2. Simulação e avaliação de estratégias de manejo para mitigação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade do milho	134
5.3.2.1. Semeadura	134
5.3.2.2. Ciclo da Cultivar	135
5.3.2.3. Irrigação	138
5.3.2.4. Adubação nitrogenada	141
5.3.2.5. Combinação das estratégias de manejo	141
5.4. Conclusões	146
Referências	147
6. CONCLUSÕES GERAIS	153
ANEXOS	155

RESUMO

Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras

O clima é um dos fatores ambientais que impõe os maiores riscos para a atividade agrícola, sendo responsável pelas oscilações e frustrações das safras no Brasil. Em cenário de mudanças climáticas, os atuais níveis de produtividade do milho de 1ª e de 2ª safra deverão ser alterados. Para se avaliar tais impactos, os modelos de simulação de culturas possibilitam estimar o crescimento, o desenvolvimento fenológico e a produtividade das culturas sob ampla gama de condições ambientais e de manejo, sendo, portanto, ferramentas eficientes para esse tipo de estudo. Considerando os possíveis impactos das mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho, o presente estudo teve por objetivos: i) realizar preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos e, gerar séries sob projeções futuras do clima a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, para os cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5); ii) calibrar e validar os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para simular a produtividade do milho de 1ª e de 2ª safra, e analisar a sensibilidade desses modelos, identificando os fatores de maior influência na produtividade do milho; iii) aplicar o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para determinar a produtividade do milho de 1ª e de 2ª safra, em condições de clima atual e futuro, e avaliar possíveis estratégias de manejo, de forma individual e combinada, como épocas de semeadura, ciclo da cultivar, irrigação e adubação nitrogenada, para minimização dos possíveis impactos. Para o preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos, o método de Bristow-Campbell (estimação da radiação solar), e a base em ponto de grade XAVIER foram as que apresentaram melhor desempenho. As projeções de clima futuro evidenciaram condições de clima mais quente, com redução no total acumulado de chuva nas regiões Norte-Nordeste e aumento no Sul do país, e as regiões Sudeste e Centro-Oeste configurando como áreas de transição. Os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA apresentaram índice de desempenho (c) muito bom para ambas as safras, na estimação da produtividade do milho, com EAM inferior a 450 e 350 kg ha⁻¹ na 1ª e na 2ª safra, respectivamente. Para as estimativas por conjunto, os valores de c foram avaliados como ótimos para as duas safras, com EAM caindo para 276 e 194 kg ha⁻¹, na 1ª e na 2ª safra, respectivamente. Ambos os modelos mostraram sensibilidade às alterações climáticas e de adubação, porém com o modelo DSSAT/CERES-*Maize* se mostrando mais adequado para estudos de impactos de mudanças climáticas na cultura do milho. As simulações sob clima futuro com o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, mostraram perdas de produtividade em relação aos atuais níveis, variando de 41 a 63% para milho da 1ª safra, e de 58 a 65% para o milho da 2ª safra, com as estratégias de manejo quanto a data de semeadura, ciclo da cultivar, irrigação e adubação nitrogenada mostrando redução das perdas e até mesmo ganhos de produtividade quando adotadas em condições de clima futuro.

Palavras-chave: Cenários de mudanças climáticas; Milho; Modelos de culturas; Estratégias de manejo

ABSTRACT

Climate change and its impacts on maize yield and crop management strategies to minimize yield losses in different Brazilian regions

Climate is one of the major environmental factors that impose the greatest risks for the agricultural activity, being responsible for the oscillations and frustrations of the crops in Brazil. In a scenario of climate change, the current yield levels of maize growing in-season and off-season should be impacted. In order to evaluate such impacts, crop simulation models allow estimating the growth, phenological development and yield under a wide range of environmental and crop management conditions, being efficient tools for applying to this kind of study. Considering the possible impacts of climate change on maize crop yield, the present study had as objectives: i) to fill gaps in meteorological data series and to generate series under future climate projections in the short (2010-2039), medium (2040-2069) and long (2070-2099) terms periods, for the intermediate emission (RCP4.5) and high emission (RCP8.5) scenarios; ii) to calibrate and validate the DSSAT/CERES-Maize and MONICA models to simulate in-season and off-season maize yield and to analyze the sensitivity of these models, identifying the factors that have the major influence on yield; (iii) to apply the DSSAT/CERES-Maize model to determine maize yield in the in-season and off-season, under current and future climate conditions, and evaluate possible crop management strategies, individually and in combination, such as sowing dates, crop cycle, irrigation and nitrogen fertilization, to minimize possible negative impacts. In order to fill the gaps in meteorological data series, the Bristow-Campbell method (for solar radiation estimation) and the XAVIER daily gridded database were the ones that presented the best performance. The projections of future climate showed warmer climate conditions, with a reduction in the rainfall amounts in the North-Northeast and an increase in the South of the country, with the Southeast and Center-West regions representing transition areas. Both DSSAT/CERES-Maize and MONICA models showed very good performance index (c) in the estimation of maize yield for both seasons, with MAE lower than 450 and 350 kg ha⁻¹ during the in-season and off-season, respectively. For the ensemble estimation, the estimation improve, with optimal performance index, with MAE falling to 276 and 194 kg ha⁻¹, for in-season and off-season maize growing, respectively. Both models showed sensitivity to climate change and fertilization, but with the DSSAT/CERES-Maize model being more suitable for studies of climate change impacts on maize crop. The simulations under future climate with DSSAT/CERES-Maize model showed a yield loss in relation to current levels, ranging from 41 to 63% for in-season, and from 58 to 65% for off-season, with management strategies regarding sowing date, cultivar cycle, irrigation and nitrogen fertilization, showing reduction of losses and even yield gains when adopted in the future climate conditions.

Keywords: Climate change scenarios; Maize crop; Simulation crop models; Mitigation strategies

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho é cultivado em praticamente todo o território brasileiro (Figura 1), ocupando na safra 2015/2016, uma área de cerca de 16 milhões de hectares (CONAB, 2016). As regiões Sul e Sudeste foram as responsáveis por mais da metade da produção nacional do milho 1ª safra, enquanto a região Centro-Oeste supriu mais da metade da produção da 2ª safra (CONAB, 2016). Nos atuais níveis de produção, a 2ª safra é responsável por mais de 60% da produção total.

O milho 1ª safra (safra das águas) é típico do período primavera-verão, enquanto a 2ª safra (safrinha) é implantada no final da época normal de semeadura, no período outono-inverno. A 2ª safra teve seus primeiros cultivos, realizados ao final dos anos de 1970, no estado do Paraná. Conduzido com baixo investimento tecnológico, adicionado às maiores limitações climáticas nos estágios avançados de desenvolvimento, principalmente devido à disponibilidade hídrica, de radiação solar e de temperatura (SHIOGA, 2009; SHIOGA et al., 2012), resultando em baixas produtividades, passou a ser vista como cultivo marginal.

Figura 1.1 - Distribuição da produção brasileira da cultura do milho na safra 2015/2016 (1ª e 2ª safra). Fonte: CONAB (2016)

Inicialmente vista como uma atividade de risco, no início da década de 1990, com o avanço no nível tecnológico empregado, com a utilização de ciclos precoces e adaptados às

condições climáticas mais restritivas à cultura, a 2ª safra do milho, passou a ser a melhor opção de cultivo aos agricultores paranaenses, para o período outono-inverno (FORNASIERI FILHO, 2007). Atualmente cultivada inclusive em parte dos estados das regiões Sudeste e principalmente Centro-Oeste os níveis de produtividade e produção, da 2ª safra têm superado a 1ª safra (CONAB, 2016).

Apesar de sua adaptação às diferentes regiões climáticas do Brasil, a cultura do milho apresenta grande variação de produtividade de acordo com o clima de cada local e com a época de semeadura. Em anos específicos, a variabilidade interanual e sazonal das condições meteorológicas pode reduzir significativamente os níveis de produtividade nos diferentes ciclos de produção (BERLATO; FARENZENA e FONTANA, 2005; SOLER et al., 2011). Sendo assim, a cultura do milho, com todas as demais, é altamente dependente do clima e da interação deste com o genótipo (cultivar) e com manejo da cultura (PALHARES, 2003).

Para o Brasil, todos os modelos climáticos globais ou regionais apresentam projeções de clima futuro mais quente, com taxas que variam entre os modelos e entre os cenários de gases de efeito estufa. Já para a chuva, os cenários indicam aumento nos acumulados em algumas regiões e redução em outras (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO, 2009; PBMC, 2013; TORRES e MARENGO, 2013; CHOU et al., 2014; REBOITA et al., 2014; SÁNCHEZ et al., 2015). Preocupantemente, as projeções sob temperaturas mais quente tem indicado um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, com períodos de muito frio ou muito calor; chuvas intensas ou secas severas

Essas mudanças do clima irão afetar diretamente a agricultura, uma vez que com temperaturas mais elevadas e alteração nos padrões das chuvas, o regime hídrico dos solos também deverá ser alterado. A nível nacional, vários estudos têm demonstrado os impactos das alterações do clima na produtividade das culturas como os relatados por Siqueira; Farias e Sans (1994) e Streck e Alberto (2006), para o trigo, milho e soja, Costa et al. (2009) para o milho e o feijão, Justino et al. (2013) para o milho e a soja, Minuzzi e Lopes (2015) para o milho, Gouvêa (2008), Marin et al., (2013), Pinto (2015) para a cana-de-açúcar e Do Rio et al. (2016) e Battisti (2016) para a soja. Apesar disso, poucos têm avaliado o efeito de ações de manejo na mitigação desses impactos.

Para a cultura do milho, espera-se que sob cenário de aumento nas concentrações de CO₂, e de elevação da temperatura do ar juntamente com as alterações nos padrões das chuvas (volume e distribuição), os atuais níveis de produtividade da 1ª e 2ª safra, nas diferentes regiões brasileiras, deverão sofrer alteração, especialmente nos cultivos de sequeiro. Tal hipótese é reforçada pela alta correlação existente entre as produtividades da cultura do milho e as

condições climáticas (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2009), especialmente as condições hídricas, que são as que mais afetam a produção das lavouras de milho. Dada a relevância das condições climáticas para a cultura do milho, espera-se que qualquer mudança no clima possa resultar em alterações no zoneamento agrícola, nos níveis de produtividade e na realização das práticas de manejo.

Devido à extensão territorial do país, os impactos das mudanças climáticas podem variar regionalmente. Para que tal hipótese possa ser comprovada, modelos de simulação de culturas podem ser empregados, pois possibilitam simular o crescimento e o desenvolvimento da cultura do milho sob uma ampla gama de condições ambientais e de manejo, sendo ferramentas altamente eficientes para esse tipo de estudo.

Dentre os modelos de simulação da cultura do milho, o CERES-*Maize* (RITCHIE et al., 1998), acoplado à plataforma DSSAT - *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (JONES et al., 2003), e o MONICA - *Model for Nitrogen and Carbon in Agroecosystems* (NENDEL et al., 2011) vêm se destacando em função de suas abordagens mecanísticas, já que ambos são baseados em processos.

Dada a possibilidade da predição das variações na fenologia das plantas e na produtividade em função das mudanças climáticas, estudos sobre ações que permitam mitigar eventuais perdas são relevantes, permitindo orientar agências governamentais e tomadores de decisões na busca de soluções. Diante disso, os objetivos do presente estudo foram: (i) avaliar o preenchimento de falhas nas séries históricas das diferentes variáveis meteorológicas ou a estimação daquelas cujas medidas estavam ausentes, de modo a caracterizar o clima e sua variabilidade e gerar cenários climáticos futuros para diferentes regiões brasileiras; (ii) calibrar e avaliar os modelos DSSAT/CSM-CERES-*Maize* e MONICA para simular o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho de 1ª e 2ª safras para diferentes localidades e analisar a sensibilidade desses modelos às variações de diferentes fatores que exercem influência no desenvolvimento e na produtividade da cultura do milho; (iii) aplicar os modelos calibrados e avaliados para a determinação da produtividade do milho sob condições climáticas atuais e futuras, avaliando-se diferentes estratégias de manejo para minimização dos impactos das mudanças climáticas nos diferentes cenários de alterações do clima, em diferentes regiões brasileiras.

Referências

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da; MARENGO, J. A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L. A.; FERNANDEZ, J. P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretaria de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007, p. 73.

BATTISTI, R. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. In: MONTEIRO, J. E. B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. Parte II - Cultivos temporários, p. 239–260.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 423-432, 2005.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 3, p. 512-527, 2014.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 12, Safra 2015/16 – Décimo segundo levantamento**, Brasília, p. 1-182, 2016.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, Ibaraki, v. 4, p. 1-10, 2009.

DO RIO, A.; SENTELHAS, P. C.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R.; FERREIRA, R. C. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 36, p. 3664-3672, 2016.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep. 2007, 576p.

GOUVÊA, J. R. F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 2008. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235–265, 2003.

JUSTINO, F.; OLIVEIRA, E. C.; RODRIGUES, R. D. Á.; HENRIQUE, P.; GONÇALVES, L.; JORGE, P.; PONTE, O.; STORDAL, F.; MARENGO, J.; SILVA, T. G.; DELGADO, R. C.; LINDEMANN, S.; COSTA, L. C. Mean and Interannual Variability of Maize and Soybean in Brazil under Global Warming Conditions. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 2, p. 237–253, 2013.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte III - Variabilidade Climática, p. 407-424.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 117, p. 227–239, 2013.

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 734–740, 2015.

NENDEL, C.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H. J.; WENKEL, K. O. Testing different CO₂ response algorithms against a FACE crop rotation experiment. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, Wageningen, v. 57, p. 17–25, 2009.

PALHARES, M. **Distribuição e população de plantas e produtividade de grãos de milho**. 2003. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

PBMC. PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro relatório de Avaliação Nacional do PAINEL Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1**. PBMC, Rio de Janeiro, 24p., 2013.

PINTO, H. M. S. **Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, Boulder, v. 2014, p. 1–17, 2014.

RITCHIE, J. T.; SINGH, U.; GODWIN, D. C.; BOWEN, W. T. Cereal growth, development and yield. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998, p. 79–98.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A. R. C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R. P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 45, p. 2193-2212, 2015.

SHIOGA, P. S. Sistemas de produção do milho safrinha no Paraná. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 10., 2009, Rio Verde. GO. **Anais...** 2009.

SHIOGA, P.S.; GERAGE, A. C.; ARAÚJO, P.M. de; BIANCO, R. **Avaliação estadual de cultivares de milho segunda safra 2012**. 1ª Ed. Londrina: IAPAR, 2012. 114p. (IAPAR Boletim Técnico 78).

SIQUEIRA, O. J. F. de; FARIAS, J. R. B. de; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 115–129, 1994.

SOLER, C. M. T.; BADO, V. B.; TRAORE, K.; BOSTICK, W. M.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Soil organic carbon dynamics and crop yield for different crop rotations in a degraded ferruginous tropical soil in a semi-arid region: a simulation approach. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 149, p. 579–593, 2011.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 1351–1359, 2006.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 112, p. 253–272, 2013.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura do milho no Brasil

No cenário mundial, o Brasil figura como o terceiro maior produtor de milho, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e pela China (FAOSTAT, 2017). A produção tem se caracterizado pela divisão em duas épocas de plantio: a de verão, ou 1ª safra, realizada na época tradicional (de outubro a novembro), durante o período chuvoso; e a safrinha, ou 2ª safra, que se refere ao milho de sequeiro semeado em fevereiro ou março, em sucessão à cultura do verão, normalmente a soja.

O milho da 2ª safra, com os primeiros plantios sendo realizados por volta de 1978/79, era semeado como uma opção de rotação de culturas na entressafra. Já os incrementos na área de cultivo no início dos anos 80, no Paraná, foram devido à necessidade do grão para uso na propriedade, principalmente pelos produtores de suínos e aves. Inicialmente considerada como um cultivo marginal, a partir das experiências pioneiras, esse sistema de plantio, realizado fora da época normal e em condições climáticas desfavoráveis, cresceu recebendo investimentos tecnológicos, o que permitiu a sua expansão para diferentes regiões do país.

Atualmente, a cultura do milho da 2ª safra responde pela maior parte da produção total do grão, resultado do incremento na produtividade e, principalmente, na expansão da área de plantio, conforme exposto na Figura 2.1. Com produção total em 2015/16 de 66,7 milhões de toneladas, a 2ª safra foi responsável por 61,2% da produção nacional. Já a área total de milho da última safra atingiu 15,9 milhões de hectares, com o milho da 2ª safra representando 66,2% da área plantada. Grande parte da produção total na 1ª Safra é produzida nas regiões Sul (46,0%) e Sudeste (29,1%), enquanto que a região Centro-Oeste responde por 63,2% da produção na 2ª safra (CONAB, 2016a).

A produção nacional de milho na safra 2015/16, considerando a 1ª e 2ª safras, teve uma queda de 21,2% em relação à safra anterior, com uma redução da produtividade de 22,4% devido às condições meteorológicas adversas, principalmente na 2ª safra (CONAB, 2016a).

Recentemente, a região denominada MATOPIBA, sigla que define a fronteira agrícola formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, vem recebendo destaque pelo seu potencial agrícola. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016a), o cultivo de milho, 1ª e 2ª safra na região, relativo a safra 2014/2015, cresceu 97% em área de cultivo, com a produção aumentando de 2,4 para 6,3 milhões de toneladas na última década.

Figura 2.1 – Evolução anual da área plantada (a), produtividade (b) e produção (c) do milho no Brasil na 1ª e 2ª safras. Fonte: (CONAB, 2016b)

A produtividade média nacional ainda é de aproximadamente $5,0 \text{ t ha}^{-1}$, valor que, no entanto, não reflete o nível tecnológico alcançado nos últimos anos, uma vez que os valores médios são determinados a partir da produtividade obtida em diferentes regiões, considerando lavouras com diferentes níveis tecnológicos (sistemas de cultivo e manejo). Nas áreas mais tecnificadas das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, as produtividades chegam a alcançar, $12,0 \text{ t ha}^{-1}$ na 1ª safra e $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ na 2ª safra, respectivamente.

2.2. Necessidade térmica e hídrica do milho

O desenvolvimento da planta de milho depende, basicamente, das condições térmicas, que influenciam desde a germinação e emergência, função da temperatura do solo, até o desenvolvimento fenológico e o crescimento da planta, afetados principalmente pela temperatura do ar (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2009). Aqui, quando nos referimos ao crescimento, este consiste, basicamente, no aumento do tamanho da planta e é potencializado

por condições favoráveis, como umidade adequada, nutrientes, temperatura, etc.; enquanto que, o desenvolvimento é a progressão do estágio da planta para um estágio mais avançado.

De acordo com Landau; Sans e Santana (2010) as temperaturas afetam as diferentes fases de desenvolvimento do milho da seguinte forma: (i) temperatura do solo inferior a 10°C e superior a 40°C a profundidades superficiais, comprometem os processos normais de germinação, sendo as temperaturas ideais entre 25 e 30°C; (ii) as fases de florescimento e maturação podem ser aceleradas sob temperatura média superior a 26°C e retardadas quando essas forem inferiores a 15,5°C; (iii) temperatura do ar acima de 35°C pode reduzir a produtividade do milho, assim como, alterar a composição proteica dos grãos; (iv) temperaturas acima de 33°C reduzem o potencial germinativo dos grãos de pólen; (v) temperaturas noturnas superiores a 24°C, aumentam o gasto energético em função do incremento da respiração celular, reduzindo a taxa de assimilação, com consequente queda de produtividade da cultura.

Quanto às necessidades hídricas, a quantidade de água que o milho utiliza durante o ciclo é influenciada por diversos fatores, tais como: a demanda evaporativa da atmosfera, que varia de acordo com o clima; época de cultivo; duração do ciclo da cultura; e da disponibilidade de água no solo (HSIAO, 2012).

Doorenbos e Kassam (1994) citam que para se atingir produtividades máximas, uma cultivar de milho de ciclo médio necessita entre 500 e 800 mm para atender sua evapotranspiração. Já Albuquerque (2010) apresentou um patamar inferior, que variou de 380 a 550 mm de água em seu ciclo, dependendo das condições climáticas, valores que corroboram com os resultados apresentados por Landau; Sans e Santana (2010), que variam de 350 a 500 mm, representando um consumo médio diário de 5 a 7 mm dia⁻¹ no período de maior demanda, que compreende a fase reprodutiva, desde a iniciação floral à maturação.

Já a sensibilidade da cultura do milho ao déficit hídrico depende da demanda evaporativa da atmosfera, da capacidade de armazenamento de água no solo, das características da cultivar e do estágio de desenvolvimento em que a planta se encontra (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2009). Quando a estiagem, mesmo que de curto período, coincide com o período crítico da cultura, há uma drástica redução da produtividade (DOORENBOS e KASSAM, 1994; BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2009). De acordo com Magalhães; Durães (2006), o efeito da falta de água sobre a produção de grãos de milho, é importante em três estágios de desenvolvimento da planta: (i) iniciação floral e desenvolvimento de inflorescência, quando o número potencial de grãos é determinado; (ii) período de fertilização, quando o potencial de produção é fixado; e (iii) enchimento de grãos. Bergamaschi et al. (2004)

identificaram elevada sensibilidade ao déficit hídrico no período que se estende desde o pendoamento até o início de enchimento de grãos.

2.3. Variabilidade climática e produtividade de milho no Brasil

Considerando-se os atuais níveis de produtividade agrícola no Brasil, o clima e sua variabilidade é o principal fator de risco para a atividade agrícola do país, responsável pelas oscilações e frustrações das safras (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2009). Um exemplo disso é a produção nacional de milho na safra 2015/16, a qual na soma da 1ª e 2ª safras apresentou uma redução de 21,2% em relação à safra anterior, decorrente do efeito das condições meteorológicas adversas na produtividade da cultura (CONAB, 2016a).

Portanto, a agricultura é altamente impactada pela variabilidade climática natural, decorrente, principalmente, do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) (GRIMM, 2009), o qual gera alterações no padrão do clima de forma variada no território brasileiro, já que os fenômenos El Niño (fase quente do ENOS) e La Niña (fase fria do ENOS) afetam a distribuição de chuvas e alteram a temperatura do ar. Diversos estudos vêm evidenciando os efeitos dessa variabilidade na produtividade da cultura do milho, como aqueles apresentados por Bergamaschi et al. (2004), Berlato; Farenzena e Fontana (2005); Soler; Sentelhas e Hoogenboom (2010) e Justino et al. (2013).

O efeito do ENOS no clima do Brasil é bastante variável, dada a grande extensão territorial do país, a alta diversidade de formas de relevo, a variação da altitude e também a dinâmica das correntes e massas de ar, fazendo com que o Brasil apresente uma grande diversidade de climas, de modo que a variação climática natural, por si só, apresente impactos distintos na produtividade agrícola das diferentes regiões do país.

Essa diversidade climática é exemplificada na Figura 2.2, na qual se observa a caracterização climatológica mensal das chuvas (Figura 2.2a) e das temperaturas (Figura 2.2b) no território brasileiro, de acordo com Xavier; King e Scanlon (2015). No Norte do país, verifica-se um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca. No Nordeste, em grande parte da região, a estação chuvosa apresenta baixos índices pluviométricos, restringindo-se a poucos meses, caracterizando um clima semiárido. As Regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem influência, tanto de sistemas tropicais, como de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas. O Sul do Brasil, devido à sua localização latitudinal, sofre maior influência dos sistemas de latitudes médias, onde os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante o ano.

Figura 2.2 - Variação mensal das chuvas (a) e das temperaturas máxima e mínima do ar (b), em espaçamento de grade de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude/longitude, calculados com a base nos dados de Xavier; King e Scanlon (2015), no período de 1980-2009

Com relação à temperatura do ar (Figura 2.2b), observa-se nas Regiões Norte e Nordeste valores elevados com pouca variação sazonal, caracterizando o clima quente. Nas médias latitudes, a variação da temperatura ao longo do ano é muito importante na definição do clima. No período de inverno há maior penetração de massas de ar frio de altas latitudes, o que contribui para a predominância de baixas temperaturas (QUADRO et al., 1996) e, consequentemente, baixas taxas de evapotranspiração das culturas agrícolas.

As projeções de clima futuro têm indicado condições mais quentes e alterações no regime de chuvas, com aumento na frequência dos eventos climáticos extremos (PBMC, 2013; IPCC, 2014). Os impactos esperados não são igualmente distribuídos, com as regiões tropicais sendo as mais expostas, o que se torna um desafio quanto a necessidade de adaptação no setor agrícola, frente a maior demanda por alimentos, pressionada pela elevada taxa de crescimento populacional.

A nível nacional, esse quadro é bastante preocupante, considerando que em termos de produtividade agrícola um dos fatores que exerce grande influência é a disponibilidade hídrica no solo, afetada principalmente pelos padrões de chuva e de evapotranspiração. A exemplo das regiões Central, Norte e Nordeste do país, a redução no regime de chuvas segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), e o aumento da demanda hídrica da atmosfera, com o aumento da temperatura do ar, devem ocasionar déficits hídricos mais pronunciados, afetando de forma negativa as produtividades das culturas agrícolas.

Na Figura 2.3 é apresentada a caracterização dos padrões sazonais a partir de valores médios diários do balanço entre a chuva (P) e a evapotranspiração potencial (ETP), determinada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), nas diferentes regiões do Brasil para os quatro trimestres do ano.

No trimestre (JFM), que engloba boa parte do verão (Figura 2.3a), em que predominam os maiores acumulados de chuva em relação às demais estações do ano, observa-se um balanço positivo em grande parte do Brasil, sendo que no Sul do país o balanço levemente negativo está associado às elevadas temperaturas do ar, enquanto que em Roraima o saldo negativo está associado às poucas chuvas nesse período. No Nordeste, tem-se a combinação de elevadas temperaturas e os baixos acumulados de chuva que caracterizam áreas com balanço negativo entre P e ETP.

No segundo trimestre (AMJ), que engloba boa parte do outono (Figura 2.3b), observam-se áreas com balanço negativo em grande parte das regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste. No Sul do país, o início do período com diminuição das temperaturas indica que os

acumulados de chuva superam a ETP. Na região Norte, os maiores acumulados de chuva também se sobrepõem à evapotranspiração.

Figura 2.3 – Variação sazonal da balanço entre a chuva (P) e a evapotranspiração potencial (ETP) (mm d^{-1}) nos quatro trimestres do ano: JFM (a), AMJ (b), JAS (c) e OND (d), determinados com a base nos dados de Xavier; King e Scanlon (2015), no período de 1980-2009. A ETP foi estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998)

No trimestre (JAS), que contempla boa parte do inverno (Figura 2.3c), a diminuição das temperaturas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, resulta em menores valores de ETP. No entanto, devido à redução das chuvas nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e, inclusive Norte e Nordeste, predominam as áreas com balanço negativo, com exceção apenas para parte da região Sul e no extremo norte da região Norte.

No trimestre (OND), que contempla a primavera (Figura 2.3d), apesar das temperaturas voltarem a aumentar, a chuva também aumenta, caracterizando excedente hídrico em grande parte do país, com exceção para a região Nordeste, na qual os acumulados de chuva permanecem baixos.

2.4. Cenários climáticos futuros

Apesar de se ter um conjunto de causas naturais que podem conduzir para as mudanças climáticas, tais como: variação na deriva continental; na constante solar; na órbita da terra ao redor do Sol; e erupções vulcânicas, o homem também contribui para tais mudanças no clima (PEREIRA et al., 2002; PBMC, 2013).

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, 2007; 2014), a maior contribuição humana para as mudanças climáticas vem da emissão dos gases de efeito estufa (GEEs). Os GEEs absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e a reemite para a superfície, elevando as temperaturas do planeta, em um efeito comparável ao que acontece no interior de uma estufa. Dentre os gases de efeito estufa estão o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). O CO_2 é o principal deles, sendo que a nível nacional, os setores de energia, agropecuária e mudança de uso da terra e floresta detêm a maior participação das emissões, contribuindo com 37, 33 e 18%, respectivamente. Já os 12% restantes são emissões provenientes da soma do que é emitido pelos setores industriais e de tratamento de resíduos (MCTI, 2016).

Vale salientar que o efeito estufa é um efeito natural e benéfico (até o ponto em que é capaz de manter a temperatura da Terra dentro dos limites favoráveis às condições de vida no planeta). No entanto, o que é preocupante, é o aumento nas concentrações de GEEs em relação ao período pré-industrial, em que as concentrações se elevaram dos 280 ppm, para os atuais 404 ppm (DLUGOKENCKY e TANS, 2017), resultando no aumento da temperatura média global e alteração do padrão de chuvas, impactando os diversos setores da sociedade. A partir da percepção da influência da ação humana no clima do planeta, em 1988 foi criado o IPCC,

designado para avaliar pesquisas realizadas em âmbito internacional, relevantes ao entendimento dos riscos das mudanças climáticas, seus impactos e, de estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

As projeções de clima futuro são resultado de um esforço conjunto de 20 grupos de modelagem climática de todo o mundo, em que vários modelos climáticos globais (MCGs) têm sido utilizados para prover projeções do clima futuro. Essas projeções fazem parte da quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5*) (TAYLOR; STOUFFER e MEEHL, 2012), sendo avaliados no quinto relatório de avaliação (*Fifth Assessment Report - AR5, IPCC-AR5*) do IPCC (2014).

As projeções climáticas fornecidas pelos MCGs do CMIP5 são realizadas utilizando-se a nova geração de cenários forçantes. Até seu quarto Relatório de Avaliação (AR4), o IPCC definia os cenários climáticos baseados em cenários de emissão (*Special Report on Emission Scenarios - SRES*). Já em seu quinto relatório, o painel passou a adotar cenários das forçantes radiativas, denominados Caminhos Representativos de Concentrações (*Representative Concentration Pathways - RCPs*). O termo ‘representativos’ refere-se a um dos muitos cenários possíveis, enquanto o termo ‘caminhos’ dá importância à trajetória descrita pelos níveis de concentração ao longo do tempo e não apenas ao valor pontual alcançado a longo prazo (MOSS et al., 2010; VAN VUUREN et al., 2011).

Neste caso, a forçante radiativa expressa a variação do balanço de energia incidente e da energia emergente do sistema climático em relação à época pré-industrial, sendo expressa em termos de energia (Wm^{-2}). Desse modo, uma forçante positiva induz um aquecimento do sistema Terra-Atmosfera, enquanto que uma forçante radiativa negativa induz a um resfriamento.

Conforme ilustrado na Figura 2.4, as simulações realizadas pelo CMIP5 consideram quatro tipos de cenários, com base nos valores da forçante radiativa ao final do século XXI (MOSS, et al., 2010; MEINSHAUSEN et al., 2011; VAN VUUREN et al., 2011; TAYLOR; STOUFFER e MEEHL, 2012): i) cenário de baixa emissão de gases de efeito estufa, RCP2.6, em que a forçante radiativa atinge um pico de 3 Wm^{-2} e decai para valores de $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ em 2100; ii) cenários de emissão intermediária, RCP4.5 e RCP6.0, em que a forçante radiativa estabiliza em valores próximos de $4,5$ e $6,0 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente; iii) cenário de alta emissão, no qual a forçante radiativa cresce ao longo do século 21 atingindo valores da ordem de $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ em 2100.

Figura 2.4 - Representação da trajetória descrita pela forçante radiativa para as simulações de clima futuro adotados nos modelos de circulação geral do CMIP5, de acordo com as diferentes hipóteses socioeconômicas (sob baixa, intermediária e alta emissão), conhecidas como Trajetórias Representativas de Concentração (RCP) e denominadas como RCP2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, que correspondem a uma forçante radiativa aproximada ao final do século XXI, de 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 Wm^{-2} , respectivamente, relativo às condições pré-industriais. Fonte: Meinshausen et al. (2011)

Na Figura 2.5 (esquerda), com trajetória similar ao descrito pela forçante radiativa, os níveis de CO_2 no cenário RCP2.6 atingem um pico equivalente a 490 ppm antes de 2100 e, então, decaem. Nos cenários RCP4.5 e RCP6.0 os níveis de CO_2 se estabilizam em valores próximos a 650 e 850 ppm, respectivamente. E no cenário de maior forçante, RCP8.5, os níveis de CO_2 em 2100, alcançam 1370 ppm (MEINSHAUSEN et al., 2011; TAYLOR; STOUFFER e MEEHL, 2012). Já as projeções de temperatura ao final do século XXI, Figura 2.5 (direita), indicam aumento dos valores médios globais, em relação ao período 1986-2005, para todos os cenários de emissão. Para o cenário mais pessimista, no qual as emissões continuam a crescer em ritmo acelerado, o aumento médio será de 2,6 a 4,8°C, enquanto que para estimativas mais otimistas, que consideram baixas emissões, o aumento médio deverá ser de 0,3 a 1,7°C (KNUTTI; SEDLÁČEK, 2013; IPCC, 2014).

Figura 2.5 - Projeção da concentração de CO₂ atmosférico, em ppm (esquerda), para cada um dos RCPs (área em cinza claro e escuro indicam os percentis de 98 e 90% de probabilidade de ocorrência), e da temperatura global (média e desvio padrão em sombreado), relativo ao período histórico 1986-2005, projetada pelos MCGs do CMIP5 utilizando os RCPs, em que entre parênteses estão indicados o número de MCGs utilizados para cada cenário (direita). Fonte: Van Vuuren et al. (2011) e Knutti e Sedláček (2013)

2.5. Mudanças climáticas e impactos na agricultura

Para o Brasil, todos os modelos climáticos globais ou regionais apresentam projeções de clima futuro mais quente, com taxas que variam entre os modelos. Já para a chuva, os cenários não são conclusivos, com indícios de aumento em algumas regiões e redução em outras, dependendo dos modelos considerados (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO, 2009; PBMC, 2013; TORRES e MARENGO, 2013; CHOU et al., 2014; REBOITA et al., 2014; SÁNCHEZ et al., 2015). No entanto, o efeito dessas alterações climáticas na produtividade das culturas agrícolas ainda é incerto.

No caso dos níveis de CO₂, sendo este gás fonte primária de carbono para a fotossíntese, responsável pela produção de biomassa vegetal, espera-se que a elevação de seus níveis aumente a taxa de crescimento das plantas, resultando em maiores produtividades (STRECK, 2005; MARTINEZ et al., 2015). Por outro lado, maiores [CO₂] deverão causar redução na condutância estomática, devido à menor abertura dos estômatos, reduzindo as perdas de água por transpiração (LEAKEY, 2009; SILVA et al., 2012b). A redução da transpiração, por sua vez, diminui a quantidade de água conduzida através do xilema e absorvida pelas raízes, reduzindo a taxa de absorção de nutrientes, o que poderá demandar adubações maiores em

ambientes com elevada $[\text{CO}_2]$ para que se possa manter os atuais índices de produtividade (WALTER; ROSA e STRECK, 2015).

Apesar de tais abordagens serem pertinentes, respostas distintas são esperadas em relação à elevação da $[\text{CO}_2]$ entre espécies de plantas com metabolismo fotossintético C3 e C4 (GRAY e BRADY, 2016). Plantas do tipo C4, como o milho, o milheto, a cana-de-açúcar, nos atuais níveis de CO_2 são mais eficientes na fixação de carbono de modo que a perda de CO_2 no processo de fotorrespiração é desprezível. Assim, sob maior $[\text{CO}_2]$ as plantas C3 deverão minimizar a perda por fotorrespiração e a tendência é que essas aumentem sua taxa de fixação de carbono, ao passo que as plantas C4 não deverão responder ao incremento na $[\text{CO}_2]$ na mesma proporção (ARAÚJO et al., 2015; MARTINEZ et al., 2015). Por outro lado, plantas de metabolismo C4, quando submetidas a elevados níveis de CO_2 , poderão ser beneficiadas quando submetidas a déficit hídrico ou nutricional (LEAKEY, 2009).

O potencial de resposta de plantas C4 às elevadas $[\text{CO}_2]$ tem sido mostrado em estudos na Índia. Jalota; Ray e Panigrahy (2009), com simulação numérica, mostraram que a duplicação da $[\text{CO}_2]$, mantendo as condições atuais de temperatura (1991-2005), resultariam em aumentos no rendimento nas culturas do milho, algodão e arroz da ordem de 6,5, 5,5 e 4,9%, respectivamente. Já, Vanaja et al. (2015), utilizando câmaras de topo aberto, para três genótipos de milho, sob condições atuais (390 ppm) e de elevada (550 ppm) $[\text{CO}_2]$, mostraram ganho de biomassa variando de 32 a 47%, e produtividade de grãos aumentando de 46 a 127%.

Se considerado o aumento da temperatura do ar, os efeitos benéficos dos níveis de $[\text{CO}_2]$ na produtividade das culturas poderá ser anulado, em decorrência do encurtamento do ciclo e devido ao aumento da respiração de manutenção (STRECK, 2005). Em estudo numérico aplicado às culturas de trigo, arroz, milho e milheto na Índia, Tripathy; Ray e Singh (2009) evidenciaram esse efeito. O milho foi a cultura que teve a menor sensibilidade entre as quatro culturas analisadas, apresentando redução de 8 a 25 dias no ciclo, com queda na produtividade variando de 9,5 a 37,4%, sob incrementos de temperatura de 1 a 5°C. Adicionalmente Jalota; Ray e Panigrahy (2009), elevando a temperatura média atual em 20%, mostraram reduções na produtividade das culturas de arroz, milho e algodão da ordem de 26, 49 e 75%, respectivamente.

Considerando o efeito combinado, Tripathy; Ray e Singh (2009) mostraram, ainda, que a redução na produtividade, devido ao stress térmico, pode ser compensada pela duplicação na $[\text{CO}_2]$. Os autores evidenciaram a mitigação das perdas na produtividade devido ao efeito adverso do aumento de até 1°C na temperatura, no caso do milheto, 2°C para as culturas de trigo e arroz, e de até 3°C, no caso do milho; enquanto que Jalota; Ray e Panigrahy (2009)

mostraram que, para elevações de temperatura de até 2°C e com o dobro da [CO₂], a produtividade das culturas de milho, arroz e algodão não foi afetada, evidenciando que o efeito negativo do aumento da temperatura foi compensado pelo aumento nas emissões de CO₂.

No Brasil, Costa et al. (2009) mostraram que, sob condições de temperaturas mais elevadas, a produtividade potencial do milho no estado de Minas Gerais apresentaria redução para os anos de 2050 e 2080 em até 30% em relação ao ano base de 2000. Ainda, adicionando o efeito fertilizador do CO₂, os autores mostraram que os efeitos negativos de temperaturas mais elevadas foram mais pronunciados do que o efeito benéfico da crescente [CO₂] na produtividade do milho, concordando com Benlloch-Gonzalez et al. (2014) que, em estudo realizado com a cultura do trigo na Austrália, observaram que temperaturas elevadas reduziram o efeito positivo das [CO₂] em decorrência do desenvolvimento reduzido do sistema radicular, possivelmente associado a redução na condutância estomática e transpiração, que ocasionaria aumento da temperatura das folhas e do dossel, reduzindo o crescimento e a partição de biomassa.

2.6. Modelos de simulação de culturas

A mudança climática global devido ao aumento constante dos GEEs na atmosfera, tende a ocasionar o aumento nas temperaturas, assim como mudanças nos padrões de chuva. Espera-se que as alterações nesses padrões terão efeitos amplos sobre o ambiente e, consequentemente, sobre os recursos hídricos e agricultura. O Brasil, sendo um país de grande extensão territorial, apresenta variação acentuada nos padrões climáticos, portanto, possíveis alterações climáticas deverão implicar em respostas distintas na produção agrícola (ASSAD et al., 2004; PBMC, 2013). Nesse sentido, modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas, tem se mostrado como ferramentas úteis na compreensão de como a elevação dos níveis de CO₂, o aumento da temperatura do ar e as variações na chuva, influenciarão o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas (RAUFF e BELLO, 2015).

Dentre os principais sistemas que empregam modelos de crescimento de culturas destacam-se: DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*, DSSAT version 4.6, JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2014) composto por diversos modelos de simulação; e MONICA (*MOdel for Nitrogen and Carbon in Agro-ecosystems*, NENDEL et al., 2011) desenvolvido na Europa Central para a simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas sob impactos de mudanças climáticas.

2.6.1. Modelo DSSAT/CERES-Maize

A plataforma DSSAT - *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (JONES et al., 2003), que abriga o modelo CERES-Maize, contém ferramentas de suporte que auxiliam na manipulação de dados de clima, solo, condições experimentais e informações do genótipo. O sistema permite, ainda, simulações sazonais ou sequências (sistema de rotação de culturas), para aplicação de estudos de riscos e impactos associados a mudanças climáticas (HOOGENBOOM et al., 2014).

O modelo CERES-Maize é parte de um sistema modular denominado *Crop System Model* (CSM), o qual usa o mesmo conjunto de códigos para simular a dinâmica da água, de carbono e de nitrogênio no solo, para cereais como milho, arroz, trigo, cevada e milheto, enquanto o crescimento e o desenvolvimento das plantas são simulados a partir de módulos específicos de cada cultura (HOOGENBOOM et al., 2010).

As fases fenológicas para a cultura do milho, usadas no modelo CERES-Maize, incluem germinação, emergência, fim da fase juvenil, iniciação da floração masculina, começo do enchimento de grãos e maturidade fisiológica (HOOGENBOOM et al., 2010). O desenvolvimento da cultura é controlada pela temperatura, ou seja, pela soma térmica ou graus-dia ($^{\circ}\text{C}$ dia), dado pelos graus-dia acumulados desde a emergência das plântulas até o estágio juvenil (temperatura base de 8°C) (P1), pelo coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (P2) e pelos graus-dia acumulados desde o florescimento até o ponto de maturidade fisiológica (temperatura base 8°C) (P5) e graus-dia necessários para a emergência de uma folha (PHINT). A produtividade, por sua vez, é controlada pelos seguintes coeficientes: número potencial de grãos por planta (G2) e taxa potencial de crescimento do grão (G3) (HOOGENBOOM et al., 1994, 2010; JONES et al., 2003).

Para as simulações, o modelo CERES-Maize necessita no mínimo dados de entrada de clima (temperatura máxima e mínima do ar diária, radiação solar global, chuva), do solo (classificação, granulometria, declividade e drenagem), práticas de manejo (semeadura, cultivar, espaçamento entre linhas, densidade de plantas e profundidade de plantio, manejo de fertilizantes e de irrigação) e genótipo.

O balanço de água no solo é dado em termos da quantidade de água disponível em cada camada, considerando o limite superior (ponto de murcha permanente) e inferior (capacidade de campo) de água disponível e o ponto de saturação do solo. A infiltração é resultado da diferença entre a água suprida pela irrigação ou chuva e o escoamento superficial. Quando a soma da quantidade de água infiltrada e presente no solo superar a capacidade de

retenção (diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente), o volume excedente é drenado para a camada inferior, e assim sucessivamente, conhecido pelo movimento de água no solo do tipo “cascata” (RITCHIE, 1998). Para a contabilização do conteúdo diário de água no solo, considera-se, ainda, a evaporação do solo e a transpiração da planta, a qual é estimada por meio da evapotranspiração potencial, segundo os métodos de Priestley e Taylor (1972) ou de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

2.6.2. Modelo MONICA

O modelo MONICA está disponível de forma aberta e inserido no sistema de apoio à decisão para avaliação do impacto das mudanças climáticas e análise das estratégias potenciais de adaptação ao uso da terra LandCaRe2020 (WENKEL et al., 2013).

O modelo MONICA é o sucessor do modelo HERMES (KERSEBAUM, 1995), incluindo o ciclo de carbono, em que os algoritmos de crescimento de culturas são influenciados por mudanças na $[CO_2]$, sendo concebido, portanto, para dar suporte às pesquisas da dinâmica do carbono sob mudanças climáticas (SPECKA; NENDEL e WIELAND, 2015). Foi desenvolvido na Europa Central (Alemanha) para a simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas, considerando a dinâmica da água, nitrogênio e carbono no sistema solo-planta-atmosfera (NENDEL et al., 2011).

Em termos de crescimento e desenvolvimento das culturas, a produção diária líquida de matéria seca devido à fotossíntese e à respiração é influenciada pela radiação solar global e temperatura (NENDEL, 2014). A $[CO_2]$ afeta a taxa de fotossíntese máxima e a resistência estomática, influenciando a transpiração (NENDEL, 2014; SPECKA; NENDEL e WIELAND, 2015). A respiração de manutenção é calculada separadamente para períodos diurnos e noturnos. Já os fotoassimilados são atribuídos a diferentes partições de órgãos, dependendo da fase de desenvolvimento da cultura (KERSEBAUM, 1995).

Em condição de restrição hídrica, que esteja limitando a transpiração potencial, a assimilação bruta de CO_2 é reduzida por um fator que considera a transpiração real em relação à transpiração potencial, em que a sensibilidade ao déficit hídrico é determinada pelo coeficiente da cultura, variável de acordo com o estágio fenológico (NENDEL, 2014).

Constando de uma plataforma genérica, o modelo MONICA pode ser adaptado a várias culturas usando parâmetros específicos que descrevem sua fisiologia e desenvolvimento, que por sua vez, são calculados a partir da soma térmica (graus-dia). Das fases fenológicas simuladas para a cultura do milho, ajustadas para a cultivar, tem-se: semeadura a emergência (1), emergência a emissão de folhas (2), emissão de folhas a inflorescência masculina (3),

inflorescência masculina ao florescimento (4), florescimento ao enchimento de grãos (5), enchimento de grãos (6) e maturação (7) (SPECKA; NENDEL e WIELAND, 2015).

O modelo MONICA necessita dados de manejo, informações do perfil de solo e dados de clima (temperaturas do ar máxima, mínima e média diária do ar, chuva, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar global e insolação) (SPECKA; NENDEL e WIELAND, 2015).

O movimento de água no solo é modelado em termos da capacidade de campo, de modo que a água que não pode ser armazenada em uma dada camada do solo é drenada para a camada inferior, com a capacidade de armazenamento e a taxa de percolação governadas pela textura e conteúdo de matéria orgânica do solo (NENDEL, 2014). A evapotranspiração é determinada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), adaptado aos coeficientes específicos da cultura.

Referências

ALBUQUERQUE, P. E. P. **Manejo de irrigação na cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas. Sistema de Produção 1, Versão Eletrônica - 6ª edição, 2010.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da; MARENGO, J. A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L. A.; FERNANDEZ, J. P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretária de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007, p. 73.

ARAÚJO, L. F. de; OLIVEIRA, N. P. dos S.; SILVA, R. M. e; BEZERRA, M. A.; ANGELOTTI, F. Influência do aumento do CO₂ no crescimento inicial e nas trocas gasosas do meloeiro amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, p. 439–453, 2015.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1057-1064, 2004.

BENLLOCH-GONZALEZ, M.; BOCHICCHIO, R.; BERGER, J.; BRAMLEY, H.; PALTA, J. A. High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 165, p. 71–79, 2014.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período

crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 831–839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. In: MONTEIRO, J. E. B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. Parte II - Cultivos temporários, p. 239-260.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul Association between El Niño Southern Oscillation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 423–432, 2005.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 3, p. 512-527, 2014.

CONABa. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 12, Safra 2015/16 – Décimo segundo levantamento**, Brasília, p. 1-182, 2016.

CONABb. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção, Relativas às Safras 1976/77 a 2015/16 de Grãos**. Brasília, 2016.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, Ibaraki, v. 4, p. 1-10, 2009.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmosphere Carbon Dioxide – Global**. National Oceanic & Atmospheric Administration/ Earth System Research Laboratory, 2017. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em fev. 2017

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

FAOSTAT. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Acesso em: 13 jan. 2017.

GRAY, S. B.; BRADY, S. M. Plant developmental responses to climate change. **Developmental Biology**, San Diego, California, v. 419, p. 64–77, 2016.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte II - Climas do Brasil, p. 259-275.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; BATCHELOR, W. D.; BOWEN, W. T.; HUNT, L. A.; PICKERING, N. B.; SINGH, U.; GODWING, D. C.; BAER, B.;

BOOTE, K. J.; RITCHIE, J. T.; WHITE, J. W. Crop models. In: TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Ed.). **DSSAT v3, Decision Support System for Agrotechnology Transfer**. Honolulu: University of Hawaii, 1994, v. 2, cap. 2, p. 95–244.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; WILKENS, P. W.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; TSUJI, G. Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2010.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTE, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. L.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KUO, J.; SHELIA, V.; TSUJI, G. Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2015.

HSIAO, T. C. Herbaceous crops - Maize. In: STEDUTO, P., HSIAO, T.C., FERERES, E., RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome: FAO, 2012. Part III - Yield response to water of herbaceous crop: The AQUACROP simulation model, p. 114-120.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007**. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2007, 104 p.

_____. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014, 151 p.

JALOTA, S. K.; RAY, S. S.; PANIGRAHY, S. EFFECTS OF ELEVATED CO₂ AND TEMPERATURE ON PRODUCTIVITY OF THREE MAIN CROPPING SYSTEMS IN PUNJAB STATE OF INDIA—A SIMULATION ANALYSIS. In: Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, ii, 2009, Ahmedabad. **Anais...**, Ahmedabad 2009.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **Ceres-maize: a simulation model of maize growth and development**. College Station: Texas A&M Univ. Press, 194p, 1986.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235-265, 2003.

JUSTINO, F.; OLIVEIRA, E. C.; RODRIGUES, R. D. Á.; HENRIQUE, P.; GONÇALVES, L.; JORGE, P.; PONTE, O.; STORDAL, F.; MARENGO, J.; SILVA, T. G.; DELGADO, R. C.; LINDEMANN, S.; COSTA, L. C. Mean and Interannual Variability of Maize and Soybean in Brazil under Global Warming Conditions. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 2, p. 237-253, 2013.

KERSEBAUM, K. C. Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 81, p. 145-156, 1995.

KNUTTI, R.; SEDLÁČEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 369-373, 2013.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Clima e solo. In: CRUZ, J. C. (Ed.). **Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Sistema de produção 1, 2010. 1p.

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

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Embrapa Milho e Sorgo, 2006. (Circular Técnicas, n. 76).

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte III - Variabilidade Climática, p. 407-424.

MARTINEZ, C. A.; OLIVEIRA, E. A. D. de; MELLO, T. R. P.; MARIN, A. L. A. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 8, p. 635–650, 2015.

MCTI. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 3ª Edição, set.2016. Brasília. Disponível em: http://www.mcti.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf. Acesso em fev. 2017.

MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K.; DANIEL, J. S.; KAINUMA, M. L. T.; LAMARQUE, J.; MATSUMOTO, K.; MONTZKA, S. A.; RAPER, S. C. B.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; VELDEERS, G. J. M.; VAN VUUREN, D. P. P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, p. 213-241, 2011.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, p. 747–56, 2010.

NENDEL, C.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H. J.; WENKEL, K. O. Testing different CO2 response algorithms against a FACE crop rotation experiment. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, Wageningen, v. 57, p. 17–25, 2009.

NENDEL, C.; BERG, M.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; SPECKA, X.; WEGEHENKEL, M.; WENKEL, K. O.; WIELAND, R. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 222, p. 1614–1625, 2011.

PBMC. PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, 24p., 2013.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, p. 81–92, 1972.

QUADRO, M. F. L. MACHADO, L. H. R. CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M. OLIVEIRA, G. S. Climatologia de Precipitação e Temperatura. **Revista Climanálise – Edição especial comemorativa de 10 anos**, 1996.

RAUFF, K. O.; BELLO, R. A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. **Agricultural Sciences**, Boston, v. 6, p. 1098–1105, 2015.

REBOITA, M. S.; da ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, Boulder, v. 2014, p. 1–17, 2014.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUGI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic; International Consortium for Agricultural System Applications, 1998. p. 41–54.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A. R. C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R. P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 45, p. 2193–2212, 2015.

SILVA, J. B. L. DA; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, E. G.; COSTA, L. C.; MIRANDA, G. V. Development of experimental structure and influence of high CO₂ concentration in maize crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, p. 306–314, 2012.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. The impact of El Niño Southern oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 30, p. 1056–1066, 2010.

SPECKA, X.; NENDEL, C.; WIELAND, R. Analyzing the parameter sensitivity of the agroecosystem model MONICA for different crops. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 71, p. 73–87, 2015.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 730–740, 2005.

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

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 112, p. 253–272, 2013.

TRIPATHY, R.; RAY, S. S.; SINGH, A. K. ANALYZING THE IMPACT OF RISING TEMPERATURE AND CO₂ ON GROWTH AND YIELD OF MAJOR CEREAL CROPS USING SIMULATION MODEL. In: Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, 2009, Ahmedabad. **Anais...**, Ahmedabad 2009.

VANAJA, M.; MAHESWARI, M.; JYOTHI, N. L.; SATHISH, P.; YADAV, S.; SALINI, K.; VAGHEERA, P.; VIJAY, G. K.; RAZAK, A. Variability in Growth and Yield Response of Maize Genotypes at Elevated CO₂ Concentration. **Advances in Plants & Agriculture Research**, [s.l.], v. 2, p. 2–5, 2015.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, Dordrecht v. 109, p. 5–31, 2011.

WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. A. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, p. 1564–1571, 2015.

WENKEL, K.O.; BERG, M.; MIRSCHEL, W.; WIELAND, R.; NENDEL, C.; KÖSTNER, B. LandCaRe DSS--an interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies. **Journal of Environmental Management**, London, v. 127, p. S168-183, 2013.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 36, p. 2644-2659, 2015.

3. PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE DADOS METEOROLÓGICOS E PROJEÇÕES DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS, EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS

Resumo

Modelos de simulação de culturas são importantes ferramentas para quantificar os efeitos das mudanças climáticas na produtividade agrícola. No entanto, para simulações adequadas, esses modelos necessitam, como dados de entrada, séries históricas de dados meteorológicos, responsáveis pela principal fonte de variação das produtividades. Nesse sentido, antes mesmo de se trabalhar com projeções de clima futuro, faz-se necessário o preenchimento de falhas nas séries históricas das diferentes variáveis meteorológicas ou a estimação daquelas cujas medidas estão ausentes. Desse modo, o presente estudo teve por objetivos: i) avaliar o preenchimento de falhas para as variáveis meteorológicas diárias de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar global, chuva, velocidade do vento e umidade relativa, ii) gerar séries climáticas sob projeções futuras, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, com base em sete modelos climáticos globais do CMIP5/IPCC/AR5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5/Intergovernmental Panel on Climate Change/Fifth Assessment Report*), para os cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5), com referência ao período presente (1980-2009), e iii) identificar padrões de mudanças climáticas na temperatura do ar e na chuva, em diferentes regiões brasileiras, em termos da variabilidade e tendências em relação ao clima atual. Dentro desta abordagem, avaliou-se a estimação da radiação solar global, a partir de diferentes modelos baseados na amplitude térmica diária; analisou-se o desempenho de diferentes bases de dados diários, em ponto de grade, para o preenchimento de falhas, tais como: AgCFSR, AgMERRA, NASA/POWER e XAVIER e, ainda, considerou-se o preenchimento alternativo pela interpolação de falhas de até três dias para a temperatura máxima e mínima do ar e o uso de dados da ANA para a chuva. Com a série histórica de dados meteorológicos preenchida, realizou-se a comparação com os dados observados da base do INMET, avaliando-se os procedimentos que apresentaram os melhores desempenhos para cada variável meteorológica. Para a estimação da radiação solar global, o modelo de Bristow-Campbell foi o que apresentou os melhores resultados. Para as bases de dados em ponto de grade, o sistema XAVIER foi o que apresentou a maior similaridade com os dados observados, sendo a melhor alternativa para o preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos. As projeções de clima futuro com base nas séries preenchidas, nos diferentes locais do Brasil, sob cenário RCP4.5 e RCP8.5, evidenciaram condições de clima mais quente a curto, médio e longo prazos, com incremento médio chegando a 2,52°C para a temperatura máxima e a 2,25°C para a temperatura mínima, no cenário RCP4.5, podendo chegar a 4,61°C para a temperatura máxima e 4,35°C para a temperatura mínima no cenário RCP8.5, ao final do século XXI. Para a chuva, ainda que com certo grau de incerteza, as projeções indicam redução no total acumulado nas regiões Norte-Nordeste e aumento no Sul do país. As regiões Sudeste e Centro-Oeste, por serem áreas de transição, apresentam variações distintas, sendo que locais mais ao sul apresentaram aumento, enquanto que locais mais ao norte apresentaram redução no acumulado total de chuva.

Palavras-chave: Preenchimento de falhas; Dados meteorológicos; Climatologia; Cenários futuros; Mudança climática

Abstract

Crop simulation models are important tools to quantify the effects of climate change on agricultural productivity. However, for proper simulations, these models require high quality historical meteorological data as input, which represent the main source of variation for yields. Therefore, before working with future climate projections, it is necessary filling gaps in the different meteorological variables, or even to estimate variables whose measurements are absent. In this sense, this study aimed to: i) assess the gaps filling in daily meteorological variables of maximum and minimum air temperature, solar radiation, rainfall, wind speed and relative humidity, ii) generate future climate projections, under a near (2010-2039), mid (2040-2069) and end-of-century (2070-2099) periods, based on seven global climate models from CMIP5/IPCC/AR5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5/Intergovernmental Panel on Climate Change/Fifth Assessment Report) for an intermediate (RCP4.5) and high (RCP8.5) emission scenarios, with reference to the current period (1980-2009), and iii) identify patterns of climate changes in air temperature and rainfall for different Brazilian regions, in terms of variability and trends in relation to the current climate. Based on that, global solar radiation estimation from air temperature models we evaluated; the performance of different gridded databases for gap filling, such as AgCFSR, AgMERRA, NASA/POWER, XAVIER were analyzed; and other filling alternatives approaches for gaps up to three days for maximum and minimum air temperature and the use of ANA database for rainfall were considered. With the historical weather database fulfilled, which means without gaps, the comparison with INMET observed database was performed, evaluating the procedures that showed the best results for each weather variable. For the estimation of solar radiation, among the evaluated methods, Bristow-Campbell presented closest results to observed data. Based on gridded data, the system provided by XAVIER showed to be the most similar to the observed data, showing up as the best alternative for gaps filling in meteorological data series. The future climate projections in different Brazilian regions, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, showed warmer weather conditions in the near, mid and end-of-century periods, with an average increase reaching 2.52°C for maximum and 2.25°C for the minimum temperatures under RCP4.5 scenario, reaching 4.61°C for maximum and 4.35°C for the minimum temperatures under RCP8.5 scenario, at the end of 21st century. For rainfall, although the uncertainties involved, the projections indicate a reduction in the total amount in the North and Northeast regions and an increased in the Southern part of the country. In the Southeast and Midwest regions, as they are transition regions, different variations are projected, with the southernmost locations presenting an increase and the northern a reduction of accumulated rainfall.

Keywords: Filling gaps; Meteorological data; Climatology; Future scenarios; Climate change

3.1. Introdução

Diante das projeções de mudanças climáticas globais e seus possíveis impactos na agricultura, vários modelos de simulação de culturas têm sido empregados para quantificar as perdas no campo, assim como para avaliar estratégias de manejo que possam minimizar essas perdas, tais como: APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*, MCCOWN et al., 1996), DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*, JONES et al., 2003), e MONICA (*Model for Nitrogen and Carbon in Agro-ecosystems*, NENDEL et al., 2011). Para tanto, dados climáticos de qualidade são fundamentais para se realizarem simulações adequadas

com esses modelos que, usualmente, requerem séries de dados com valores diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, precipitação pluvial, doravante denominada de chuva, radiação solar global e velocidade do vento.

Uma das grandes dificuldades com relação às séries históricas de dados meteorológicos no Brasil é a escassez de pontos de medidas, associada ao número reduzido de variáveis meteorológicas mensuradas e da presença de muitas falhas (HEINEMANN et al., 2008; XAVIER; KING e SCANLON, 2015). Para as séries históricas existentes e com falhas, a opção é o preenchimento dessas. Entre os diferentes métodos de preenchimento em séries de dados meteorológicos, com base em dados observados, destacam-se: os geradores climáticos, que geram sequências estocásticas de dados diários, como é o caso dos geradores WGEN (RICHARDSON e WRIGHT, 1984) e SIMMETEO (GENG; PENNING DE VRIES e SUPIT, 1986); o uso de relações empíricas por meio de estimativas que utilizem outros elementos meteorológicos presentes nos dados observados e que sejam de fácil aquisição (ÄNGSTRÖM, 1924; HARGREAVES, 1981; BRISTOW e CAMPBELL, 1984) e, mais recentemente, a utilização de dados em pontos de grade, como aqueles gerados pelos sistemas AgCFSR, AgMERRA, NASA/POWER e XAVIER (RUANE et al., 2015; XAVIER; KING e SCANLON, 2015).

Dentre as várias utilidades das séries históricas de dados meteorológicos, uma delas é que essas servem de base para a projeção do clima futuro, em função dos diversos cenários gerados pelos modelos climáticos, que podem ser globais (MCGs) ou regionais (MCRs). Mesmo com a maior limitação no uso de projeções dos MCGs, em decorrência da menor resolução (maior espaçamento de grade horizontal), não sendo capazes de captar fenômenos em escalas menores, como fenômenos de mesoescala e locais, esses, quando comparados aos MCRs para estudos de impactos, se destacam, especialmente no Brasil devido à sua extensão continental, por antever as características gerais do clima futuro (MARENGO, 2007). Porém, mesmo com formulações mais complexas, recentemente desenvolvidas para a representação de processos e fenômenos críticos, e com o significativo avanço tecnológico em simulações computacionais, as projeções climáticas ainda estão sujeitas a diversos níveis de incertezas (SILVEIRA et al., 2013; SAMPAIO e SILVA DIAS, 2014).

Dentre as fontes de incertezas para as projeções climáticas, destacam-se: i) as incertezas associadas aos cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), decorrentes do não conhecimento das trajetórias de emissões desses gases e dos aerossóis no futuro; ii) a variabilidade natural do clima, o qual oscila de forma dinâmica nas escalas anual e decadal, em razão da atmosfera ser um sistema de natureza caótica, influenciando as projeções, as quais são

sensíveis às condições iniciais do clima de controle; iii) e as incertezas dos modelos, devido à complexidade de compreensão do sistema climático global e às simplificações necessárias dos modelos climáticos (IPCC, 2001; GIORGI, 2005; MARENGO, 2007; BLÁZQUEZ e NUÑEZ, 2013; SAMPAIO; SILVA DIAS, 2014).

Devido as incertezas associadas à configuração dos modelos, ainda que sob o mesmo cenário de emissão, diferentes modelos podem produzir respostas climáticas diferentes, e uma maneira de reduzir esse tipo de incerteza, é por meio do uso de projeções por conjunto (*ensemble*). A partir de um conjunto de projeções obtidas por diferentes MCGs, a média do conjunto será mais confiável do que se considerados os modelos individualmente (SAMPAIO e SILVA DIAS, 2014).

Atualmente, as projeções climáticas fornecidas pelos MCGs em sua quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5*) (TAYLOR; STOUFFER e MEEHL, 2012), e avaliadas no quinto relatório de avaliação (*Fifth Assessment Report - AR5*, IPCC-AR5) do IPCC (2014), são realizadas utilizando-se a nova geração de cenários forçantes. Até seu quarto Relatório de Avaliação (AR4), o IPCC definia os cenários climáticos baseados em cenários de emissão (*Special Report on Emission Scenarios - SRES*). Já em seu quinto relatório, o painel passou a adotar cenários das forçantes radiativas, denominados Caminhos Representativos de Concentrações (*Representative Concentration Pathways - RCPs*). O termo ‘representativos’ refere-se a um dos muitos cenários possíveis, enquanto o termo ‘caminhos’ dá a importância da trajetória descrita pelos níveis de concentração ao longo do tempo e não apenas ao valor pontual alcançado a longo prazo (MOSS et al., 2010; VAN VUUREN et al., 2011).

Aqui a forçante radiativa, expressa a variação do balanço de energia incidente e da energia emergente do sistema climático, em relação a época pré-industrial, sendo expressa em termos de energia (Wm^{-2} , Watt por metro quadrado). Desse modo, uma forçante positiva induz um aquecimento do sistema Terra-Atmosfera enquanto forçante radiativa negativa induz um resfriamento.

As simulações realizadas pelo CMIP5 consideram quatro tipos de cenários, com base nos valores da forçante radiativa ao final do século XXI. Um cenário de baixa emissão de GEEs, RCP2.6, em que a forçante radiativa atinge um pico de 3 Wm^{-2} e decai para valores da ordem de $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ em 2100. Dois cenários de emissão intermediária, RCP4.5 e RCP6.0, em que a forçante radiativa estabiliza em valores próximos de $4,5$ e $6,0 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente. E um cenário de alta emissão, no qual a forçante radiativa cresce ao longo do século 21 atingindo valores da ordem de $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ em 2100. Com trajetória similar ao descrito pela forçante

radiativa, os níveis de concentração de CO₂ no cenário RCP2.6 atinge um pico equivalente a 490 ppm antes de 2100 e então decaem. Nos cenários RCP4.5 e RCP6.0 os níveis de [CO₂] se estabilizam em valores próximos a 650 e 850 ppm, respectivamente. E no cenário de maior forçante, RCP8.5, os níveis de [CO₂] em 2100, alcançam 1370 ppm (MEINSHAUSEN et al., 2011; TAYLOR; STOUFFER e MEEHL, 2012).

Em seu último relatório, o IPCC-AR5 (IPCC, 2014) indica para cenário mais pessimista, na qual as emissões continuam a crescer em ritmo acelerado, aumento médio da temperatura do ar, em relação ao período de 1986-2005, entre 2,6 e 4,8°C até 2100, enquanto que para estimativas mais otimistas, que consideram baixas emissões, o aumento médio deverá ser de 0,3 a 1,7°C. De acordo ainda com o IPCC-AR5, nas regiões de alta altitude e no Oceano Equatorial Pacífico sob altas emissões, as chuvas deverão sofrer um aumento nos totais acumulados. Já as regiões de latitude média e subtropicais secas, deverão apresentar decréscimo nos totais acumulados de chuva, enquanto que em muitas regiões úmidas de média latitude, deverão sofrer um aumento nos totais acumulados até o final do século (IPCC, 2014).

Para a América do Sul e para o Brasil, as projeções também não têm sido diferentes, desde os primeiros estudos, com tendência de aumento das temperaturas e um padrão ainda incerto na distribuição da chuva (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO, 2007; NOBRE; SAMPAIO e SALAZAR, 2008; MARENGO, 2009). Tais padrões têm se confirmado nos estudos mais recentes conduzidos por Chou et al. (2014), Sánchez et al. (2015) e Salviano; Groppo e Pellegrino (2016).

Torres e Marengo (2014), usando o Índice de Mudança Climática Regional sobre a América do Sul, identificaram o sul da Amazônia, a região Centro-Oeste e a porção oeste do estado de Minas-Gerais como persistentes *hotspots* (regiões onde as mudanças climáticas podem ser mais pronunciadas) de mudanças climáticas para o final do século, em todos os cenários forçantes analisados. Já a região Nordeste e as principais regiões metropolitanas do Brasil, principalmente em Manaus, Belo Horizonte, Brasília, Salvador, Rio de Janeiro e São Paulo, aparecem como os locais de maior vulnerabilidade sócio-climática (TORRES et al., 2012).

De acordo com Sampaio e Silva Dias (2014), em termos de variabilidade na previsibilidade, a confiabilidade nas previsões climáticas é relativamente alta para o Nordeste brasileiro, devido à grande dependência dessa região em relação ao estado das massas oceânicas. A região Sul apresenta confiabilidade média em decorrência da influência, não só dos oceanos, mas também da variabilidade caótica interna, associada às instabilidades e à não linearidade do escoamento atmosférico, enquanto as regiões Sudeste e Centro-Oeste

apresentam-se como as de menor confiabilidade, devido à menor dependência dessas em relação ao estado dos oceanos e à grande variedade e variabilidade dos sistemas meteorológicos que as atingem.

Das incertezas envolvidas nas projeções de clima futuro, Torres e Marengo (2013) em projeções sazonais, apontaram maior confiabilidade nas projeções de temperatura sobre a bacia do Prata, e um maior intervalo de incerteza na bacia Amazônica. Esses autores obtiveram uma probabilidade superior a 90% para o aumento da temperatura acima de 2°C para todo o continente Sul-Americano, e menor do que 50% para um aumento superior a 4°C no final deste século sobre o noroeste da América do Sul, bacia Amazônica e Nordeste do Brasil. Para a chuva, os resultados projetam mudanças com a mesma magnitude dos intervalos de incertezas em toda América do Sul.

Dada a grande importância das séries de dados meteorológicos para os estudos dos impactos das mudanças climáticas na agricultura e ao fato do Brasil ter uma baixa densidade de estações meteorológicas, em grande parte das áreas, e muitas delas terem um número grande de dados faltantes (XAVIER; KING e SCANLON, 2015), o presente estudo teve por objetivos: (i) avaliar o preenchimento de falhas para as variáveis meteorológicas diárias temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar global, chuva, velocidade do vento e umidade relativa, considerando-se quatro diferentes abordagens: estimação da radiação solar global a partir de diferentes modelos baseados na amplitude térmica diária; avaliação do desempenho de diferentes bases de dados diários em ponto de grade para o preenchimento de falhas, como os sistemas AgCFSR, AgMERRA, NASA/POWER e XAVIER; o preenchimento alternativo pela interpolação de falhas de até três dias para a temperatura máxima e mínima do ar, e o uso de dados da ANA para o preenchimento das falhas da chuva; (ii) gerar, a partir das séries preenchidas e consistidas, séries climáticas sob projeções futuras, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, com base em sete modelos climáticos globais do CMIP5/IPCC/AR5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5/Intergovernmental Panel on Climate Change/Fifth Assessment Report*), para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, tendo como referência o período presente de 1980-2009; (iii) identificar os padrões de mudanças climáticas na temperatura do ar e na chuva, em diferentes regiões do Brasil, em termos da variabilidade e tendências em relação ao clima atual.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Localidades analisadas e dados meteorológicos

As séries históricas de dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Estações meteorológicas do BDMEP utilizadas no presente estudo, com suas respectivas siglas, coordenadas geográficas, e percentual de dias faltantes no período de 1980 a 2009

Local	UF	Sigla	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Omissões (%)
1 - Pelotas	RS	RSPE	-31,78	-52,41	13	44,72
2 - Cruz Alta	RS	RSCA	-28,63	-53,60	473	26,71
3 - Campos Novos	SC	SCCN	-27,38	-51,20	947	25,03
4 - Chapecó	SC	SCCH	-27,11	-52,61	679	22,49
5 - Castro	PR	PRCA	-24,78	-50,00	1009	21,42
6 - Londrina	PR	PRLO	-23,31	-51,13	566	27,58
7 - Avaré	SP	SPAV	-23,08	-48,91	854	40,12
8 - Franca	SP	SPFR	-20,58	-47,36	1026	1,17
9 - Votuporanga	SP	SPVO	-20,41	-49,98	503	16,35
10 - Bambuí	MG	MGBA	-20,03	-45,00	661	15,69
11 - Uberaba	MG	MGUB	-19,73	-47,95	737	20,66
12 - Patos de Minas	MG	MGPM	-18,51	-46,43	940	22,18
13 - Unaí	MG	MGUN	-16,36	-46,88	460	12,03
14 - Ivinhema	MS	MSIV	-22,30	-53,81	369	40,82
15 - Paranaíba	MS	MSPA	-19,75	-51,18	331	28,10
16 - Diamantino	MT	MTDI	-14,40	-56,45	286	30,49
17 - Catalão	GO	GOCA	-18,18	-47,95	840	6,18
18 - Jataí	GO	GOJA	-17,91	-51,71	663	9,67
19 - Brasília	DF	DFBR	-15,78	-47,92	1160	1,01
20 - Bom Jesus da Lapa	BA	BABJ	-13,26	-43,41	440	27,38
21 - Barreiras	BA	BABA	-12,15	-45,00	439	36,62
22 - Barra	BA	BARR	-11,08	-43,16	402	27,64
23 - Bom Jesus do Piauí	PI	PIBJ	-9,10	-44,11	332	17,23
24 - Alto Parnaíba	MA	MAAP	-9,10	-45,93	285	11,29
25 - Carolina	MA	MACA	-7,33	-47,46	193	8,82
26 - Barra do Corda	MA	MABC	-5,50	-45,23	153	9,28
27 - Taguatinga	TO	TOTA	-12,40	-46,41	604	3,81
28 - Porto Nacional	TO	TOPN	-10,71	-48,41	239	12,89
29 - Pedro Afonso	TO	TOPA	-8,96	-48,18	187	11,91
30 - São Félix do Xingu	PA	PASF	-6,63	-51,96	206	31,83
31 - Marabá	PA	PAMA	-5,36	-49,13	95	10,93

*UF – estado da federação; Lat. – latitude; Long. – longitude; Alt. – altitude

Foram utilizados dados diários de temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, chuva, velocidade média do vento e umidade relativa média do ar, para diferentes regiões brasileiras. Ainda na Tabela 3.1 segue a descrição das estações meteorológicas do BDMEP utilizadas, dentro do período de 1980 a 2009, com a respectiva sigla, coordenadas geográficas, e número de falhas no período, número de dias sem observação em termos percentuais, para cada um dos locais. A seleção dessas localidades foi com base em sua importância no contexto agrícola brasileiro, especialmente no que se refere à cultura do milho (IBGE, 2015).

3.2.2. Preenchimento de falhas nos dados meteorológicos

Em decorrência de falhas na base de dados históricos do BDMEP, procedeu-se o preenchimento das variáveis meteorológicas faltantes. Primeiramente, foram avaliados diferentes modelos de estimação da radiação solar global. Posteriormente, avaliaram-se diferentes bases de dados em ponto de grade como alternativa ao preenchimento dos dados de temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar global, chuva acumulada, velocidade do vento e umidade relativa. Nessa abordagem, a avaliação foi realizada pela comparação das diferentes abordagens de estimação com dados observados.

Ainda como alternativa, foi avaliado o preenchimento de falhas, de até três dias, nas temperaturas máxima e mínima diária, por meio da interpolação dos dias adjacentes (anterior e posterior ao período com dados faltantes). E por fim, para a chuva analisou-se a interpolação de falhas a partir de dados da ANA. Essas análises de interpolação, da temperatura do ar e chuva, foram realizadas dentro da abordagem de validação cruzada, em que falhas foram induzidas na série histórica com o propósito de verificar a capacidade dos modelos em estimar as variáveis em questão, comparando-se os dados estimados com os observados.

3.2.2.1. Modelos de estimação de radiação solar global

Como apontado por Conceição e Marin (2007), poucos locais apresentam registros de dados históricos da Q_g . Em contrapartida, dados de temperatura máxima e mínima do ar são mais comuns, o que faz os modelos de estimação da Q_g com base na temperatura do ar ser de grande utilidade. Devido à ausência de medidas diretas de radiação solar global (Q_g), na base de dados observados do BDMEP, valores desta variável foram estimados, a partir do modelo de Agström (1924) e Prescott (1940) (AP), o qual emprega a radiação solar extraterrestre (Q_o) e a razão entre a insolação (n) e o fotoperíodo (N), com coeficientes a e b sugeridos por Glover e McCulloch (1958), tomando-se essa estimativa como valores observados.

Dentre os modelos baseados na amplitude térmica diária foram utilizados o de Hargreaves (1981) (Ha), em que a estimacão de Q_g é dada em função de Q_0 e da raiz quadrada da amplitude térmica (ΔT); o de Hunt; Kuchar e Swanton (1998) (Hu), o qual emprega o método de Ha corrigido por uma constante (b); o de Annandale et al. (2002) (An), o qual também se baseia no método de Ha, porém com uma correção para a altitude local; o de Bristow e Campbell (1984) (BC), no qual a estimacão de Q_g se baseia também no Q_0 e em uma função exponencial de ΔT ; e Donatelli e Campbell (1998) (DC), os quais propuseram uma correção para o modelo de BC, para reduzir o efeito da sazonalidade. Os modelos acima mencionados são descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Modelos de estimacão da radiação solar global diária, com base na insolação (n) e fotoperíodo (N) e na amplitude térmica (ΔT)

Modelo	Equação*	Coefficientes	Fontes
AP	$Q_g = Q_0 \times \left(a + b \times \left(\frac{n}{N} \right) \right)$	a, b	Angström (1924); Prescott (1940)
Ha	$Q_g = a \times \Delta T^{0,5} \times Q_0$	a	Hargreaves (1981)
Hu	$Q_g = a \times \Delta T^{0,5} \times Q_0 + b$	a, b	Hunt; Kuchar e Swanton (1998)
An	$Q_g = a \times (1 + 2,7 \times 10^{-5} \times Alt) \times \Delta T^{0,5} \times Q_0$	a	Annandale et al. (2002)
BC	$Q_g = a \times (1 - \exp(-b \times \Delta T^c)) \times Q_0$	a, b, c	Bristow e Campbell (1984)
DC	$Q_g = a \times (1 - \exp(-b \times \Delta T^c / \Delta T_m)) \times Q_0$	a, b, c	Donatelli e Campbell (1998)

* Q_g - radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); Q_0 - radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); n - insolação (horas); N - fotoperíodo (horas); ΔT - diferença entre a temperatura máxima e mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$); ΔT_m - média móvel da amplitude térmica em torno de 7 dias ($^{\circ}\text{C}$); a, b e c são os coeficientes de ajuste; sendo os coeficientes a e b do modelo AP determinados com base em Glover e McCulloch (1958); enquanto o coeficiente a dos modelos BC e DC foram determinados de acordo com a equação $a = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times Alt$ - Allen; Hill e Srikanth (1994)

Os valores de Q_0 ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), foram determinados de acordo com as equações 3.1 a 3.4 (PEREIRA et al., 2002):

$$Q_0 = 37,6 \times \left(\frac{d}{D} \right)^2 \times \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \times h_n \times \sin \varnothing \times \sin \delta + \cos \varnothing \times \cos \delta \times \sin h_n \right] \quad (3.1)$$

em que: $(d/D)^2$ é o coeficiente de ajuste para a distância relativa entre a Terra e o Sol; h_n é o ângulo horário do nascer do Sol; $\varnothing$ a latitude do local e δ a declinação solar, ambas em graus. O termo $(d/D)^2$ foi determinado por:

$$\left(\frac{d}{D} \right)^2 = 1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{NDA \times 360}{365} \right) \quad (3.2)$$

em que: NDA é o número do dia do ano, variando de 1 a 365. Os valores de h_n e δ foram calculados por:

$$h_n = \arcsin[-\tan \phi \times \tan \delta] \quad (3.3)$$

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[\frac{360 \times (NDA - 80)}{365} \right] \quad (3.4)$$

O período utilizado para o ajuste e avaliação dos diferentes modelos de estimação da radiação solar global, e porcentagem de dados (insolação e temperatura) faltantes em cada uma das localidades estudadas está descrito na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Período de dados utilizados para ajuste e avaliação de modelos de estimação de radiação solar global e porcentagem de dias faltantes, para cada um dos locais do estudo

Sigla	Período		Omissões (%)	
	Ajuste	Avaliação	Ajuste	Avaliação
RSPE	2006 e 2007	2008 e 2009	0,05	0,05
RSCA	2007 e 2008	2009 e 2010	0,00	0,00
SCCN	2007 e 2008	2009 e 2010	0,00	0,00
SCCH	2004 e 2005	2006 e 2007	0,00	0,03
PRCA	2007 e 2008	2009 e 2010	0,00	0,00
PRLO	2007 e 2008	2009 e 2010	0,00	0,00
SPAV	1968 e 1969	1970 e 1971	1,37	0,00
SPFR	1998 e 1999	2000 e 2001	0,38	0,03
SPVO	2002 e 2003	2004 e 2005	0,00	0,07
MGBA	2004 e 2005	2006 e 2007	0,00	0,00
MGUB	1998 e 1999	2000 e 2001	0,00	0,09
MGPM	1998 e 1999	2008 e 2009	0,00	0,00
MGUN	2005 e 2006	2007 e 2008	0,27	0,05
MSIV	2004 e 2005	2007 e 2008	0,00	0,00
MSPA	2005 e 2006	2007 e 2008	0,27	0,18
MTDI	1981 e 1982	1983 e 1984	0,00	0,00
GOCA	1983 e 1984	1985 e 1996	0,00	0,05
GOJA	2004 e 2005	2009 e 2010	0,00	0,00
DFBR	1995 e 1996	1997 e 1998	0,07	0,03
BABJ	2002 e 2003	2004 e 2005	0,73	0,32
BABA	2002 e 2003	2006 e 2007	0,09	0,00
BARR	1998 e 1999	2001 e 2002	0,00	0,00
PIBJ	1997 e 1998	1999 e 2000	0,00	0,09
MAAP	1999 e 2000	2001 e 2002	0,41	0,05
MACA	1995 e 1996	1997 e 1998	0,00	0,02
MABC	1996 e 1997	1999 e 2000	0,00	0,00
TOTA	1982 e 1983	1988 e 1989	0,09	0,37
TOPN	1985 e 1986	1987 e 1988	0,00	0,05
TOPA	2006 e 2007	2008 e 2009	0,00	0,09
PASF	1983 e 1984	1985 e 1986	0,00	0,00
PAMA	2005 e 2006	2009 e 2010	0,09	0,27

As estimativas do modelo AP foram consideradas como valores observados de radiação solar global e, a partir destes, os coeficientes dos modelos baseados na amplitude térmica diária foram ajustados para as condições locais, sendo utilizados dois anos de dados para a calibração e outros dois anos de dados independentes para a avaliação dos coeficientes ajustados. Como critério de escolha dos anos, optou-se por anos com menor quantidade de falhas. Sendo que os coeficientes de ajuste dos modelos foram obtidos a partir do método dos mínimos quadrados da diferença entre os valores observados e estimados, o qual minimiza a soma do erro quadrático.

3.2.2.2. Preenchimento de falhas com base em dados de grade

Como alternativa ao preenchimento de falhas em séries históricas de dados meteorológicos, diferentes bases de dados em ponto de grade foram avaliados, sendo elas: 1) AgCFSR (RUANE et al., 2015); 2) AgMERRA (RUANE et al., 2015); 3) NASA/POWER (STACKHOUSE et al., 2015); e 4) XAVIER (XAVIER; KING e SCANLON, 2015).

Os conjuntos AgCFSR (<http://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agcfsr/>), e AgMERRA (<http://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agmerra/>), desenvolvidos como parte do projeto de Intercomparação e Aprimoramento de Modelos Agrícolas (*The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project – AgMIP*), para avaliar a intercomparação entre modelos agrícolas face às mudanças climáticas, são produzidos pela combinação de reanálises do *NCEP's Climate Forecast System Reanalysis - CFSR* (SAHA et al., 2010) e do *NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications – MERRA* (RIENECKER et al., 2011) com conjuntos de dados observados de redes de estações e satélite. São fornecidos em escala temporal diária, cobrindo todo o globo, para o período de 1980-2009, em escala espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

A base da *National Aeronautics and Space Administration* desenvolvida pelo projeto *Prediction of Worldwide Energy Resource - NASA/POWER* (<http://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>) voltada para aplicações em agrometeorologia, é composta de dados de satélite, radiossondas, observações em superfície, e de modelagem numérica a partir da assimilação de dados. As variáveis meteorológicas são disponibilizadas em escala temporal diária a nível mundial, porém em grade de menor resolução, ou seja, de maior espaçamento horizontal, com coordenadas de 1° de latitude por 1° de longitude, para o período de 1983 até o presente (com *delay* de uma semana). Apenas para a chuva, a série histórica teve início em 1997.

O conjunto de dados desenvolvido por Xavier; King e Scanlon (2015), aqui denominada de XAVIER (<https://utexas.app.box.com/v/xavier-et-al-ijoc-data>), cobrindo o Brasil, inclui

dados diários coletados de pluviômetros, e de estações meteorológicas convencionais e automáticas, que provém de diferentes fontes, como INMET, da Agência Nacional de Águas (ANA) e Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE), disponibilizados em espaçamento de grade de 0,25° de resolução horizontal, no período de 1980-2013. Para construir a base em grade, diferentes métodos de interpolação foram avaliados, a partir das cinco estações consistentes mais próximas, sendo escolhido como método de estimação aquele de melhor desempenho para cada uma das variáveis.

Para essa análise, optou-se por trabalhar conjuntamente com todos os locais deste estudo, portanto, considerou-se um único conjunto de dados observados composto por dois anos de dados de cada local, comparados ao mesmo período das diferentes bases em grade.

3.2.2.3. Preenchimento alternativo

Como preenchimento alternativo, para as falhas na variável temperatura máxima e mínima, recorreu-se ao processo de interpolação linear entre os dados do dia anterior e posterior ao período faltante, aplicado às falhas de dados de temperatura menores ou iguais a três dias. Para a chuva, o preenchimento das falhas considerou os dados da rede pluviométrica da ANA, de acordo com o critério da estação mais próxima, em um raio de abrangência de até no máximo 20 km de distância, sendo escolhida a estação que apresentasse as condições geográficas mais próximas da estação meteorológica do INMET.

3.2.2.4. Avaliação dos modelos de estimação de radiação solar global e métodos de preenchimento

Os diferentes modelos de estimação da radiação solar global, das diferentes bases de dados em grade e dos métodos alternativos considerados para o preenchimento de falhas nas séries históricas foram avaliados por meio da comparação dos valores estimados aos observados, considerando-se uma base independente e utilizando-se o coeficiente de determinação (r^2), o índice de concordância ou acurácia (d) (WILLMOTT et al., 1985), o coeficiente de confiança ou desempenho (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), cujo critério de interpretação é descrito na Tabela 3.4, e ainda o erro médio (EM) e erro absoluto médio (EAM), sendo suas equações descritas a seguir:

$$r^2 = \frac{\frac{1}{X} \times \sum_{i=1}^X [(E_i - \bar{O}) \times (O_i - \bar{O})]^2}{\left[\frac{1}{X} \times \sum_{i=1}^X (E_i - \bar{E})^2 \right] \times \left[\frac{1}{X} \times \sum_{i=1}^X (O_i - \bar{O})^2 \right]} \quad (3.5)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^x (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^x (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3.6)$$

$$c = \sqrt{r^2} \times d \quad (3.7)$$

$$EM = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x (E_i - O_i) \quad (3.8)$$

$$EAM = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x |E_i - O_i| \quad (3.9)$$

em que: O_i é a variável observada; E_i a variável estimada; x o total de dados do período; e $\bar{O}$ a média da variável observada.

Tabela 3.4 - Critério de interpretação do desempenho dos modelos de estimação da radiação global, pelo índice de confiança “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

3.2.3. Climatologia e balanço hídrico

Uma vez que a grande extensão territorial faz com que o Brasil esteja sujeito a atuação e desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, ocasionando uma variabilidade climática distinta em cada uma das regiões, optou-se em fazer uma caracterização climática de cada uma das localidades. Para tal utilizaram-se as séries históricas do BDMEP, com os dados meteorológicas consistidos, para o período de 1980 a 2009.

Adicionalmente, visando monitorar a variação do armazenamento de água no solo, foram determinadas as estimativas do excedente hídrico e deficiência hídrica mensais, calculadas a partir do balanço hídrico climatológico normal (1980-2009) proposto por Thornthwaite e Mather (1955), em planilha desenvolvida por Rolim; Sentelhas e Barbieri (1998). Como capacidade de água disponível (CAD) utilizou-se o valor de 100 mm, e a evapotranspiração real (ETP) foi estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

3.2.4. Cenários futuros

As projeções de clima futuro foram realizadas a partir de um conjunto de rotinas e algoritmos em linguagem “R”(R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011), desenvolvidas e disponibilizadas pelo grupo AgMIP (ROSENZWEIG et al., 2013), a partir das séries históricas consistidas para o período de 30 anos de dados diários.

Os cenários de mudanças climáticas, são determinados por meio do método delta, o qual consiste em determinar, a partir das simulações do MCG, a mudança sazonal entre o cenário presente e o futuro (HAY; WILBY e LEAVESLEY, 2000; WILBY et al., 2004; FOWLER; BLENKINSOP e TEBALDIB, 2007). A mudança prevista é, então, aplicada à série histórica atual, em que as variáveis temperatura e chuva são projetadas para o clima futuro a partir da adição e multiplicação do valor de delta da alteração, respectivamente. Para a radiação solar global, a velocidade do vento e a umidade relativa, não são aplicadas correções, ou seja, esses valores se mantêm iguais aos da série histórica atual (HUDSON e RUANE, 2013; ROSENZWEIG et al., 2015).

O método do delta é vantajoso, já que elimina os erros associados à modelagem climática das condições atuais, limitando-se apenas às incertezas associadas à previsão de mudanças climáticas para o futuro, inerentes ao MCG (OLIVEIRA; PEDROLLO e CASTRO, 2015). Porém, os MCGs produzem vieses constantes ao longo do tempo, de modo que não existe mudanças na variabilidade e nem no padrão espacial do clima. Permanecendo inalterados o número de dias chuvosos ou de valores extremos de temperatura, possibilitando que as mesmas anomalias registradas no passado sejam observadas no futuro (FOWLER; BLENKINSOP e TEBALDIB, 2007; OLIVEIRA; PEDROLLO e CASTRO, 2015).

As projeções climáticas futuras foram realizadas para dois cenários de emissão de GEEs: RCP4.5 e RCP8.5. A escolha dos cenários, deu-se pela possibilidade de trabalhar com projeções contrastantes. Sendo que no primeiro cenário (RCP4.5), são assumidas emissões de GEEs mais brandas, enquanto que no segundo cenário (RCP8.5) essas emissões atingem os níveis mais elevados. Além disso, para o cenário RCP4.5, Ward et al. (2011), avaliando a trajetória das emissões devido às produções de combustíveis fósseis, constaram uma similaridade entre os dados observados com os valores descritos nesse cenário. Essas projeções foram analisadas para três períodos distintos, a curto-prazo (2010-2039), médio-prazo (2040-2069) e longo-prazo (2070-2099).

3.2.4.1. Incertezas e MCGs utilizados

Para as projeções futuras, foram empregados sete MCGs distintos. Isso foi adotado, já que as incertezas são inerentes ao sistema climático, resultado das interações não lineares e da complexidade intrínseca própria dos fenômenos naturais (PBMC, 2013). Além disso, para um mesmo cenário de emissão, diferentes modelos produzem diferentes projeções de mudanças climáticas, e uma maneira de minimizar essas incertezas, é por meio do uso de um conjunto de modelos globais e/ou regionais, o que é denominado de *ensemble*.

A escolha dos modelos de escala global baseou-se em Silveira et al. (2013) e Pinheiro et al. (2014), que descreveram estes modelos entre aqueles de melhor desempenho quanto a representação dos padrões de variação da chuva no século XX, em diferentes regiões brasileiras, considerando-se que esta variável apresenta maior dificuldade de predição em modelos de grande escala. Foram selecionados os seguintes MCGs: CNRM-CM5 (França), CSIRO-MK3-6-0 (Austrália), GISS-E2-R (Nova Iorque), HadGEM2-ES (Reino Unido), inmCM4 (Rússia), MIROC-ESM (Japão), MPI-ESM-LR (Alemanha). Esses modelos possuem diferentes resoluções, que variam de aproximadamente 1,25 a 2,8 graus, e divergem quanto à dinâmica dos oceanos e da circulação atmosférica, não sendo possível identificar qual deles oferece o resultado mais confiável (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Modelos Climáticos Globais do conjunto CMIP5 utilizados neste estudo, contendo os institutos nos quais esses foram desenvolvidos e a resolução horizontal aproximada (latitude/longitude)

Modelo	Nome/Instituição/País	Resolução
CNRM-CM5	<i>National Centre for Meteorological Research, France</i>	1.5° x 1.5°
CSIRO-MK3-6-0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia</i>	1.8° x 1.8°
GISS-E2-R	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies, New York</i>	2.0° x 2.5°
HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre, United Kingdom</i>	1.875° x 1.25°
inmCM4	<i>Institute of Numerical Mathematics, Russia</i>	2.0° x 1.5°
MIROC-ESM	<i>Center for Climate System Research, Japan</i>	2.8° x 2.8°
MPI-ESM-LR	<i>Max Planck Institute for Meteorology, Germany</i>	1.8° x 1.8°

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Preenchimento de falhas nos dados meteorológicos

3.3.1.1. Modelos de estimação de radiação solar global

Os coeficientes de ajuste dos diferentes modelos de estimação da radiação solar global, com base na temperatura, determinados para cada um dos locais, estão descritos na Tabela 3.6

Para o modelo Ha, os coeficientes de ajuste variaram entre $0,10^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ e $0,18^{\circ}\text{C}^{-0,5}$; diferindo dos valores $0,16^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ e $0,19^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ sugeridos por Hargreaves e Samani (1982) para as localidades situadas no interior dos continentes e em regiões litorâneas. Barbosa et al. (2011), encontraram coeficientes também inferiores aos indicados no trabalho original, variando de $0,145^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ a $0,164^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ para algumas cidades de Minas Gerais.

Para o método Hu, o coeficiente a ajustado variou entre 0,04 e 0,19. Porém, os valores do coeficiente b do modelo Hu, apresentaram valores bastante distintos, variado entre -7,70 e 9,98. Esses resultados diferem dos obtidos por Barbosa et al. (2011) que obtiveram valores oscilando de 0,219 a 0,67 para o coeficiente a e de -1,225 a -6,442 para o coeficiente b (Tabela 3.6).

O modelo An segue mais ou menos o mesmo padrão do método Ha, com coeficientes dentro do mesmo intervalo de variação, 0,10 a 0,18, sendo que Barbosa et al. (2011) encontraram valores no intervalo de 0,141 a 0,160 (Tabela 3.6).

Para o modelo DC, os coeficientes b e c foram maiores se comparados aos do método BC, concordando com Liu et al. (2009). A maior variação está relacionada ao coeficiente b , uma vez que este é influenciado pelo modo como é determinado o termo de correção da amplitude térmica. No presente estudo, o coeficiente b variou de 0,02 a 0,16 e o coeficiente c de 1,57 a 2,94. Já Barbosa et al. (2011) encontraram uma maior amplitude para esses coeficientes, com b variando de 0,130 a 0,241 e c de 1,374 a 2,032 (Tabela 3.6).

Em termos de valores médios dos coeficientes de ajuste entre todos os locais, os modelos Ha e An apresentaram coeficiente $a = 0,16$. Para os modelos BC e DC o coeficiente a , determinado em função da latitude local, foi 0,76, e os coeficientes b e c 0,03 e 1,62 para o modelo BC e 0,07 e 2,24, para o modelo DC. Já para o modelo Hu os coeficientes médios foram $a = 0,17$ e $b = -0,66$ (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Coeficientes de ajuste dos diferentes modelos de estimação de radiação solar global, determinados a partir da amplitude térmica, em escala anual, para os modelos de Hargreaves (Ha), Hunt (Hu), Annandale (An), Bristow-Campbell (BC) e Donatelli-Campbell (DC) em diferentes localidades brasileiras, (descritas nas Tabelas 3.1 e 3.3)

Modelo	Ha	Hu		An	BC			DC		
Coeficientes	a	a	b	a	a	b	c	a	b	c
RSPE	0,18	0,19	-1,12	0,18	0,75	0,07	1,29	0,75	0,14	1,98
RSCA	0,17	0,19	-2,08	0,17	0,76	0,02	1,73	0,76	0,06	2,29
SCCN	0,17	0,18	-1,49	0,17	0,77	0,04	1,52	0,77	0,14	1,94
SCCH	0,17	0,18	-1,06	0,17	0,76	0,03	1,64	0,76	0,11	2,08
PRCA	0,10	0,11	-0,63	0,10	0,77	0,05	1,02	0,77	0,15	1,57
PRLO	0,12	0,13	-1,46	0,12	0,76	0,03	1,30	0,76	0,09	1,88
SPAV	0,17	0,16	0,66	0,16	0,77	0,04	1,44	0,77	0,16	1,89
SPFR	0,18	0,12	1,79	0,13	0,77	0,04	1,32	0,77	0,11	1,86
SPVP	0,17	0,16	1,70	0,17	0,76	0,03	1,65	0,76	0,08	2,20
MGBA	0,14	0,16	-1,86	0,14	0,76	0,05	1,26	0,76	0,09	2,00
MGUB	0,17	0,16	0,99	0,17	0,76	0,01	1,98	0,76	0,03	2,57
MGPM	0,17	0,16	0,94	0,16	0,77	0,02	1,79	0,77	0,04	2,42
MGUN	0,16	0,16	-0,51	0,16	0,76	0,02	1,75	0,76	0,04	2,46
MSIV	0,17	0,19	-2,00	0,17	0,76	0,02	1,82	0,76	0,07	2,27
MSPA	0,18	0,20	-3,19	0,17	0,76	0,02	1,79	0,76	0,06	2,39
MTDI	0,15	0,14	1,56	0,15	0,76	0,04	1,39	0,76	0,10	2,03
GOCA	0,17	0,17	0,23	0,17	0,77	0,02	1,81	0,77	0,04	2,46
GOJA	0,15	0,16	-0,76	0,15	0,76	0,05	1,32	0,76	0,10	2,02
DFBR	0,18	0,15	3,08	0,17	0,77	0,03	1,71	0,77	0,06	2,36
BABJ	0,18	0,18	0,12	0,18	0,76	0,03	1,72	0,76	0,06	2,39
BABA	0,17	0,18	-1,26	0,17	0,76	0,03	1,60	0,76	0,05	2,38
BARR	0,18	0,21	-3,08	0,18	0,76	0,01	2,23	0,76	0,02	2,94
PIBJ	0,11	0,04	9,98	0,11	0,76	0,03	1,25	0,76	0,08	1,88
MAAP	0,17	0,19	-2,88	0,17	0,76	0,02	1,79	0,76	0,04	2,52
MACA	0,18	0,20	-2,27	0,18	0,75	0,03	1,71	0,75	0,05	2,42
MABC	0,16	0,22	-7,70	0,16	0,75	0,01	2,04	0,75	0,02	2,75
TOTA	0,17	0,16	1,05	0,17	0,76	0,02	1,83	0,76	0,04	2,52
TOPN	0,17	0,20	-3,77	0,16	0,75	0,03	1,58	0,75	0,06	2,31
TOPA	0,17	0,20	-2,89	0,17	0,75	0,03	1,68	0,75	0,07	2,30
PASF	0,13	0,11	2,84	0,13	0,75	0,03	1,35	0,75	0,07	2,02
PAMA	0,17	0,22	-5,29	0,17	0,75	0,02	1,92	0,75	0,04	2,51
Média	0,16	0,17	-0,66	0,16	0,76	0,03	1,62	0,76	0,07	2,24

Os índices estatísticos e erros empregados na avaliação dos modelos de estimação da radiação solar global, e a classificação de desempenho, para cada uma das localidades analisadas, com dados independentes, são apresentados nas Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9.

Tabela 3.7 - Índices estatísticos de avaliação do desempenho dos modelos de estimação da radiação solar global, de acordo com os modelos de Hargreaves (Ha), Hunt (Hu) e Annandale (An), nos locais descritos nas Tabelas 3.1 e 3.3

Locais	Ha					Hu					An				
	r ²	d	c	EM (MJm ⁻² d ⁻¹)	EAM	r ²	d	c	EM (MJm ⁻² d ⁻¹)	EAM	r ²	d	c	EM (MJm ⁻² d ⁻¹)	EAM
RSPE	0,73	0,90	0,77	-0,43	3,21	0,73	0,91	0,78	-0,61	3,17	0,73	0,90	0,77	-0,44	3,21
RSCA	0,77	0,93	0,81	-1,16	3,12	0,77	0,93	0,82	0,20	2,92	0,77	0,92	0,81	0,23	3,02
SCCN	0,71	0,91	0,76	0,42	3,03	0,71	0,91	0,77	0,48	3,02	0,71	0,90	0,76	0,18	3,09
SCCH	0,73	0,92	0,78	0,21	2,88	0,73	0,92	0,78	0,45	2,96	0,73	0,91	0,78	0,23	3,03
PRCA	0,67	0,89	0,72	0,14	2,13	0,67	0,89	0,73	0,39	1,89	0,67	0,88	0,72	0,17	1,90
PRLO	0,63	0,88	0,69	0,34	2,09	0,63	0,88	0,70	0,59	2,21	0,63	0,87	0,69	0,51	2,25
SPAV	0,58	0,85	0,65	-0,26	2,42	0,58	0,85	0,65	-0,14	2,48	0,58	0,85	0,65	-0,47	2,53
SPFR	0,59	0,72	0,58	-0,48	2,60	0,59	0,72	0,56	-0,28	2,58	0,59	0,76	0,58	-0,74	2,70
SPVP	0,60	0,84	0,66	-0,55	2,88	0,60	0,84	0,65	-0,23	3,13	0,60	0,85	0,66	-0,60	3,19
MGBB	0,56	0,83	0,60	-0,67	2,92	0,56	0,83	0,62	-0,67	3,02	0,56	0,80	0,60	-0,97	3,15
MGUB	0,54	0,82	0,60	-0,24	2,63	0,54	0,82	0,60	-0,10	2,91	0,54	0,82	0,60	-0,53	2,99
MGPM	0,62	0,77	0,62	0,43	2,60	0,62	0,77	0,60	0,61	2,92	0,62	0,79	0,62	0,09	2,96
MGUN	0,50	0,80	0,56	-0,39	2,23	0,50	0,80	0,57	-0,42	2,60	0,50	0,79	0,56	-0,67	2,67
MSIV	0,57	0,85	0,63	0,29	3,20	0,57	0,85	0,64	0,22	3,33	0,57	0,83	0,63	0,10	3,38
MSPA	0,55	0,85	0,61	-0,03	2,76	0,55	0,85	0,63	-0,01	2,90	0,55	0,83	0,61	-0,11	2,94
MTDI	0,51	0,68	0,50	0,29	2,80	0,51	0,68	0,48	0,25	2,89	0,51	0,70	0,50	0,09	2,86
GOCA	0,80	0,80	0,71	-0,31	2,57	0,80	0,80	0,72	-0,39	2,86	0,80	0,80	0,71	-0,83	2,96
GOJA	0,57	0,76	0,56	0,08	2,51	0,57	0,76	0,57	0,04	2,66	0,57	0,75	0,56	-0,29	2,70
DFBR	0,50	0,67	0,50	-0,11	3,03	0,50	0,67	0,47	0,15	3,11	0,50	0,71	0,50	-0,54	3,20
BABJ	0,75	0,72	0,63	-0,28	2,55	0,75	0,72	0,62	0,20	2,76	0,75	0,72	0,63	-0,07	2,81
BABA	0,65	0,82	0,64	0,02	2,30	0,65	0,82	0,66	0,07	2,45	0,65	0,80	0,64	-0,17	2,49
BARR	0,60	0,85	0,63	-0,05	1,95	0,60	0,85	0,65	-0,16	2,36	0,60	0,82	0,63	-0,43	2,49
PIBJ	0,33	0,44	0,31	-0,28	3,16	0,33	0,44	0,25	0,23	3,09	0,33	0,55	0,31	-0,21	3,33
MAAP	0,76	0,82	0,70	0,18	2,30	0,76	0,82	0,72	0,13	2,68	0,76	0,80	0,70	-0,04	2,72
MACA	0,51	0,80	0,56	0,39	3,04	0,51	0,80	0,57	0,48	3,08	0,51	0,78	0,56	0,39	3,09
MABC	0,54	0,72	0,46	-1,22	2,64	0,54	0,72	0,53	-1,02	2,85	0,54	0,63	0,46	-0,83	2,95
TOTA	0,57	0,73	0,56	-0,75	2,80	0,57	0,73	0,55	-0,61	3,08	0,57	0,75	0,56	-0,94	3,17
TOPN	0,63	0,83	0,62	-0,09	2,93	0,63	0,83	0,66	-0,05	3,05	0,63	0,78	0,62	-0,22	3,12
TOPA	0,71	0,84	0,68	-0,16	2,27	0,71	0,84	0,71	0,02	2,31	0,71	0,81	0,68	0,01	2,30
PASF	0,35	0,52	0,33	1,33	3,14	0,35	0,52	0,31	1,33	3,28	0,35	0,55	0,33	1,23	3,21
PAMA	0,55	0,79	0,54	-0,88	2,74	0,55	0,79	0,59	-0,75	3,02	0,55	0,73	0,54	-0,71	3,17
Média	0,60	0,79	0,61	-0,14	2,69	0,60	0,79	0,62	0,01	2,82	0,60	0,79	0,61	-0,21	2,89

Tabela 3.8 - Índices estatísticos de avaliação do desempenho dos modelos de estimação da radiação solar global, de acordo com os modelos de Bristow-Campbell (BC) e Donatelli-Campbell (DC), nos locais descritos na Tabelas 3.1 e 3.3

Locais	BC					DC				
	r ²	d	c	EM	EAM	r ²	d	c	EM	EAM
				(MJm ⁻² d ⁻¹)					(MJm ⁻² d ⁻¹)	
RSPE	0,69	0,90	0,75	-0,68	3,30	0,66	0,88	0,72	-1,31	3,56
RSCA	0,77	0,93	0,81	-1,16	3,14	0,76	0,93	0,80	-0,89	3,12
SCCN	0,72	0,92	0,78	0,42	2,85	0,70	0,91	0,76	0,34	3,03
SCCH	0,73	0,92	0,79	0,21	2,85	0,72	0,92	0,78	0,29	2,88
PRCA	0,68	0,90	0,75	0,14	1,83	0,64	0,89	0,71	0,34	2,13
PRLO	0,70	0,91	0,76	0,34	1,88	0,67	0,90	0,73	0,48	2,09
SPAV	0,63	0,88	0,70	-0,26	2,29	0,60	0,87	0,68	-0,21	2,42
SPFR	0,56	0,85	0,64	-0,48	2,40	0,41	0,79	0,51	-0,54	2,60
SPVP	0,65	0,88	0,71	-0,55	2,85	0,64	0,89	0,71	-0,46	2,88
MGBB	0,65	0,87	0,70	-0,67	2,62	0,61	0,86	0,67	-0,98	2,92
MGUB	0,63	0,89	0,70	-0,24	2,45	0,62	0,88	0,69	-0,30	2,63
MGPM	0,61	0,87	0,68	0,43	2,38	0,53	0,84	0,61	0,34	2,60
MGUN	0,63	0,88	0,70	-0,39	2,10	0,61	0,88	0,68	-0,57	2,23
MSIV	0,58	0,86	0,66	0,29	3,12	0,59	0,87	0,66	0,16	3,20
MSPA	0,55	0,85	0,63	-0,03	2,76	0,57	0,87	0,66	-0,12	2,76
MTDI	0,54	0,81	0,59	0,29	2,65	0,48	0,81	0,56	0,08	2,80
GOCA	0,79	0,93	0,82	-0,31	2,38	0,69	0,91	0,75	-0,49	2,57
GOJA	0,58	0,83	0,63	0,08	2,40	0,59	0,85	0,66	-0,11	2,51
DFBR	0,53	0,84	0,61	-0,11	2,72	0,47	0,82	0,56	-0,13	3,03
BABJ	0,73	0,85	0,73	-0,28	2,64	0,72	0,85	0,72	-0,08	2,55
BABA	0,69	0,87	0,73	0,02	2,20	0,65	0,88	0,71	-0,01	2,30
BARR	0,68	0,89	0,74	-0,05	1,95	0,68	0,90	0,74	-0,14	1,95
PIBJ	0,32	0,62	0,35	-0,28	3,14	0,26	0,64	0,32	-0,13	3,16
MAAP	0,72	0,88	0,75	0,18	2,19	0,70	0,89	0,75	-0,02	2,30
MACA	0,54	0,86	0,63	0,39	2,85	0,49	0,82	0,58	0,21	3,04
MABC	0,52	0,81	0,59	-1,22	2,58	0,51	0,83	0,59	-1,05	2,64
TOTA	0,66	0,88	0,72	-0,75	2,52	0,63	0,88	0,70	-0,83	2,80
TOPN	0,65	0,88	0,71	-0,09	2,72	0,57	0,87	0,66	-0,28	2,93
TOPA	0,69	0,90	0,75	-0,16	2,12	0,68	0,90	0,75	-0,20	2,27
PASF	0,36	0,69	0,41	1,33	3,03	0,31	0,60	0,33	1,26	3,14
PAMA	0,59	0,86	0,66	-0,88	2,58	0,55	0,86	0,64	-0,86	2,74
Média	0,62	0,86	0,68	-0,14	2,56	0,59	0,85	0,66	-0,20	2,70

Tabela 3.9 - Classificação dos modelos de estimação de radiação solar global de acordo com o índice de desempenho c

Local	Modelo				
	Ha	Hu	An	BC	DC
RSPE	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom
RSCA	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
SCCN	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
SCCH	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
PRCA	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
PRLO	Bom	Bom	Bom	Muito Bom	Bom
SPAV	Mediano	Mediano	Mediano	Bom	Bom
SPFR	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Mediano	Sufrível
SPVP	Bom	Mediano	Bom	Bom	Bom
MGBB	Sufrível	Mediano	Sufrível	Bom	Bom
MGUB	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Bom	Bom
MGPM	Mediano	Sufrível	Mediano	Bom	Mediano
MGUN	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Bom	Bom
MSIV	Mediano	Mediano	Mediano	Bom	Bom
MSPA	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Bom
MTDI	Mau	Mau	Mau	Sufrível	Sufrível
GOCA	Bom	Bom	Bom	Muito Bom	Bom
GOJA	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Mediano	Bom
DFBR	Mau	Mau	Mau	Mediano	Sufrível
BABJ	Mediano	Mediano	Mediano	Bom	Bom
BABA	Mediano	Bom	Mediano	Bom	Bom
BARR	Mediano	Mediano	Mediano	Bom	Bom
PIBJ	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo
MAAP	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
MACA	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Mediano	Sufrível
MABC	Mau	Sufrível	Mau	Sufrível	Sufrível
TOTA	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Bom	Bom
TOPN	Mediano	Bom	Mediano	Bom	Bom
TOPA	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
PASF	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Mau	Péssimo
PAMA	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Bom	Mediano
Média	Mediano	Mediano	Mediano	Bom	Bom

Os valores de r^2 encontrados para o modelo BC, entre 0,32 e 0,79 com valor médio entre os locais de 0,62, são menores do que os encontrados por Conceição e Marin (2007), entre 0,67 e 0,75, com valor médio de 0,70. Já Barbosa et al. (2011), em estudo para cidades da região Sul, Sudeste, Oeste e Campo das Vertentes, em Minas Gerais, encontraram r^2 de 0,72, enquanto, Massignam (2007), encontrou coeficiente de determinação variando de 0,51 a 0,87 (Tabela 3.8).

Para o modelo DC, os valores de r^2 variam entre 0,26 a 0,76, com valor médio de 0,59. Valores maiores foram obtidos por Barbosa et al. (2011), em Minas Gerais, com $r^2 = 0,71$ (Tabela 3.8).

Os valores estimados de radiação solar apresentaram, em relação aos estimados por AP, coeficiente de exatidão, d , entre 0,44 e 0,93 para os modelos Ha, Hu, entre 0,55 e 0,92 para o modelo An, com valor médio de 0,79, para os três modelos (Tabela 3.7). Já para os modelos BC e DC, esse coeficiente variou entre 0,62 e 0,93 e entre 0,60 e 0,93, com valor médio de 0,86 e 0,85, respectivamente (Tabela 3.8). Pelo método Ha, Nogueira et al. (2012) encontraram coeficiente de exatidão igual a 0,60; Massignam (2007) encontrou valores variando de 0,67 a 0,86. Pelo método BC, Massignam (2007) encontrou índice d variando entre 0,66 a 0,91.

Para o coeficiente de confiança c foram encontrados valores entre 0,31 a 0,81, com valor médio de 0,61, pelos modelos Ha e An, e de 0,25 a 0,82, com valor médio de 0,62 para o modelo Hu (Tabela 3.7). Para o modelo BC o coeficiente de confiança c variou de 0,35 a 0,82, enquanto que para o modelo DC variou entre 0,32 e 0,80, com valor médio de 0,68 e 0,66, respectivamente (Tabela 3.8). Deste modo, considerando valor médio entre todos os locais, os modelos de Ha, Hu e An, apresentaram desempenhos classificados como “Mediano”. Por outro lado, os desempenhos do modelo BC e DC foram classificados como “Bom”. Nogueira et al. (2012) em estimativas pelo método de Ha encontraram coeficiente de confiança com valor 0,35, classificado como “Péssimo”. Conceição e Marin (2007) para os modelos Ha e BC encontraram valores médios para o coeficiente de desempenho de 0,67 e 0,75.

Quanto ao desempenho dos modelos dado pelo coeficiente de determinação e coeficiente de confiança ou desempenho, em termos gerais, o modelo BC foi o que apresentou o melhor desempenho na maior parte dos locais analisados, sendo que os melhores ajustes se deram para as localidades da região Sul, evidenciando uma resposta mais próxima na variação da temperatura com a variação da nebulosidade.

Em termos médios, os valores de radiação solar global estimados, quando comparados com os valores medidos, apresentaram coeficientes de exatidão d variando de 0,79 para os modelos Ha, Hu e An, e 0,86 para o BC e 0,85 para o DC. Para o coeficiente de confiança c , foram determinados valores variando de 0,61 a 0,62 para os modelos Ha, Hu e An, que segundo Camargo e Sentelhas (1997) é classificado como mediano. O desempenho foi considerado bom para os modelos BC e DC, com valores de 0,68 e 0,66, respectivamente. Com tendência de subestimativa dos valores diários de radiação solar global, variando entre -0,14 a -0,21, exceto

para o método Ha, com EM de $0,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, com os modelos de BC e DC entre os que apresentaram menor EAM, de 2,56 e $2,70 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente (Tabelas 3.7 e 3.8).

Avaliando o desempenho dos modelos de estimação da radiação solar global de acordo com o índice de confiança c de Camargo e Sentelhas (1997), na Tabela 3.9, verificou-se a similaridade no índice c entre os modelos Ha e An, com ligeiríssima diferença entre o modelo Hu. BC e DC, na maioria dos locais, apresentaram índices com desempenho igual ou superior, em comparação a Ha, Hu e An. Os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina apresentaram os melhores índices, dentro da categoria bom a muito bom.

Os resultados aqui encontrados, concordam com Conceição e Marin (2007) que identificaram o BC como sendo o método que proporcionou melhores estimativas da radiação solar global, em comparação, ao Ha, em diferentes regiões do Brasil. Barbosa et al. (2011), em estudo para Minas Gerais, verificaram que o modelo BC apresentou melhor performance, seguido por DC, enquanto que os modelos Ha, Hu e An apresentaram erros maiores.

Em estudo para Piracicaba, SP, Bender e Sentelhas (2015) mostraram que o método BC também apresentou estimativas mais próximas aos valores observados em relação as bases em grade do NASA/POWER e do AgMERRA.

Conclui-se que os modelos aqui empregados na estimação da radiação solar global diária apresentaram desempenho variável entre os locais em estudo. Sendo observado valores de estimativas mais próximas aos valores observados na região Sul, em que, aparentemente, há uma maior correlação da nebulosidade com a amplitude térmica diária. Os melhores desempenhos se deram para estimativas a partir do modelo BC, sendo que para os locais da região Sul e Sudeste (exceto Franca, SP) esse apresentou desempenho classificado como bom a muito bom.

3.3.1.2. Preenchimento de falhas com base em dados de grade

A Tabela 3.10 apresenta os índices estatísticos de desempenho das diferentes bases de dados, em ponto de grade, para preenchimento de falhas de diferentes variáveis meteorológicas. Para a temperatura máxima todas as bases apresentaram alta acurácia ($d \geq 0,89$), com XAVIER apresentando precisão elevadíssima ($r^2 = 1$). Houve uma tendência de subestimativa pelos modelos, exceto para a base do AgCFSR, com $EM = 0,47^\circ\text{C}$. Com máxima precisão associada a XAVIER, essa base também apresentou a maior proximidade das estimativas com seu valor observado, com EAM da ordem de $0,17^\circ\text{C}$. Por outro lado, a base do NASA/POWER, com a menor precisão ($r^2 = 0,68$), apresentou maior EAM, da ordem de $2,46^\circ\text{C}$.

Em relação à temperatura mínima, todos as bases apresentaram alta acurácia ($d \geq 0,93$) e boa precisão ($r^2 \geq 0,77$). Assim como para a temperatura máxima, o melhor desempenho foi obtido para a base XAVIER, com menor EM ($0,06^\circ\text{C}$) e EAM ($0,30^\circ\text{C}$), enquanto que o NASA/POWER apresentou o pior desempenho, com EM = $0,76^\circ\text{C}$ e EAM = $1,74^\circ\text{C}$. As bases do AgCFSR e AgMERRA apresentam desempenho similar e intermediário, tanto em termos do EM e do EAM, como em termos de desempenho geral, com o índice c sendo, respectivamente, de 0,84 e 0,86.

Tabela 3.10 - Índices estatísticos para a avaliação do desempenho dos modelos de estimação com base em dados diários de grade, para as variáveis de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), radiação solar global (Qg), chuva (Chuva), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (U_{2m}), considerando-se todas as localidades analisadas

Variável	Base de dados	Índices					
		r^2	d	c	Classif.	EM ($^\circ\text{C}$)	EAM ($^\circ\text{C}$)
Tmax	AgCFSR	0,77	0,93	0,82	Muito bom	0,47	1,88
	AgMERRA	0,76	0,93	0,81	Muito bom	-0,37	1,86
	NASA/POWER	0,68	0,89	0,73	Bom	-1,18	2,46
	XAVIER	1,00	1,00	1,00	Ótimo	-0,03	0,17
Tmin	AgCFSR	0,80	0,94	0,84	Muito bom	0,71	1,63
	AgMERRA	0,82	0,95	0,86	Ótimo	0,08	1,45
	NASA/POWER	0,77	0,93	0,82	Muito bom	0,76	1,74
	XAVIER	0,98	0,99	0,98	Ótimo	0,06	0,30
Qg	AgCFSR	0,64	0,89	0,71	Bom	-0,66	2,65
	AgMERRA	0,64	0,88	0,71	Bom	-1,32	2,79
	NASA/POWER	0,76	0,93	0,81	Muito bom	-0,58	2,19
	XAVIER	0,94	0,97	0,94	Ótimo	-1,19	1,57
Chuva	AgCFSR	0,16	0,60	0,24	Péssimo	-0,03	4,88
	AgMERRA	0,25	0,67	0,33	Péssimo	-0,03	4,48
	NASA/POWER	0,20	0,65	0,29	Péssimo	0,12	4,86
	XAVIER	0,88	0,96	0,90	Ótimo	-0,10	1,51
UR	AgCFSR	0,52	0,79	0,57	Sofrível	-2,43	14,43
	AgMERRA	0,38	0,72	0,45	Mau	-6,67	17,06
	NASA/POWER	0,55	0,82	0,61	Mediano	-6,75	11,14
	XAVIER	0,90	0,97	0,92	Ótimo	0,18	3,76
U_{2m}	AgCFSR	0,10	0,56	0,18	Péssimo	0,17	0,83
	AgMERRA	0,08	0,53	0,15	Péssimo	0,54	0,98
	NASA/POWER	0,14	0,69	0,21	Péssimo	0,64	0,86
	XAVIER	0,47	0,79	0,54	Sofrível	0,22	0,49

* r^2 - coeficiente de determinação; d - índice de concordância de Willmott; c - índice de confiança; Classif. - classificação do índice de desempenho c; EM - Erro Médio; EAM - Erro Absoluto Médio

Para a radiação solar global, os melhores desempenhos foram obtidos com as bases NASA/POWER e XAVIER, sendo esta última a que apresentou a maior acurácia ($d = 0,97$) e precisão ($r^2 = 0,94$), resultando num índice $c = 0,94$. Todas as bases apresentaram uma leve tendência de subestimar a Q_g , com EM oscilando entre $-0,58$ e $-1,32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Em termos de EAM, os dados provenientes da base XAVIER foram os que mais se aproximaram dos dados medidos, com $\text{EAM} = 1,57 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Para a chuva, a dificuldade na sua estimação está relacionada não apenas à quantificação do total acumulado, mas também, na determinação de sua distribuição espacial. Em função disso, os dados provenientes das bases AgCFSR, AgMERRA e NASA/POWER apresentaram péssimo desempenho, com $r^2 \leq 0,25$, $d \leq 0,67$, $c \leq 0,33$ e $\text{EAM} \geq 4,48 \text{ mm d}^{-1}$. No caso dos dados provenientes da base XAVIER, houve boa precisão ($r^2 = 0,88$), alta acurácia ($d = 0,96$), resultando em ótimo desempenho ($c = 0,90$), com tendência muito leve de subestimativa ($\text{EM} = -0,10 \text{ mm d}^{-1}$) e o menor afastamento médio das estimativas em relação aos valores observados ($\text{EAM} = 1,51 \text{ mm d}^{-1}$).

Avaliando-se a frequência de eventos de chuva, representado pelo total acumulado igual e, ou superior a 1 mm, verifica-se na Figura 3.1 uma superestimativa nos eventos de até 5 mm d^{-1} , para todas as bases analisadas. Apesar disso, os dados provenientes das bases AgCFSR e AgMERRA foram os que apresentaram o maior número eventos de chuva que não ocorreram. Por outro lado, as bases NASA/POWER e XAVIER, apesar de também terem superestimado o número de dias com chuvas de até 5 mm d^{-1} , apresentaram-se mais próximos da realidade. Para os eventos de maior intensidade, especialmente acima de 15 mm, todas as bases subestimaram o número de eventos em relação ao observado. Para acumulados iguais e, ou superiores a 15 mm, os dados provenientes da base XAVIER foram os que mais se aproximaram dos dados observados.

Para a umidade relativa do ar (UR), novamente os dados provenientes da base XAVIER foram os que apresentaram o melhor desempenho, com alta acurácia ($d = 0,97$), boa precisão ($r^2 = 0,90$), com $\text{EM} = 0,18\%$ e $\text{EAM} = 3,76\%$.

Apesar do desempenho sofrível para a velocidade do vento (U_{2m}), os dados da base XAVIER ainda foram os de melhor desempenho, apresentando $r^2 = 0,47$, $d = 0,79$ e $c = 0,54$, com EAM da ordem de $0,49 \text{ m s}^{-1}$. O baixo desempenho quanto a estimação da velocidade do vento está relacionado ao fato desta ser uma variável de pequena magnitude, de modo que, mesmo pequenos desvios, levam a erros muito grandes. Outra causa para o baixo desempenho

pode estar relacionada a sua grande variabilidade espacial, semelhante ao que ocorre com a variável da chuva, tornando a sua estimativa mais difícil.

Figura 3.1 - Frequência de eventos de chuva sob diferentes limiares de totais acumulados para a base de dados observados e para as bases em grade dos sistemas AgCFSR, AgMERRA, NASA/POWER e XAVIER

Portanto, ao analisar todas as variáveis, a base de dados em grade, XAVIER, sempre prevaleceu sobre as demais. Apresentou desempenho ótimo, até mesmo para a chuva e a umidade relativa, variáveis mais difíceis de serem estimadas. Quanto a velocidade do vento, apesar do desempenho sofrível, está ainda é a base com estimativas mais próximas aos valores observados.

O melhor desempenho para a base XAVIER pode estar relacionada ao fato desta estar entre as bases de maior resolução espacial, ou seja, menor espaçamento de grade, adicionada ao fato de que os valores médios reportados são compostos a partir da interpolação de dados observados que incluem a própria base das estações convencionais do BDMEP.

3.3.1.3. Preenchimento Alternativo

Na Tabela 3.11 são apresentados os índices estatísticos para o preenchimento de falhas pelos métodos alternativos para a temperatura máxima, temperatura mínima e chuva. Os índices obtidos demonstram o ótimo desempenho para esses métodos, apresentando alta acurácia ($d \geq 0,95$), boa precisão ($r^2 \geq 0,87$), alto desempenho ($c \geq 0,90$) e EM e EAM muito baixos.

Tabela 3.11 - Índices estatísticos de avaliação do desempenho de modelos alternativos na estimativa da temperatura máxima (Tmax) e temperatura mínima (Tmin) do ar e chuva acumulada (Chuva)

Variável	Modelo	Índices				
		r ²	d	c	EM (°C)	EAM (°C)
Tmax	Interpolado	0,96	0,98	0,96	-0,2	0,25
	XAVIER	0,98	1,00	0,99	0,01	0,15
Tmin	Interpolado	0,93	0,95	0,92	0,1	0,35
	XAVIER	0,99	1,00	0,99	-0,02	0,11
Chuva	ANA	0,87	0,96	0,90	-0,02	0,43
	XAVIER	0,99	1,00	0,99	-0,02	0,17

No entanto, ainda que se mostrem viáveis para a estimação de valores faltantes, a interpolação com base nos dados dos dias adjacentes, para até três dias com falhas, teve desempenho pior do que o dos dados em grade da base XAVIER, como mostra a Tabela 3.10, com valores de EAM menores do que a metade apresentada pelo processo de interpolação. Sendo assim, o procedimento de interpolação não apresentou vantagens em comparação com a base XAVIER.

3.3.2. Climatologia das localidades analisadas

A Figura 3.2 apresenta a variabilidade climatológica para as variáveis temperatura máxima e mínima, radiação solar global, chuva mensal, velocidade média do vento e umidade relativa média do ar, nos diferentes locais do presente estudo. Essa climatologia foi obtida a partir da base de dados históricos do BDMEP (1980-2009) em que as falhas foram preenchidas com a base de dados em ponto de grade XAVIER.

Nos municípios da região Sul do país, se configura um padrão de chuvas bem distribuídas ao longo do ano (Figura 3.2d). No entanto, devido a sua localização geográfica, no subtropical, as altas temperaturas do verão, contrastam com as baixas temperaturas do inverno (Figura 3.2a e 3.2b), conferindo a esses locais a maior amplitude térmica anual no país (GRIMM, 2009). O ciclo anual contrastante de temperaturas é coerente com a maior diferença de radiação solar recebida no verão e no inverno (Figura 3.2c). Por sua maior disponibilidade energética no verão, os ventos também são mais intensos nessa época (Figura 3.3e).

Figura 3.2 - Climatologia média mensal (1980-2009) para temperatura máxima (a), temperatura mínima (b), radiação solar global (c), chuva mensal (d), velocidade média do vento (e), e umidade relativa média do ar (f), aplicada para cada uma das localidades deste estudo

Na região Sudeste, o regime sazonal das chuvas é tipicamente tropical, havendo uma estação chuvosa, de outubro a março, e uma estação seca, de abril a setembro (Figura 3.2d). No entanto, o início da estação chuvosa apresenta grande variabilidade geográfica e interanual (NUNES; VICENTE e CANDIDO, 2009). Além disso, essa região apresenta temperaturas com variabilidade sazonal elevada, com as máximas ocorrendo no verão e as mínimas no inverno (Figura 3.2a e 3.2b).

O Centro-Oeste apresenta verão, de dezembro a fevereiro, quente e chuvoso, enquanto o inverno, de junho a agosto, muito seco e com temperaturas amenas devido a incursão de massas de ar frio. Nessa região, é comum durante o inverno a umidade relativa do ar ficar extremamente baixa (ALVES, 2009), com exceção do sul da região, representada por Ivinhema, MS, onde o regime de chuvas é mais bem distribuído ao longo do ano.

Climaticamente, com temperaturas elevadas o ano todo, com pouca amplitude térmica, a região Nordeste tem sua estação chuvosa entre os meses de dezembro a março (Figura 3.2d). A região Norte também é caracterizada por altas temperaturas durante o ano todo, mas com período chuvoso nos meses de verão-outono (Figura 3.2d).

Quanto à incidência de radiação solar global (Figura 3.7c) as regiões Norte e Nordeste têm a menor variação ao longo do ano, porém, recebem a menor incidência durante o verão devido a maior cobertura de nuvens e maior volume de chuvas, típicos da estação. Ao contrário, nas regiões Sul e Sudeste, devido à maior latitude (maior variação do fotoperíodo e declinação solar), a variação da incidência de radiação solar entre inverno e verão é maior (Figura 3.7c). A região Central do Brasil recebe a maior incidência de radiação solar durante a estação seca, quando volume de chuva é baixo e o número de dias com céu claro é maior.

Quanto ao armazenamento de água no solo, na Figura 3.3 são apresentadas as estimativas do excedente hídrico (a) e deficiência hídrica (b) mensais.

Constata-se pela Figura 3.3, que na região Sul, onde os totais pluviométricos são elevados e bem distribuídos ao longo do ano, tem-se a persistência do padrão de excedente em todos os meses do ano, com maiores valores no período em que a temperatura média mensal assume os menores valores. Nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte, o período de déficit, coincide com o período em que se tem os menores totais de chuva, e o excedente ocorre na estação chuvosa. Nos municípios dos estados da Bahia e Piauí, destaca-se a quase ausência de excedente hídrico ao longo de todo o ano.

Figura 3.3 - Variação mensal do excedente hídrico (a) e deficiência hídrica (b), obtidos pelo balanço hídrico climatológico normal (1980-2009) de Thornthwaite e Mather (1955), para cada um dos locais para uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm

3.3.1. Cenários futuros

Nas Tabela 3.12, 3.13 e 3.14 são apresentados as alterações médias absolutas para temperatura máxima, mínima e média e a alteração percentual no total acumulado de chuva, para cada um dos locais do estudo, em relação ao período base de 1980-2009, sob os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, a curto, médio e longo prazo, respectivamente. A distribuição espacial destes incrementos com relação a temperatura máxima, temperatura mínima e chuva, nos diferentes cenários de clima futuro, pode ser consultado no ANEXOS AA, AB e AC, respectivamente.

A partir das projeções de clima futuro (Tabela 3.12, 3.13 e 3.14), avaliando-se os valores médios para cada um dos locais do estudo, considerando, a média do conjunto de modelos

utilizados, ambos os cenários de emissão e períodos analisados, apresentaram uma tendência de aumento na temperatura máxima e mínima. Quanto a variável chuva observou-se uma incerteza maior, com tendência de aumento no total acumulado na região Sul do país e redução nas regiões Nordeste e Norte, com exceção dos locais situados em Tocantins, para o RCP4.5, a curto prazo.

A curto prazo, sob ambos os cenários de emissão, o aumento na temperatura máxima é mais pronunciado em relação ao aumento da temperatura mínima, exceto para as estações mais ao Sul do país, Pelotas (RSPE) e Cruz Alta (RSCA), no cenário RCP4.5, além das localidades de Campos Novos (SCCN) e Chapecó (SCCH), no cenário RCP8.5. Esse padrão também se repete nas projeções a médio prazo, para ambos os cenários de emissão e a longo prazo no cenário de altas emissões.

Em termos de valores médios entre todos os locais, sob cenário de emissão intermediário (RCP4.5), os aumentos na temperatura máxima, são da ordem de 1,03, 2,01 e 2,51°C, enquanto que para a temperatura mínima as projeções indicam aumentos da ordem de 0,91, 1,79 e 2,25°C, a curto, médio e longo prazos, respectivamente. No entanto, sob o cenário de alta emissão (RCP8.5), as projeções indicam aumentos bem mais elevados, da ordem de 1,18, 2,70 e 4,61°C na temperatura máxima e de 1,09, 2,56 e 4,45°C na temperatura mínima, a curto, médio e longo prazos, respectivamente. Como esperado, os incrementos sob o cenário RCP8.5 são maiores se comparados aos aumentos sob o cenário RCP4.5. No entanto, essas diferenças ficam bem mais pronunciadas a longo prazo.

Para a variável chuva, o que se observou foi uma tendência de aumento nos totais acumulados em toda região Sul, e também na estação de Avaré, SP (SPAV), na região Sudeste, para ambos os cenários de emissão e todos os períodos de projeções futuras. Por outro lado, verifica-se uma redução nos totais acumulados na região Nordeste e Norte, exceto no estado de Tocantins, sob o cenário de emissão RCP4.5, a curto prazo. Esse padrão de redução também se repete para as estações de Bambuí, Patos de Minas e Unaí, todos no estado de Minas Gerais, na região Sudeste, Catalão, GO, e Brasília, DF, na região Centro-Oeste. As projeções na região Sudeste e Centro-Oeste apresentam-se bastante incertas quanto às projeções climáticas futuras, no entanto, as estações localizadas mais a Sul, tendem a apresentar um aumento nos totais acumulados, enquanto que as localizadas mais a Norte, uma redução. Sob cenário de alta emissão, a longo prazo, tem-se um aumento de até 19,38% em Campos Novos, SC (SCCN) e redução de até 31,46% em Barra, BA (BARR).

Tabela 3.12 - Alteração média para o conjunto de sete modelos de circulação geral (MCGs), da quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (CMIP5), nas projeções de temperatura e chuva, sob dois cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5, a curto prazo (2010-2039), para cada um dos locais do estudo

Local	RCP4.5				RCP8.5			
	Temperatura (°C)			Chuva (%)	Temperatura (°C)			Chuva (%)
	Máxima	Mínima	Média		Máxima	Mínima	Média	
RSPE	0,52	0,64	0,58	6,21	0,64	0,75	0,70	5,28
RSCA	0,72	0,76	0,74	3,89	0,80	0,96	0,88	4,09
SCCN	0,81	0,77	0,79	4,13	0,90	0,92	0,91	3,92
SCCH	0,88	0,83	0,86	2,70	0,98	0,99	0,99	2,41
PRCA	1,00	0,88	0,94	1,93	1,08	1,02	1,05	3,31
PRLO	1,06	0,84	0,95	2,70	1,23	1,17	1,20	1,63
SPAV	0,97	0,88	0,93	0,88	1,12	1,00	1,06	1,83
SPFR	1,11	0,98	1,05	0,17	1,28	1,20	1,24	0,17
SPVO	1,21	0,99	1,10	2,68	1,38	1,25	1,32	-0,03
MGBA	1,07	0,91	0,99	-2,80	1,19	1,06	1,13	-1,20
MGUB	1,14	0,94	1,04	0,18	1,29	1,15	1,22	-0,30
MGPM	1,12	0,98	1,05	-4,46	1,28	1,17	1,23	-0,95
MGUN	1,12	0,98	1,05	-3,16	1,26	1,15	1,21	-2,12
MSIV	1,23	0,97	1,10	1,73	1,36	1,26	1,31	-0,47
MSPA	1,18	1,02	1,10	4,09	1,35	1,19	1,27	0,82
MTDI	1,24	1,07	1,16	1,76	1,39	1,25	1,32	-0,89
GOCA	1,15	0,97	1,06	-2,12	1,31	1,19	1,25	-0,68
GOJA	1,18	0,93	1,06	1,66	1,36	1,18	1,27	-2,52
DFBR	1,10	0,97	1,04	-4,05	1,27	1,16	1,22	-2,47
BABJ	1,00	0,80	0,90	-2,47	1,13	0,90	1,02	-6,76
BABA	1,09	0,92	1,01	-0,76	1,22	1,05	1,14	-7,45
BARR	0,97	0,86	0,92	-5,58	1,12	1,00	1,06	-10,05
PIBJ	0,97	0,92	0,95	-5,33	1,16	1,12	1,14	-8,21
MAAP	0,98	0,80	0,89	-1,60	1,18	0,97	1,08	-7,51
MACA	1,03	0,98	1,01	-2,25	1,18	1,11	1,15	-5,21
MABC	0,92	0,88	0,90	-4,12	1,09	1,06	1,08	-6,39
TOTA	1,05	0,95	1,00	0,17	1,23	1,13	1,18	-8,60
TOPN	1,04	0,92	0,98	0,23	1,23	1,13	1,18	-9,18
TOPA	1,07	0,96	1,02	0,74	1,22	1,14	1,18	-8,28
PASF	1,07	1,07	1,07	-2,54	1,26	1,19	1,23	-7,10
PAMA	0,98	0,97	0,98	-3,34	1,14	1,10	1,12	-5,82
Média	1,03	0,91	0,97	-0,28	1,18	1,09	1,14	-2,54

Tabela 3.13 - Alteração média para o conjunto de sete modelos de circulação geral (MCGs), da quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (CMIP5), nas projeções de temperatura e chuva, sob dois cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5, a médio prazo (2040-2069), para cada um dos locais do estudo

Local	RCP4.5				RCP8.5			
	Temperatura (°C)			Chuva (%)	Temperatura (°C)			Chuva (%)
	Máxima	Mínima	Média		Máxima	Mínima	Média	
RSPE	1,11	1,32	1,22	11,23	1,64	1,89	1,77	14,28
RSCA	1,47	1,52	1,50	8,62	2,06	2,28	2,17	7,98
SCCN	1,60	1,57	1,59	6,52	2,16	2,22	2,19	9,60
SCCH	1,76	1,65	1,71	5,12	2,37	2,38	2,38	7,84
PRCA	1,92	1,70	1,81	3,22	2,52	2,46	2,49	8,38
PRLO	2,08	1,71	1,90	1,97	2,69	2,62	2,66	3,94
SPAV	1,88	1,68	1,78	0,82	2,52	2,39	2,46	3,54
SPFR	2,11	1,84	1,98	-2,00	2,82	2,62	2,72	1,22
SPVO	2,27	1,85	2,06	-1,23	2,92	2,75	2,84	5,78
MGBA	1,97	1,62	1,80	-3,27	2,65	2,38	2,52	0,53
MGUB	2,17	1,83	2,00	-3,74	2,83	2,62	2,73	0,87
MGPM	2,15	1,91	2,03	-9,09	2,83	2,67	2,75	-2,43
MGUN	2,12	1,87	2,00	-10,66	2,82	2,64	2,73	-7,60
MSIV	2,28	1,92	2,10	1,47	2,96	2,74	2,85	4,19
MSPA	2,27	1,91	2,09	-1,07	2,92	2,68	2,80	6,52
MTDI	2,39	2,02	2,21	-4,92	3,10	2,88	2,99	1,84
GOCA	2,21	1,93	2,07	-7,27	2,86	2,68	2,77	-1,70
GOJA	2,31	1,92	2,12	-8,03	3,01	2,67	2,84	-0,39
DFBR	2,13	1,89	2,01	-9,88	2,86	2,65	2,76	-6,48
BABJ	1,94	1,57	1,76	-15,39	2,56	2,20	2,38	-11,72
BABA	2,07	1,80	1,94	-18,18	2,81	2,56	2,69	-16,52
BARR	1,91	1,72	1,82	-17,51	2,61	2,39	2,50	-16,23
PIBJ	1,95	1,87	1,91	-16,37	2,69	2,70	2,70	-20,83
MAAP	1,97	1,76	1,87	-14,18	2,72	2,50	2,61	-20,83
MACA	2,02	1,84	1,93	-10,83	2,78	2,69	2,74	-16,39
MABC	1,82	1,72	1,77	-12,20	2,57	2,49	2,53	-15,70
TOTA	2,08	1,88	1,98	-15,22	2,84	2,66	2,75	-13,94
TOPN	2,09	1,87	1,98	-14,88	2,89	2,72	2,81	-16,19
TOPA	2,08	1,90	1,99	-15,03	2,85	2,66	2,76	-13,52
PASF	2,15	2,01	2,08	-7,32	3,02	2,86	2,94	-11,87
PAMA	1,93	1,84	1,89	-12,22	2,77	2,66	2,72	-18,70
Média	2,01	1,79	1,90	-6,18	2,70	2,56	2,63	-4,34

Tabela 3.14 - Alteração média para o conjunto de sete modelos de circulação geral (MCGs), da quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (CMIP5), nas projeções de temperatura e chuva, sob dois cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5, a longo prazo (2070-2099), para cada um dos locais do estudo

Local	RCP4.5				RCP8.5			
	Temperatura (°C)			Chuva (%)	Temperatura (°C)			Chuva (%)
	Máxima	Mínima	Média		Máxima	Mínima	Média	
RSPE	1,61	1,81	1,71	9,72	2,98	3,38	3,18	18,08
RSCA	2,08	2,05	2,07	4,57	3,73	3,96	3,85	13,38
SCCN	2,08	2,04	2,06	7,95	3,79	3,92	3,86	19,38
SCCH	2,28	2,15	2,22	4,11	4,14	4,20	4,17	14,10
PRCA	2,42	2,16	2,29	5,52	4,27	4,21	4,24	13,76
PRLO	2,56	2,18	2,37	1,08	4,58	4,38	4,48	9,03
SPAV	2,36	2,10	2,23	1,68	4,34	4,12	4,23	8,84
SPFR	2,60	2,30	2,45	-1,12	4,76	4,60	4,68	-0,72
SPVO	2,75	2,32	2,54	-0,64	4,99	4,55	4,77	3,45
MGBA	2,47	2,08	2,28	-2,82	4,53	4,08	4,31	-2,78
MGUB	2,63	2,34	2,49	-2,42	4,84	4,53	4,69	-1,10
MGPM	2,64	2,36	2,50	-6,92	4,81	4,46	4,64	-8,07
MGUN	2,62	2,33	2,48	-9,63	4,78	4,37	4,58	-12,92
MSIV	2,83	2,38	2,61	-1,91	5,11	4,65	4,88	2,38
MSPA	2,74	2,38	2,56	0,13	5,03	4,48	4,76	4,88
MTDI	2,94	2,50	2,72	-5,03	5,28	4,74	5,01	-3,94
GOCA	2,69	2,39	2,54	-6,02	4,91	4,51	4,71	-5,54
GOJA	2,84	2,41	2,63	-6,94	5,13	4,51	4,82	-5,89
DFBR	2,64	2,33	2,49	-9,56	4,84	4,43	4,64	-13,26
BABJ	2,33	1,88	2,11	-12,65	4,28	3,82	4,05	-24,18
BABA	2,59	2,27	2,43	-15,44	4,69	4,35	4,52	-26,60
BARR	2,38	2,11	2,25	-18,16	4,34	4,11	4,23	-31,46
PIBJ	2,48	2,37	2,43	-17,01	4,56	4,51	4,54	-27,76
MAAP	2,48	2,19	2,34	-13,44	4,59	4,30	4,45	-30,17
MACA	2,54	2,34	2,44	-19,98	4,76	4,62	4,69	-29,57
MABC	2,42	2,15	2,29	-21,97	4,44	4,16	4,30	-29,87
TOTA	2,62	2,34	2,48	-10,37	4,78	4,52	4,65	-21,15
TOPN	2,62	2,34	2,48	-12,53	4,93	4,60	4,77	-20,95
TOPA	2,62	2,36	2,49	-9,73	4,80	4,53	4,67	-21,34
PASF	2,77	2,56	2,67	-16,06	5,24	4,93	5,09	-26,82
PAMA	2,56	2,32	2,44	-21,62	4,78	4,47	4,63	-30,53
Média	2,52	2,25	2,39	-6,68	4,61	4,35	4,48	-8,62

Analisando os valores médios de todos os locais, percebe-se uma tendência de redução no total acumulado, da ordem de -0,28, -6,18 e -6,68%, sob cenário de emissão RCP4.5 e de -2,54, -4,34 e -8,62%, sob cenário de emissão RCP8.5, a curto, médio e longo prazo, respectivamente. Devido às incertezas associadas às projeções futuras de chuva, a médio prazo,

a redução sob cenário intermediário, assumiu valores superiores ao indicado sob cenário de alta emissão, com uma diferença percentual de 1,84.

O padrão de aumento na temperatura aqui identificado, vai ao encontro das projeções realizadas por Torres e Marengo (2013), Chou et al. (2014), Reboita et al. (2014) e Sánchez et al. (2015). Esses últimos autores indicam, inclusive, uma probabilidade de ocorrência acima de 90% desse aumento exceder 2°C ao final do século na América do Sul. Quanto ao padrão dos totais acumulados de chuva em cenários futuros, o aumento na região Sul e a redução nas regiões Norte e Nordeste do país, aqui identificados, já haviam sido evidenciados no PBMC (2013) e por Sánchez et al. (2015).

Analisando o aumento médio na temperatura do conjunto de MCGs, sob distintos cenários de emissão, o que se observa, a curto prazo, que o incremento delta, em relação aos dois cenários de emissão, é muito similar. No entanto, a longo prazo, os incrementos assumem valores bem mais elevados sob cenário de alta emissão, se comparado ao cenário de emissão intermediária, a exemplo do que pode ser verificado no incremento mensal em Cruz Alta, RS (RSCA), e Barra do Corda, MA (MABC), para a temperatura máxima (Figura 3.4a e 3.4c) e mínima do ar (Figura 3.4b e 3.4d).

Figura 3.4 - Projeção da alteração da temperatura máxima e mínima do ar, nos municípios de Cruz Alta, RS (a-b) e de Barra do Corda, MA (c-d), sob cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos,

Avaliando o incremento mensal para todos os locais do estudo, sob cenário de alta emissão a longo prazo, verifica-se a persistência do padrão de aumento da temperatura máxima (Figura 3.5a) mais intenso em relação a temperatura mínima (Figura 3.5b), exceto para as estações localizadas ao Sul do país. Portanto, como já evidenciado por Marengo (2009), o consenso é maior em relação a extremos de temperatura, com tendência de aumento nas temperaturas diurnas e noturnas, uma vez que todas as projeções indicaram condições de clima futuro mais quente, com incrementos que persistem em todos os meses (SÁNCHEZ et al., 2015).

Figura 3.5 - Variabilidade média mensal da alteração da temperatura máxima (a), temperatura mínima (b) e chuva (c), considerando a média do conjunto de sete MCGs utilizados, sob projeção futura a longo prazo (2070-2099), e cenário de alta emissão (RCP8.5) para os locais do estudo

Para a chuva, Figura 3.5c, o padrão de aumento no total acumulado, para locais mais ao Sul do país, e de redução, a Norte, concordam com os resultados das projeções regionalizadas de clima, reportadas no primeiro relatório de avaliação nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), com base no Quarto Relatório de avaliação do IPCC (IPCC-AR4). No entanto, o que é importante observar é que o padrão de redução ocorre nos

meses de agosto a outubro, o qual, climatologicamente, já é um período de menores valores acumulados, e em resposta ao menores acumulados de chuva, nesse período tem-se os maiores incrementos em relação a temperatura máxima e mínima.

3.3.1.1. Incertezas e MCGs utilizados

Avaliando as incertezas envolvidas nas projeções de mudança de temperatura e chuva, verifica-se uma considerável variabilidade nas alterações médias mensais geradas pelos sete MCGs. A Figura 3.6, mostra um gráfico do tipo *boxplot* da distribuição dos incrementos de cada variável, sob forçante de máxima emissão (RCP8.5), a longo prazo (2070-2099), nos municípios de Cruz Alta, RS (RSCA), e de Barra do Corda, MA (MABC).

Há um evidente indício de aumento nas temperaturas máxima, e mínima, em RSCA e MABC, Figuras 3.6a e 3.6d e Figuras 3.6b e 3.6e, respectivamente. As maiores incertezas no clima futuro, para ambas as variáveis meteorológicas, ocorrem na cidade de MABC. Observa-se, ainda, para MABC as maiores incertezas, quanto ao prognóstico da temperatura, coincidindo com o primeiro semestre do ano. Os maiores incrementos na temperatura máxima (junho a dezembro) e mínima (julho a agosto) em MABC, se comparado à climatologia, ocorrem nos períodos mais quente e frio em relação à temperatura máxima e mínima, respectivamente (Figuras 3.6d e 3.6e).

Quanto à chuva, para RSCA (Figuras 3.6c), há um indício de chuvas dentro à acima da climatologia observada. MABC (Figura 3.6f), apresentou tendência de redução nos acumulados de chuva em cenário de projeção futura, com as maiores reduções em período climático de menores valores acumulados no cenário atual, ou seja, junho a novembro.

Porém, a análise em relação às mudanças na chuva apresenta maior complexidade, como já colocado por Nobre; Sampaio e Salazar (2008), em que diferentes modelos apresentam diferenças na magnitude e mesmo no sinal da prevalecendo o incremento nos totais acumulados em Cruz Alta, enquanto que em Barra do Corda prevalece a redução.

Os resultados encontrados aqui, com base nos MCGs escolhidos, concordam com Torres e Marengo (2013), que apontam maior confiabilidade nas projeções de clima futuro para a temperatura do ar sobre a bacia do Prata, e menor na bacia Amazônica.

Figura 3.6 - Incertezas associadas às projeções climáticas mensais dos sete MCGs, sob cenário de emissão RCP8.5 a longo prazo (2070-2099). O gráfico do tipo *boxplot* representa a variação do incremento delta mensal nas projeções, para as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima e chuva nos municípios de Cruz Alta, RS (a-c) e de Barra do Corda, MA (d-f)

3.4. Conclusões

As estimativas dos dados meteorológicos a partir da base de dados em grade XAVIER apresentaram grande similaridade, se comparados aos dados observados, mostrando-se como a melhor alternativa para a preenchimento de falhas em séries meteorológicas.

No que se refere à temperatura do ar, as projeções climáticas nos diferentes locais do Brasil, considerando os períodos de curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob cenário intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão, tem evidenciado condições de clima futuro mais quente. No que se refere à chuva, ainda que com algum grau de incerteza, as projeções indicam redução no total acumulado nas regiões Norte-Nordeste e aumento no Sul do país. As regiões Sudeste e Centro-Oeste configuram-se como área de transição, com os locais mais ao sul apresentando aumento enquanto aqueles localizados mais ao norte tendem a apresentar redução no acumulado total.

Referências

- ALLEN, R. G.; HILL, R. W.; SRIKANTH, V. Evapotranspiration parameters for variably-sized wetlands. **American Society of Agricultural Engineers**, Kansas, n. 942132, p. 24, 1994.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).
- ALVES, L. M. Clima da Região Centro-Oeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte II - Climas do Brasil, p. 235-241, 2009.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da; MARENGO, J. A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L. A.; FERNANDEZ, J. P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretária de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007, p. 73.
- ÄNGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Washington, v. 50, p. 121-126, 1924.
- ANNANDALE, J.; JOVANOVIC, N.; BENADÉ, N.; ALLEN, R. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**, New York, v. 21, p. 57-67, 2002.
- BARBOSA, L. A.; SILVA, C. R.; PAULA, M. T. G.; SILVA, V. J.; FINZI, R. R.; CARVALHO, F. J.; NASCIMENTO, H. F. Estimativa da radiação solar com base na temperatura do ar na Região Sul, Sudeste, Oeste de Minas e Campo das Vertentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari, 2011.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Preenchimento de falhas de radiação solar global diária por diferentes métodos - estudo de caso para Piracicaba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., 2015, Lavras. **Anais...**Lavras, 2015, 2517p.

BLÁZQUEZ, J.; NUÑEZ, M. N. Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: Comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 41, p. 1039–1056, 2013.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 159-166, 1984.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 89–97, 1997.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNISKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 3, p. 512-527, 2014.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MARIN, F. R. Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários da radiação solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 15, p. 103–107, 2007.

DONATELLI, M.; CAMPBELL, G. S. A simple model to estimate global solar radiation. In: CONGRESS OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR AGRONOMY, 5., 1998, Nitra, Eslováquia. **Anais...**1998, p.133-134.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDIB, C. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. **International Journal of Climatology**, London, v. 27, p. 1547-1578, 2007.

GENG, S.; PENNING DE VRIES, F. W. T.; SUPIT, I. A simple method for generating daily rainfall data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 36, p. 363-376, 1986.

GIORGI, F. Climate Change Prediction. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 73, p. 239-265, 2005.

GLOVER, J. M. J.; MCCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 84, p. 172-175, 1958.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte II - Climas do Brasil, p. 259-275.

HARGREAVES, G. H. Responding to tropical climates. In: THE 1980-1981 FOOD AND CLIMATE REVIEW, THE FOOD AND CLIMATE FORUM, 1981, Boulder, Colo. **Anais...**Boulder, Colo, 1981, p. 29-32.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating Potential Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 108, p. 225-230, 1982.

HAY, L. E.; WILBY, R. L.; LEAVESLEY, G. H. A Comparison of Delta Change and Downscaled GCM Scenarios for Three Mountainous Basins in the United States. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 36, p. 387-397, 2000.

HEINEMANN, A. B.; DINGKUHN, M.; LUQUET, D.; COMBRES, J. C.; CHAPMAN, S. Characterization of drought stress environments for upland rice and maize in central Brazil. **Euphytica**, Wageningen, v. 162, p. 395-410, 2008.

HUDSON, N.I.; RUANE, A. C. Appendix 2. Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R in Windows, Version 2.3. In: ROSENZWEG, C.; HILLEL, D. (Eds.). **Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1**. New York, Imperial College Press, 2015, 387-440. (ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation, 3)

HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 91, p. 293-300, 1998.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001**. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001, 881p.

_____. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014, 151 p.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235-265, 2003.

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; ZHANG, Y.; PORTER, J. R. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, p. 1433-1446, 2009.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade** - caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. v.1, p. 214.

_____. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte III - Variabilidade Climática, p. 407-424.

MASSIGNAM, A. M. Estimativa da radiação solar em função da amplitude térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2007, p. 1-5.

MCCOWN, R. L.; HAMMER, G. L.; HARGREAVES, J. N. G.; HOLZWORTH, D. P.; FREEBAIRN, D. M. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural Systems**, Essex, v. 50, p. 255-271, 1996.

MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K.; DANIEL, J. S.; KAINUMA, M. L. T.; LAMARQUE, J.; MATSUMOTO, K.; MONTZKA, S. A.; RAPER, S. C. B.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; VELDERS, G. J. M.; VAN VUUREN, D. P. P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, p. 213-241, 2011.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, p. 747-56, 2010.

NENDEL, C.; BERG, M.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; SPECKA, X.; WEGEHENKEL, M.; WENKEL, K. O.; WIELAND, R. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 222, p. 1614-1625, 2011.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21. **Parcerias Estratégica**, Brasília, v. 13, p. 19-42, 2008.

NOGUEIRA, D. H.; SILVA, M. G.; LEDO, E. R. F.; ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO, E. M. Estimativa da radiação solar global (RS) através da amplitude térmica. In: WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, 4., 2012, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2012. p. 1-5.

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. Clima da Região Sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte II - Climas do Brasil, p. 243-258.

OLIVEIRA, G. G. de; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. D. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: Avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, p. 101-121, 2015.

PBMC. PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro relatório de Avaliação Nacional do PAINEL Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, 24p., 2013.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. , 2002. Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas. 1º ed. Guaíba: Editora Agropecuária, 478p .

PINHEIRO, J. U.; NEVES, J. A.; CHAVES, R. R.; MENDES, D.; BARRETO, N. J. C. Avaliação de modelos do CMIP5 que melhor expressam a atuação dos vórtices ciclônicos em altos níveis (VCANS) no Nordeste Brasileiro (NEB). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 07, p. 891-904, 2014.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, Australia, v. 64, p. 114–118, 1940.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation For Statistical Computing, 2001. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 11 junho 2013.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, Boulder, v. 2014, p. 1–17, 2014.

RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. WGEN: a model for generating daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, **Agriculture Research Service**, [s.l.], ARS-8. v. 9, p. 83 1984.

RIENECKER, M. M.; SUAREZ, M. J.; GELARO, R.; TODLING, R.; BACMEISTER, J.; LIU, E.; BOSILOVICH, M. G.; SCHUBERT, S. D.; TAKACS, L.; KIM, G. K.; BLOOM, S.; CHEN, J.; COLLINS, D.; CONATY, A.; DA SILVA, A.; GU, W.; JOINER, J.; KOSTER, R. D.; LUCCHESI, R.; MOLOD, A.; OWENS, T.; PAWSON, S.; PEGION, P.; REDDER, C. R.; REICHLE, R.; ROBERTSON, F. R.; RUDDICK, A. G.; SIENKIEWICZ, M.; WOOLLEN, J. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. **Journal of Climate**, Boston, v. 24, p. 3624-3648, 2011.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133–137, 1998.

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**, Amsterdam, v. 170, p. 166-182, 2013.

ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; VALDIVIA, R.O.; PORTER, C.H.; JANSSEN, S.; MUTTER, C.Z. Appendix 1. Guide for Regional Integrated Assessments: Handbook of Methods and Procedures, Version 5.1. In: ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. (Eds). **Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1**. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation Vol. 3. Imperial College Press, 2015, 331-386.

RUANE, A. C.; GOLDBERG, R.; CHRYSSANTHACOPOULOS, J. Climate forcing datasets for agricultural modeling: Merged products for gap-filling and historical climate series estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 200, p. 233-248, 2015.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H. L.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; WANG, J.; HOU, Y. T.; CHUANG, H. Y.; JUANG, H. M. H.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; VAN DELST, P.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; VAN DEN DOOL, H.; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J. K.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.; ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C. Z.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R. W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 91, p. 1015-1057, 2010.

SALVIANO, M. F.; GROPPA, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 31, p. 64–73, 2016.

SAMPAIO, G.; SILVA DIAS, P. L. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 41, 2014.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A. R. C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R. P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 45, p. 2193-2212, 2015.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. D. A.; COSTA, A. A.; CABRAL, S. L. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS DO CMIP5 QUANTO À REPRESENTAÇÃO DOS PADRÕES DE VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NO SÉCULO XX SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL, AMAZÔNIA E BACIA DA PRATA E ANÁLISE DAS PROJEÇÕES PARA O CENÁRIO RCP8. 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 28, p. 317-330, 2013.

STACKHOUSE, P. W.; WESTBERG, D.; HOELL, J. M.; CHANDLER, W. S.; ZHANG, T. Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) --- Agroclimatology Methodology --- (1 Latitude by 1 Longitude Spatial Resolution). p. 0-45, 2015.

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

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

TORRES, R. R.; LAPOLA, D. M.; MARENGO, J. A.; LOMBARDO, M. A. Socio-climatic hotspots in Brazil. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 115, p. 597-609, 2012.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 112, p. 253-272, 2013.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: From CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 117, p. 579-587, 2014.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, Dordrecht v. 109, p. 5–31, 2011.

WARD, J. D.; WERNER, A. D.; NEL, W. P.; BEECHAM, S. The influence of constrained fossil fuel emissions scenarios on climate and water resource projections. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 15, p. 1879-1893, 2011.

WILBY, R. L.; CHARLES, S. P.; ZORITA, E.; TIMBAL, B.; WHETTON, P.; MEARN, L. O. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, **Supporting material of the Intergovernmental Panel in Climate Change**, [s.l.], v. 27, p. 1-27, 2004.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, Washington v. 90, p. 8995–9005, 1985.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 36, p. 2644-2659, 2015.

4. AJUSTE, AVALIAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO, EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS

Resumo

Atualmente, no cenário mundial, o Brasil é o terceiro maior produtor de milho, com a produção dividida em 1ª e 2ª safras. No entanto, projeções de clima futuro tem evidenciado a ocorrência de mudanças climáticas globais devido ao aumento dos gases de efeito estufa, resultantes, principalmente, da ação antrópica. Uma vez que o clima influencia a produção agrícola, os modelos de simulação de culturas têm se mostrado eficientes para quantificar os impactos do clima futuro na produtividade das culturas. No entanto, antes mesmo de simular respostas na produtividade agrícola, sob o clima futuro, é necessário que esses modelos sejam avaliados e adaptados para que possam responder adequadamente às variações nas condições de solo, de clima e de características específicas das culturas. Assim, o presente estudo teve por objetivos: i) calibrar e avaliar a capacidade dos modelos DSSAT/CSM-CERES-*Maize* e MONICA, para simular a produtividade do milho na 1ª safra e na 2ª safra; ii) avaliar os ajustes feitos nesses modelos para a estimação da produtividade de grãos de milho, individualmente e por conjunto (ensemble), e iii) analisar a sensibilidade desses modelos às variações de temperatura do ar, chuva, níveis de concentração de CO₂ atmosférico e doses de nitrogênio, identificando os fatores que exercem maior influência sobre a produtividade de grãos. Ambos os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA apresentaram bom desempenho na estimação da produtividade do milho, com EAM inferior a 450 e 350 kg ha⁻¹ na 1ª e na 2ª safra, respectivamente. O índice de confiança (c) indicou desempenho muito bom para ambas as safras para os dois modelos. Para as estimativas por conjunto os valores do índice c foram avaliados como ótimo para as duas safras, com EAM caindo para 276 e 194 kg ha⁻¹, respectivamente. Com relação à análise de sensibilidade, ambos os modelos apresentaram respostas mais expressivas às alterações de temperatura média do ar, impactando de forma negativa os atuais níveis de produtividade do milho na 1ª e na 2ª safra. Aumentos nos acumulados totais de chuva resultaram em aumentos da produtividade de grãos, enquanto reduções levaram a perdas na produtividade. Já concentrações crescentes de CO₂, apresentaram pouca ou nenhuma sensibilidade. Para as doses de N, ambos os modelos foram sensíveis, com o aumento da produtividade se estabilizando a partir das doses totais entre 120 a 180 kg ha⁻¹. Em geral, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* apresentou maiores desvios em relação aos valores médios para as variações de chuva e doses de N, mostrando, portanto, maior sensibilidade que o modelo MONICA, sendo assim mais adequado para estudos dos impactos das mudanças climáticas na cultura do milho.

Palavras-chave: Milho; Modelos de simulação; Ajuste e avaliação; Análise de sensibilidade

Abstract

Currently, Brazil is the third largest producer of maize in the world, with production divided in two growing seasons: on-season and off-season. However, projections of future climate have evidenced an occurrence of global climate changes due to the increase of greenhouse gases, resulting mainly from anthropic activities. Once the climate influences the agricultural activity, simulation crop models, have proved to be important tools to quantify the effects under future climate projections. However, before simulating responses in crop production in the future climate projections, it is necessary to calibrate and validate the crop simulation models so that they respond adequately to soil and climate conditions and crop

specific characteristics. The objective of the present study was to: i) calibrate and validate the DSSAT/CERES-Maize and MONICA models to simulate maize grain yield in both on-season and off-season; ii) to evaluate the adjustments of the models on the capacity of estimating maize grain yield, individually and by their ensemble, iii) to analyze the sensitivity of the models to variations of temperature, rainfall, and levels of atmospheric CO₂ concentration, and nitrogen doses, identifying the factors that have the greatest influence on maize grain yield. Crop yield and cycle and weather data from several experiments around Brazil were used to calibrate and validate the models. Both DSSAT/CERES-Maize and MONICA models showed good performance for estimating maize grain yield, with MAE lower than 450 and 350 kg ha⁻¹ in the on-season and off-season, respectively. The c index indicate very good performance for both maize seasons and models. The ensemble of the models improved the performance, with c index evaluated as optimal, for both maize seasons, with MAE falling to 276 and 194 kg ha⁻¹, in on-season and off-season, respectively. From the sensitivity analysis, both models presented greater responses of maize grain yield for variations in mean air temperature, with the increasing temperatures impacting negatively the yield in both growing seasons. Increases in rainfall amounts resulted in increases in grain yield, while reductions led to yield losses. Increasing concentrations of CO₂, however, presented little effect on yields. On the other hand, for N doses, both models were sensitive, with yields stabilizing at N doses between 120 and 180 kg ha⁻¹. In general, DSSAT/CERES-Maize showed to be more sensitive to variations in rainfall and N doses than MONICA, being more suitable for studies about climate change impact on maize crop.

Keywords: Maize; Crop Simulation Models; Adjust and Evaluating; Sensitivity Analysis

4.1. Introdução

Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho (FAOSTAT, 2017), com a produção dividida em duas safras. Os plantios de verão, ou 1^a safra, são realizados durante o período chuvoso, que varia entre o final de agosto na região Sul até os meses de outubro a dezembro no Sudeste e Centro-Oeste, e início do ano no Nordeste. A semeadura da safrinha, ou 2^a safra, normalmente ocorre entre fevereiro e março, sendo cultivado desde o estado do Paraná até a região Nordeste, predominando na região Centro-Oeste.

Na safra 2015/16, o país produziu 66,69 milhões de toneladas de grãos de milho, sendo a 2^a safra responsável por 66% da área plantada e 61% da produção total, com a região Centro-Oeste contribuindo com mais de 60% desta (CONAB, 2016).

A cultura do milho, em termos de produtividade de grãos, apresenta resposta a diversos fatores, tais como os relacionados ao solo, ao clima e à decisões de manejo agrícola (ANDRÉA, 2016). No atual cenário de produção, as condições climáticas adversas são responsáveis por significativas quebras na produtividade, de modo que se espera que as alterações climáticas também devam alterar os atuais níveis de produtividade dessa cultura.

Com relação às mudanças climáticas, o cenário é bastante preocupante, já que a concentração de dióxido de carbono [CO₂] global na atmosfera atingiu recentemente 407 ppm (DLUGOKENCKY e TANS, 2017), como resultado da ação conjunta das forçantes naturais e da ação antrópica, para as quais a atividade humana tem contribuído significativamente, desde a revolução industrial, em 1750, época na qual as estimativas indicam concentrações de 280 ppm (IPCC, 2007, 2014).

Considerando que a queima de combustíveis fósseis é uma característica das sociedades ao redor do mundo, os cenários futuros de emissões de gases de efeito estufa tem indicado uma atmosfera terrestre na qual as [CO₂] podem superar os alarmantes níveis de 1370 ppm em 2100 (MOSS et al., 2010; VAN VUUREN et al., 2011). Iminentemente, sob cenários em que as emissões vão crescendo, em relação aos atuais níveis, cenários futuros tem indicado clima com temperaturas mais quentes, que deverão se elevar de 0,3 a 1,7 °C, em um cenário otimista, chegando a um aumento de 2,6 a 4,8°C, em um cenário pessimista (KNUTTI e SEDLÁČEK, 2013; IPCC, 2014). Para as chuvas, o padrão de alteração é bastante incerto, porém, indicando redução no total acumulado nas regiões Norte-Nordeste e aumento no Sul do país (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO, 2009; PBMC, 2013; TORRES e MARENGO, 2013; CHOU et al., 2014; REBOITA et al., 2014; SÁNCHEZ et al., 2015)

Diante desse panorama, o Brasil, sendo um país de ampla extensão continental e, naturalmente, por apresentar grande variação nos padrões climáticos, possivelmente deverá experimentar variações distintas quanto aos impactos na produção agrícola sob alterações climáticas (ASSAD et al., 2004; PBMC, 2013).

Neste contexto, vale ressaltar que a produtividade agrícola é altamente influenciada pelas condições meteorológicas, uma vez que a interação entre o genótipo, em dada população de plantas, com as condições de radiação solar, fotoperíodo e temperatura do ar define a produtividade potencial (PP) das culturas agrícolas. Além disso, ao se contabilizar o efeito do déficit hídrico na PP, obtém-se a produtividade atingível (PA), também conhecida como produtividade limitada pela água, a qual expressa o máximo de produtividade a ser atingida por culturas de sequeiro, sob condições ótimas de manejo. Finalmente, quanto a PA é limitada por práticas de manejo, especialmente relacionados à proteção dos cultivos, chega-se à produtividade real (PR) (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; BATTISTI et al., 2013; FISCHER, 2015; SENTELHAS et al., 2016).

A melhor forma de se estimar os valores de PP e PA é por meio dos modelos de simulação de culturas, devidamente calibrados e testados. Essas estimativas têm se mostrado como ferramentas úteis na compreensão de como os efeitos das mudanças climáticas, tais como

elevação nos níveis de $[CO_2]$, aumento da temperatura do ar e variações na chuva, influenciarão o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas (RAUFF e BELLO, 2015), entre elas a do milho (BASSU et al., 2014).

Apesar da importância dos modelos de simulação de culturas, a aplicação prática desses requer calibrações e avaliações para as condições locais ou regionais de interesse (BOOTE; JONES e PICKERING, 1996). A calibração consiste no ajuste dos coeficientes que caracterizam a fenologia da cultura e fatores relacionados ao crescimento e produtividade, de forma que os valores simulados sejam o mais próximo possível aos valores observados (COSTA, 2015). Já a avaliação consiste em empregar critérios estatísticos para verificar o desempenho do modelo calibrado na simulação de dados observados de forma independente. A necessidade de calibrações e avaliações se justifica em função dos diferentes cultivares empregadas em cada região e à grande variabilidade espacial nas características do clima, do solo e das práticas de manejo (ANGULO et al., 2013; LIU et al., 2015).

Atualmente, tem sido recomendado o uso de modelos em conjunto (*ensemble*), ou abordagem multi-modelos. A vantagem desse tipo de abordagem, é que as incertezas associadas a cada um dos modelos de simulação de cultura avaliados individualmente é reduzida ao se considerar a média entre os modelos empregados (BASSU et al., 2014; GRASSINI et al., 2015). No entanto, é preciso tomar cuidado nesse tipo de abordagem, já que quantidade nem sempre expressa qualidade. De acordo com Grassini et al. (2015), é melhor usar poucos modelos de simulação de culturas, desde que bem calibrados, ao invés de usar vários modelos que não estejam bem ajustados.

Dentre os principais sistemas que empregam modelos de crescimento de culturas destacam-se: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT), version 4.6 (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2010, 2014), composto por diversos modelos de simulação; e o *MOdel for NItrogen and Carbon in Agro-ecosystems* (MONICA) (NENDEL et al., 2011), desenvolvido na Europa Central para a simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas sob impactos de mudanças climáticas.

Considerando-se que a forma como as alterações climáticas deverão impactar a produtividade das culturas ainda é incerto e devido à importância da cultura do milho para a agricultura brasileira, é relevante se compreender como essa cultura irá responder ao aumento dos níveis de CO_2 na atmosfera, às alterações nas temperaturas e nos acumulados totais de chuva, assim como à variação na disponibilidade de nitrogênio no solo. Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivos: (i) Calibrar e avaliar os modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA para simular a produtividade de grãos de milho na 1ª e na 2ª safra; (ii) avaliar os

ajustes dos modelos para a estimação da produtividade de grãos de milho, individualmente e por conjunto (*ensemble*); (iii) analisar a sensibilidade dos modelos avaliados às variações na [CO₂], temperatura, chuva e nitrogênio, identificando os fatores que exercem maior influência sobre a produtividade de grãos de milho.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Modelos de simulação

Para a realização do presente estudo foram utilizados dois modelos de simulação da cultura do milho, sendo eles: modelo DSSAT/CSM-CERES-*Maize*, versão 4.6, que simula os efeitos do genótipo, do clima e das propriedades físicas e químicas do solo, no crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2010; HOOGENBOOM et al., 2015); e o modelo MONICA, que simula o crescimento e desenvolvimento de culturas, considerando a dinâmica da água, nitrogênio e carbono do sistema solo-planta-atmosfera, sendo concebido, portanto, para dar suporte às pesquisas da dinâmica do carbono sob mudanças climáticas (NENDEL et al., 2011).

Nas simulações com o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998). A infiltração de água no solo segue o método do número da curva de escoamento superficial, definido pelo serviço de conservação do solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972). Para o cálculo do balanço hídrico é usado o modelo de Ritchie (1998), enquanto a evaporação da água do solo é determinada de acordo com o método de Suleiman-Ritchie (2003). A fotossíntese é determinada em função da variação temporal da curva do dossel (*canopy curve*).

Para o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, os coeficientes manipulados na calibração foram: P1 - soma térmica desde a emergência até a etapa do final do período juvenil (temperatura base 8°C); P2 - coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo; P5 - graus-dia acumulados desde o florescimento até o ponto de maturidade fisiológica (temperatura base 8°C); G2 - número potencial de grãos por planta; G3 - taxa potencial de crescimento do grão; e PHINT – graus-dia necessários para a emissão de uma folha.

No processo de calibração, apenas o coeficiente P2 foi mantido inalterado, sendo igual a 0,5, valor recomendado para híbridos tropicais (JONES e KINIRY, 1986). Para o coeficiente PHINT, assumiu-se o valor médio obtido a partir de dados experimentais da literatura. Deste modo, admitiu-se o valor de 46,79°C dia para a cultivar da 1ª safra (SILVA et al., 2012a;

AMARAL et al., 2015; COSTA, 2015) e de 44,10°C dia para a cultivar da 2ª safra (SOLER; SENTELHAS e HOOGENBOOM, 2007). Com o coeficiente P2 mantido fixo e o PHINT definido como o valor médio obtido da literatura, o valor de P1 foi ajustado até as datas estimadas de florescimento ficarem próximas das observadas. Uma vez definido o valor de P1, ajustou-se o valor de P5 até que as datas estimadas e observadas da maturidade fisiológica ficassem o mais próximo possível. Por fim, o ajuste dos coeficientes G2 e G3 foram realizados de modo combinado, até a diferença entre as produtividades observadas e simuladas fosse minimizada.

No modelo MONICA, a ETo é determinada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998). A infiltração no solo segue abordagem da capacidade de campo (WEGEHENKEL, 2000), em que a água que não pode ser armazenada em uma dada camada do solo é drenada para a camada inferior, com a capacidade de armazenamento e a taxa de percolação governadas pela textura e conteúdo de matéria orgânica do solo (NENDEL, 2014). A evaporação da água é baseada na cobertura e conteúdo de água do solo, sendo limitada pela disponibilidade de água e pelo gradiente de pressão de vapor do ar. A transpiração é definida pela distribuição e profundidade radicular, limitada pelos déficits hídrico e nutricional.

Para o modelo MONICA, as fases fenológicas ajustadas para a cultura do milho, na calibração, foram: 1 - semeadura a emergência; 2 - emergência a emissão de folhas; 3 - emissão de folhas a inflorescência masculina; 4 - inflorescência masculina ao florescimento; 5 - florescimento ao enchimento de grãos; 6 - enchimento de grãos e 7 - maturação. À semelhança do ajuste realizado para os coeficientes do modelo DSSAT/CERES-*Maize*, realizou-se o ajuste dos parâmetros do modelo MONICA que descrevem sua fisiologia e desenvolvimento, de modo a aproximar os valores simulados dos observado, de acordo com a seguinte ordem dos coeficientes: 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

4.2.2. Dados de ensaios

Para a calibração dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, foram utilizados dados dos ensaios públicos de produtividade do milho do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), referente ao ano 2009/2010. Na Figura 4.1 é apresentada a distribuição espacial dos ensaios utilizados, sendo 11 locais empregados para o ajuste do milho 1ª safra e oito ensaios para a 2ª safra (Figuras 4.1a e 4.1b). A descrição da localização geográfica, densidade de plantio, florescimento, produtividade e épocas de semeadura e colheita para cada um dos ensaios pode ser consultada no ANEXO B. A opção em usar dados de um único estado, deu-se pela dificuldade em conseguir ajustar os coeficientes quanto ao crescimento e desenvolvimento

da planta, principalmente pela discrepância entre as datas de florescimento, quando locais de diferentes estados eram utilizados.

Para a avaliação dos coeficientes ajustados na capacidade preditiva dos modelos, foram utilizados dados independentes, de produtividade, totalizando 85 dados de milho para 1ª safra, no ano 2012/2013, e 67 para 2ª safra, nos anos de 2012, 2013 e 2014. A distribuição espacial dos locais utilizados é apresentada nas Figuras 4.2a e 4.2b, respectivamente. Detalhes quanto à descrição da localização geográfica, datas de semeadura e colheita, produtividade de grãos e textura do solo, para o conjunto de dados utilizados podem ser consultados nos ANEXOS CA e CB, para milho 1ª safra e ANEXOS DA e DB, para milho 2ª safra.

Figura 4.1 – Distribuição espacial dos ensaios públicos de produtividade do milho, na 1ª safra (a) e na 2ª safra (b) do IAPAR, no estado do Paraná, empregados no ajuste dos modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA

Figura 4.2 - Distribuição espacial das localidades utilizadas no processo de avaliação dos modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA, para milho 1ª safra (a) e 2ª safra (b)

4.2.3. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos diários de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar global, insolação, chuva, velocidade do vento e umidade relativa do ar, foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e do banco de dados meteorológicos do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO), da EMBRAPA. O modelo proposto por Angström (1924) e Prescott (1940), com coeficientes a e b sugeridos por Glover e McCulloch (1958), foi usado para os cálculos dos valores observados de radiação solar global. Em caso de falhas, ou variáveis ausentes, procedeu-se o preenchimento com a base de dados em grade desenvolvida por Xavier; King e Scanlon (2015). Nos processos de calibração e avaliação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, apenas dados meteorológicos para anos mais recentes foram utilizados, conforme descrito no item 4.2.2. Posteriormente, a análise de sensibilidade, foi conduzida para a série histórica de 1980-2009.

4.2.4. Dados de solo

Três perfis médios de solo foram considerados de acordo com o tipo de solo, textura e capacidade de água disponível (CAD). O tipo de solo utilizado no ajuste e validação dos modelos, em cada um dos locais, foi considerado de acordo com a predominância em cada local. Sendo assim, foi considerado como solo de textura arenosa aquele com menos do que 15% de teor de argila, textura média aquele com 15 a 35% de teor de argila, e textura argilosa os que apresentaram mais do que 35% de teor de argila, representando, respectivamente, baixa, média e alta CAD (Solos 1, 2 e 3), conforme critério de classificação atualmente adotado no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (MAPA, 2008).

A Tabela 4.1 apresenta a classificação, teor médio de areia, silte e argila e a CAD para cada tipo de solo utilizado, assim como o fator de enraizamento para cada perfil do solo. A CAD foi determinada em função dos parâmetros físicos-hídricos dos solos, obtidos do projeto RADAM-BRASIL (PROJETO RADAM BRASIL, 1975-1983), utilizando-se funções de pedotransferência para o cálculo da curva de retenção (TOMASELLA; HODNETT e ROSSATO, 2000). O fator de enraizamento determina o crescimento das raízes nas diferentes camadas do solo, e exerce influência no potencial de absorção de água da planta. No DSSAT esse fator é calculado de acordo com as características físico-hídricas de cada perfil. Neste estudo o crescimento das raízes foi limitado a uma profundidade de 80 cm.

Tabela 4.1 - Classificação do solo, teor médio de areia, silte e argila, capacidade de água disponível (CAD) e fator de enraizamento (FE) para os solos usados no presente estudo. NQ – Neossolo Quartzarênico; LVd – Latossolo Vermelho Distrófico; e Latossolo Vermelho. Perfil 1 = 0-20 cm; Perfil 2 = 20-40 cm; Perfil 3 = 40-80 cm

Classificação	Tipo	Areia	Silte	Argila	CAD	FE		
		(%)			(mm m ⁻¹)	1	2	3
NQ	1	89	4	7	45	1,00	0,52	0,32
LVd	2	71	12	17	73	1,00	1,00	0,45
LV	3	3	34	53	140	1,00	1,00	0,47

4.2.5. Calibração e avaliação dos modelos de simulação da cultura do milho

Devido à ausência de informações específicas do manejo nutricional da cultura do milho nos ensaios públicos do IAPAR, as simulações da cultura do milho, para calibração e avaliação, foram conduzidas sem estresse nutricional, já que nos protocolos desses ensaios as adubações são feitas de acordo com as análises de solo, de modo a obter altas produtividades. Sendo assim, o crescimento e o desenvolvimento da cultura do milho se deram apenas sob influência do estresse hídrico. Além disso, visando a calibração e o ajuste do modelo para uma cultivar representativa para todo o território brasileiro, não se considerou cultivares específicas, mas uma cultivar média.

As simulações dos modelos, durante a fase de calibração e de avaliação, foram conduzidas com [CO₂] em 380 ppm.

4.2.6. Índices estatísticos utilizados na avaliação dos modelos de simulação ajustados.

A avaliação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA na estimação da produtividade de milho para a 1ª e 2ª safra, foi realizada pela comparação dos valores estimados com os observados utilizando-se o coeficiente de determinação (r^2), o coeficiente de confiança ou desempenho (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), cujo critério de interpretação é descrito na Tabela 4.2, o erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM) e, ainda, a raiz do erro quadrático médio (REQM), sendo descritos nas equações 4.1 a 4.5.

$$r^2 = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(E_i - \bar{O}) \times (O_i - \bar{O})]^2}{\left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] \times \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]} \quad (4.1)$$

$$c = \sqrt{r^2} \times 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4.2)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (4.3)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (4.4)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (4.5)$$

em que: O_i e E_i são, respectivamente, as produtividades observada e estimada, em kg ha^{-1} ; $\bar{O}$ e $\bar{E}$ são, respectivamente, as médias das produtividades observada e estimada; n é o total de dados do período (adimensional).

Os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, foram avaliados quanto a capacidade em simular os valores de produtividade de grãos de milho, para 1ª e 2ª safra de forma individual. Considerou-se também, a estimação conjunta, em que valores simulados foram determinados pelo valor médio simulados pelos dois modelos. Essa é uma abordagem que vem sendo aplicada recentemente, conhecida como *ensemble*, em que estimativas médias do conjunto de modelos tendem a ser mais próximas aos valores observados, se comparados às estimativas de cada modelo individualmente (BASSU et al., 2014; SALO et al., 2015).

Tabela 4.2 - Critério de interpretação do desempenho dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, na estimação da produtividade do milho, 1ª e 2ª safra, pelo índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

4.2.7. Análise de sensibilidade

Objetivando compreender a resposta dos modelos à alteração de um fator, após os processos de ajuste e calibração dos modelos, foi conduzida uma análise de sensibilidade dos mesmos para simular os possíveis cenários de alterações nos níveis de $[\text{CO}_2]$, nas temperaturas

mínimas e máximas do ar, chuva e diferentes doses de adubação nitrogenada. Para essa análise, as simulações foram realizadas ao longo de 30 anos (1980-2009).

Os parâmetros de uma cultivar de ciclo médio ajustada, foram empregados em cada um dos modelos. Por questões de padronização, para milho 1ª safra, considerou-se a semeadura em 15 de novembro, com a população de 6,5 plantas por m², em espaçamento entre linhas de 0,80 m, a uma profundidade de 0,05 m. Já para o milho 2ª safra, a semeadura foi realizada em 15 de fevereiro, para uma população de 5,5 plantas por m², também com espaçamento entre linhas de 0,80 m, a uma profundidade de 0,05 m. A data de semeadura foi definida de modo a coincidir com a época em que a maior parte dos locais produtores do país realiza o plantio, de acordo com o Zoneamento Agrícola de Rico Climático (ZARC). A [CO₂], relativa ao período de 1980-2009, foi assumida em 360 ppm, o que representa a condição média para o período da série histórica empregada.

Devido à diversidade de padrões climáticos no território brasileiro, a análise de sensibilidade foi conduzida em três locais com características climáticas (ALVARES et al., 2013) e de solo distintas: Cruz Alta, RS (RSCA), onde o clima é característico de regiões subtropicais, de elevada amplitude térmica e grande variação anual da duração do dia e com chuvas bem distribuídas ao longo do ano; Jataí, GO (GOJA), região de transição; e Barra do Corda, MA (MABC), região de condições tipicamente tropicais, com temperaturas elevadas, com menor amplitude térmica, menor variação anual do fotoperíodo e com chuvas concentradas no verão (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Locais para os quais foi conduzida análise de sensibilidade, para simulações realizadas nos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para milho 1ª e 2ª safra, com as suas siglas, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura do solo e classificação climática de Köppen

Local	Sigla	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Tipo de solo	Textura	Classificação climática Köppen
Cruz Alta, RS	RSCA	-28,63	-53,60	473	Latossolo	Média	Cfa
Jataí, GO	GOJA	-17,91	-51,71	663	Latossolo	Argilosa	Aw
Barra do Corda, MA	MABC	-5,50	-45,23	153	Latossolo	Arenosa	Aw

4.2.7.1. Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA às variações dos elementos climáticos

Os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA foram aplicados para a estimação da produtividade do milho, 1ª e 2ª safra, sob diferentes condições de alteração de temperatura do ar, chuva e concentração de CO₂. Para tanto, a temperatura mínima e máxima diária do ar foram alteradas pela adição de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 4^{\circ}\text{C}$ e $\pm 5^{\circ}\text{C}$ em relação aos valores diários da

série histórica atual (1980-2009). Para a chuva, foram consideradas variações percentuais nos valores diários de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$ e $\pm 50\%$, em relação à série histórica atual (1980-2009). Para as variações nas concentrações de CO_2 , em relação a série histórica (1980-2009), foram considerados concentrações variando de 350 até 850 ppm, com incrementos de 100 ppm. Na Tabela 4.4 estão sumarizados os cenários utilizados para a análise de sensibilidade dos modelos de simulação em relação aos elementos climáticos.

Tabela 4.4 - Cenários utilizados para a análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para a cultura do milho, 1ª e 2ª safra, quanto às alterações de temperatura do ar, chuva, e níveis de concentração atmosférica de CO_2

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		Chuva (mm)		[CO_2]
Alteração absoluta		Alteração percentual		(ppm)
0		0		350
-1	+1	-10	+10	450
-2	+2	-20	+20	550
-3	+3	-30	+30	650
-4	+4	-40	+40	750
-5	+5	-50	+50	850

As simulações para avaliação das respostas dos modelos às alterações da temperatura média do ar e também para as diferentes [CO_2] foram conduzidas na ausência de qualquer tipo de restrição hídrica ou nutricional. Para o caso da chuva, as simulações foram conduzidas apenas sob restrição hídrica, de modo que a produtividade atingível máxima ficou condicionada à ocorrência de chuva ao longo do ciclo da cultura do milho. As simulações na análise de sensibilidade foram conduzidas de forma individual, para as alterações em relação à temperatura média do ar, à chuva e à [CO_2].

4.2.7.2. Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA às variações da adubação nitrogenada

Como para a cultura do milho a adubação nitrogenada tem um papel de grande importância para a obtenção de altos níveis de produtividade (COELHO; FRANÇA, 1995), foi avaliada a sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA às variações dos níveis de nitrogênio, aplicados na forma de ureia. A Tabela 4.5 apresenta os cenários empregados na análise de sensibilidade dos modelos de simulação da cultura do milho quanto à adubação nitrogenada, na forma de ureia, para doses variando de 0 a 300 kg ha^{-1} , com incrementos de 30 kg ha^{-1} , parceladas em duas épocas, ou seja, 33% aplicados na semeadura e 67% aplicados em cobertura aos 45 dias após semeadura. Tal parcelamento se baseou nos estudos de Novais; Novais e Braga (1974).

Tabela 4.5 - Cenários de parcelamento da adubação nitrogenada, na forma de ureia, utilizados para a análise de sensibilidade nos modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA para a cultura do milho, 1ª e 2ª safra, aplicada na semeadura e 45 dias após a semeadura (DAS), na proporção de 33 e 67%

Doses de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	Parcelamento da Aplicação de N (kg ha ⁻¹)	
	Semeadura (33%)	45 DAS (67%)
0	0	0
30	9,9	20,1
60	19,8	40,2
90	29,7	60,3
120	39,6	80,4
150	49,5	100,5
180	59,4	120,6
210	69,3	140,7
240	79,2	160,8
270	89,1	180,9
300	99,0	201,0

Para as simulações sob diferentes doses de nitrogênio, considerou-se a penalização pela restrição nutricional. De modo a se minimizar os efeitos do déficit hídrico nessa análise, uma vez que o objetivo foi o de avaliar a resposta dos modelos apenas com relação a doses distintas de nitrogênio, manteve-se o balanço hídrico dos modelos ativados, porém com a irrigação automática, iniciada sempre que o nível crítico de água no solo atingisse 95% da água disponível na profundidade de 30 cm, ou seja, sob mínimo estresse por falta de água.

4.2.7.3. Avaliação da análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada considerando-se as alterações percentuais na produtividade de grãos de milho nas duas safras, por meio dos valores médios para 30 anos de simulações. Com base nessas produtividades determinou-se a alteração relativa de produtividade (ΔP , em %):

$$\Delta P(\%) = \left[1 - \left(\frac{P_{\text{sob alteração}}}{P_{\text{sem alteração}}} \right) \right] * 100 \quad (4.6)$$

em que, $P_{\text{sob alteração}}$ e $P_{\text{sem alteração}}$ são as produtividades simuladas para os cenários de alterações na temperatura, chuva e $[\text{CO}_2]$ e para o cenário atual, sem alteração, respectivamente.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Calibração e validação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para a estimação da produtividade do milho

Os coeficientes genéticos calibrados para a cultura do milho (1ª e 2ª safra) nos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Coeficientes genéticos do modelo DSSAT/CERES-*Maize* calibrados para a cultura do milho de 1ª e 2ª safra, em condições brasileiras

Safr	Coeficientes Genéticos					
	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
1ª safra	290,60	0,50	907,10	749,90	9,40	46,79
2ª safra	285,20	0,50	914,70	857,00	6,07	44,10

Tabela 4.7 - Coeficientes de ajuste do modelo MONICA calibrados para a cultura do milho de 1ª e 2ª safra, em condições brasileiras

Safr	Fases fenológicas						
	1	2	3	4	5	6	7
1ª safra	90	188	454	254	249	1500	15
2ª safra	90	133	383	260	275	1875	15

Para o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, os coeficientes P1, P2 e P5 definem a fenologia da cultura, enquanto que os coeficientes G2 e G3 estão relacionados com a produtividade. Para o modelo MONICA, as fases fenológicas simuladas são respectivamente: 1 – da semeadura à emergência; 2 – da emergência à emissão de folhas; 3 – da emissão de folhas à inflorescência masculina; 4 – da inflorescência masculina ao florescimento; 5 – do florescimento ao enchimento de grãos; 6 – enchimento de grãos; e 7 – maturação.

Os resultados do desempenho desses modelos na fase de calibração são apresentados na Tabela 4.8, na qual se observa que ambos os modelos simularam as produtividades do milho de forma satisfatória, com precisão regular (r^2 entre 0,60 e 0,72), bom desempenho (c entre 0,63 e 0,73) e baixos erros (EAM entre 319 e 583 kg ha⁻¹ e REQM entre 523 e 981 kg ha⁻¹).

Uma vez calibrados os coeficientes para uma cultivar média, esses foram usados para simular a produtividade do milho, comparando-se as estimativas com os dados observados que não fizeram parte da calibração (dados independentes). Esse processo é conhecido como validação do modelo. Na Figura 4.3 são apresentadas as relações entre os dados de produtividade de milho observados e estimados pelos modelos DSSAT/CERES-*Maize*,

MONICA e pelo conjunto de ambos, para o milho 1ª safra (Figuras 4.3a, 4.3b e 4.3c) e 2ª safra (Figuras 4.3d, 4.3e e 4.3f), respectivamente.

Tabela 4.8 - Desempenho dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para estimação da produtividade do milho, 1ª e 2ª safra, a partir de ensaios públicos de produtividade do estado do Paraná, durante a fase de calibração, sendo EM = erro médio; EAM = erro absoluto médio; REQM = raiz do erro quadrático médio; c = índice de desempenho; r² = coeficiente de determinação

Safr	Modelo	coeficiente de determinação					Simulado	Observado
		EM	EAM	REQM	c	r ²		
		(kg ha ⁻¹)					(kg ha ⁻¹)	
1ª safra	DSSAT	-252	449	830	0,72	0,72	11110 [*]	11363 [*]
	MONICA	-482	583	981	0,63	0,64	10881 [*]	
	CONJUNTO ^{***}	-367	461	882	0,70	0,71	10996 [*]	
2ª safra	DSSAT	-324	349	576	0,72	0,69	8123 ^{**}	8447 ^{**}
	MONICA	62	411	616	0,67	0,60	8509 ^{**}	
	CONJUNTO ^{***}	-131	319	523	0,73	0,67	8316 ^{**}	

*Valores médios observados e simulados da produtividade do milho na 1ª safra a partir de 85 experimentos;

**Valores médios observados e simulados da produtividade do milho na 2ª safra a partir de 67 experimentos;

***Valores médios das estimativas dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA.

De acordo com a Figura 4.3, verifica-se que os dois modelos foram capazes de simular as produtividades da cultura do milho em diferentes condições de ambiente (clima e solo), que são os principais fatores que interferem nos níveis de produtividade atingível. As produtividades de milho observadas e simuladas variaram entre 8000 a 13000 kg ha⁻¹, na 1ª safra, e 6000 a 9000 kg ha⁻¹, na 2ª safra. Portanto, fica evidente que ambos os modelos, assim como a combinação deles (conjunto), foram capazes de estimar a variabilidade das produtividade de forma adequada, de modo que possam ser empregados em estudos dos impactos das mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho (ASSENG, 2013).

Considerando-se a produtividade do milho de 1ª safra, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* apresentou uma precisão (r² = 0,79) um pouco melhor do que a do MONICA (r² = 0,76, (Figuras 4.3 a, 4.3b; Tabela 4.9). Para a 2ª safra, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* voltou a ter melhor precisão (r² = 0,77) em comparação com o MONICA (r² = 0,72) (Figura 4.3d, 4.3e; Tabela 4.9). O desempenho das estimativas a partir dos valores médios do conjunto dos dois modelos, foi superior às estimativas individuais (Tabela 4.9), tanto na 1ª safra (r² = 0,89) (Figura 4.3c), quanto na 2ª safra (r² = 0,86) (Figura 4.3f). Assim como a precisão, o desempenho dos modelos, que engloba precisão e exatidão, também foram elevados, com c da ordem de 0,81 a 0,83 para o modelo DSSAT/CERES-*Maize* e entre 0,76 e 0,82 para o MONICA, todos classificados como muito bom, de acordo com a classificação de Camargo e Sentelhas (1997). Quando os valores de c das estimativas pelo conjunto dos modelos foram considerados, esses passaram a ser classificados como ótimo, já que os valores de c ficaram a cima de 0,85.

Figura 4.3 - Relação entre a produtividade do milho observada e simulada pelos modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA e pelo conjunto de ambos para a 1ª safra (a, b, c) e 2ª safra (d, e, f), na fase de validação dos modelos

Em termos de erros, os valores de EM apresentados na Tabela 4.9 indicaram uma tendência do DSSAT/CERES-*Maize* em superestimar as produtividades, enquanto que o modelo MONICA tendeu a subestimá-las. A média dos erros absolutos (EAM) para o modelo DSSAT/CERES-*Maize* foi de 394 e 305 kg ha⁻¹, enquanto que para o modelo MONICA o EAM foi ligeiramente superior, de 445 e 347 kg ha⁻¹, respectivamente, para a 1ª e a 2ª safra. Padrão similar foi observado para a raiz do erro quadrático médio (REQM), a qual indicou valores semelhantes nas estimativas dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para 1ª safra, enquanto que para a 2ª safra, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* apresentou erros menores (REQM = 337 kg ha⁻¹) em comparação ao MONICA (REQM = 403 kg ha⁻¹) (Tabela 4.9).

Na validação dos modelos na 2ª safra, com o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, Justino et al. (2013) encontraram EM próximo, de 406 kg ha⁻¹, valores muito superiores aos obtidos no presente estudo (EM = 79 kg ha⁻¹). Também para a 2ª safra, Soler; Sentelhas e Hoogenboom (2007) encontraram valores da REQM de 348 kg ha⁻¹, para a cultura em regime de sequeiro, bem próximo do que foi encontrado neste estudo, com REQM = 337 kg ha⁻¹).

Tabela 4.9 - Desempenho dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para estimação da produtividade do milho, 1ª e 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras, durante a fase de validação, sendo EM o erro médio; EAM o erro absoluto médio; REQM a raiz do erro quadrático médio; c o índice de desempenho; r² coeficiente de determinação

Safra	Modelo	EM	EAM	REQM	c	r ²	Simulado	Observado
		(kg ha ⁻¹)					(kg ha ⁻¹)	
1ª safra	DSSAT	224	394	518	0,83	0,79	10838*	
	MONICA	-82	445	517	0,81	0,76	10532*	10614*
	CONJUNTO***	71	276	347	0,91	0,89	10685*	
2ª safra	DSSAT	79	305	337	0,82	0,77	7033**	
	MONICA	-163	347	403	0,76	0,72	6912**	6954**
	CONJUNTO***	-42	194	242	0,89	0,86	6912**	

*Valores médios observados e simulados da produtividade do milho na 1ª safra a partir de 85 experimentos;

**Valores médios observados e simulados da produtividade do milho na 2ª safra a partir de 67 experimentos;

***Valores médios das estimativas dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA.

De um modo geral, as estimativas por conjunto apresentaram desempenho estatístico bem superior às estimativas de produtividade de milho obtidas pelos modelos de simulação quando empregados individualmente, tanto na fase de calibração (Tabela 4.8) quanto na fase de validação (Figura 4.3; Tabela 4.9). A abordagem de avaliações por conjunto vem sendo empregada em diversos estudos recentes, uma vez que, estimativas médias tendem a ser mais próximas aos valores observados, se comparados às estimativas de cada modelo individualmente (BASSU et al., 2014; SALO et al., 2015).

4.3.2. Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para a estimativa da produtividade do milho

As análises de sensibilidade, conduzidas para as localidades de Cruz Alta, RS (RSCA), Jataí, GO (GOJA) e Barra do Corda, MA (MABC), com as respostas das simulações das produtividades do milho, pelos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para as alterações na temperatura do ar, na chuva, na [CO₂] e nas doses de nitrogênio, são apresentadas nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 (a, b, c, d) para o milho de 1ª safra e nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 (e, f, g, h) para a 2ª safra. Os resultados das medianas, médias e percentis simulados para cada situação não são iguais entre as distintas análises uma vez que as simulações foram conduzidas sob restrição hídrica para as análises de sensibilidade relativas à alteração da chuva, restrição nutricional e hídrica sob irrigação automática no caso de doses distintas de nitrogênio, enquanto que as respostas às alterações de temperatura e à [CO₂] foram conduzidas sem qualquer restrição hídrica ou nutricional.

As produtividades médias da 1ª safra simuladas pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para as três localidades (RSCA, GOJA, MABC), para o cenário de alterações de temperatura, foram de 11564, 9158 e 7858 kg ha⁻¹, respectivamente, (Figuras 4.4a, 4.5a e 4.6a), com redução de produtividade de 42, 55, e 72%, para o incremento de 5°C, e aumento de 50, 40 e 47%, para o decréscimo de 5°C. Para o modelo MONICA, os valores médios simulados para a 1ª safra de milho, foram de 10626, 8568 e 5478 kg ha⁻¹, com redução na produtividade de 37, 57 e 57%, para o cenário de aumento de 5°C, e um aumento de produtividade de 32 e 98%, para o cenário de decréscimo de 5°C na temperatura média do ar, respectivamente para as localidades de GOJA (Figura 4.5a) e MABC (Figura 4.6a). Na localidade de RSCA, o decréscimo de 5°C na temperatura do ar promoveu uma redução da produtividade da ordem de 12% (Figura 4.4a).

Para a 2ª safra (Figuras 4.4e, 4.5e e 4.6e), as produtividades médias simuladas pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, no cenário sob as temperaturas atuais, nas localidades de RSCA, GOJA, MABC, foram de 7494, 8768 e 6226 kg ha⁻¹, com redução de produtividade de, respectivamente, 12, 45 e 67%, para o incremento de até 5°C na temperatura do ar. Assim como observado na 1ª safra, a redução das temperaturas em RSCA resultou em decréscimo das produtividades (Figura 4.4e). Em GOJA houve aumento da produtividade para decréscimo de temperatura até -4°C, passando a haver um decréscimo nesta para o cenário de -5°C (Figura 4.5e). Em MABC (Figura 4.6e), as reduções das temperaturas promoveram aumento constante da produtividade do milho.

Figura 4.4 - Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para a estimação da produtividade do milho (série histórica de 30 anos, 1980-2009, mediana indicada pela linha e média pelos pontos) em função das alterações nas temperaturas máxima e mínima do ar, na chuva, nos níveis de concentração de CO₂ e nas doses de nitrogênio aplicadas no plantio (33%) e aos 45 dias após o plantio (67%), para a 1ª safra (a, b, c, d) e a 2ª safra (e, f, g, h), em Cruz Alta, RS

Figura 4.5 - Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA para a estimação da produtividade do milho (série histórica de 30 anos, 1980-2009, mediana indicada pela linha e média pelos pontos) em função das alterações nas temperaturas máxima e mínima do ar, na chuva, nos níveis de concentração de CO₂ e nas doses de nitrogênio aplicadas no plantio (33%) e aos 45 dias após o plantio (67%), para a 1ª safra (a, b, c, d) e a 2ª safra (e, f, g, h), em Jataí, GO

Figura 4.6 - Análise de sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-Maize e MONICA para a estimação da produtividade do milho (série histórica de 30 anos, 1980-2009, mediana indicada pela linha e média pelos pontos) em função das alterações nas temperaturas máxima e mínima do ar, na chuva, nos níveis de concentração de CO₂ e nas doses de nitrogênio aplicadas no plantio (33%) e aos 45 dias após o plantio (67%), para a 1ª safra (a, b, c, d) e a 2ª safra (e, f, g, h), em Barra do Corda, MA

Quando o modelo MONICA foi empregado na estimação da produtividade do milho, os valores médios simulados para o cenário sem alteração de temperatura do ar foram de 5328, 6080 e 4625 kg ha⁻¹, com redução de 31, 61 e 60 % na produtividade para os incrementos de 5°C, respectivamente em RSCA, GOJA e MABC (Figuras 4.4e, 4.5e e 4.6e). Para decréscimos de temperatura, o modelo MONICA gerou resultados semelhantes aos apresentados pelo DSSAT/CERES-*Maize*, com redução das produtividades em RSCA (Figura 4.4e), para decréscimo de até -4°C e posterior estabilização em GOJA (Figura 4.5e) e aumento constante em MABC (Figura 4.6e).

Esses resultados evidenciam a sensibilidade dos modelos às variações da temperatura do ar, mostrando que em todas as regiões o aumento das temperaturas resultou em decréscimos da produtividade, em razão dos efeitos dessa variável na duração do ciclo da cultura, no processo fotossintético e no balanço hídrico (déficit hídrico), ao passo que a diminuição das temperaturas resultou em acréscimo da produtividade nas regiões mais quentes, como GOJA e MABC, e redução dessas na região mais fria (RSCA), já que quando a temperatura do ar fica inferior à temperatura base, há paralização do crescimento da planta, resultando em diminuição da produtividade. Isso foi observado tanto na 1ª quanto na 2ª safra, com pequenas variações, dependendo do modelo. Tais resultados corroboram aqueles encontrados por Maytin et al. (1995); Jalota; Ray e Panigrahy (2009); Renato (2013) e Lin; Wu e Ge (2015).

Considerando-se que a água é o principal fator limitante para a cultura do milho, o déficit deste fator pode ocasionar danos em todas as fases da cultura, reduzindo a produtividade de grãos. Sendo assim, a análise de sensibilidade empregada apresentou os padrões esperados, com aumento da produtividade para os acumulados de chuva crescentes, e decréscimo da produtividade à medida que os acumulados de chuva foram sendo reduzidos (Figuras 4.4b, 4.4f, 4.5b, 4.5f, 4.6b e 4.6f). De acordo com as Figuras 4.4b, 4.5b e 4.6b, as produtividades médias da 1ª safra simuladas pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para as localidades de RSCA, GOJA, MABC, no cenário atual de chuva, foram de 7324, 9143 e 5764 kg ha⁻¹, com aumento nas produtividades de respectivamente 25, 1 e 13%, para os incrementos de até 50% na chuva total e redução de produtividade de 47, 9 e 32 %, para decréscimos em 50% do total de chuva. Para o modelo MONICA (Figuras 4.4b, 4.5b e 4.6b), as produtividades médias simuladas foram de 10490, 8568 e 5478 kg ha⁻¹, com aumento relativo na produtividade de 6,0 e 2%, para o aumento de 50% na chuva acumulada e redução de 9,3 e 2% nas produtividades, para o decréscimo de 50% do total de chuva. Esses resultados evidenciam a melhor distribuição das chuvas no estado de GO na 1ª safra, já que tanto o aumento como a redução das chuvas impactou

muito pouco as produtividades, especialmente se for considerado que os solos de GO são mais argilosos.

Para a 2ª safra (Figuras 4.4f, 4.5f e 4.6f), as produtividades médias, sob o cenário de chuva sem alteração, simuladas pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize* para as localidades de RSCA, GOJA, MABC, foram de 6789, 5788 e 3938 kg ha⁻¹, respectivamente, com aumento das produtividades da ordem de 8,44 e 22%, para o cenário de incremento de 50% no acumulado de chuva, e reduções de produtividade de 23, 46 e 35% com a redução das chuvas em 50%. As simulações com o modelo MONICA (Figuras 4.4f, 4.5f e 4.6f), resultaram em produtividades para o cenário atual de 4608, 5982 e 4262 kg ha⁻¹, com aumento relativo das produtividades de 5, 1 e 4%, na condição de aumento das chuvas em 50% e redução das produtividades de 12, 9 e 9%, no cenário com redução de 50% no total de chuva.

Esses resultados mostram claramente que as respostas nos níveis de produtividade do milho para a alteração no acumulado total das chuvas foram mais expressivas quando se empregou o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, o qual gerou maiores quebras na produtividade sob restrição hídrica em comparação com o modelo MONICA. Essa menor sensibilidade do MONICA pode estar associada ao fato do modelo ter sido desenvolvido em condições úmidas, nas quais o déficit hídrico não chega a ser tão elevado quanto as condições simuladas na análise de sensibilidade, resultando em subestimativas das quebras. Cabe ressaltar, que este trabalho está entre os primeiros em que se calibrou e empregou o modelo MONICA para a estimação da produtividade do milho em condições tropicais.

A sensibilidade dos modelos aos incrementos na [CO₂], nos três locais avaliados, é apresentada nas Figuras 4.4c, 4.4g, 4.5c, 4.5g, 4.6c e 4.6g, para as duas safras do milho. Para o cenário de 350 ppm, o modelo MONICA estimou produtividades médias de 10625, 8568, 5478 kg ha⁻¹, para milho de 1ª safra (Figuras 4.4c, 4.5c e 4.6c), e de 5328, 6046 e 4619 kg ha⁻¹, para o milho de 2ª safra (Figuras 4.4g, 4.5g e 4.6g), respectivamente, para as localidades de RSCA, GOJA e MABC. Já o modelo DSSAT/CERES-*Maize* simulou para a concentração de CO₂ de 350 ppm produtividades médias de 11990, 9132 e 7836 kg ha⁻¹, para o milho da 1ª safra (Figuras 4.4c, 4.5c e 4.6c), e de 7475, 8745 e 6209 kg ha⁻¹, para o milho de 2ª safra (Figuras 4.4g, 4.5g e 4.6g), respectivamente, para as mesmas localidades. Observa-se que ambos os modelos apresentaram uma sensibilidade muito baixa ao aumento da concentração do CO₂ atmosférico, com incrementos de produtividade para a concentração de 850 ppm inferiores a 6%, tanto na 1ª, como na 2ª safra. Resultados similares foram encontrados em simulações realizadas por Jalota; Ray e Panigrahy (2009), Renato (2013) e Bassu et al. (2014), os quais observaram que

a duplicação da $[CO_2]$ aumentou a produtividade de grãos de milho da ordem de 6,5, 5,0 e 7,5%, respectivamente.

Já as análises de sensibilidade dos modelos para diferentes doses de nitrogênio, para a 1ª e a 2ª safra são apresentadas nas Figuras 4.4d, 4.4h, 4.5d, 4.5h, e 4.6d e 4.6h, para as localidades de RSCA, GOJA e MABC, respectivamente. Os dois modelos apresentaram resposta aos incrementos nas doses de N aplicadas, tanto na 1ª quanto 2ª safra, com os maiores incrementos de produtividade sendo obtidos nas doses de 150 a 180 kg ha⁻¹. No entanto, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* apresentou incrementos na produtividade para todas as doses aplicadas, tanto para milho da 1ª, quanto da 2ª safra (Figuras 4.4d, 4.4h, 4.5d, 4.5h, 4.6d e 4.6h). Com relação ao modelo MONICA, para RSCA, GOJA, MABC, os maiores incrementos na produtividade média, ocorrem para doses de até 120 kg ha⁻¹, nos três locais, para o cultivo de 1ª safra (Figuras 4.4d, 4.5d e 4.6d), e de 120, 120, 150 kg ha⁻¹, para a 2ª safra (Figuras 4.4h, 4.5h e 4.6h). Esses resultados concordam com aqueles apresentados por Nendel et al. (2014) aplicados na Alemanha, que encontraram incrementos na produtividade do milho, para doses de N de até 150 kg ha⁻¹.

De um modo geral, a sensibilidade dos modelos de estimação da produtividade do milho, DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, às alterações na temperatura média do ar, chuva acumulada, $[CO_2]$ e doses de N, foi variável, como mostram as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. A sensibilidade dos modelos na estimação da produtividade foi mais acentuada para as variações na temperatura do ar. Para as variações na chuva total, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* foi mais sensível às reduções da chuva do que o modelo MONICA, gerando maior variabilidade interanual, especialmente na condição da 2ª safra.

Para os aumentos nas $[CO_2]$ de 350 para 850 ppm, ambos os modelos apresentaram incrementos médios de produtividade do milho inferiores a 6%, mostrando que para plantas C4, como o milho, o incremento de CO_2 atmosférico gera poucas alterações na produtividade, concordando com Nendel et al. (2011), que também encontraram ausência de resposta da fotossíntese do milho ao aumento da $[CO_2]$.

Finalmente, a sensibilidade dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA às diferentes doses de adubação nitrogenada mostram que ambos apresentam resposta à essa fonte de alteração. Apesar disso, fica evidente nas Figuras 4.4d, 4.4h, 4.5d, 4.5h, 4.6d e 4.6h, que o modelo DSSAT/CERES-*Maize* é muito mais responsivo às baixas doses de adubação nitrogenada do que o modelo MONICA. Apesar dos resultados apresentados nas fases de calibração (Tabela 4.8) e validação (Tabela 4.9 e Figura 4.3) indicarem que ambos os modelos, assim como o conjunto deles, serem adequados para a estimação da produtividade do milho em

condições brasileiras, os resultados da análise de sensibilidade (Figuras 4.4, 4.5 e 4.6) mostraram que o modelo DSSAT/CERES-*Maize* foi mais responsivo às variações hídricas e de adubação nitrogenada, o que o qualifica como mais adequado para estudos sobre a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho, já que há uma clara interação entre a disponibilidade de água no solo e a absorção de nutrientes, no caso o nitrogênio. Assim, o uso de um modelo pouco responsivo às variações da chuva iria interferir nos resultados da produtividade em cenários de aumento da temperatura e redução das chuvas, pois a minimização do déficit hídrico iria resultar em menor deficiência nutricional, resultando num cenário menos crítico.

Em função disso, este estudo evidencia que o emprego do modelo DSSAT/CERES-*Maize* se mostra mais adequado aos estudos das consequências das mudanças climáticas na produção agrícola, em especial na do milho, já que apresenta maior sensibilidade aos fatores de produção, o que possibilita avaliar estratégias de manejo agrícola que possam mitigar os possíveis efeitos das alterações do clima futuro na produção agrícola.

4.4. Conclusões

O ajuste dos parâmetros dos modelos de simulação, empregando dados de experimentos de campo, permite que os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA estimem satisfatoriamente a produtividade do milho, 1ª e 2ª safras.

A qualidade das estimações é melhor quando se utilizam os valores médios simulados pelos dois modelos, em comparação com as estimações individuais.

Ao simular a produtividade de milho, 1ª e 2ª safras, ambos os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, são sensíveis às variações de temperatura do ar, chuva e doses de nitrogênio e pouco responsivos às variações na [CO₂] atmosférico.

O modelo DSSAT/CERES-*Maize* é o mais responsivo às variações no volume de chuva e às doses de nitrogênio, que o modelo MONICA e, por isso, se mostra mais adequado aos estudos dos impactos das mudanças climáticas na agricultura.

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische**

Zeitschrift, Berlin, v. 22, p. 711–728, 2013.

AMARAL, T. A.; LIMA, A. C. R. DE; ANDRADE, C. D. L. T. DE; SILVA, S. D. D. A. E. PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-MAIZE PARA CULTIVARES DE MILHO RECOMENDADAS PARA A MICRORREGIÃO DE PELOTAS, RS. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, p. 371–391, 2015.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da; MARENGO, J. A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L. A.; FERNANDEZ, J. P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretária de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007, p. 73.

ANDRÉA, M. C. da S. **Model-based approach for maize yield gap analysis related to climate variability and nitrogen management**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ÄNGSTRÖM, A. Solar and Terrestrial Radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Washington, v. 50, p. 121–126, 1924.

ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 170, p. 32–46, 2013.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1057–1064, 2004.

ASSENS, S. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, London v. 3, p. 627–632, 2013.

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**, Oxford, v. 20, p. 2301–2320, 2014.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 390–396, 2013.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential Uses and Limitations of Crop Models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704–716, 1996.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, p. 89–97, 1997.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 3, p. 512–527, 2014.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. de. Seja o doutor do seu milho - nutrição e adubação. Arquivo do Agrônomo, **POTAFOS**, Piracicaba, v. 2, p. 1–9, 1995.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 12, Safra 2015/16 – Décimo segundo levantamento**, Brasília, p. 1-182, 2016.

COSTA, M. M. **Recomendação de adubação em agricultura de precisão com base no modelo CERES-Maize**. 2015. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmosphere Carbon Dioxide – Global**. National Oceanic & Atmospheric Administration/ Earth System Research Laboratory, 2017. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em fev. 2017.

FAOSTAT. **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS**. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Acesso em: 13 jan. 2017.

FISCHER, R. A. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 182, p. 9–18, 2015.

GLOVER, J.; MCCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of bright sunshine in the high-altitude tropics. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 84, n. 359, p. 56–60, 1958.

GRASSINI, P.; VAN BUSSEL, L. G. J.; VAN WART, J.; WOLF, J.; CLAESSENS, L.; YANG, H.; BOOGAARD, H.; DE GROOT, H.; VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 177, p. 49–63, 2015.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; WILKENS, P. W.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; TSUJI, G. Y. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.5**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2010.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. I.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KOO, J. SHELIA, V.; TSUJI, G. Y. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.6**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2015.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007**. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2007, 104 p.

_____. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014, 151 p.

JALOTA, S. K.; RAY, S. S.; PANIGRAHY, S. EFFECTS OF ELEVATED CO₂ AND TEMPERATURE ON PRODUCTIVITY OF THREE MAIN CROPPING SYSTEMS IN PUNJAB STATE OF INDIA—A SIMULATION ANALYSIS. In: Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, ii, 2009, Ahmedabad. **Anais...**, Ahmedabad 2009.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **Ceres-maize: a simulation model of maize growth and development**. College Station: Texas A&M Univ. Press, 194p, 1986.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235–265, 2003.

JUSTINO, F.; OLIVEIRA, E. C.; RODRIGUES, R. D. Á.; HENRIQUE, P.; GONÇALVES, L.; JORGE, P.; PONTE, O.; STORDAL, F.; MARENGO, J.; SILVA, T. G.; DELGADO, R. C.; LINDEMANN, S.; COSTA, L. C. Mean and Interannual Variability of Maize and Soybean in Brazil under Global Warming Conditions. **American Journal of Climate Change**, Irvine, CA, v. 2, p. 237–253, 2013.

KNUTTI, R.; SEDLÁČEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 369–379, 2013.

LIN, Y.; WU, W.; GE, Q. CERES-Maize model-based simulation of climate change impacts on maize yields and potential adaptive measures in Heilongjiang Province, China. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 95, p. 2838–2849, 2015.

LIU, X.; ANDRESEN, J.; YANG, H.; NIYOGI, D. Calibration and validation of the hybrid-maize crop model for regional analysis and application over the U.S. corn belt. **Earth Interactions**, Boston, v. 19, p. 1–16, 2015.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, Berlin, v. 34, p. 179–204, 2009.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. J. DA;

SILVA DIAS, M. A. F. DA (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009 Parte III – Variabilidade Climática, p. 407–424.

MAYTIN, C. E.; ACEVEDO, M. E.; JAIMEZ, R.; ANDRESSEN, R.; HARWELL, M. A.; ROBOCK, A.; AZOCAR, A. Potential Effects of Global Climatic Change on the Phenology and Yield of Maize in Venezuela *. **Climatic Change**, Netherlands, v. 29, p. 189–211, 1995.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, p. 747–56, 2010.

NENDEL, C.; BERG, M.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; SPECKA, X.; WEGEHENKEL, M.; WENKEL, K. O.; WIELAND, R. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 222, p. 1614–1625, 2011.

NENDEL, C. MONICA: a simulation model for nitrogen and carbon dynamics in agro-ecosystems. In: MUELLER, L.; SAPAROV, A.; LISCHIED, G. **Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia**. Springer International Publishing, Switzerland, 2014. p. 389-405.

NENDEL, C.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; WENKEL, K. O. Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 52, p. 47–56, 2014.

NOVAIS, M. V.; NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M. Efeito da adubação nitrogenada e de seu parcelamento sobre a cultura do milho, em Patos de Minas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 21, p. 193–202, 1974.

PBMC. PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, 24p., 2013.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, Australia, v. 64, p. 114–118, 1940.

PROJETO RADAM BRASIL. **Levantamento de recursos naturais**, vols. 8 a 22 (Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1975-83).

RAUFF, K. O.; BELLO, R. A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. **Agricultural Sciences**, Boston, v. 6, p. 1098–1105, 2015.

REBOITA, M. S.; da ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, Boulder, v. 2014, p. 1–17, 2014.

RENATO, N. dos S. **Modelo de crescimento das culturas do milho e do feijão em condições de temperatura e CO₂ atmosférico elevados**. 2013. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUGI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrech: Kluwer Academic; International Consortium for Agricultural Systems Applications, p. 41–53, 1998.

SALO, T. J.; PALOSUO, T.; KERSEBAUM, K. C.; NENDEL, C.; ANGULO, C.; EWERT, F.; BINDI, M.; CALANCA, P.; KLEIN, T.; MORIONDO, M.; FERRISE, R.; OLESEN, J. E.; PATIL, R. H.; RUGET, F.; TAKÁČ, J.; HLAVINKA, P.; TRNKA, M.; RÖTTER, R. P. Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 154, p. 1–23, 2015.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A. R. C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; DA ROCHA, R. P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 45, p. 2193-2212, 2015.

SENTELHAS, P. C.; BATTISITI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSER, F. de A. Yield Gap, Conceitos, definições e exemplos. **Informações agronômicas**, Piracicaba, n. 155, p. 9–12, 2016.

SILVA, D. de F.; ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; CASTRO, L. A. de; ALVES, M. E. B.; RODRIGUES, C. C. F.; FONSECA, D. A. B.; TEIXEIRA, T. C.; PAIXÃO, J. S. Calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-Maize para simulação do manejo da fertilização mineral e com dejetos de suínos em milho. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO - Águas de Lindóia - 26 a 30 de Agosto de 2012, **Anais...**2012.

SOIL CONSERVATION SERVICE. Hidrology section 4: In: _____. **National engineering handbook**. Washington: USDA, NRCS, 1972. Chap. 4/10.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. The impact of El Niño Southern oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 30, p. 1056–1066, 2010.

SULEIMAN, A. A.; RITCHIE, J. T. Modeling soil water redistribution during second-stage evaporation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 67, p. 377–386, 2003.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 327–338, 2000.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 112, p. 253–272, 2013.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, Dordrecht v. 109, p. 5–31, 2011.

WEGEHENKEL, M. Test of a modelling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 129, p. 39–64, 2000.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, **Chichester**, v. 36, p. 2644-2659, 2015.

5. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE DO MILHO SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MANEJO AGRÍCOLA EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS

Resumo

O Brasil configura-se como terceiro maior produtor de milho, com produção obtida em duas safras ao longo do ano, a 1ª safra ou de verão, e a 2ª safra ou safrinha, ambas predominantemente de sequeiro. Sendo a produtividade da cultura do milho influenciada por diversos fatores que interagem entre si, tais como solo, clima e manejo, espera-se que o potencial de produção em função do aumento da temperatura e possível redução da disponibilidade de água no solo deverão afetar negativamente os atuais níveis de produtividade do milho. Deste modo, modelos de simulação de culturas tem se mostrado como ferramentas adequadas para a simulação de diversos cenários de manejo dos fatores de produção, permitindo o entendimento da dinâmica dos processos envolvidos no sistema, assim como a identificação de possíveis ações para minimizar as perdas de produtividade. Assim, o presente estudo teve por objetivos: i) aplicar o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, devidamente calibrado e avaliado, para a determinação da produtividade do milho de 1ª e 2ª safras, sob condições climáticas atuais (1980-2009); ii) aplicar o modelo DSSAT/CERES-*Maize* devidamente calibrado e avaliado para a determinação da produtividade do milho de 1ª e 2ª safras, para os cenários de mudanças climáticas do CMIP5, sob cenário de emissão intermediário (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) de gases de efeito estufa, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos; iii) avaliar diferentes estratégias de manejo da cultura do milho, como épocas de semeadura, uso de cultivar com diferentes ciclos, uso da irrigação e doses de nitrogênio, para minimização dos impactos das mudanças climáticas nos diferentes cenários e prazos; iv) avaliar o potencial de minimização dos impactos das mudanças climáticas nos diferentes cenários de manejo e prazos, considerando-se a combinação das melhores estratégias de manejo. Simulações sob clima futuro, mostraram perdas em relação aos atuais níveis de produtividade do milho em 1ª e 2ª safras, devido à redução na duração do ciclo e aumento do consumo hídrico relativo, com perda média variando de 41 a 63%, para milho de 1ª safra, e de 58 a 65%, para milho de 2ª safra. As estratégias de manejo como data de semeadura, ciclo da cultivar, manejo de irrigação e adubação nitrogenada, evidenciaram a possibilidade de uso na mitigação de perdas de produtividade em clima futuro. A combinação das diferentes estratégias de manejo, ainda que sob regime de sequeiro, mostraram redução ou ganho de produtividade, de modo que, quando adicionado o manejo de irrigação, os atuais níveis de produtividade passaram a apresentar ganho de produtividade sob clima futuro.

Palavras-chave: DSSAT/CERES-*Maize*; Mudança climática; Estratégias de manejo

Abstract

Brazil appears as the third largest maize producer in the world, with production obtained in two seasons, the in-season called as summer season, and the off-season know as 'safrinha', both seasons are predominantly dry. As the productivity of maize, is influenced by the interaction of several factors, such as soil, climate and management, it is expected that the potential production due to the increase in temperature and possible reduction of water availability in the soil should affect the current levels of productivity. Thus, crop simulation models have been shown as use tools for the simulation of several production factor management scenarios, allowing the understanding of the dynamics of the processes involved in the system, as well as the identification of possible actions to minimize losses on productivity levels. The objective of the present study was to: i) apply the calibrated and validated DSSAT/CERES-*Maize* model to determine the yield of the maize growing in-season and off-

season under current climatic conditions (1980-2009); ii) to apply the calibrated and validated DSSAT/CERES-Maize model to determine the yield of the in-season and off-season under climate change scenarios of CMIP5, in an intermediate emission scenario (RCP4.5) and high emission scenario (RCP8.5) for a short (2010-2039), medium (2040-2069) and long (2070-2099) term periods; iii) to evaluate different maize management strategies, such as sowing dates, alteration of cultivar cycle, irrigation and nitrogen fertilizer, to minimize the impacts of climate change on the different climate change scenarios; iv) to evaluate the potential of minimizing the impacts of climate change in the different climate change scenarios, considering the combination of the best management strategies. Simulations under future climate changes showed losses in relation to the current yield levels of the in-season and off-season growing maize, due to the reduction in cycle length and increase of the relative water consumption, with average loss varying from 41 a 63% for the in-season, and from 58 to 65% for the off-season. Management strategies regarding sowing date, cultivar cycle, irrigation management and nitrogen fertilization, evidenced the possibility in mitigation of productivity losses under future climate change. The combination of different management strategies, even under rainfed conditions, showed a reduction in losses or gain in productivity levels, so that when irrigation management was added, productivity under future climate show productivity gains in relation to current levels of productivity.

Keywords: DSSAT/CERES-Maize; Climate Changes; Mitigation Strategies

5.1. Introdução

A mudança climática tem sido vista como um grande desafio para os mais diversos setores. No setor agrícola, o aumento da demanda por alimentos com o crescente aumento da população, tem se mostrado um desafio, diante da redução no potencial de produção agrícola em função do aumento das temperaturas e, possíveis, reduções de disponibilidade de água no solo.

O que se espera, de um modo geral, é que os efeitos das mudanças do clima possivelmente irão afetar de formas distintas as diferentes regiões do planeta. Se considerada a grande dimensão continental do Brasil, com considerável diversidade climática, tipos de solo e topografia, os impactos das mudanças climáticas podem variar regionalmente (MARENGO, 2001; AMBRIZZI et al., 2007; NOBRE et al., 2011). Diante das evidências de aumento das temperaturas sob o clima futuro (IPCC, 2007, 2014), chegando a incrementos de 2,6 a 4,8°C em um cenário pessimista (KNUTTI e SEDLÁČEK, 2013; IPCC, 2014), a adoção de estratégias de adaptação é um fator de relevância na minimização dos impactos das mudanças climáticas na produção agrícola.

No cenário mundial, o Brasil configura como o terceiro maior produtor de milho (FAOSTAT, 2017), com produção de 67 milhões de toneladas de grãos na safra 2015/2016 (CONAB, 2016). Essa produção tem sido obtida em duas safras distintas ao longo do ano, sendo uma denominada de 1ª safra ou de verão, com a semeadura ocorrendo na primavera, de

setembro a novembro, e a colheita no verão, entre janeiro e março, e outra denominada de 2ª safra ou safrinha, sendo semeada no verão, entre fevereiro e março, e colhida no outono, entre maio e julho. Ambos os cultivos são predominantemente de sequeiro, sendo que a 1ª safra predomina nos estados da região Sul, Sudeste e do MATOPIBA enquanto que a safrinha predomina nos estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e região Centro-Oeste, atualmente a principal região produtora de milho safrinha (CONAB, 2016).

A cultura do milho, em termos de produtividade de grãos, apresenta resposta a diversos fatores que interagem entre si, tais como o solo, o clima e decisões relacionadas ao manejo da cultura (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014; ANDRÉA, 2016). Alguns desses fatores são totalmente dinâmicos, como no caso das condições climáticas, enquanto que as condições de solo são mais estáticas, variando apenas entre regiões, e as condições de manejo são variáveis com o nível tecnológico do produtor. Se avaliada em condições de campo, a produtividade agrícola é determinada pela interação de fatores determinantes (genótipo e população de plantas com as condições ambientais – radiação solar, temperatura e fotoperíodo), limitantes (déficit hídrico e nutricional) e redutores (pragas, doenças e plantas daninhas associadas a condições de manejo). Com base na interação destes fatores pode-se definir três níveis de produtividade: produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA) e produtividade real (PR) (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; BATTISTI et al., 2013; SENTELHAS et al., 2016).

A PP é definida como a produtividade alcançada por uma cultura, em um ambiente para o qual é adaptada, sem que está esteja sujeita a restrição hídrica, nutricional e fitossanitária, de modo que seu nível de produtividade é resultado da interação entre condições climáticas, genótipo e população de plantas. A PA representa a produtividade de uma cultura em plantio de sequeiro, em que se penaliza a PP pelo déficit hídrico e também déficit nutricional, isso porque, a água é o veículo para a absorção dos nutrientes disponíveis no solo. A PR, normalmente menor que a PA, uma vez que considera, além dos efeitos das condições meteorológicas, o efeito do manejo agrícola, que incluem o preparo, correção e manejo do solo e também controle fitossanitário (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; BATTISTI et al., 2013; FISCHER, 2015; SENTELHAS et al., 2016).

Nesse sentido, os modelos de simulação de culturas, os quais consideram os fatores relativos à variabilidade espaço-temporal do clima, a variação espacial dos solos e os diferentes níveis tecnológicos dos produtores, se apresentam como ferramentas de grande utilidade, possibilitando a simulação de diversos cenários de manejo dos fatores de produção, permitindo o entendimento da dinâmica dos processos envolvidos no sistema, assim como o entendimento

do efeito de um único fator isolado na produtividade das culturas agrícolas (WHITE et al., 2011).

Diversos estudos apontam que o aumento da concentração de CO₂ atmosférico seria benéfico às plantas, devido ao seu efeito fertilizador, em que maiores concentrações de CO₂ resultariam no aumento da taxa fotossintética e, conseqüentemente, em maior produção de biomassa. No entanto, sob temperaturas mais elevadas, o efeito fertilizador devido à maior [CO₂] poderá ser anulado, em razão do encurtamento do ciclo de desenvolvimento das culturas e do aumento da respiração de manutenção (STRECK e ALBERTO, 2006; MORAES et al., 2011; MARTINEZ et al., 2015). Além disso, o aumento da demanda hídrica da atmosfera, com o aumento da temperatura, em cenários de manutenção ou redução das chuvas deverá resultar em maiores déficits hídricos, afetando de forma negativa as produtividades agrícolas.

Em estudo numérico aplicado à cultura do milho e milheto na Índia, Tripathy; Ray; Singh (2009) observaram que, com a elevação das temperaturas de 1 a 5°C e aumento da concentração de CO₂ atmosférico, o milho apresentou redução de 8 a 25 dias no ciclo e redução na produtividade variando de 9 a 37%, respectivamente. Adicionalmente, Jalota; Ray; Panigrahy, (2009), elevando a temperatura média atual em 20%, mostraram quebras na produtividade da cultura do milho de 49%. No Brasil, Costa et al. (2009) mostraram que, sob condições de temperaturas mais elevadas, a produtividade potencial do milho no estado de Minas Gerais apresentou redução para o período 2050-2080 de até 30% em relação ao ano 2000. Ainda, adicionando o efeito fertilizador do CO₂, os autores mostraram que os efeitos negativos de temperaturas mais elevadas foram mais pronunciados do que o efeito benéfico da crescente [CO₂] na produtividade do milho, o que também foi observado para a cultura do trigo por Benlloch-Gonzalez et al. (2014) na Austrália.

Entre as possíveis ações para se minimizar as perdas de produtividade das culturas agrícolas sob condições de mudanças climáticas, as estratégias de manejo agrícola, como a adoção de cultivares tolerantes a seca e de ciclo mais longo, uso da irrigação, épocas de semeadura e preparo do solo e adubação, são as mais indicadas. No entanto, a combinação dessas ações em condições de clima futuro ainda é pouco estudada (BATTISTI, 2016). Nesse contexto, os modelos de simulação do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade de culturas podem ser utilizados para simular os impactos das projeções de clima futuro na agricultura e os efeitos das possíveis estratégias de manejo agrícola para mitigar os impactos negativos na produtividade. Sendo assim, estudos dessa natureza são de suma importância para as projeções futuras de produção de alimentos, pois permitem fornecer informações detalhadas aos agricultores, formadores de políticas públicas e tomadores de decisão, na adoção de

medidas mitigadoras para a adaptação da agricultura às mudanças climáticas futuras (RAUFF e BELLO, 2015).

Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivo geral analisar os impactos das mudanças climáticas globais na produção do milho de 1ª e 2ª safras, em diferentes regiões produtoras do Brasil, considerando-se a adoção de estratégias de manejo agrícola como forma de adaptação para minimizar os possíveis impactos negativos na produtividade. Para tanto, o estudo teve como objetivos parciais: (i) aplicar o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, devidamente calibrado e validado, para a determinação da produtividade do milho de 1ª e 2ª safra, sob condições climáticas atuais (1980-2009); (ii) aplicar o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, devidamente calibrado e validado, para a determinação da produtividade do milho de 1ª e 2ª safra, para os cenários de mudanças climáticas do CMIP5, sob cenário de emissão intermediário (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) de gases de efeito estufa, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos; (iii) avaliar diferentes estratégias de manejo da cultura do milho, como épocas de semeadura, ciclo da cultivar, irrigação e doses de nitrogênio, para minimização dos impactos das mudanças climáticas nos diferentes cenários e prazos; (iv) avaliar o potencial de minimização dos impactos das mudanças climáticas nos diferentes cenários e prazos, considerando-se a combinação das melhores estratégias de manejo.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Modelo de simulação

Em ajuste para estimação de valores de produtividade do milho da 1ª e 2ª safra, no capítulo anterior foi demonstrado que, tanto o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, como o modelo MONICA mostraram-se aptos para a simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho, habilitando-os para o uso em estudos sobre os impactos da variabilidade e mudanças climáticas na produção agrícola. A análise das estimativas a partir do conjunto de valores estimados (*ensemble*) mostrou que o desempenho na estimação da produtividade foi ainda melhor, quando as estimativas foram comparadas aos valores observados. No entanto, neste estudo optou-se por empregar apenas o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, uma vez que este foi o que apresentou maior sensibilidade às variações das condições meteorológicas, especialmente chuva, e doses de nitrogênio, na estimação da produtividade do milho da 1ª e da 2ª safra, uma vez que o objetivo deste capítulo é, justamente, compreender como a produtividade do milho deverá responder aos cenários futuros do clima sob diferentes estratégias de manejo agrícola.

Sendo assim, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* v4.6 (HOOGENBOOM et al. 2015), devidamente calibrado e validado, foi empregado para estimar as produtividades do milho de 1ª e 2ª safra, em diferentes regiões produtoras do Brasil. Os coeficientes genéticos calibrados para o milho da 1ª e 2ª safra referentes a P1 - soma térmica desde a emergência até a etapa o final do período juvenil (temperatura base 8°C), P2 - coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo, P5 - graus-dias acumulados desde o florescimento até o ponto de maturidade fisiológica (temperatura base 8°C), G2 - número potencial de grãos por planta; G3 - taxa potencial de crescimento do grão e PHINT – graus-dia necessários para a emissão de uma folha, estão na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Coeficientes genéticos do modelo DSSAT/CERES-*Maize* calibrado para uma cultivar média da cultura do milho da 1ª e da 2ª safra, para condições brasileiras

Safr	Coeficientes Genéticos					
	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
1ª safra	290,6	0,5	907,1	749,9	9,40	46,79
2ª safra	285,2	0,5	914,7	857,0	6,07	44,20

Para as simulações no modelo DSSAT/CERES-*Maize*, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998). A infiltração de água no solo foi determinada de acordo com o método do número da curva de escoamento superficial, seguindo definição do serviço de conservação do solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972). O cálculo do balanço hídrico foi determinado pelo modelo de Ritchie (1998), enquanto a evaporação da água do solo seguiu o método de Suleiman-Ritchie (2003). A fotossíntese foi determinada em função da variação temporal da curva do dossel (*canopy curve*).

5.2.2. Locais de estudo

As simulações para avaliação dos cenários de mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho foram realizadas para 31 locais distribuídos ao longo do território brasileiro, identificados na Figura 5.1.

A seleção dessas localidades foi com base em sua importância no contexto de produção nacional da cultura do milho, 1ª ou 2ª safra, se considerado o cenário atual (IBGE, 2015), ou por serem áreas potenciais para a expansão dessa cultura.

Figura 5.1 - Distribuição geográfica dos locais para os quais foram realizadas as simulações com o modelo DSSAT/CERES-Maize para a estimação da produtividade da cultura de milho no cenário atual e de clima futuro

5.2.3. Dados de solo

Devido à falta de informações específicas dos solos nos diferentes locais de estudo, utilizou-se o protocolo empregado no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2008), em que os solos são

definidos de acordo com o tipo, a textura e a capacidade de água disponível (CAD). Sendo assim, foram considerados os seguintes tipos de solos em função de sua textura: textura arenosa (< 15% de teor de argila); textura média (15-35% de teor de argila); e textura argilosa (> 35% de teor de argila), representando baixa, média e alta CAD, respectivamente. A Tabela 5.2, contém a classificação, o teor médio de areia, silte e argila e a CAD para cada tipo de solo utilizado. A CAD foi determinada em função dos parâmetros físicos e químicos, obtidos do projeto (PROJETO RADAM BRASIL, 1975-1983), utilizando-se funções de pedotransferência (TOMASELLA; HODNETT; ROSSATO, 2000). O fator de enraizamento determina o crescimento das raízes nas diferentes camadas do solo, e exerce influência no potencial de absorção de água da planta. No DSSAT esse fator é calculado de acordo com as características físico-hídricas de cada perfil. Neste estudo o crescimento das raízes foi limitado a uma profundidade de 80 cm.

Tabela 5.2 - Classificação do solo, teor médio de areia, silte e argila, capacidade de água disponível (CAD) e fator de enraizamento (FE) para os solos usados no presente estudo. NQ – Neossolo Quartzarênico; LVd – Latossolo Vermelho Distrófico; e Latossolo Vermelho. Perfil 1 = 0-20 cm; Perfil 2 = 20-40 cm; Perfil 3 = 40-80 cm

Classificação	Tipo	Areia	Silte	Argila	CAD	FE		
		(%)			(mm m ⁻¹)	1	2	3
NQ	1	89	4	7	45	1,00	0,52	0,32
LVd	2	71	12	17	73	1,00	1,00	0,45
LV	3	3	34	53	140	1,00	1,00	0,47

Já a Tabela 5.3, apresenta a lista das localidades empregadas neste estudo, com suas respectivas siglas de identificação, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura do solo considerado para as simulações no modelo DSSAT/CERES-*Maize*.

Tabela 5.3 - Locais avaliados quanto ao impacto na produtividade do milho sob os cenários atual e de clima futuro, com as suas siglas, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura de solo

Local, Estado	Sigla	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Tipo de solo	Textura
1 - Pelotas, RS	RSPE	-31,78	-52,41	13	Planossolo	Argilosa
2 - Cruz Alta, RS	RSCA	-28,63	-53,60	473	Latossolo	Média
3 - Campos Novos, SC	SCCN	-27,38	-51,20	947	Cambissolo	Argilosa
4 - Chapecó, SC	SCCH	-27,11	-52,61	679	Nitossolo	Argilosa
5 - Castro, PR	PRCA	-24,78	-50,00	1009	Cambissolo	Argilosa
6 - Londrina, PR	PRLO	-23,31	-51,13	566	Latossolo	Argilosa
7 - Avaré, SP	SPAV	-23,08	-48,91	854	Latossolo	Média
8 - Franca, SP	SPFR	-20,58	-47,36	1026	Latossolo	Média
9 - Votuporanga, SP	SPVO	-20,41	-49,98	503	Argissolo	Média
10 - Bambuí, MG	MGBA	-20,03	-45,00	661	Latossolo	Argilosa
11 - Uberaba, MG	MGUB	-19,73	-47,95	737	Latossolo	Arenosa
12 - Patos de Minas, MG	MGPM	-18,51	-46,43	940	Cambissolo	Arenosa
13 - Unaí, MG	MGUN	-16,36	-46,88	460	Neossolo	Argilosa
14 - Ivinhema, MS	MSIV	-22,30	-53,81	369	Latossolo	Média
15 - Paranaíba, MS	MSPA	-19,75	-51,18	331	Latossolo	Média
16 - Diamantino, MT	MTDI	-14,40	-56,45	286	Latossolo	Argilosa
17 - Catalão, GO	GOCA	-18,18	-47,95	840	Latossolo	Argilosa
18 - Jataí, GO	GOJA	-17,91	-51,71	663	Latossolo	Argilosa
19 - Brasília, DF	DFBR	-15,78	-47,92	1160	Latossolo	Média
20 - Bom Jesus da Lapa, BA	BABJ	-13,26	-43,41	440	Latossolo	Argilosa
21 - Barreiras, BA	BABA	-12,15	-45,00	439	Argissolo	Argilosa
22 - Barra, BA	BARR	-11,08	-43,16	402	Latossolo	Arenosa
23 - Bom Jesus do Piauí, PI	PIBJ	-9,10	-44,11	332	Argissolo	Arenosa
24 - Alto Parnaíba, MA	MAAP	-9,10	-45,93	285	Latossolo	Média
25 - Carolina, MA	MACA	-7,33	-47,46	193	Plintossolo	Média
26 - Barra do Corda, MA	MABC	-5,50	-45,23	153	Latossolo	Arenosa
27 - Taguatinga, TO	TOTA	-12,40	-46,41	604	Cambissolo	Argilosa
28 - Porto Nacional, TO	TOPN	-10,71	-48,41	239	Plintossolo	Argilosa
29 - Pedro Afonso, TO	TOPA	-8,96	-48,18	187	Plintossolo	Arenosa
30 - São Félix do Xingu, PA	PASF	-6,63	-51,96	206	Argissolo	Argilosa
31 - Marabá, PA	PAMA	-5,36	-49,13	95	Argissolo	Argilosa

*Lat. - latitude; Lon.- longitude; Alt. - altitude

5.2.4. Dados meteorológicos e cenários climáticos

Para as simulações no período atual de 1980 a 2009, os dados meteorológicos diários de temperatura máxima e mínima do ar, chuva, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, foram obtidos junto as estações meteorológicas convencionais do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), pertencente a rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A radiação solar global foi estimada com base no modelo de Angström (1924) e Prescott (1940), empregando-se os coeficientes *a* e *b* sugeridos por Glover e McCulloch (1958), tomando-se essa estimativa como valores observados. Falhas nas

séries históricas foram preenchidas a partir da base de dados em grade de Xavier; King e Scanlon (2015).

Já, as séries meteorológicas sob projeções futuras foram geradas com base na série atual de 1980-2009, sem falhas, por meio do método delta (ROSENZWEIG et al., 2013), ou seja, pelo incremento da mudança entre os cenários presente e futuro. A alteração é determinada a partir das projeções dos modelos climáticos globais (MCGs) realizados na quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5*) (TAYLOR; STOUFFER e MEEHL, 2012), sendo avaliados no quinto relatório de avaliação (*Fifth Assessment Report - AR5, IPCC-AR5*) do IPCC (2014). A mudança prevista foi, então, adicionada às variáveis térmicas, temperatura máxima e temperatura mínima, e multiplicada à chuva gerando as séries futuras. Foram consideradas projeções sob cenários de emissão de gases de efeito estufa intermediário (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, empregando-se sete MCGs distintos, conforme ilustrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Representação dos cenários climáticos atual e futuros considerados nas simulações da cultura do milho pelo modelo DSSAT/CERES-Maize, para avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade. RCP4.5 e RCP8.5 referem-se aos cenários de emissão intermediária e alta, com projeções realizadas a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos em relação ao período atual (1980-2009), sendo para tal, considerados sete modelos climáticos globais: CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, InmCM4, MIROC-ESM e MPI-ESM-LR

Para as simulações em cada um dos períodos considerados, os valores das concentrações atmosféricas de CO₂ foram assumidos em 360 ppm para a série histórica, 423, 499 e 532 ppm, para o RCP4.5, e 432, 571 e 801 ppm para o RCP8.5, a curto, médio e longo prazo, respectivamente, cada um representando a concentração referente ao ano central do período de 30 anos, conforme recomendado pelo projeto AgMIP (ROSENZWEIG et al., 2015) e descritos na Tabela 5.4. Esta recomendação é adotada uma vez que os níveis de [CO₂] atmosférico variam sazonalmente dentro de um mesmo ano, de modo que se caracteriza a concentração em termos de valor médio ao longo do período de 30 anos.

Tabela 5.4 - Cenários de emissão de gases de efeito estufa e períodos de anos considerados, com a concentração de dióxido de carbono referente ao valor que este assume no ano central do período. Fonte: (ROSENZWEIG et al., 2015)

Cenário e período	Anos de referência	Ano central	[CO ₂] (ppm)
Atual	1980-2009	1995	360
RCP4.5 Curto-prazo	2010-2039	2025	423
RCP8.5 Curto-prazo	2010-2039	2025	432
RCP4.5 Médio-prazo	2040-2069	2055	499
RCP8.5 Médio-prazo	2040-2069	2055	571
RCP4.5 Longo-prazo	2070-2099	2085	532
RCP8.5 Longo-prazo	2070-2099	2085	801

5.2.5. Simulações dos impactos do clima futuro na produtividade do milho

Para a determinação dos impactos das condições de clima futuro na produtividade do milho, em relação ao clima atual, foram feitas simulações com o modelo DSSAT/CERES-*Maize*, sob condições de sequeiro, em que o fornecimento de água à cultura foi limitado à ocorrência de chuvas. Desse modo, o consumo hídrico da cultura do milho foi um dos fatores limitantes da produtividade. Sob tais condições, foram avaliadas as influências das condições de clima futuro sobre a produtividade do milho em comparação ao clima atual, considerando-se os efeitos da temperatura, da concentração de CO₂ atmosférico e da evapotranspiração relativa, ou seja, da relação entre a evapotranspiração real e a máxima da cultura (ET_r/ET_c).

Para efeito de padronização das simulações, nos 31 locais, foram considerados os seguintes aspectos na implantação do milho de 1ª safra: semeadura em 15 de novembro; espaçamento de 0,80 m entre linhas; e densidade populacional de 6,5 plantas por m². Para o milho de 2ª safra foram considerados: semeadura em 15 de fevereiro; espaçamento de 0,80 m entre linhas; e densidade populacional de 5,5 plantas por m². Desse modo, as diferenças entre

os resultados são explicadas apenas pelos padrões climáticos distintos entre os locais e períodos considerados (Tabela 5.3 e Tabela 5.4).

Os níveis de produtividade foram simulados para uma cultivar de ciclo médio, e com aplicação de 150 kg N ha⁻¹, parcelados na semeadura (49,5 kg N ha⁻¹) e aos 45 dias após a semeadura (100,5 kg N ha⁻¹) (NOVAIS; NOVAIS e BRAGA, 1974).

5.2.6. Simulação e avaliação de estratégias de manejo para mitigação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade do milho

Sendo o potencial de produtividade da cultura determinado pela interação de fatores genéticos (genótipo), climáticos e de manejo agrícola (PALHARES, 2003; BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2009; SENTELHAS et al., 2016), diferentes estratégias de manejo para mitigação de perdas na produtividade do milho nos cenários de clima futuro foram avaliadas. Tais estratégias focaram na época de semeadura, no ciclo da cultivar, no uso da irrigação e nas doses da adubação nitrogenada. Essa análise foi realizada apenas para seis localidades, escolhidas por apresentarem condições climáticas distintas, por estarem inseridas em regiões produtoras já consagradas ou por apresentarem potencial de se tornarem regiões de produção, devido à migração de cultivos para regiões de fronteira agrícola (ASSAD et al., 2008). Os locais selecionados foram: Cruz Alta, RS (RSCA, Lat: -28,63° S; Long: -53,60° W, Alt: 473 m); Patos de Minas, MG (MGPM, Lat: -18,51° S, Long: -46,43° W, Alt: 940 m); Ivinhema, MS (MSIV, Lat: -22,30° S; Long: -53,81° W; Alt: 369 m); Diamantino, MT (MTDI, Lat: -14,40° S; Long: -56,45° W; Alt: 286 m); Bom Jesus do Piauí, PI (PIBJ, Lat: -9,10° S; Long: -44,11° W; Alt: 332 m); São Félix do Xingu, PA (PASF, Lat: -6,63° S; Long: -51,96° W; Alt: 206 m) (Tabela 5.3).

5.2.6.1. Data de semeadura

Devido à influência que as variações de temperatura do ar, da radiação solar, do fotoperíodo e da disponibilidade hídrica no solo exercem na fenologia, no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade das culturas agrícolas, a época de semeadura é um fator fundamental na definição das suas produtividades potencial e atingível. Desse modo, a definição da época preferencial de semeadura está intimamente relacionada às condições do clima local e sua variabilidade interanual. Sendo assim, a época de semeadura foi uma das estratégias avaliadas. Foram simuladas 36 épocas de semeadura ao longo do ano, sempre se considerando o primeiro dia de cada decêndio (01/01, 11/01, 21/01, 01/02, 11/02 até 21/12), para cada um dos 30 anos de simulação (1980 a 2009), conforme a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Identificação das épocas de semeadura (ES) decendiais da cultura do milho nas quais foram simuladas as produtividades pelo modelo DSSAT/CERES-Maize

ES	Data	ES	Data	ES	Data	ES	Data
Jan1	01/01	Abr1	01/04	Jul1	01/07	Out1	01/10
Jan2	11/01	Abr2	11/04	Jul2	11/07	Out2	11/10
Jan3	21/01	Abr3	21/04	Jul3	21/07	Out3	21/10
Fev1	01/02	Mai1	01/05	Ago1	01/08	Nov1	01/10
Fev2	11/02	Mai2	11/05	Ago2	11/08	Nov2	11/11
Fev3	21/02	Mai3	21/05	Ago3	21/08	Nov3	21/11
Mar1	01/03	Jun1	01/06	Set1	01/09	Dez1	01/12
Mar2	11/03	Jun2	11/06	Set2	11/09	Dez2	11/12
Mar3	21/03	Jun3	21/06	Set3	21/09	Dez3	21/12

5.2.6.2. Ciclo da cultivar

Com relação ao ciclo da cultura do milho, espera-se que sob temperaturas mais elevadas as fases de desenvolvimento, sejam mais curtas, de modo que em situações de seca, cultivares com ciclo de desenvolvimento mais curto teriam um risco maior de estresse e perdas se comparadas a cultivares com ciclo mais longo. Deste modo, avaliou-se a adaptação de cultivares com ciclo de duração mais curto e mais longo em relação a cultivar de ciclo médio atual. Apenas os coeficientes genéticos que descrevem a duração das fases fenológicas foram modificados com acréscimo ou decréscimo de 10 e 20 % no valor, em relação a cultivar de ciclo médio ajustada, conforme Tabela 5.6. Já os coeficientes relativos à produtividade foram mantidos fixos (Tabela 5.1).

Tabela 5.6 - Coeficientes genéticos para as cultivares de ciclo superprecoce (CSP), precoce (CP), médio (CM), tardio (CT), e supertardio (CST) para o milho de 1ª e 2ª safra, empregados na simulação da produtividade nos cenários climáticos futuros com o modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes localidades brasileiras

Safra	Ciclo	Coeficientes					
		P1	P2	P3	G2	G3	PHINT
1ª safra	CSP	232,5	0,5	725,7	749,9	9,40	46,79
	CP	261,5	0,5	816,4	749,9	9,40	46,79
	CM	290,6	0,5	907,1	749,9	9,40	46,79
	CT	319,7	0,5	997,8	749,9	9,40	46,79
	CST	348,7	0,5	1089	749,9	9,40	46,79
2ª safra	CSP	228,2	0,5	731,8	857,0	6,07	44,20
	CP	256,7	0,5	823,2	857,0	6,07	44,20
	CM	285,2	0,5	914,7	857,0	6,07	44,20
	CT	313,7	0,5	1006	857,0	6,07	44,20
	CST	342,2	0,5	1098	857,0	6,07	44,20

Deste modo, foram caracterizadas cultivares de ciclo superprecoce (CSP), precoce (CP), tardio (CT) e supertardio (CST), com base na cultivar de ciclo médio (CM), ajustada no capítulo anterior.

5.2.6.3. Irrigação

Sob condições de clima futuro, com temperaturas mais elevadas, a demanda hídrica da cultura do milho também deverá aumentar, o que poderá levar a um aumento das condições de déficit hídrico ao longo do ciclo, caso as chuvas se mantenham inalteradas ou diminuam. Desse modo, a irrigação suplementar, por qualquer um dos métodos, poderá ser uma estratégia de manejo para minimizar as possíveis perdas de produtividade do milho, tanto na 1ª como na 2ª safra. Sendo assim, foram simulados diferentes cenários de irrigação suplementar para a cultura do milho em condições de clima futuro. Na Tabela 5.7 são apresentados os diferentes cenários de irrigação, os quais variaram de 0 a 180 mm no ciclo, representando de nenhuma a seis lâminas de 30 mm em diferentes momentos do ciclo, entre 15 e 90 dias após a semeadura.

Tabela 5.7 - Cenários de irrigação considerados na simulação da produtividade da cultura do milho pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize* nas condições de clima futuro

Tratamento	DAS e lâminas de irrigação (mm)					
	15	30	45	60	75	90
SEQ	-	-	-	-	-	-
L30	-	-	30	-	-	-
L60	-	-	30	30	-	-
L90	-	30	30	30	-	-
L120	-	30	30	30	30	-
L150	30	30	30	30	30	-
L180	30	30	30	30	30	30

*DAS - dias após semeadura; SEQ – sequeiro; L30 - lâmina de 30 mm aplicada a 45 dias DAS; L60 - lâminas de 30 mm aplicadas a 45 e 60 DAS; L90 - lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45 e 60 DAS; L120 - lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45, 60 e 75 DAS; L150 - lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; L180 - lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60, 75 e 90 DAS.

5.2.6.4. Adubação nitrogenada

Além das condições climáticas, outro fator que afeta a produtividade da cultura do milho é a adubação, sendo o nitrogênio o elemento requerido em maior quantidade pela cultura do milho. Em função disso, foram simuladas as produtividades da cultura do milho de 1ª e de 2ª safra com o modelo DSSAT/CERES-*Maize* considerando-se diferentes cenários (doses) de

adubação nitrogenada: 0; 50; 100; 150; 200; 250; e, 300 kg ha⁻¹ de nitrogênio na forma de ureia, aplicados na semeadura e aos 45 dias após a semeadura, na proporção de 33 e 67%, respectivamente (NOVAIS; NOVAIS e BRAGA, 1974), como apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Doses de nitrogênio, na forma de ureia, aplicadas na semeadura e aos 45 dias após a semeadura, respectivamente nas proporções de 33 e 67%, para a simulação da produtividade do milho da 1^a e da 2^a safra pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*

Tratamento	Doses de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	Época de aplicação (Proporção de N aplicado)	
		Semeadura (33%)	45 DAS (67%)
N0	0	0	0
N50	50	16,50	33,50
N100	100	33,00	67,00
N150	150	49,50	100,50
N200	200	66,00	134,00
N250	250	82,50	167,50
N300	300	99,00	201,00

*N0 – sem adubação nitrogenada; N50 – dose parcelada de 50 kg N ha⁻¹; N100 – dose parcelada de 100 kg N ha⁻¹; N150 – dose parcelada de 150 kg N ha⁻¹; N200 – dose parcelada de 200 kg N ha⁻¹; N250 – dose parcelada de 250 kg N ha⁻¹; N300 – dose parcelada de 300 kg N ha⁻¹, parcelados na semeadura e aos 45 dias após a semeadura (DAS)

5.2.6.5. Simulações da produtividade do milho sob a combinação das estratégias manejo para mitigação dos impactos das mudanças climáticas

Para padronização das simulações, todas as estratégias de manejo avaliadas individualmente (semeadura, ciclo da cultivar, irrigação e adubação) ou em combinação, foram simuladas pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, considerando limitação hídrica e nutricional.

As estratégias de manejo agrícola para mitigação dos impactos das mudanças climáticas na cultura do milho, foram combinadas de modo a se avaliar os benefícios para a produtividade do milho. Foram combinadas aquelas estratégias que em cenário futuro apresentaram menor perda de produtividade em relação ao cenário atual. Assim, adotou-se nas simulações, a combinação da melhor data de semeadura, a cultivar com o ciclo mais ajustado, a lâmina de irrigação mais adequada e a melhor dose de adubação nitrogenada, em cada um dos cenários de clima futuro.

Com relação a data de semeadura, considerou-se como a data mais adequada aquela que apresentou menor perda de produtividade do milho em relação a data de maior produtividade obtida no cenário atual, considerando como limite para janela de semeadura, de setembro a dezembro, para 1^a safra do milho, e janeiro a abril, para 2^a safra do milho.

Para efeito de comparação do ganho ou perda de produtividade sob a adoção de estratégias de manejo em clima futuro, as simulações em relação ao clima atual seguiram os mesmos aspectos adotados na implantação da cultura em relação à avaliação dos impactos das mudanças de clima na alteração de produtividade do milho, conforme item 5.2.5. Adicionalmente, os níveis de produtividade para o período atual consideraram uma cultivar de ciclo médio, a condição de sequeiro e com aplicação de 150 kg N ha⁻¹, parcelados na semeadura (49,5 kg N ha⁻¹) e aos 45 dias após a semeadura (100,5 kg N ha⁻¹) (NOVAIS; NOVAIS e BRAGA, 1974).

Assumindo-se que há a possibilidade de não haver recursos hídricos para a irrigação da cultura do milho nos cenários futuros, efetuaram-se também as simulações para as mesmas combinações de época de semeadura, ciclo da cultivar e adubação nitrogenada, sob condições de sequeiro.

5.2.7. Avaliação geral dos resultados

Todas as simulações efetuadas pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, sob as condições climáticas futuras, foram conduzidas para cada um dos sete MCGs, descritos no item 5.2.4. No entanto, os resultados são apresentados em termos de valores médios do conjunto de saídas (*ensemble*) do modelo DSSAT/CERES-*Maize*.

A avaliação do impacto do clima futuro em relação ao atual na produtividade do milho, e das estratégias de manejo adotadas, na 1ª e na 2ª safra, foi realizada pelos valores médios dos 30 anos simulados (1980-2009), em termos da alteração relativa percentual da produtividade atingível (ΔP , em %), conforme a Equação (5.1).

$$\Delta P(\%) = \left[1 - \left(\frac{PA_{Futuro}}{PA_{Atual}} \right) \right] * 100 \quad (5.1)$$

em que, PA_{Futuro} e PA_{Atual} são as produtividades atingíveis simuladas sob cenário futuro e atual, respectivamente.

A duração do ciclo também foi avaliada, sendo caracterizada a duração média no cenário atual e a alteração desta nos diferentes cenários futuros considerados.

5.3. Resultado e discussão

5.3.1. Simulações dos impactos do clima futuro na produtividade do milho

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, a alteração percentual da produtividade do milho e da duração do ciclo do milho 1ª safra, para cada um dos locais e cenários futuros avaliados. Observa-se em todas as localidades, redução, na produtividade, e na duração do ciclo.

Figura 5.3 - Alteração da produtividade atingível (%) do milho da 1ª safra, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-Maize, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Figura 5.4 - Alteração da duração do ciclo (dias) do milho da 1ª safra, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-Maize, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Em termos médios a redução de produtividade para o milho 1ª safra variou de 41 a 63% (ANEXO E), enquanto a redução na duração do ciclo variou de 5 a 20 dias (ANEXO F). As localidades BABJ, BABA, BARR, PIBJ e MABC, foram as que apresentam os menores totais acumulados de chuva no período atual (ANEXO G), com valores muito próximos dos 500 mm requeridos pela cultura ao longo do ciclo (ALBUQUERQUE, 2010; LANDAU; SANS e SANTANA, 2010). Em função disso, com a redução nos volumes de chuva, verificada nos períodos futuros, as produtividades decresceram consideravelmente (Figura 5.2), já que com o

aumento futuro das temperaturas máxima, ANEXO H, e mínima, ANEXO I, houve aumento da demanda hídrica da cultura do milho, levando a um maior déficit hídrico ao longo do ciclo.

Já as Figuras 5.5 e 5.6 apresentam a alteração percentual da produtividade e da duração do ciclo para o milho de 2ª safra. Fica mais uma vez evidente que, em todas as localidades consideradas, houve redução, tanto na produtividade (Figuras 5.5), quanto na duração do ciclo (Figuras 5.6). A produtividade média reduziu entre 58 a 65% (ANEXO J), com redução na duração do ciclo de 6 a 25 dias (ANEXO K).

Figura 5.5 - Alteração da produtividade atingível (%) do milho da 2ª safra, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-Maize, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Figura 5.6 - Alteração da duração do ciclo (dias) do milho da 2ª safra, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-Maize, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Para o cultivo de 2ª safra, a duração do ciclo ultrapassou 200 dias, nas localidades de RSCA e SCCN da região Sul (Figura 5.6 e ANEXO K), já que o modelo DSSAT/CERES-Maize foi calibrado para uma cultivar de ciclo médio. Isso explica as menores perdas na produtividade nestes locais (Figura 5.5), uma vez que, sob clima futuro, embora a chuva acumulada no ciclo da cultura do milho 2ª safra (ANEXO L), tenha reduzido, os valores acumulados no ciclo foram suficientes para atender boa parte da necessidade hídrica da cultura, que nessa região se mantém entre 350 a 550 mm (ALBUQUERQUE, 2010; LANDAU; SANS e SANTANA, 2010), de modo que sob temperaturas mais elevadas (temperatura máxima,

ANEXO M, temperatura mínima, ANEXO N), em que o ciclo (ANEXO K), apesar de sofrer redução, ainda permanece adequado para gerar níveis razoáveis de produtividade.

Portanto, as reduções na produtividade foram mais expressivas para o cultivo de 2ª safra (Figuras 5.3 e 5.5, ANEXOS E e J), devido a maiores reduções na duração do ciclo (Figuras 5.4 e 5.6, ANEXOS F e K), somado a redução da chuva (ANEXO L) aumentando desse modo o estresse hídrico. Resultados de reduções na duração do ciclo e na produtividade do milho sob condições térmicas mais elevadas também foram obtidos por outros autores (TRIPATHY; RAY e SINGH, 2009; AMARAL et al., 2014; BASSU et al. 2014).

Sob cenários de clima futuro, para o milho de 1ª e 2ª safras, a evapotranspiração real diária (ET_r), e a evapotranspiração máxima diária da cultura (ET_c) aumentaram nos cenários futuros, com aumentos mais acentuados na ET_r, corroborando com os resultados reportados por Dos Santos; Sentelhas (2014), em estudo dos impactos das mudanças climáticas na evapotranspiração e no balanço hídrico de regiões produtoras de cana-de-açúcar. Segundo esse autores, os maiores aumentos da ET_r estão relacionados ao aumento da temperatura do ar em cenários futuros, enquanto que para a ET_c esses aumentos não são tão acentuados devido às variações que ocorrem também no regime de chuvas. Guo; Westra e Maier (2016), avaliando a sensibilidade da evapotranspiração em relação às condições climáticas, também observaram aumento dessa variáveis com o aumento da temperatura.

Desta maneira, em cenário futuro de aumento da temperatura do ar e redução nos acumulados totais de chuva, ao longo do ciclo do milho, a evapotranspiração relativa (ET_r/ET_c), aqui também referida como consumo hídrico relativo (Figura 5.7) apresenta uma redução sob diferentes cenários de clima futuro, em relação ao período atual, com maior redução à medida que se avança para o longo prazo, tanto no cenário de baixa, como de alta emissão (RCP4.5 e RCP8.5).

Valores médios de ET_r, ET_c e ET_r/ET_c, para cada um dos locais, podem ser consultados nos ANEXOS O, P e Q, para cultivo de 1ª safra e ANEXOS R, S e T para cultivo de 2ª safra, respectivamente. Portanto, parte da perda de produtividade do milho sob clima futuro é devido à redução na disponibilidade de água no solo, decorrente da ação combinada de diminuição das chuva e aumento da temperatura (ANEXOS G, H e I, para milho 1ª safra, e ANEXOS L, M e N para milho 2ª safra). Esses resultados se assemelham aos obtidos por Streck e Alberto (2006), para várias culturas, incluindo o milho, os reportados por Santos e Sentelhas (2014), para a cultura da cana-de-açúcar, e por Battisti et al. (2017), para a cultura da soja.

Figura 5.7 - Consumo hídrico relativo, representado pela relação entre ET_r e ET_c , da cultura do milho de 1ª safra (a) e 2ª safra (b), considerando-se valor médio das 31 localidades simulados pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para as condições do clima atual (1980-2009) e para as projeções futuras, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, para emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5)

5.3.2. Simulação e avaliação de estratégias de manejo para mitigação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade do milho

5.3.2.1. Semeadura

Observa-se na Tabela 5.9 que para a região de RSCA, a tendência é de que a melhor época de semeadura do milho continue sendo no terceiro decêndio de dezembro, a curto e médio prazos, para o cenário RCP4.5 e a curto prazo, para o cenário RCP8.5. A longo prazo, para o RCP4.5, e a médio e longo prazos, para o RCP8.5, a tendência é a de que as menores perdas de produtividade do milho aconteçam com a antecipação da semeadura para o primeiro decêndio de setembro.

Nas regiões de PIBJ e PASF, a semeadura tende a ser atrasada, passando de Nov3 e Nov2 para Dez3, em qualquer dos cenários futuros (Tabela 5.9). Para as demais regiões, a tendência de atraso da semeadura persiste, especialmente em MGPM, indo de Set3 para Out2 em todos os cenários futuros, e em MTDI, em que as semeaduras passam de Out3 para Nov1, em curto prazo, e para Nov2, a médio e longo prazos, para as duas condições de emissão (RCP4.5 e RCP8.5).

Com relação ao cultivo de 2ª safra (Tabela 5.10), a semeadura do milho em clima futuro irá predominar entre o primeiro e o segundo decêndio de janeiro, o que não indica alteração em relação ao cenário atual. A única exceção é para a região Sul (RSCA) em que a semeadura no cenário atual (Jan3) passa a ser adiada para Fev3 (RCP4.5) e para Mar2 (RCP8.5) nos cenários a curto e médio prazos, e para Abr2 (RCP8.5), para o cenário a longo prazo. Essas variações decorrem principalmente do regime hídrico que irá imperar nas condições de clima futuro, fazendo com que a semeadura, ora seja antecipada, ora retardada.

Tabela 5.9 - Datas de semeadura em que foram obtidas as menores perdas de produtividade do milho da 1ª safra sob projeções de clima futuro e em cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5), em relação aos atuais níveis de produtividade em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSCA	Dez3	Dez3	Dez3	Set1	Dez3	Set1	Set1
MGPM	Set3	Out2	Out2	Out2	Out2	Out2	Out2
MSIV	Dez1	Dez1	Dez2	Dez1	Dez1	Dez2	Dez2
MTDI	Out3	Nov1	Nov2	Nov2	Nov1	Nov2	Nov2
PIBJ	Nov3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3
PASF	Nov2	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3

Tabela 5.10 - Datas de semeadura em que foram obtidas as menores perdas de produtividade do milho da 2ª safra sob projeções de clima futuro e em cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5), em relação aos atuais níveis de produtividade em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSCA	Jan3	Fev3	Fev3	Fev3	Mar2	Mar2	Abr2
MGPM	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1
MSIV	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1
MTDI	Jan1	Jan2	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1
PIBJ	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1
PASF	Jan1	Jan2	Jan2	Jan3	Jan1	Jan2	Jan3

5.3.2.2. Ciclo da Cultivar

As simulações para cultivares com diferentes durações de ciclo, na 1ª e 2ª safra é mostrada nas Tabelas 5.11 e 5.12. Para cultivo de 1ª safra, as cultivares com maturidade tardia

(CT) ou supertardia (CST) responderam com menores perdas de produtividade em relação à cultivar de ciclo médio (CM), enquanto as cultivares precoce (CP) e superprecoce (CSP) apresentaram perdas ainda maiores se comparadas à cultivar do CM (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Alteração da produtividade do milho da 1ª safra para projeções de clima futuro nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para cultivares de diferentes ciclos, em relação a cultivar de ciclo médio em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Cenário de emissão	Período futuro	Alteração da produtividade atingível (%) em relação ao cenário atual				
				Ciclo do Cultivar*				
				CSP	CP	CM	CT	CST
RSCA	8732	RCP4.5	2010-2039	-59	-56	-43	-41	-38
			2040-2069	-63	-60	-47	-42	-39
			2070-2099	-67	-62	-52	-45	-42
		RCP8.5	2010-2039	-61	-57	-49	-42	-39
			2040-2069	-66	-62	-51	-44	-41
			2070-2099	-76	-72	-66	-59	-55
MGPM	6997	RCP4.5	2010-2039	-47	-39	-31	-26	-21
			2040-2069	-48	-41	-34	-27	-23
			2070-2099	-49	-43	-37	-31	-26
		RCP8.5	2010-2039	-47	-39	-36	-25	-21
			2040-2069	-49	-43	-38	-31	-26
			2070-2099	-56	-54	-46	-41	-36
MSIV	8668	RCP4.5	2010-2039	-62	-60	-47	-42	-38
			2040-2069	-67	-66	-54	-48	-44
			2070-2099	-70	-69	-59	-53	-48
		RCP8.5	2010-2039	-65	-62	-57	-46	-42
			2040-2069	-71	-70	-60	-53	-49
			2070-2099	-81	-81	-75	-69	-66
MTDI	8185	RCP4.5	2010-2039	-48	-45	-32	-23	-16
			2040-2069	-55	-56	-42	-34	-28
			2070-2099	-61	-62	-50	-43	-37
		RCP8.5	2010-2039	-50	-48	-46	-27	-20
			2040-2069	-61	-63	-51	-44	-39
			2070-2099	-78	-80	-71	-68	-64
PIBJ	6554	RCP4.5	2010-2039	-48	-45	-32	-23	-16
			2040-2069	-55	-56	-42	-34	-28
			2070-2099	-61	-62	-50	-43	-37
		RCP8.5	2010-2039	-50	-48	-46	-27	-20
			2040-2069	-61	-63	-51	-44	-39
			2070-2099	-78	-80	-71	-68	-64
PASF	8614	RCP4.5	2010-2039	-48	-47	-27	-20	-13
			2040-2069	-57	-56	-38	-30	-23
			2070-2099	-63	-62	-46	-37	-31
		RCP8.5	2010-2039	-48	-48	-42	-20	-13
			2040-2069	-66	-66	-50	-42	-36
			2070-2099	-78	-77	-68	-63	-59
Média				-60	-58	-48	-40	-35

*CSP – cultivar de ciclo superprecoce; CP – cultivar de ciclo precoce; CM – cultivar de ciclo médio; CT – cultivar de ciclo tardio e CST – cultivar de ciclo supertardio; RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV – Patos de Minas, MG; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA

Tabela 5.12 - Alteração da produtividade do milho da 2ª safra para projeções de clima futuro nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para cultivares de diferentes ciclos, em relação a cultivar de ciclo médio em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Cenário de emissão	Período futuro	Alteração da produtividade atingível (%) em relação ao cenário atual				
				Ciclo do Cultivar*				
				CSP	CP	CM	CT	CST
RSCA	6711	RCP4.5	2010-2039	-36	-30	-21	-26	-24
			2040-2069	-36	-27	-17	-22	-18
			2070-2099	-40	-30	-17	-21	-18
		RCP8.5	2010-2039	-34	-28	-18	-26	-23
			2040-2069	-40	-30	-16	-20	-16
			2070-2099	-52	-40	-21	-23	-18
MGPM	2395	RCP4.5	2010-2039	-74	-75	-75	-76	-77
			2040-2069	-74	-74	-74	-76	-76
			2070-2099	-74	-75	-75	-76	-76
		RCP8.5	2010-2039	-73	-75	-73	-76	-76
			2040-2069	-71	-72	-71	-74	-74
			2070-2099	-74	-74	-75	-76	-77
MSIV	6996	RCP4.5	2010-2039	-77	-73	-60	-63	-63
			2040-2069	-80	-77	-66	-68	-66
			2070-2099	-79	-77	-67	-69	-67
		RCP8.5	2010-2039	-78	-74	-65	-66	-65
			2040-2069	-79	-76	-65	-66	-62
			2070-2099	-84	-82	-75	-77	-73
MTDI	6989	RCP4.5	2010-2039	-77	-75	-68	-73	-74
			2040-2069	-81	-79	-73	-77	-77
			2070-2099	-82	-81	-75	-78	-78
		RCP8.5	2010-2039	-78	-76	-73	-73	-74
			2040-2069	-82	-81	-75	-78	-77
			2070-2099	-87	-86	-83	-84	-84
PIBJ	2774	RCP4.5	2010-2039	-63	-60	-53	-60	-62
			2040-2069	-67	-65	-58	-63	-64
			2070-2099	-69	-67	-60	-65	-65
		RCP8.5	2010-2039	-64	-61	-58	-60	-62
			2040-2069	-69	-67	-60	-65	-65
			2070-2099	-73	-72	-69	-71	-70
PASF	5836	RCP4.5	2010-2039	-65	-62	-47	-58	-58
			2040-2069	-70	-67	-54	-63	-63
			2070-2099	-73	-72	-59	-68	-67
		RCP8.5	2010-2039	-66	-63	-56	-59	-59
			2040-2069	-74	-72	-59	-67	-67
			2070-2099	-82	-81	-74	-78	-77
Média			-69	-66	-58	-62	-61	

*CSP – cultivar de ciclo superprecoce; CP – cultivar de ciclo precoce; CM – cultivar de ciclo médio; CT – cultivar de ciclo tardio e CST – cultivar de ciclo supertardio; RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV – Patos de Minas, MG; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA

Independente da duração do ciclo da cultivar, para cultivo de 1ª safra, as perdas de produtividade do milho progrediram dos cenários de curto para longo prazo, com valores ainda mais acentuados na condição de alta emissão (RCP8.5). Considerando-se os valores médios, o uso das cultivares de CT e CST resultou em perdas de produtividade menores em todos os locais analisados. As reduções de rendimento em relação ao cenário atual empregando-se a cultivar de ciclo médio (CM) foi da ordem de 48%, enquanto que ao se adotar as cultivares CT e CST essas perdas caíram para 40 e 35%, respectivamente, representando, portanto, uma mitigação de 8 e 13% das perdas de produtividade.

A cultivar de CM ainda se mostrou como a melhor estratégia sob clima futuro para o cultivo de 2ª safra (Tabela 5.12), com perda média de 58% da produtividade do milho em relação ao cenário atual. Nesse caso, as CT ou CST apresentaram perdas ainda maiores de produtividade em relação à CM, provavelmente porque a 2ª safra é cultivada em período com redução gradativa das chuvas, de modo que, o ciclo de maior duração levou a uma maior exposição da cultura a déficits hídricos elevados nas fases críticas de desenvolvimento, como o enchimento de grãos (CARDOSO; FARIA e FOLEGATTI, 2004). Adicionalmente, as regiões situadas mais ao sul do país têm as temperaturas ao final do ciclo da 2ª safra menores, sendo este outro fator limitante para o crescimento da cultura do milho nessas áreas.

5.3.2.3. Irrigação

Com os critérios de irrigação usados, observa-se nas Tabelas 5.13 e 5.14 que houve uma redução das perdas, porém sem eliminá-las. Para a 1ª safra, o melhor cenário de irrigação foi, predominantemente, aquele em que se aplicou a maior lâmina de água, ou seja, 180 mm (L180) em seis aplicações de 30 mm ao longo do ciclo. As únicas exceções ocorreram nas localidades de MTDI e PASF em que as lâminas maiores tiveram pouco efeito nas reduções das perdas. Em MTDI no cenário de longo prazo (2070-2099) e alta emissão (RCP8.5) e em PASF no cenário de longo prazo com emissão intermediária, as perdas se estabilizaram a partir da lâmina de 120 mm (L120). Em PASF para o cenário de longo prazo e alta emissão, a lâmina de irrigação de 150 mm (L150) foi a requerida para estabilizar as perdas de produtividade do milho na 1ª safra (Tabela 5.13). Para a 2ª safra, ao longo da qual os déficits hídricos são mais acentuados, a lâmina de 180 mm (L180) foi majoritariamente a que proporcionou as menores perdas, com exceção apenas para MTDI, no cenário de longo prazo e alta emissão, que teve a lâmina de 120 mm (L120) como aquela a partir da qual as perdas se estabilizaram (Tabela 5.14).

Tabela 5.13 - Alteração da produtividade do milho da 1ª safra para projeções de clima futuro nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para tratamentos de lâminas de irrigação suplementar, em relação aos atuais níveis de produtividade em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Cenário de emissão	Período futuro	Alteração da produtividade atingível (%) em relação ao cenário atual						
				Tratamento*						
				SEQ	L30	L60	L90	L120	L150	L180
RSCA	8732	RCP4.5	2010-2039	-43	-41	-37	-36	-28	-30	-22
			2040-2069	-47	-45	-41	-40	-33	-34	-27
			2070-2099	-52	-50	-45	-44	-38	-39	-33
		RCP8.5	2010-2039	-45	-43	-39	-39	-30	-31	-23
			2040-2069	-51	-48	-43	-43	-37	-37	-32
			2070-2099	-66	-64	-56	-55	-51	-52	-48
MGPM	6997	RCP4.5	2010-2039	-31	-30	-28	-28	-25	-26	-23
			2040-2069	-34	-34	-29	-30	-28	-29	-26
			2070-2099	-37	-36	-30	-30	-29	-30	-27
		RCP8.5	2010-2039	-32	-32	-29	-29	-27	-27	-25
			2040-2069	-38	-37	-31	-31	-30	-30	-27
			2070-2099	-46	-45	-36	-36	-34	-35	-33
MSIV	8668	RCP4.5	2010-2039	-31	-30	-28	-28	-25	-26	-23
			2040-2069	-34	-34	-29	-30	-28	-29	-26
			2070-2099	-37	-36	-30	-30	-29	-30	-27
		RCP8.5	2010-2039	-32	-32	-29	-29	-27	-27	-25
			2040-2069	-38	-37	-31	-31	-30	-30	-27
			2070-2099	-46	-45	-36	-36	-34	-35	-33
MTDI	8185	RCP4.5	2010-2039	-32	-30	-27	-26	-24	-24	-23
			2040-2069	-42	-40	-38	-37	-36	-36	-35
			2070-2099	-50	-48	-46	-45	-44	-44	-43
		RCP8.5	2010-2039	-35	-34	-30	-29	-28	-28	-27
			2040-2069	-51	-50	-48	-48	-47	-47	-46
			2070-2099	-71	-70	-69	-69	-68	-68	-68
PIBJ	6554	RCP4.5	2010-2039	-53	-51	-43	-41	-38	-36	-33
			2040-2069	-61	-59	-53	-51	-49	-47	-45
			2070-2099	-66	-64	-59	-57	-55	-54	-52
		RCP8.5	2010-2039	-54	-52	-45	-42	-40	-38	-35
			2040-2069	-68	-66	-61	-60	-58	-56	-55
			2070-2099	-81	-80	-78	-77	-77	-76	-75
PASF	8614	RCP4.5	2010-2039	-27	-25	-19	-18	-17	-17	-16
			2040-2069	-38	-36	-31	-29	-28	-28	-27
			2070-2099	-46	-43	-39	-38	-36	-36	-36
		RCP8.5	2010-2039	-28	-26	-20	-19	-18	-17	-17
			2040-2069	-48	-46	-42	-41	-40	-39	-39
			2070-2099	-68	-67	-66	-65	-64	-63	-63
Média			-46	-45	-40	-39	-37	-37	-34	

* SEQ – sequeiro; L30 - lâmina de 30 mm aplicada a 45 dias após a semeadura (DAS); L60 - lâminas de 30 mm aplicadas a 45 e 60 DAS; L90 - lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45 e 60 DAS; L120 - lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45, 60 e 75 DAS; L150 - lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; L180 - lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; RCP4.5 - cenário sob emissão intermediária; RCP8.5 – cenário sob alta emissão; RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA

Tabela 5.14 – Alteração da produtividade do milho da 2ª safra para projeções de clima futuro nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para tratamentos de aplicação de lâminas de água, em relação aos atuais níveis de produtividade em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Cenário de emissão	Período futuro	Alteração da produtividade atingível (%) em relação ao cenário atual						
				Tratamento*						
				SEQ	L30	L60	L90	L120	L150	L180
RSCA	6711	RCP4.5	2010-2039	-26	-22	-17	-17	-7	-8	-2
			2040-2069	-22	-17	-13	-12	-3	-3	3
			2070-2099	-22	-17	-12	-12	-4	-4	4
		RCP8.5	2010-2039	-24	-20	-16	-17	-7	-8	0
			2040-2069	-22	-17	-10	-10	-2	-3	5
			2070-2099	-28	-24	-15	-13	-8	-8	-4
MGPM	2395	RCP4.5	2010-2039	-54	-54	-43	-43	-23	-23	-4
			2040-2069	-55	-54	-34	-34	-16	-16	1
			2070-2099	-55	-54	-29	-29	-11	-11	6
		RCP8.5	2010-2039	-54	-53	-40	-40	-21	-21	-2
			2040-2069	-52	-51	-24	-24	-6	-6	10
			2070-2099	-58	-56	-37	-37	-22	-21	-9
MSIV	6996	RCP4.5	2010-2039	-65	-62	-49	-50	-40	-40	-35
			2040-2069	-70	-68	-57	-58	-47	-48	-43
			2070-2099	-71	-68	-58	-58	-49	-50	-46
		RCP8.5	2010-2039	-66	-64	-51	-53	-42	-42	-37
			2040-2069	-72	-69	-58	-58	-51	-51	-48
			2070-2099	-78	-76	-72	-71	-68	-68	-67
MTDI	6989	RCP4.5	2010-2039	-67	-64	-59	-59	-52	-52	-48
			2040-2069	-72	-70	-66	-66	-62	-62	-60
			2070-2099	-74	-72	-70	-69	-67	-67	-65
		RCP8.5	2010-2039	-67	-65	-59	-59	-53	-53	-49
			2040-2069	-74	-72	-70	-70	-68	-68	-66
			2070-2099	-82	-81	-80	-80	-79	-79	-79
PIBJ	2774	RCP4.5	2010-2039	-54	-53	-41	-40	-29	-28	-17
			2040-2069	-58	-57	-48	-47	-39	-38	-31
			2070-2099	-60	-59	-53	-52	-47	-46	-40
		RCP8.5	2010-2039	-54	-53	-41	-41	-30	-28	-18
			2040-2069	-61	-60	-55	-54	-50	-49	-44
			2070-2099	-68	-67	-66	-66	-65	-64	-63
PASF	5836	RCP4.5	2010-2039	-44	-43	-38	-38	-35	-35	-31
			2040-2069	-52	-51	-47	-47	-45	-45	-42
			2070-2099	-59	-57	-54	-54	-52	-52	-50
		RCP8.5	2010-2039	-45	-44	-39	-38	-36	-35	-32
			2040-2069	-58	-57	-54	-54	-52	-52	-50
			2070-2099	-73	-72	-71	-71	-70	-70	-69
Média				-56	-54	-46	-46	-38	-38	-31

* SEQ – sequeiro; L30 - lâmina de 30 mm aplicada a 45 dias após a semeadura (DAS); L60 - lâminas de 30 mm aplicadas a 45 e 60 DAS; L90 - lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45 e 60 DAS; L120 - lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45, 60 e 75 DAS; L150 - lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; L180 - lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; RCP4.5 - cenário sob emissão intermediária; RCP8.5 – cenário sob alta emissão; RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA

5.3.2.4. Adubação nitrogenada

O uso de diferentes doses de adubação nitrogenada como estratégia para se minimizar os impactos das mudanças climáticas mostrou-se também capaz de mitigar as perdas de produtividade do milho na 1ª e na 2ª safras (Tabela 5.15 e 5.16), porém sem reverter totalmente o quadro de perdas, já que a resposta das culturas à adubação tem efeito direto das condições climáticas, especialmente da chuva (ANDRÉA, 2016).

Observando-se a Tabela 5.15, para o milho de 1ª safra, pode ser verificado que a adubação ótima para cada localidade variou com o cenário de mudança climática. Na grande maioria dos casos as doses ótimas de nitrogênio, na forma de ureia, que ocasionaram as menores perdas de produtividade estão entre 200 e 250 kg ha⁻¹. Apenas em duas condições, em MGPM, a dose máxima de 300 kg ha⁻¹ foi requerida, enquanto que em apenas três condições, em PIBJ, a dose ótima foi de 100 kg ha⁻¹, e em outras duas, uma em PIBJ e outra em PASF, a dose ótima foi de 150 kg ha⁻¹. Na 2ª safra (Tabela 5.16), observaram-se mais variação das doses de nitrogênio que foram capazes de melhor atenuar o efeito de mudanças climáticas, predominando aquelas entre 50 e 200 kg ha⁻¹. Isso se dá porque a 2ª safra ocorre em condições de maior restrição hídrica (Figura 5.7), limitando a utilização dos fertilizantes aplicados em maiores doses. Esses resultados evidenciam a interação entre cultura, adubação e clima, como já destacado por Andréa (2016).

5.3.2.5. Combinação das estratégias de manejo

Considerando-se as estratégias de manejo anteriormente mencionadas, que inclui ajuste de época de semeadura, do ciclo da cultivar, uso de irrigação e adubação nitrogenada, elaborou-se uma análise combinando aquelas de melhor resposta para a minimização das perdas de produtividade do milho em clima futuro em relação ao cenário atual. Acreditando-se que nos cenários futuros possa haver uma maior restrição de recursos hídricos para irrigação, efetuou-se também a combinação de época de semeadura, ciclo da cultivar e adubação nitrogenada para a condição de sequeiro. Os manejos ótimos adotados em cada uma das simulações, estão descritos nos ANEXOS U e V, com resultados sendo apresentados nas Tabela 5.17 e 5.18, para milho de 1ª e 2ª safra, respectivamente.

Tabela 5.15 - Alteração da produtividade do milho da 1ª safra para projeções de clima futuro nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para tratamentos de aplicação de doses de nitrogênio, em relação a dose de aplicação de 150 kg ka⁻¹ em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Cenário de emissão	Período futuro	Alteração da produtividade atingível (%) em relação ao cenário atual						
				Tratamento*						
				N0	N50	N100	N150	N200	N250	N300
RSCA	8732	RCP4.5	2010-2039	-90	-65	-50	-43	-41	-40	-40
			2040-2069	-90	-67	-53	-47	-45	-45	-45
			2070-2099	-91	-69	-57	-52	-50	-50	-50
		RCP8.5	2010-2039	-90	-66	-51	-45	-43	-42	-42
			2040-2069	-91	-69	-55	-51	-49	-48	-48
			2070-2099	-91	-74	-68	-66	-66	-65	-65
MGPM	6997	RCP4.5	2010-2039	-89	-62	-39	-31	-28	-28	-28
			2040-2069	-89	-61	-41	-34	-33	-33	-32
			2070-2099	-89	-61	-42	-37	-35	-35	-34
		RCP8.5	2010-2039	-89	-62	-40	-32	-30	-30	-30
			2040-2069	-89	-62	-43	-38	-36	-36	-36
			2070-2099	-89	-62	-49	-46	-45	-44	-43
MSIV	8668	RCP4.5	2010-2039	-90	-65	-52	-47	-45	-45	-45
			2040-2069	-91	-67	-57	-54	-53	-53	-52
			2070-2099	-91	-69	-61	-59	-58	-58	-57
		RCP8.5	2010-2039	-91	-66	-55	-51	-49	-49	-48
			2040-2069	-91	-70	-63	-61	-60	-60	-60
			2070-2099	-91	-78	-76	-75	-75	-74	-74
MTDI	8185	RCP4.5	2010-2039	-89	-58	-38	-32	-31	-30	-30
			2040-2069	-90	-61	-46	-42	-41	-41	-41
			2070-2099	-90	-65	-52	-50	-49	-48	-48
		RCP8.5	2010-2039	-89	-59	-41	-35	-34	-34	-33
			2040-2069	-90	-66	-54	-51	-51	-50	-50
			2070-2099	-90	-77	-72	-71	-71	-70	-70
PIBJ	6554	RCP4.5	2010-2039	-88	-59	-54	-53	-52	-52	-52
			2040-2069	-88	-65	-61	-61	-61	-61	-61
			2070-2099	-88	-69	-66	-66	-66	-66	-66
		RCP8.5	2010-2039	-88	-60	-55	-54	-54	-54	-53
			2040-2069	-88	-70	-68	-68	-68	-68	-68
			2070-2099	-88	-81	-81	-81	-80	-80	-80
PASF	8614	RCP4.5	2010-2039	-87	-56	-34	-27	-26	-26	-26
			2040-2069	-88	-58	-42	-38	-37	-37	-37
			2070-2099	-89	-62	-49	-46	-45	-44	-44
		RCP8.5	2010-2039	-87	-55	-34	-28	-27	-26	-26
			2040-2069	-89	-63	-51	-48	-47	-47	-47
			2070-2099	-90	-75	-70	-68	-68	-68	-68
Média			-89	-65	-59	-56	-55	-55	-55	

* N0 – sem aplicação; N50 – dose parcelada de 50 kg N ha⁻¹; N100 – dose parcelada de 100 kg N ha⁻¹; N150 – dose parcelada de 150 kg N ha⁻¹; N200 – dose parcelada de 200 kg N ha⁻¹; N250 – dose parcelada de 250 kg N ha⁻¹; N300 – dose parcelada de 300 kg N ha⁻¹ na forma de ureia aplicados na semeadura e 45 dias após a semeadura, na proporção de 33 e 67%, respectivamente; RCP4.5 – cenário sob emissão intermediária; RCP8.5 – cenário sob alta emissão; RSCA – Cruz Alta, RS; MGPM – Patos de Minas, MG; MSIV – Ivinhema, MS; MTDI – Diamantino, MT; PIBJ – Bom Jesus do Piauí, PI; PASF – São Félix do Xingu, PA

Tabela 5.16 - Alteração da produtividade do milho da 2ª safra para projeções de clima futuro nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para tratamentos de aplicação de doses de nitrogênio, em relação a dose de aplicação de 150 kg ka⁻¹ em regime de sequeiro, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Cenário de emissão	Período futuro	Alteração da produtividade atingível (%) em relação ao cenário atual						
				Tratamento*						
				N0	N50	N100	N150	N200	N250	N300
RSCA	6711	RCP4.5	2010-2039	-87	-60	-37	-26	-22	-23	-23
			2040-2069	-86	-57	-34	-22	-17	-17	-18
			2070-2099	-86	-56	-34	-22	-19	-20	-20
		RCP8.5	2010-2039	-87	-58	-36	-24	-19	-19	-19
			2040-2069	-86	-55	-34	-22	-19	-19	-19
			2070-2099	-86	-54	-37	-28	-26	-26	-26
MGPM	2395	RCP4.5	2010-2039	-67	-52	-54	-54	-56	-56	-56
			2040-2069	-67	-53	-54	-55	-56	-56	-57
			2070-2099	-67	-54	-55	-55	-56	-56	-57
		RCP8.5	2010-2039	-67	-52	-53	-54	-55	-56	-56
			2040-2069	-67	-51	-51	-52	-53	-53	-53
			2070-2099	-67	-58	-58	-58	-58	-58	-58
MSIV	6996	RCP4.5	2010-2039	-88	-72	-66	-65	-65	-65	-65
			2040-2069	-88	-75	-71	-71	-71	-70	-70
			2070-2099	-88	-75	-71	-71	-71	-71	-71
		RCP8.5	2010-2039	-88	-73	-68	-66	-66	-66	-66
			2040-2069	-88	-76	-72	-72	-71	-71	-71
			2070-2099	-89	-80	-79	-78	-78	-78	-78
MTDI	6989	RCP4.5	2010-2039	-85	-72	-69	-67	-66	-65	-65
			2040-2069	-85	-76	-74	-72	-72	-71	-71
			2070-2099	-85	-78	-75	-74	-73	-73	-73
		RCP8.5	2010-2039	-85	-72	-69	-67	-66	-66	-65
			2040-2069	-85	-78	-75	-74	-74	-73	-73
			2070-2099	-85	-83	-82	-82	-81	-81	-81
PIBJ	2774	RCP4.5	2010-2039	-71	-56	-54	-54	-53	-53	-53
			2040-2069	-71	-59	-58	-58	-57	-57	-57
			2070-2099	-71	-61	-60	-60	-60	-60	-60
		RCP8.5	2010-2039	-71	-56	-54	-54	-54	-54	-53
			2040-2069	-71	-62	-61	-61	-61	-61	-61
			2070-2099	-71	-68	-68	-68	-68	-68	-68
PASF	5836	RCP4.5	2010-2039	-86	-63	-48	-44	-43	-43	-43
			2040-2069	-86	-67	-55	-52	-51	-51	-51
			2070-2099	-86	-70	-61	-59	-58	-57	-57
		RCP8.5	2010-2039	-86	-64	-49	-45	-44	-44	-43
			2040-2069	-86	-70	-60	-58	-57	-57	-57
			2070-2099	-86	-78	-74	-73	-72	-72	-72
Média			-81	-65	-59	-56	-55	-55	-55	

* N0 – sem aplicação; N50 – dose parcelada de 50 kg N ha⁻¹; N100 – dose parcelada de 100 kg N ha⁻¹; N150 – dose parcelada de 150 kg N ha⁻¹; N200 – dose parcelada de 200 kg N ha⁻¹; N250 – dose parcelada de 250 kg N ha⁻¹; N300 – dose parcelada de 300 kg N ha⁻¹ na forma de ureia aplicados na semeadura e 45 dias após a semeadura, na proporção de 33 e 67%, respectivamente; RCP4.5 – cenário sob emissão intermediária; RCP8.5 – cenário sob alta emissão; RSCA – Cruz Alta, RS; MGPM – Patos de Minas, MG; MSIV – Ivinhema, MS; MTDI – Diamantino, MT; PIBJ – Bom Jesus do Piauí, PI; PASF – São Félix do Xingu, PA

Tabela 5.17 - Alteração da produtividade do milho da 1ª safra sob projeções de clima futuro, em cenário de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para as condições de manejo atual e para as combinações de estratégias de manejo (época de semeadura, ciclo da cultivar, adubação), sem e com o uso de irrigação, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Cenários futuros sem estratégia de manejo							
RSCA	8732	-43	-47	-52	-45	-51	-66
MGPM	6997	-31	-34	-37	-32	-38	-46
MSIV	8668	-47	-54	-59	-51	-60	-75
MTDI	8185	-32	-42	-50	-35	-51	-71
PIBJ	6554	-53	-61	-66	-54	-68	-81
PASF	8614	-27	-38	-46	-28	-50	-68
Cenários futuros + combinação de manejo em sequeiro							
RSCA	8732	7	10	-13	17	-9	-3
MGPM	6997	44	38	35	39	33	5
MSIV	8668	23	3	-3	13	-4	-33
MTDI	8185	27	2	-11	21	-12	-48
PIBJ	6554	19	1	-11	13	-12	-41
PASF	8614	23	7	-6	22	-10	-43
Cenários futuros + combinação de manejo irrigado							
RSCA	8732	70	65	12	76	20	24
MGPM	6997	69	62	59	62	55	28
MSIV	8668	73	55	45	65	45	-3
MTDI	8185	49	19	5	43	2	-42
PIBJ	6554	65	46	31	60	31	-15
PASF	8614	35	20	5	33	1	-35

*RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA

Os resultados da Tabela 5.17 revelam que ganhos de produtividade para o milho 1ª safra poderão ocorrer, em algumas localidades, nos cenários futuros, tanto na condição de sequeiro, quanto na irrigada, porém com variações. Para a condição de sequeiro a otimização da época de semeadura, do ciclo da cultivar e da adubação nitrogenada levou a ganhos de produtividade apenas a curto e médio prazo, no cenário de emissão intermediário (RCP4.5) e a curto prazo, no cenário de alta emissão (RCP8.5), com exceção de MGPM em que, para ambos os cenários de emissão, verificaram-se ganhos também em longo prazo. Para o milho da 2ª safra (Tabela 5.18), as ações de manejo geraram expressivos incrementos de produtividade em relação ao cenário atual, tanto na condição de sequeiro, como na irrigada. A única exceção nessa safra foi para a região de PIBJ, na condição de sequeiro que, apesar de ter tido menores variações, ainda apresentou redução de produtividade em relação ao cenário atual. O mesmo foi observado em MSIV nos cenários de longo prazo no RCP4.5 e de médio e longo prazo para

o RCP8.5. Para a condição irrigada, a otimização do manejo da cultura resultou em ganhos de produtividade na grande maioria dos cenários, exceto em MSIV, MTDI, PIBJ e PASF, no cenário de longo prazo, para o RCP8.5 (Tabela 5.18), o que se deveu às maiores demandas hídricas que ocorrem nessas regiões, com o aumento excessivo das temperaturas.

Tabela 5.18 - Alteração da produtividade do milho da 2ª safra sob projeções de clima futuro, em cenário de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) para as condições de manejo atual e para as combinações de estratégias de manejo (época de semeadura, ciclo da cultivar, adubação), sem e com irrigação, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Cenários futuros sem estratégia de manejo							
RSCA	8732	-26	-22	-22	-24	-22	-28
MGPM	6997	-54	-55	-55	-54	-49	-58
MSIV	8668	-65	-70	-71	-66	-70	-78
MTDI	8185	-74	-78	-50	-74	-80	-70
PIBJ	6554	-54	-58	-60	-54	-61	-68
PASF	8614	-44	-52	-59	-45	-59	-73
Cenários futuros + combinação de manejo em sequeiro							
RSCA	8732	7	16	13	-3	7	3
MGPM	6997	158	143	137	152	137	101
MSIV	8668	6	6	-8	3	-4	-36
MTDI	8185	85	56	39	82	26	-16
PIBJ	6554	-14	-21	-26	-19	-28	-41
PASF	8614	42	25	5	37	8	-34
Cenários futuros + combinação de manejo irrigado							
RSCA	8732	38	51	54	15	31	12
MGPM	6997	123	126	130	120	131	105
MSIV	8668	73	62	35	69	42	-15
MTDI	8185	124	82	60	114	44	-11
PIBJ	6554	53	28	10	41	3	-35
PASF	8614	57	39	16	45	21	-29

*RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA

Os resultados apresentados neste estudo indicam que há possibilidade das ações de manejo agrícola reverter os impactos negativos das mudanças climáticas na cultura do milho, assim como também destacado por Altieri e Nicholls (2013). Isso se deve ao conjunto de estratégias adotadas, ou seja, ajuste do ciclo da cultivar e da época de semeadura, associadas à adubação nitrogenada e irrigação. Esses resultados diferem parcialmente daqueles apresentados para a cultura do milho por Lehmann et al. (2013), os quais não indicaram incrementos na produtividade do milho alterando as doses de adubação nitrogenada e com irrigação em

cenários de mudanças climáticas em duas localidades da Suíça. Isso pode estar associado principalmente ao ciclo da cultivar, que ao ser reduzido com o aumento da temperatura, afeta demasiadamente a produtividade do milho, como pode ser observado nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. No entanto, resultados de Yang et al. (2017) mostram que a irrigação da cultura do milho em Portugal, poderá ajudar a reverter os impactos negativos das mudanças climáticas sobre essa cultura.

Apesar dos resultados promissores apresentados neste estudo, esses devem ser interpretados com cautela, uma vez há incertezas, tanto nos cenários climáticos (média de sete MCGs), como no modelo de simulação da cultura do milho que foram empregados. Nesse sentido, esses resultados devem ser considerados como exploratórios de modo a orientar pesquisas futuras sobre a integração de estratégias de manejo que visem a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho. Além dessas ações de manejo, o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas às condições de estresses térmicos e hídricos poderão auxiliar na minimização desses impactos, assim como destacado nos trabalhos de Angulo et al. (2013) e Battisti et al. (2017) para a cultura da soja na região centro-sul do Brasil.

5.4. Conclusões

O estudo permitiu concluir que as mudanças climáticas irão afetar negativamente a produtividade da cultura do milho no Brasil, tanto na 1ª, como na 2ª safra (safrinha), sendo esta última mais afetada. As reduções na produtividade deverão se dar, principalmente, pelo encurtamento do ciclo da cultura e pelo maior déficit hídrico nos cenários futuros. Sendo assim, a adoção de estratégias de manejo de forma combinada, ajustando a época de semeadura, o ciclo da cultivar e a adubação nitrogenada, deverá resultar em redução das perdas e até mesmo em incremento das produtividades nos cenários futuros. Se considerada também a irrigação, o potencial de ganho de produtividade se evidencia de curto a longo prazo, tanto para milho de 1ª, como de 2ª safra, com algumas exceções no cenário RCP8.5 a longo prazo. Diante disso, se pode afirmar que as medidas de adaptação por meio das estratégias de manejo da cultura do milho são fundamentais para a produção de alimentos frente às mudanças do clima.

Referências

- ALBUQUERQUE, P. E. P. **Manejo de irrigação na cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção, v. 1, 2010.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 140, n. 1, p. 33–45, 2013.
- AMARAL, T. A.; LIMA, A. C. R. DE; ANDRADE, C. D. L. T. DE; SILVA, S. D. D. A. E. **PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-MAIZE PARA CULTIVARES DE MILHO RECOMENDADAS PARA A MICRORREGIÃO DE PELOTAS, RS**. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, p. 371–391, 2015.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da; MARENGO, J. A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L. A.; FERNANDEZ, J. P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretária de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007, p. 73.
- ANDRÉA, M. C. da S. **Model-based approach for maize yield gap analysis related to climate variability and nitrogen management**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- ÄNGSTRÖM, A. Solar and Terrestrial Radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Washington, v. 50, n. 210, p. 121-126, 1924.
- ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 170, p. 32–46, 2013.
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1057–1064, 2004.
- 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**, Oxford, v. 20, p. 2301–2320, 2014.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 390–396, 2013

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 390–396, 2013.

BATTISTI, R. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BENLLOCH-GONZALEZ, M.; BOCHICCHIO, R.; BERGER, J.; BRAMLEY, H.; PALTA, J. A. High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 165, p. 71–79, 2014.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. Parte II – Cultivos temporários, p. 239–260.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS, 2014. 84 p.

CARDOSO, C. O.; FARIA, R. T.; FOLEGATTI, M. V. Simulação do rendimento e riscos climáticos para o milho safrinha em Londrina-PR, utilizando o modelo CERES-maize. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 291–300, 2004.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 12, Safra 2015/16 – Décimo segundo levantamento**, Brasília, p. 1-182, 2016.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, Ibaraki, v. 4, p. 1–10, 2009.

DOS SANTOS, D. L.; SENTELHAS, P. C. Climate Change Scenarios and Their Impact on Water Balance and Sugarcane Yield in Southern Brazil. **Sugar Tech**, v. 16, n. 4, p. 356–365, 2014.

FAOSTAT. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Acesso em: 13 jan. 2017.

FISCHER, R. A. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 182, p. 9–18, 2015.

GLOVER, J. M. J.; MCCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 84, p. 172-175, 1958.

GUO, D.; WESTRA, S.; MAIER, H. R. Sensitivity of potential evapotranspiration to changes in climate variables for different climatic zones. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 21, p. 2107-2126, 2016.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. I.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KOO, J. SHELIA, V.; TSUJI, G. Y. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.6**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2015.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>. Acesso em: 12 mar. 2015.

IPCC. INTERGOVERNAMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007**. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2007, 104 p.

_____. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014, 151 p.

JALOTA, S. K.; RAY, S. S.; PANIGRAHY, S. EFFECTS OF ELEVATED CO₂ AND TEMPERATURE ON PRODUCTIVITY OF THREE MAIN CROPPING SYSTEMS IN PUNJAB STATE OF INDIA—A SIMULATION ANALYSIS. In: Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, ii, 2009, Ahmedabad. **Anais...**, Ahmedabad 2009.

KNUTTI, R.; SEDLÁČEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 369–379, 2013.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Clima e solo. In: CRUZ, J. C. (Ed.). **Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.

LEHMANN, N.; FINGER, R.; KLEIN, T.; CALANCA, P.; WALTER, A. Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale. **Agricultural Systems**, Essex, v. 117, p. 55–65, 2013.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, Berlin, v. 34, p. 179–204, 2009.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 179–204, 2009.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. J. DA; SILVA DIAS, M. A. F. DA (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Parte III – Variabilidade Climática, p. 407–424.

MARTINEZ, C. A.; OLIVEIRA, E. A. D. de; MELLO, T. R. P.; MARIN, A. L. A. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 8, n. número especial VI SMUD, p. 635–650, 2015.

MORAES, W. B.; JUNIOR, Wc.; MORAES, W. B.; CECILIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 5, n. 2, p. 3–14, 2011.

NOBRE, C.; MARENGO, J.; SAMPAIO, G.; BETTS, R.; KAY, G. Mudanças climáticas globais e regionais. In: **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil**. 2011. p. 56.

NOVAIS, M. V.; NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M. Efeito da adubação nitrogenada e de seu parcelamento sobre a cultura do milho, em Patos de Minas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 21, p. 193–202, 1974.

PALHARES, M. **Distribuição e população de plantas e produtividade de grãos de milho**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, Australia, v. 64, p. 114-118, 1940.

PROJETO RADAM BRASIL. **Levantamento de recursos naturais**, vols. 8 a 22 (Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1975-83).

RAUFF, K. O.; BELLO, R. A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. **Agricultural Sciences**, Boston, v. 6, p. 1098-1105, 2015.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUGI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrech: Kluwer Academic; International Consortium for Agricultural Systems Applications, p. 41–53, 1998.

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**, Amsterdam, v. 170, p. 166-182, 2013.

ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; VALDIVIA, R.O.; PORTER, C.H.; JANSSEN, S.; MUTTER, C.Z. Appendix 1. Guide for Regional Integrated Assessments: Handbook of Methods and Procedures, Version 5.1. In: ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. (Eds). **Handbook of Climate**

Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation Vol. 3. Imperial College Press, 2015, 331-386.

SENTELHAS, P. C.; BATTISITI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSER, F. de A. Yield Gap, Conceitos, definições e exemplos. **Informações agrônômicas**, Piracicaba, n. 155, p. 9–12, 2016.

SOIL CONSERVATION SERVICE. Hidrology section 4: In: _____. **National engineering handbook**. Washington: USDA, NRCS, 1972. Chap. 4/10.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p. 1351–1359, 2006.

SULEIMAN, A. A.; RITCHIE, J. T. Modeling soil water redistribution during second-stage evaporation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 377–386, 2003.

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

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 327–338, 2000.

TRIPATHY, R.; RAY, S. S.; SINGH, A. K. ANALYZING THE IMPACT OF RISING TEMPERATURE AND CO₂ ON GROWTH AND YIELD OF MAJOR CEREAL CROPS USING SIMULATION MODEL. In: Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, 2009, Ahmedabad. **Anais...**, Ahmedabad 2009.

WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, G.; KIMBALL, B. A.; WALL, G. W. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, v. 124, n. 3, p. 357–368, 2011. XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 36, p. 2644-2659, 2015.

YANG, J.; LI, H.; ZHANG, D.; WU, M.; PAN, B. Limited role of biochars in nitrogen fixation through nitrate adsorption. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 592, p. 758–765, 2017.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Considerando os resultados obtidos no presente estudo e atendendo aos objetivos propostos, é possível concluir que:

- a) as estimativas a partir de dados em grade de XAVIER, apresentaram grande similaridade se comparadas com dados observados, mostrando-se como uma alternativa para o preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos. Os modelos empregados na estimação da radiação solar global diária, apresentaram desempenho variável entre os locais de estudo, com estimativas mais próximas aos valores observados a partir do modelo Bristow-Campbell;
- b) as projeções climáticas em diferentes locais do Brasil, a curto (1980-2009), médio (2010-2039), e longo (2070-2099) prazos, considerando-se os cenários de emissão intermediário (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5), evidenciaram condições de clima futuro mais quente. Para a chuva, as projeções indicaram redução no total acumulado nas regiões Norte-Nordeste e aumento no Sul do país, com as regiões Sudeste e Centro-Oeste sendo áreas de transição;
- c) os coeficientes calibrados para os modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, apresentaram desempenho satisfatório, durante a fase de validação, para estimação da produtividade do milho da 1ª e da 2ª safra. Quando foi considerada a média das estimativas entre os dois modelos, o desempenho foi superior ao uso dos modelos de forma individual;
- d) quando avaliadas as sensibilidades dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA para estimação da produtividade do milho da 1ª e 2ª safra, ambos mostraram sensibilidade às variações de temperatura do ar, chuva e doses de nitrogênio, porém com pouca resposta as variações na [CO₂] atmosférico. Em ambos os modelos a sensibilidade foi mais acentuada para as variações na temperatura do ar;
- e) para as variações hídricas e de adubação nitrogenada, o modelo DSSAT/CERES-*Maize* apresentou maior sensibilidade do que o MONICA, o que o qualificou como o mais adequado para estudos sobre a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade da cultura do milho, uma vez que há interação entre a disponibilidade hídrica no solo e absorção de nutrientes;
- f) aplicando-se o modelo DSSAT/CERES-*Maize* para determinar a produtividade do milho e avaliar os impactos frente às mudanças climáticas, os resultados evidenciaram que estas irão afetar negativamente a produtividade do milho no Brasil, tanto na 1ª como na 2ª safra, sendo esta última a mais afetada, com reduções nas produtividades principalmente devido ao encurtamento do ciclo da cultura e pelo maior déficit hídrico nos cenários futuros;

g) por fim, a adoção de estratégias de manejo de forma combinada, ajustando época de semeadura, ciclo da cultivar e a adubação nitrogenada, resultaram em redução de perdas de produtividade do milho nos cenários de clima futuro. Quando incluído a irrigação a essas estratégias, o potencial de ganho de produtividade foi evidenciando a curto, médio e longo prazos, tanto para milho de 1^a como de 2^a safra, apenas com algumas poucas exceções, nas regiões analisadas.

ANEXOS

ANEXO AA - Alteração anual na temperatura mínima (°C), média de sete MCGs, para diferentes locais do Brasil, sob cenário de emissão intermediário (RCP45) e alta emissão (RCP8.5) a curto (2010-2039) (a,b) médio (2040-2069) (c,d) e longo prazos (2070-2099) (e,f), em relação ao período atual (1980-2009)

ANEXO AB - Alteração anual na temperatura máxima (°C), média de sete MCGs, para diferentes locais do Brasil, sob cenário de emissão intermediário (RCP45) e alta emissão (RCP8.5) a curto (2010-2039) (a,b) médio (2040-2069) (c,d) e longo prazos (2070-2099) (e,f), em relação ao período atual (1980-2009)

ANEXO AC - Alteração anual na chuva acumulada (%), média de sete MCGs, para diferentes locais do Brasil, sob cenário de emissão intermediário (RCP45) e alta emissão (RCP8.5) a curto (2010-2039) (a,b) médio (2040-2069) (c,d) e longo prazos (2070-2099) (e,f), em relação ao período atual (1980-2009)

ANEXO B - Locais, coordenadas geográficas, densidade de plantio, florescimento, produtividade de grãos de milho, datas de semeadura e colheita, dos ensaios usados no ajuste dos modelos DSSAT/CERES-*Maize*

Locais	Safra	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	DP ¹	FL (DAS)	Prod. (Kg ha ⁻¹)	Semeadura	Colheita
Cambará, PR		-23,03	-50,06	450	55,8	67	9753	09/10/09	04/03/10
Campo Mourão, PR		-23,03	-52,36	630	61,7	62	12209	14/10/09	23/02/10
Cascavel, PR		-24,95	-53,45	760	61,3	76	14197	21/10/09	04/03/10
Floresta, PR		-23,60	-52,08	490	69,2	67	10946	23/10/09	26/02/10
Goioerê, PR		-24,18	-53,02	505	57,5	67	9820	06/10/09	17/02/10
Guarapuava, PR	1 ^a	-25,38	-51,45	1120	66,3	74	13287	07/10/09	13/04/10
Londrina, PR		-23,30	-51,15	576	67,1	67	11279	07/10/09	05/03/10
Palotina, PR		-24,28	-53,83	360	70,8	67	10626	14/10/09	10/03/10
Pato Branco, PR		-26,22	-52,67	760	58,1	67	11873	10/10/09	10/03/10
Ponta Grossa, PR		-25,09	-50,15	975	64,2	67	10888	22/10/09	05/04/10
Santa Helena, PR		-24,54	-54,32	347	61,3	68	10114	08/10/09	18/02/10
Cambará, PR		-23,03	-50,06	450	64,2	64	8631	17/03/10	03/09/10
Campo Mourão, PR		-23,03	-52,36	630	57,9	65	8985	10/03/10	27/08/10
Floresta, PR		-23,60	-52,08	490	58,8	65	7776	12/03/10	01/09/10
Londrina, PR		-23,30	-51,15	576	66,7	59	9210	05/03/10	12/08/10
Palotina, PR	2 ^a	-24,28	-53,83	360	62,9	64	9947	04/03/10	17/08/10
Primeiro de Maio, PR		-22,85	-51,02	330	56,3	65	7802	03/03/10	20/08/10
Santa Helena, PR		-24,54	-54,32	347	67,1	65	7242	18/03/10	26/08/10
Sertãoópolis, PR		-23,05	-51,03	347	60,4	65	7982	01/03/10	18/08/10

*Lat. – latitude; Lon.- longitude; Alt. – altitude; ¹DP – densidade de plantio (mil plantas ha⁻¹); FL - florescimento; DAS – dias após a semeadura; Prod. – produtividade

ANEXO CA - Locais com sua respectiva localização geográfica, data de semeadura, colheita, produtividade e textura do solo utilizados no processo de avaliação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para milho 1ª safra

Local	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	Semeadura	Colheita	Prod. (kg ha ⁻¹)	Textura
Acreúna, GO	-17,38	-50,37	542	15/11/12	10/04/13	8793	Argilosa
Aral Moreira, MS	-22,93	-55,63	609	19/08/12	22/02/13	9300	Argilosa
Balsas, MA	-2,52	-44,03	24	25/10/12	05/05/13	8940	Arenosa
BambuÍ, MG	-20,00	-45,97	720	31/10/12	23/04/13	10327	Argilosa
Barreiras, BA	-12,01	-44,98	452	10/12/12	26/04/13	9000	Arenosa
Caarapó, MS	-22,63	-54,82	471	08/10/12	10/04/13	12060	Argilosa
Campo do Meio, MG	-21,10	-45,82	735	10/11/12	16/04/13	11977	Arenosa
Campo Verde, MT	-15,53	-55,17	668	22/11/12	30/04/13	11452	Arenosa
Capão Bonito, SP	-23,95	-48,62	725	23/09/12	06/03/13	11613	Arenosa
Carolina, MA	-7,63	-47,46	167	10/09/12	09/03/13	11040	Média
Casa Branca, SP	-21,76	-47,08	627	22/10/12	26/03/13	11997	Argilosa
Chapadão do Céu, GO	-18,40	-52,53	811	15/10/12	03/03/13	9770	Argilosa
Colinas, MA	-6,00	-44,23	141	14/10/12	20/04/13	10500	Média
Coromandel, MG	-18,47	-47,20	1177	06/11/12	08/04/13	13613	Arenosa
Correntina, BA	-13,30	-44,60	561	27/09/12	19/03/13	9780	Argilosa
Cristalina, GO	-16,77	-47,60	995	24/11/12	23/04/13	12567	Argilosa
Erechim, RS	-28,07	-51,38	828	07/10/12	31/03/13	13591	Argilosa
Fortuna, MA	-5,73	-44,90	215	09/10/12	23/03/13	10620	Média
Herval d Oeste, SC	-27,18	-51,48	523	15/09/12	15/04/13	10200	Argilosa
Herval d Oeste, SC	-27,18	-51,48	523	20/10/12	18/04/13	9600	Argilosa
Herval d Oeste, SC	-27,18	-51,48	523	05/09/12	10/03/13	10800	Argilosa
Horizontina, RS	-27,61	-54,30	343	18/08/12	18/02/13	8760	Argilosa
Ibicaré, SC	-27,08	-51,35	550	01/10/12	14/04/13	10680	Argilosa
Ibicaré, SC	-27,08	-51,35	550	14/09/12	12/03/13	10740	Argilosa
Iomere, SC	-27,00	-52,23	847	25/09/12	26/03/13	10980	Argilosa
Iporã D' Oeste, SC	-26,98	-53,53	557	23/08/12	25/02/13	11760	Argilosa
Ipumirim, SC	-27,07	-52,13	562	02/10/12	22/03/13	10740	Argilosa
Irineópolis, SC	-26,23	-50,78	762	28/09/12	15/03/13	11760	Argilosa
Irineópolis, SC	-26,23	-50,78	762	29/09/12	17/03/13	10920	Argilosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	15/12/12	23/03/13	10020	Arenosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	23/11/12	13/05/13	10680	Arenosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	15/11/12	12/05/13	8580	Arenosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	20/09/12	05/03/13	10680	Arenosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	15/08/12	09/02/13	9300	Arenosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	08/10/12	25/03/13	8700	Arenosa
Itaberá, SP	-23,85	-49,13	651	28/09/12	09/02/13	10740	Arenosa
Itaberá, SP,	-23,85	-49,13	651	10/11/12	05/05/13	11340	Arenosa
Itaí, SP	-23,42	-49,08	614	20/11/12	09/05/13	9840	Arenosa
Itaí, SP	-23,42	-49,08	614	09/12/12	27/04/13	8280	Arenosa
Itapeva, SP	-23,97	-48,87	684	15/10/12	08/04/13	10980	Arenosa
Itapeva, SP	-23,97	-48,87	684	04/11/12	24/03/13	11040	Arenosa
Itapiranga, SC	-27,17	-53,07	206	02/09/12	10/02/13	10620	Arenosa
Itararé, SP	-24,10	-49,82	740	05/10/12	15/03/13	10260	Arenosa
Itararé, SP	-24,10	-49,82	740	08/10/12	25/03/13	11820	Arenosa
Itumbiara, GO	-18,42	-49,20	448	06/11/12	01/04/13	10846	Arenosa
Ituporanga, SC	-27,40	-49,60	360	04/10/12	08/04/13	10380	Argilosa

*Lat. - latitude; Lon.- longitude; Alt. - altitude; Prod. - produtividade

ANEXO CB - Locais com sua respectiva localização geográfica, data de semeadura, colheita, produtividade e textura do solo utilizados no processo de avaliação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para milho 1ª safra

Local	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	Semeadura	Colheita	Prod. (kg ha ⁻¹)	Textura
Ituporanga, SC	-27,40	-49,60	360	26/09/12	04/03/13	13200	Argilosa
Jaborá, SC	-27,17	-51,73	689	11/10/12	05/04/13	12120	Argilosa
Jaborá, SC	-27,17	-51,73	689	14/09/12	01/04/13	11160	Argilosa
Jaboticaba, RS	-27,62	-53,27	561	28/08/12	04/02/13	10080	Arenosa
Jaboticaba, RS	-27,62	-53,27	561	04/09/12	18/02/13	10200	Arenosa
Jataí, GO	-17,87	-51,70	696	05/10/12	21/03/13	12120	Argilosa
Lagoa Vermelha, RS	-28,20	-51,52	801	12/10/12	25/05/13	11820	Argilosa
Liberato Salzano, RS	-27,60	-53,07	360	20/08/12	24/02/13	10320	Arenosa
Mafra, SC	-26,10	-49,80	793	20/09/12	14/03/13	12780	Arenosa
Mafra, SC	-26,10	-49,80	793	20/09/12	03/03/13	11040	Arenosa
Maravilha, SC	-26,75	-53,10	625	03/09/12	16/02/13	10980	Argilosa
Maravilha, SC	-26,75	-53,10	625	28/08/12	15/02/13	11520	Argilosa
Maravilha, SC	-26,75	-53,10	625	10/09/12	25/02/13	10740	Argilosa
Mineiros, GO	-17,57	-52,55	750	04/10/12	21/03/13	11220	Arenosa
Modelo, SC	-26,77	-53,05	470	18/09/12	09/02/13	10260	Argilosa
Nova Araça, RS	-28,65	-51,73	597	01/10/12	22/03/13	10140	Argilosa
Nova Erechim, SC	-26,90	-52,90	462	27/09/12	17/02/13	10980	Argilosa
Nova Prata, RS	-28,78	-51,60	662	01/10/12	22/03/13	10080	Argilosa
Nova Ramada, RS	-28,05	-53,68	511	10/09/13	10/03/13	11220	Argilosa
Orleans, SC	-28,35	-49,28	132	15/09/12	05/03/13	12840	Arenosa
Orleans, SC	-28,35	-49,28	132	06/10/12	31/03/13	11460	Arenosa
Palma Sola, SC	-26,33	-53,27	870	09/09/12	08/03/13	10800	Argilosa
Palma Sola, SC	-26,33	-53,27	870	10/09/12	14/03/13	11100	Argilosa
Palmeira das Missões, RS	-27,88	-53,30	639	06/09/12	20/02/13	11340	Arenosa
Palmeira das Missões, RS	-27,88	-53,30	639	15/08/12	20/01/13	10080	Arenosa
Paraí, RS	-28,58	-51,78	657	03/07/12	17/02/13	12060	Argilosa
Petrolândia, SC	-27,53	-49,68	410	25/09/12	08/03/13	10800	Arenosa
Pinhalzinho, SC	-26,83	-52,98	515	20/09/12	19/02/13	10680	Argilosa
Pinhalzinho, SC	-26,83	-52,98	515	17/09/12	16/02/13	10680	Argilosa
Pinheiro Preto, SC	-27,05	-51,22	696	26/09/12	18/03/13	13140	Argilosa
Pinheiro Preto, SC	-27,05	-51,22	696	25/09/12	17/03/13	12780	Argilosa
Pirituba, SC	-27,42	-51,77	430	04/09/12	10/03/13	11280	Argilosa
Ponte Serrada, SC	-26,87	-52,00	798	18/10/12	26/04/13	11940	Argilosa
Presidente Castelo Branco, SC	-27,22	-51,80	650	09/09/12	18/03/13	10800	Argilosa
Rondonópolis MT	-16,47	-54,63	470	01/12/12	23/04/13	11177	Arenosa
Santa Cruz das Palmeiras, SP	-21,42	-47,23	644	24/09/12	02/03/13	13744	Arenosa
Toledo, PR	-25,30	-53,92	683	22/09/12	22/02/13	12698	Argilosa
Toledo, PR	-25,12	-52,25	952	25/09/12	20/03/13	11107	Arenosa
Três Corações, MG	-21,68	-45,25	880	23/10/12	06/04/13	10883	Argilosa

*Lat. - latitude; Lon.- longitude; Alt. - altitude; Prod. - produtividade

ANEXO DA - Locais com sua respectiva localização geográfica, data de semeadura, colheita, produtividade e textura do solo utilizados no processo de avaliação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para milho 2ª safra

Local	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	Semeadura	Colheita	Prod. (kg ha ⁻¹)	Textura
Alto Parnaíba, MA	-9,10	-45,93	285	20/02/14	01/08/14	6840	Arenosa
Amambai, MS	-23,01	-55,22	480	10/02/13	28/07/13	6720	Arenosa
Amambai, MS	-23,01	-55,22	480	05/02/13	25/07/13	6060	Arenosa
Amambai, MS	-23,01	-55,22	480	10/02/14	18/07/14	6300	Arenosa
Antônio João, MS	-22,18	-55,93	681	10/02/14	28/09/14	6660	Argilosa
Aral Moreira, MS	-22,93	-55,63	609	05/03/11	16/08/11	6360	Média
Aral Moreira, MS	-22,93	-55,63	609	10/02/14	20/08/14	8100	Média
Aral Moreira, MS	-22,93	-55,63	609	20/02/14	15/08/14	6660	Média
Astorga, PR	-23,22	-51,65	675	25/02/13	03/08/13	6120	Arenosa
Bonito, MS	-21,12	-56,47	315	18/02/14	06/08/14	6780	Argilosa
Bonito, MS	-21,12	-56,47	315	15/03/14	28/08/14	6660	Argilosa
Caarapó, MS	-22,63	-54,82	471	07/02/14	12/07/14	6900	Argilosa
Caarapó, MS	-22,63	-54,82	471	20/02/11	25/07/11	7020	Argilosa
Caarapó, MS	-22,63	-54,82	471	13/03/14	28/08/14	6120	Argilosa
Caarapó, MS	-22,63	-54,82	471	15/02/13	15/08/13	7440	Argilosa
Caarapó, MS	-22,63	-54,82	471	13/01/14	27/06/14	6420	Argilosa
Cambé, PR	-23,27	-51,27	650	24/02/13	20/08/13	7440	Argilosa
Cambé, PR	-23,27	-51,27	650	27/02/13	15/08/13	7500	Argilosa
Campo Mourão, PR	-24,03	-52,37	585	10/02/12	05/08/12	8220	Argilosa
Campo Verde, MT	-15,53	-55,16	670	10/03/12	25/08/12	6180	Média
Canarana, MT	-13,55	-52,26	670	27/02/13	03/08/13	7380	Arenosa
Cornélio Procópio, PR	-23,17	-50,63	676	28/02/13	10/08/13	7140	Argilosa
Cornélio Procópio, PR	-23,17	-50,63	676	08/03/13	23/08/13	6180	Argilosa
Costa Rica, MS	-18,53	-53,12	641	18/02/14	11/07/14	8160	Arenosa
Dourados, MS	-22,22	-54,08	430	25/02/13	06/08/13	6660	Argilosa
Dourados, MS	-22,22	-54,08	430	25/02/13	06/07/13	6300	Argilosa
Engenheiro Beltrão, PR	-23,78	-52,27	470	07/02/12	10/07/12	8220	Argilosa
Engenheiro Beltrão, PR	-23,78	-52,27	470	20/02/12	20/07/12	8040	Argilosa
Floresta, PR	-23,58	-52,07	392	02/03/13	03/08/13	6420	Argilosa
Floresta, PR	-23,58	-52,07	392	01/03/13	06/08/13	6720	Argilosa
Ibiporã, PR	-23,27	-51,03	497	09/03/12	22/08/12	6780	Argilosa
Igarapu, PR	-23,18	-51,82	558	26/02/13	23/07/13	7260	Argilosa
Itambé, PR	-23,65	-51,98	428	24/02/12	15/08/12	7740	Argilosa
Ivaiporã, PR	-24,23	-51,68	692	20/02/13	15/08/13	6240	Argilosa
Kaloré, PR	-23,82	-51,67	520	03/03/12	28/08/12	6780	Argilosa
Laguna Carapa, MS	-22,53	-55,13	509	20/02/11	05/08/11	6300	Arenosa
Leópolis, PR	-23,07	-50,75	486	10/03/13	20/08/13	6960	Arenosa
Lidianópolis, PR	-24,01	-51,65	570	08/03/13	28/08/13	6360	Argilosa
Londrina, PR	-23,03	-51,15	585	15/03/12	26/08/12	7260	Argilosa
Londrina, PR	-23,03	-51,15	585	06/03/12	18/08/12	7440	Argilosa
Mamborê, PR	-24,32	-52,52	762	02/02/13	25/07/13	6000	Média
Maracaju, MS	-21,06	-55,17	384	10/02/11	20/07/11	7320	Arenosa
Maracaju, MS	-21,06	-55,17	384	27/02/14	19/08/14	6840	Arenosa
Maracaju, MS	-21,06	-55,17	384	07/02/13	16/07/13	6660	Arenosa
Marialva, PR	-23,48	-51,78	670	25/02/12	22/08/12	6960	Argilosa
Marialva, PR	-23,48	-51,78	670	01/03/12	10/08/12	6960	Argilosa
Marialva, PR	-23,48	-51,78	670	04/03/12	23/08/12	7200	Argilosa

*Lat. - latitude; Lon. - longitude; Alt. - altitude; Prod. - produtividade

ANEXO DB – Locais com sua respectiva localização geográfica, data de semeadura, colheita, produtividade e textura do solo utilizados no processo de avaliação dos modelos DSSAT/CERES-*Maize* e MONICA, para milho 2ª safra

Local	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	Semeadura	Colheita	Prod. (kg ha ⁻¹)	Textura
Maringá, PR	-23,42	-51,93	596	27/02/13	05/08/13	7080	Arenosa
Naviraí, MS	-23,05	-54,18	362	18/02/14	01/08/14	8100	Argilosa
Naviraí, MS	-23,05	-54,18	362	06/02/14	06/08/14	6660	Argilosa
Ourizona, PR	-23,04	-52,18	525	02/03/13	05/08/13	6900	Argilosa
Palmas, TO	-10,19	-48,30	280	13/03/14	15/08/14	5820	Argilosa
Paraíso do Norte, PR	-23,27	-52,06	372	21/02/13	05/08/13	7680	Argilosa
Pedro Afonso, TO	-8,96	-48,18	187	07/03/14	10/08/14	6360	Média
Ponta Porã, MS	-22,53	-55,72	655	05/02/14	16/08/14	6420	Argilosa
Querência, MT	-12,58	-52,18	670	26/02/13	10/08/13	7260	Arenosa
Quinta do Sol, PR	-23,85	-52,12	422	05/02/13	15/07/13	6000	Argilosa
Rio Brilhante, MS	-21,08	-54,53	312	12/02/14	14/07/14	6240	Arenosa
Rio Verde, GO	-17,78	-50,92	715	25/01/14	07/07/14	7860	Média
Rio Verde, GO	-17,78	-50,92	715	08/01/13	25/06/13	7800	Média
Rio Verde, GO	-17,78	-50,92	715	28/01/14	06/07/14	7920	Média
São Sebastião Amoreira, PR	-23,45	-50,75	664	08/03/13	26/08/13	6900	Arenosa
Sapezal, MT	-13,00	-58,75	670	07/03/12	28/08/12	6960	Arenosa
Sertãoópolis, PR	-23,05	-51,03	361	10/03/12	22/08/12	6180	Argilosa
Taguatinga, TO	-12,4	-46,41	604	20/02/13	30/07/13	7140	Argilosa
Terra Boa, PR	-23,77	-52,43	575	02/03/12	12/08/12	6180	Argilosa
Uraí, PR	-23,02	-50,78	435	10/03/12	30/08/12	6180	Argilosa

*Lat. - latitude; Lon.- longitude; Alt. - altitude

ANEXO E - Alteração da produtividade atingível (%) do milho da 1ª safra, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-Maize, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível	Alteração da produtividade atingível (%)					
	(kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	6598	-58	-64	-64	-60	-63	-71
RSCA	8732	-43	-47	-52	-45	-51	-66
SCCN	9388	-40	-41	-42	-41	-43	-51
SCCH	9268	-52	-56	-57	-54	-57	-67
PRCA	9609	-34	-37	-39	-36	-40	-52
PRLO	8595	-47	-50	-51	-49	-53	-64
SPAV	9353	-22	-26	-28	-25	-28	-38
SPFR	9006	-14	-16	-18	-15	-17	-25
SPVO	9180	-34	-39	-44	-36	-45	-61
MGBA	8847	-38	-39	-40	-39	-39	-46
MGUB	7767	-28	-30	-33	-28	-33	-46
MGPM	6997	-31	-34	-37	-32	-38	-46
MGUN	8581	-56	-57	-60	-58	-60	-68
MSIV	8668	-47	-54	-59	-51	-60	-75
MSPA	9446	-29	-35	-41	-30	-41	-60
MTDI	8185	-32	-42	-50	-35	-51	-71
GOCA	9642	-38	-40	-42	-38	-42	-51
GOJA	9835	-32	-37	-42	-34	-41	-56
DFBR	9175	-22	-22	-25	-22	-26	-31
BABJ	5136	-66	-68	-71	-67	-72	-77
BABA	7428	-66	-68	-72	-67	-72	-80
BARR	3674	-55	-63	-66	-57	-67	-73
PIBJ	6554	-53	-61	-66	-54	-68	-81
MAAP	8435	-40	-48	-55	-39	-56	-72
MACA	8461	-31	-39	-46	-29	-50	-69
MABC	6225	-58	-64	-69	-61	-71	-80
TOTA	9069	-40	-44	-49	-41	-49	-64
TOPN	8441	-46	-52	-58	-47	-60	-77
TOPA	7532	-42	-48	-54	-43	-56	-74
PASF	8614	-27	-38	-46	-28	-50	-68
PAMA	8267	-44	-52	-60	-46	-64	-78
Média	8216	-41	-45	-49	-42	-50	-63

ANEXO F - Alteração na duração do ciclo (dias) do milho da 1ª safra, para projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Local	Duração ciclo	Alteração do ciclo (dias)					
	(dias)	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	131	-2	-7	-10	-3	-10	-19
RSCA	130	-6	-11	-15	-9	-16	-24
SCCN	152	-12	-18	-21	-13	-23	-34
SCCH	130	-6	-11	-14	-7	-15	-23
PRCA	148	-9	-16	-20	-11	-21	-33
PRLO	119	-5	-9	-12	-7	-13	-20
SPAV	128	-6	-11	-13	-7	-14	-22
SPFR	134	-7	-12	-15	-9	-17	-25
SPVO	113	-5	-8	-10	-6	-11	-17
MGBA	124	-5	-9	-11	-6	-12	-19
MGUB	123	-5	-10	-12	-7	-13	-21
MGPM	128	-6	-11	-14	-7	-15	-23
MGUN	114	-7	-9	-11	-7	-12	-17
MSIV	113	-7	-11	-13	-8	-14	-19
MSPA	112	-5	-8	-10	-6	-11	-17
MTDI	110	-7	-10	-20	-8	-13	-25
GOCA	123	-6	-11	-13	-7	-14	-21
GOJA	117	-5	-9	-12	-6	-12	-19
DFBR	139	-7	-13	-17	-9	-18	-28
BABJ	107	-3	-5	-7	-3	-8	-13
BABA	111	-4	-7	-9	-4	-10	-16
BARR	107	-3	-7	-8	-4	-9	-16
PIBJ	111	-4	-9	-11	-5	-12	-18
MAAP	109	-5	-8	-10	-5	-11	-16
MACA	109	-4	-8	-10	-5	-11	-17
MABC	109	-4	-7	-9	-5	-10	-15
TOTA	114	-4	-9	-11	-5	-12	-18
TOPN	107	-4	-8	-9	-5	-11	-17
TOPA	109	-4	-8	-10	-5	-11	-17
PASF	113	-5	-9	-11	-5	-13	-19
PAMA	107	-4	-7	-9	-5	-10	-15
Média	119	-5	-10	-12	-6	-13	-20

ANEXO G - Chuva acumulada (mm) no ciclo da cultura do milho no cenário atual (1980-2009) e nos cenários sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 1ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	515	541	539	534	532	562	507
RSCA	624	602	610	590	612	613	564
SCCN	788	754	733	730	749	739	711
SCCH	693	681	668	671	681	685	655
PRCA	744	726	707	706	716	716	665
PRLO	756	744	720	720	719	719	701
SPAV	870	844	832	822	842	823	787
SPFR	1141	1095	1058	1060	1062	1054	997
SPVO	802	772	757	736	750	742	713
MGBA	996	967	936	934	946	973	901
MGUB	1060	1034	991	986	998	986	907
MGPM	1010	976	913	908	940	927	854
MGUN	862	820	783	768	797	771	749
MSIV	610	588	561	545	565	552	526
MSPA	846	817	793	772	796	785	746
MTDI	982	984	964	780	965	952	718
GOCA	998	946	892	873	916	891	818
GOJA	1004	960	885	869	946	884	834
DFBR	979	945	886	853	931	858	803
BABJ	507	498	443	444	473	437	396
BABA	615	588	544	515	577	531	472
BARR	389	371	319	309	354	304	256
PIBJ	585	563	500	471	561	468	401
MAAP	778	737	670	627	742	637	546
MACA	895	871	818	762	886	729	634
MABC	578	570	555	473	559	478	406
TOTA	1044	987	934	893	981	908	838
TOPN	900	860	804	765	849	768	688
TOPA	917	856	810	773	850	785	718
PASF	994	943	869	822	941	788	715
PAMA	887	873	814	715	834	721	628
Média	818	791	752	723	776	735	673

ANEXO H - Temperatura máxima (°C) no ciclo da cultura do milho no cenário atual (1980-2009) e nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para milho 1ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	28	29	29	30	29	30	31
RSCA	29	30	31	31	30	31	33
SCCN	26	27	28	29	28	29	31
SCCH	29	30	31	31	30	31	33
PRCA	27	28	29	29	28	29	31
PRLO	30	31	32	32	31	33	35
SPAV	29	30	30	31	30	31	33
SPFR	27	28	29	30	28	30	31
SPVO	31	32	33	34	32	34	36
MGBA	30	30	31	32	31	32	34
MGUB	30	31	31	32	31	32	34
MGPM	29	30	31	31	30	31	33
MGUN	31	32	33	33	32	34	36
MSIV	31	32	33	34	33	34	36
MSPA	31	32	33	34	33	34	36
MTDI	32	33	34	35	33	35	35
GOCA	29	30	31	32	30	32	34
GOJA	31	31	33	33	32	33	35
DFBR	27	28	29	29	28	29	31
BABJ	32	33	34	34	33	35	36
BABA	31	32	34	34	33	34	36
BARR	33	34	35	35	34	36	38
PIBJ	33	34	35	35	34	36	38
MAAP	32	33	34	34	33	35	37
MACA	31	32	33	34	32	34	36
MABC	32	33	34	34	33	35	36
TOTA	31	32	33	34	32	34	36
TOPN	32	33	34	34	33	35	37
TOPA	31	32	33	34	33	34	36
PASF	31	32	33	34	32	34	36
PAMA	31	32	33	34	33	34	36
Média	30	31	32	32	31	33	34

ANEXO I - Temperatura mínima (°C) no ciclo da cultura do milho no cenário atual (1980-2009) e nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 1ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	18	19	20	20	19	20	22
RSCA	18	19	19	20	19	20	22
SCCN	16	17	18	18	17	18	20
SCCH	18	19	20	20	19	21	22
PRCA	16	17	18	18	17	19	20
PRLO	20	20	21	22	21	22	24
SPAV	18	19	20	20	19	21	22
SPFR	19	19	20	21	20	21	23
SPVO	21	22	23	23	22	23	25
MGBA	19	19	20	20	19	21	22
MGUB	19	20	21	21	20	21	23
MGPM	19	19	20	21	20	21	22
MGUN	20	21	22	22	21	23	24
MSIV	21	22	22	23	22	23	25
MSPA	21	22	23	23	22	23	25
MTDI	21	23	24	0	23	25	2
GOCA	20	20	21	22	21	22	23
GOJA	20	21	22	22	21	22	24
DFBR	18	19	20	20	19	20	22
BABJ	21	22	23	23	22	23	25
BABA	21	22	23	23	22	23	25
BARR	21	22	23	23	22	24	26
PIBJ	20	21	22	23	22	23	25
MAAP	22	23	23	24	23	24	26
MACA	23	23	24	25	24	25	27
MABC	22	23	24	24	23	25	26
TOTA	21	22	23	23	22	23	25
TOPN	23	23	24	25	24	25	27
TOPA	22	23	24	24	23	25	27
PASF	21	22	23	23	22	24	26
PAMA	23	24	25	25	24	26	27
Média	20	21	22	21	21	22	23

ANEXO J - Alteração da produtividade atingível (%) do milho da 2ª safra, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	Alteração da produtividade atingível (%)					
		RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	6457	-48	-43	-44	-47	-44	-49
RSCA	6711	-26	-22	-22	-24	-22	-28
SCCN	4330	-22	-6	-1	-18	4	2
SCCH	7472	-43	-44	-46	-43	-43	-53
PRCA	4630	-42	-38	-36	-40	-29	-39
PRLO	6159	-61	-64	-66	-62	-63	-73
SPAV	7303	-64	-62	-62	-63	-55	-62
SPFR	5645	-74	-74	-75	-75	-65	-73
SPVO	5853	-68	-73	-74	-71	-68	-78
MGBA	4402	-74	-72	-74	-74	-70	-76
MGUB	3465	-57	-55	-56	-57	-49	-59
MGPM	2395	-54	-55	-55	-54	-49	-58
MGUN	3123	-69	-70	-70	-69	-67	-71
MSIV	6996	-65	-70	-71	-66	-70	-78
MSPA	5227	-69	-73	-75	-71	-70	-79
MTDI	6989	-74	-78	-50	-74	-80	-70
GOCA	4144	-77	-77	-77	-77	-74	-78
GOJA	6613	-76	-77	-77	-78	-76	-81
DFBR	3614	-68	-67	-66	-68	-59	-63
BABJ	1717	-52	-52	-53	-52	-52	-53
BABA	2846	-63	-67	-67	-66	-66	-69
BARR	1828	-46	-49	-51	-47	-50	-55
PIBJ	2774	-54	-58	-60	-54	-61	-68
MAAP	4938	-65	-70	-72	-67	-72	-78
MACA	5380	-55	-63	-67	-56	-68	-77
MABC	4328	-52	-58	-62	-54	-62	-72
TOTA	4618	-66	-68	-71	-68	-70	-77
TOPN	4673	-65	-71	-75	-66	-75	-80
TOPA	3309	-52	-61	-65	-56	-64	-72
PASF	5836	-44	-52	-59	-45	-59	-73
PAMA	5147	-50	-58	-63	-50	-64	-75
Média	4804	-58	-60	-60	-58	-58	-65

ANEXO K - Alteração na duração do ciclo (dias) do milho da 2ª safra, para projeções de clima futuro a partir de sete MCG, a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2009), de acordo com simulações de modelo DSSAT/CERES-Maize, para as 31 localidades avaliadas, em diferentes regiões brasileiras

Local	Duração ciclo	Redução do ciclo (dias)					
	(dias)	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	210	-12	-25	-33	-14	-36	-63
RSCA	199	-17	-32	-39	-23	-44	-66
SCCN	211	-10	-24	-30	-12	-33	-63
SCCH	186	-16	-28	-35	-19	-37	-59
PRCA	197	-6	-22	-28	-9	-32	-58
PRLO	145	-7	-15	-19	-10	-23	-36
SPAV	152	-21	-29	-31	-25	-30	-41
SPFR	134	-22	-27	-29	-25	-29	-37
SPVO	114	-11	-14	-15	-11	-14	-20
MGBA	122	7	0	-3	5	-5	-14
MGUB	119	-1	-4	-7	-3	-6	-15
MGPM	119	1	-3	-4	0	-5	-13
MGUN	103	3	0	-2	2	-2	-8
MSIV	131	-12	-18	-21	-14	-21	-31
MSPA	109	-6	-9	-11	-7	-10	-15
MTDI	114	-11	-14	-14	-11	-16	-23
GOCA	115	-4	-7	-9	-5	-10	-17
GOJA	125	-10	-14	-17	-11	-17	-25
DFBR	117	-12	-15	-16	-13	-13	-20
BABJ	97	8	4	3	8	2	-3
BABA	104	3	-1	-3	2	-4	-9
BARR	103	1	-3	-5	0	-5	-11
PIBJ	103	1	-3	-4	1	-5	-10
MAAP	105	-7	-11	-12	-8	-12	-15
MACA	105	-7	-10	-11	-7	-12	-16
MABC	110	-4	-8	-10	-5	-11	-16
TOTA	109	-6	-10	-12	-7	-12	-16
TOPN	105	-4	-7	-9	-5	-10	-17
TOPA	104	-2	-5	-7	-3	-8	-14
PASF	110	-5	-9	-11	-5	-11	-19
PAMA	103	-3	-7	-8	-4	-9	-15
Média	128	-6	-12	-15	-8	-15	-25

ANEXO L - Chuva acumulada (mm) no ciclo da cultura do milho no cenário atual (1980-2009) e nos cenários sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	816	810	794	751	799	773	690
RSCA	1014	964	918	850	923	843	765
SCCN	1089	1062	985	980	1032	956	907
SCCH	983	934	887	832	894	882	770
PRCA	675	682	650	651	682	675	592
PRLO	534	545	516	504	532	542	471
SPAV	539	504	493	479	495	536	497
SPFR	466	433	420	416	413	441	418
SPVO	378	373	360	361	357	408	357
MGBA	355	354	363	354	349	397	365
MGUB	470	468	461	457	452	500	457
MGPM	386	381	366	370	377	409	392
MGUN	380	386	371	371	386	401	387
MSIV	475	471	447	452	450	519	422
MSPA	401	398	390	394	383	438	392
MTDI	579	584	569	619	586	559	600
GOCA	428	421	404	403	412	447	419
GOJA	554	536	520	530	526	555	521
DFBR	461	455	432	430	457	465	449
BABJ	213	223	193	192	203	208	196
BABA	306	308	285	279	292	283	284
BARR	251	247	223	215	237	235	216
PIBJ	390	394	366	352	378	353	333
MAAP	523	529	490	474	498	475	447
MACA	698	675	648	616	670	634	603
MABC	600	573	581	548	600	584	543
TOTA	556	537	510	504	521	512	522
TOPN	599	573	553	535	571	532	527
TOPA	610	588	555	548	567	562	564
PASF	855	809	790	764	817	786	738
PAMA	879	822	832	775	871	822	765
Média	563	550	528	516	540	540	504

ANEXO M - Temperatura máxima (°C) no ciclo da cultura do milho no cenário atual (1980-2009) e nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para milho 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	22	23	23	23	23	22	23
RSCA	23	23	24	26	22	22	23
SCCN	22	22	21	21	21	20	18
SCCH	24	22	24	24	22	23	24
PRCA	23	24	25	25	24	22	25
PRLO	27	27	29	28	27	25	27
SPAV	26	27	28	29	28	29	31
SPFR	26	25	27	28	26	25	30
SPVO	30	31	32	33	31	33	35
MGBA	29	29	30	31	29	31	33
MGUB	29	30	31	31	30	31	34
MGPM	28	29	30	31	29	31	33
MGUN	31	32	33	33	32	33	35
MSIV	29	30	31	32	30	32	34
MSPA	30	31	33	33	32	33	35
MTDI	32	33	34	35	33	35	37
GOCA	29	30	31	31	30	31	33
GOJA	30	31	32	33	31	33	35
DFBR	26	27	28	29	28	29	31
BABJ	32	33	33	34	32	34	35
BABA	32	33	33	34	33	34	36
BARR	32	33	34	35	33	35	36
PIBJ	33	33	34	35	34	35	37
MAAP	32	33	34	34	33	35	36
MACA	32	33	33	34	33	34	36
MABC	31	32	33	33	32	33	35
TOTA	31	32	33	34	32	34	36
TOPN	33	33	34	35	34	35	37
TOPA	32	33	34	34	33	34	36
PASF	32	33	34	34	33	34	36
PAMA	32	33	34	34	33	34	36
Média	29	30	31	31	30	31	33

ANEXO N - Temperatura mínima (°C) no ciclo da cultura do milho no cenário atual (1980-2009) e nos cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	13	13	14	14	14	13	14
RSCA	13	13	14	15	12	12	13
SCCN	12	12	11	12	11	11	9
SCCH	13	12	14	14	12	13	14
PRCA	12	12	13	14	12	11	14
PRLO	16	16	17	17	16	15	17
SPAV	15	17	18	18	17	18	20
SPFR	17	16	18	19	17	16	21
SPVO	19	20	21	22	21	22	24
MGBA	15	16	17	17	16	18	20
MGUB	17	18	19	19	18	20	22
MGPM	17	18	19	19	18	19	21
MGUN	19	20	21	21	20	21	23
MSIV	18	19	20	20	19	21	23
MSPA	19	20	21	22	20	22	24
MTDI	20	22	23	23	22	24	26
GOCA	18	19	20	21	19	21	23
GOJA	17	18	19	20	18	20	22
DFBR	17	18	19	19	18	20	21
BABJ	20	21	21	22	20	22	23
BABA	20	21	22	22	21	23	24
BARR	20	21	22	23	21	23	25
PIBJ	20	21	22	22	21	23	24
MAAP	21	22	23	24	22	24	26
MACA	23	23	24	25	24	25	27
MABC	22	23	23	24	23	24	26
TOTA	21	22	22	23	22	23	25
TOPN	22	23	24	25	23	25	27
TOPA	22	23	24	25	23	25	27
PASF	21	22	23	23	22	24	26
PAMA	23	24	25	25	24	26	27
Média	18	19	20	20	19	20	22

ANEXO O - Evapotranspiração real (ET_r) no cenário atual (1980-2009) e nos cenários futuros de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 1ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	3,0	3,7	3,8	3,9	3,7	3,9	3,9
RSCA	3,2	4,3	4,5	4,5	4,4	4,6	4,6
SCCN	3,1	4,5	4,7	4,7	4,6	4,8	5,0
SCCH	3,4	4,6	4,8	4,9	4,7	4,9	5,1
PRCA	3,0	4,4	4,5	4,6	4,4	4,6	4,8
PRLO	3,6	5,0	5,1	5,2	5,0	5,2	5,3
SPAV	3,3	5,2	5,3	5,4	5,3	5,5	5,7
SPFR	3,4	5,5	5,7	5,8	5,6	5,8	6,1
SPVO	3,8	5,8	5,9	5,9	5,8	6,0	6,1
MGBA	3,4	5,1	5,2	5,3	5,2	5,4	5,5
MGUB	3,2	4,5	4,6	4,6	4,5	4,7	4,7
MGPM	2,8	3,8	3,9	3,9	3,8	4,0	4,0
MGUN	3,5	5,2	5,3	5,3	5,2	5,3	5,5
MSIV	3,6	5,1	5,1	5,1	5,0	5,1	5,3
MSPA	3,8	6,2	6,2	6,3	6,1	6,4	6,5
MTDI	3,1	6,2	6,3	4,0	6,2	6,4	4,1
GOCA	3,5	5,5	5,6	5,6	5,5	5,6	5,8
GOJA	3,6	6,3	6,3	6,4	6,3	6,5	6,6
DFBR	3,3	5,1	5,2	5,3	5,2	5,3	5,6
BABJ	3,1	4,0	3,9	3,9	3,9	4,0	3,9
BABA	3,2	4,3	4,3	4,2	4,3	4,3	4,3
BARR	2,0	2,0	1,9	1,9	2,0	1,9	1,7
PIBJ	2,5	2,9	2,8	2,7	2,9	2,7	2,4
MAAP	3,5	5,6	5,5	5,3	5,6	5,4	5,2
MACA	3,5	6,1	6,0	5,9	6,1	5,9	5,6
MABC	2,4	2,6	2,5	2,3	2,5	2,3	2,0
TOTA	3,9	5,9	5,9	5,9	5,9	6,0	6,1
TOPN	3,7	6,0	6,0	5,9	6,0	6,0	6,0
TOPA	3,2	4,3	4,3	4,2	4,3	4,2	3,9
PASF	3,2	5,8	5,8	5,8	5,8	5,7	5,7
PAMA	3,3	5,6	5,5	5,3	5,5	5,3	5,2
Média	3,3	4,9	4,9	4,8	4,9	4,9	4,9

ANEXO P - Evapotranspiração da cultura (ETc) no cenário atual (1980-2009) e nos cenários futuros de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 1ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	3,84	7,86	8,08	8,22	7,90	8,24	8,73
RSCA	3,94	7,95	8,21	8,41	8,01	8,45	9,04
SCCN	3,49	7,13	7,40	7,56	7,21	7,62	8,18
SCCH	3,85	8,06	8,34	8,50	8,13	8,55	9,11
PRCA	3,25	6,39	6,62	6,75	6,45	6,80	7,27
PRLO	4,09	8,01	8,24	8,38	8,07	8,41	8,90
SPAV	3,56	6,71	6,89	7,00	6,77	7,04	7,43
SPFR	3,55	6,61	6,8	6,91	6,67	6,95	7,32
SPVO	4,22	8,07	8,32	8,45	8,12	8,47	8,95
MGBA	3,64	7,37	7,56	7,68	7,42	7,72	8,11
MGUB	3,59	6,29	6,48	6,55	6,35	6,59	6,89
MGPM	3,39	5,92	6,13	6,21	5,99	6,24	6,52
MGUN	3,84	8,03	8,25	8,39	8,08	8,41	8,85
MSIV	4,13	8,45	8,73	8,89	8,51	8,92	9,58
MSPA	4,12	8,38	8,65	8,79	8,43	8,80	9,34
MTDI	4,54	4,66	4,84	4,96	4,69	4,98	5,54
GOCA	3,75	7,50	7,73	7,86	7,56	7,89	8,37
GOJA	3,73	7,75	8,03	8,18	7,80	8,20	8,72
DFBR	3,44	6,41	6,6	6,73	6,46	6,76	7,17
BABJ	4,17	9,47	9,73	9,85	9,54	9,94	10,35
BABA	3,86	8,55	8,82	8,98	8,61	9,04	9,53
BARR	3,79	7,16	7,25	7,25	7,20	7,25	6,98
PIBJ	3,39	6,46	6,54	6,54	6,49	6,53	6,32
MAAP	3,75	8,01	8,26	8,40	8,05	8,46	8,95
MACA	3,64	7,54	7,73	7,84	7,55	7,93	8,38
MABC	3,34	6,62	6,69	6,71	6,63	6,73	6,56
TOTA	4,07	7,83	8,07	8,22	7,87	8,27	8,72
TOPN	3,87	7,99	8,25	8,39	8,03	8,47	8,93
TOPA	3,61	6,75	6,89	6,93	6,79	6,97	6,87
PASF	3,21	6,76	6,99	7,13	6,79	7,22	7,68
PAMA	3,49	7,60	7,80	7,95	7,63	8,02	8,49
Média	3,75	7,36	7,58	7,70	7,41	7,74	8,12

ANEXO Q - Evapotranspiração relativa (ET_r/ET_c) no cenário atual (1980-2009) e nos cenários futuros de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 1ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	0,77	0,48	0,47	0,47	0,47	0,48	0,45
RSCA	0,82	0,55	0,55	0,54	0,56	0,55	0,52
SCCN	0,90	0,64	0,63	0,63	0,64	0,63	0,62
SCCH	0,88	0,58	0,57	0,57	0,58	0,58	0,56
PRCA	0,92	0,69	0,68	0,68	0,69	0,68	0,66
PRLO	0,88	0,63	0,63	0,62	0,63	0,62	0,60
SPAV	0,91	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77
SPFR	0,95	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83
SPVO	0,91	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71	0,69
MGBA	0,93	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69
MGUB	0,88	0,73	0,71	0,71	0,72	0,71	0,69
MGPM	0,82	0,65	0,64	0,63	0,65	0,64	0,62
MGUN	0,91	0,65	0,64	0,63	0,65	0,64	0,62
MSIV	0,87	0,61	0,59	0,58	0,59	0,58	0,55
MSPA	0,92	0,74	0,73	0,72	0,73	0,73	0,71
MTDI	0,97	0,83	0,81	0,80	0,82	0,81	0,78
GOCA	0,94	0,73	0,72	0,71	0,73	0,72	0,70
GOJA	0,98	0,81	0,79	0,78	0,81	0,79	0,76
DFBR	0,95	0,80	0,79	0,78	0,80	0,79	0,78
BABJ	0,75	0,43	0,41	0,40	0,42	0,40	0,38
BABA	0,84	0,51	0,49	0,48	0,50	0,48	0,45
BARR	0,52	0,29	0,26	0,26	0,28	0,26	0,24
PIBJ	0,75	0,45	0,42	0,41	0,45	0,41	0,38
MAAP	0,92	0,70	0,66	0,63	0,70	0,64	0,58
MACA	0,95	0,81	0,79	0,76	0,81	0,75	0,68
MABC	0,72	0,39	0,37	0,34	0,38	0,33	0,31
TOTA	0,95	0,76	0,74	0,73	0,75	0,73	0,70
TOPN	0,96	0,75	0,73	0,71	0,75	0,71	0,67
TOPA	0,88	0,65	0,62	0,61	0,64	0,61	0,57
PASF	0,98	0,86	0,83	0,81	0,85	0,80	0,75
PAMA	0,95	0,74	0,71	0,67	0,72	0,67	0,62
Média	0,88	0,66	0,65	0,64	0,66	0,64	0,61

ANEXO R - Evapotranspiração real (ET_r) no cenário atual (1980-2009) e nos cenários futuros de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	1,60	2,89	2,99	3,03	2,92	3,05	3,23
RSCA	1,68	3,15	3,35	3,41	3,21	3,38	3,60
SCCN	1,82	3,21	3,29	3,35	3,20	3,36	3,52
SCCH	1,88	3,31	3,46	3,50	3,34	3,55	3,73
PRCA	1,83	2,79	2,95	3,02	2,85	3,05	3,29
PRLO	2,33	3,29	3,39	3,41	3,32	3,48	3,62
SPAV	2,12	3,35	3,49	3,51	3,40	3,63	3,82
SPFR	2,33	3,46	3,59	3,67	3,49	3,70	3,97
SPVO	2,67	3,62	3,63	3,67	3,54	3,88	3,87
MGBA	2,24	2,75	2,92	2,96	2,77	3,14	3,23
MGUB	1,96	2,43	2,49	2,52	2,43	2,62	2,68
MGPM	1,69	1,89	1,92	1,94	1,90	2,06	2,07
MGUN	2,49	3,23	3,27	3,31	3,26	3,44	3,55
MSIV	2,35	3,44	3,52	3,60	3,45	3,69	3,77
MSPA	2,71	3,76	3,79	3,88	3,72	4,05	4,03
MTDI	2,60	4,38	4,46	3,58	4,42	4,55	3,86
GOCA	2,54	3,44	3,46	3,52	3,44	3,69	3,78
GOJA	2,64	4,16	4,27	4,39	4,16	4,49	4,68
DFBR	2,50	3,71	3,72	3,78	3,71	3,89	4,00
BABJ	2,19	2,38	2,31	2,33	2,29	2,45	2,48
BABA	2,48	3,01	2,98	2,99	2,94	3,06	3,19
BARR	1,48	1,40	1,35	1,33	1,37	1,41	1,38
PIBJ	1,97	2,25	2,23	2,21	2,22	2,24	2,22
MAAP	3,06	4,68	4,66	4,66	4,61	4,73	4,79
MACA	3,36	5,48	5,55	5,53	5,48	5,65	5,78
MABC	2,48	3,25	3,33	3,28	3,28	3,39	3,39
TOTA	3,08	4,40	4,46	4,52	4,38	4,61	4,87
TOPN	3,31	4,99	5,11	5,14	5,03	5,18	5,58
TOPA	2,55	3,27	3,29	3,31	3,23	3,41	3,51
PASF	3,10	5,45	5,62	5,65	5,47	5,81	6,07
PAMA	3,40	5,94	6,12	6,09	6,02	6,20	6,41
Média	2,40	3,51	3,58	3,58	3,51	3,70	3,81

ANEXO S - Evapotranspiração da cultura (ETc) no cenário atual (1980-2009) e nos cenários futuros de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	1,76	4,44	4,57	4,71	4,46	4,69	5,18
RSCA	1,91	4,57	4,78	4,98	4,57	4,91	5,47
SCCN	1,94	4,53	4,65	4,74	4,52	4,74	5,09
SCCH	2,01	4,98	5,31	5,45	5,02	5,45	6,14
PRCA	2,03	4,61	4,83	4,93	4,64	4,85	5,43
PRLO	2,65	6,21	6,60	6,70	6,31	6,62	7,39
SPAV	2,32	5,31	5,58	5,72	5,36	5,75	6,37
SPFR	2,62	6,09	6,40	6,55	6,19	6,43	7,18
SPVO	3,14	7,21	7,56	7,73	7,30	7,79	8,53
MGBA	2,66	6,79	7,06	7,24	6,86	7,29	7,92
MGUB	2,68	6,03	6,31	6,45	6,11	6,46	6,84
MGPM	2,60	5,85	6,13	6,25	5,93	6,26	6,63
MGUN	3,22	8,06	8,41	8,61	8,15	8,67	9,35
MSIV	2,67	6,71	7,09	7,27	6,79	7,33	8,19
MSPA	3,09	7,56	7,95	8,13	7,65	8,17	8,97
MTDI	4,61	4,73	4,92	5,05	4,77	5,07	5,65
GOCA	3,00	7,39	7,76	7,94	7,49	7,97	8,70
GOJA	2,92	7,67	8,07	8,27	7,77	8,30	9,07
DFBR	2,84	6,43	6,72	6,87	6,49	6,91	7,51
BABJ	3,55	9,12	9,43	9,62	9,13	9,68	10,24
BABA	3,49	8,83	9,17	9,37	8,89	9,42	10,03
BARR	3,27	7,13	7,26	7,31	7,15	7,35	7,37
PIBJ	3,24	6,81	6,90	6,95	6,83	6,97	6,91
MAAP	3,63	8,65	8,94	9,12	8,71	9,16	9,67
MACA	3,72	8,46	8,70	8,85	8,48	8,90	9,34
MABC	3,37	6,75	6,83	6,92	6,73	6,92	7,05
TOTA	3,73	8,36	8,68	8,87	8,44	8,91	9,47
TOPN	3,76	8,70	8,99	9,15	8,76	9,20	9,60
TOPA	3,54	6,89	6,98	7,02	6,91	7,05	7,03
PASF	3,18	7,20	7,41	7,55	7,22	7,59	8,04
PAMA	3,61	8,36	8,60	8,77	8,38	8,79	9,22
Média	2,99	6,79	7,05	7,20	6,84	7,21	7,73

ANEXO T – Evapotranspiração relativa (ETr/ETc) no cenário atual (1980-2009) e nos cenários futuros de emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) a curto (2010-2039), médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos, conforme simulado pelo modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para o milho da 2ª safra, em diferentes regiões brasileiras

Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
	1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
RSPE	0,91	0,65	0,66	0,65	0,66	0,65	0,63
RSCA	0,88	0,70	0,71	0,69	0,71	0,70	0,67
SCCN	0,94	0,71	0,71	0,71	0,71	0,72	0,70
SCCH	0,94	0,67	0,66	0,65	0,67	0,66	0,61
PRCA	0,90	0,61	0,62	0,62	0,62	0,63	0,61
PRLO	0,88	0,54	0,52	0,52	0,54	0,53	0,50
SPAV	0,92	0,64	0,63	0,62	0,64	0,64	0,61
SPFR	0,89	0,57	0,58	0,62	0,57	0,63	0,63
SPVO	0,85	0,51	0,48	0,48	0,49	0,50	0,46
MGBA	0,85	0,41	0,42	0,42	0,41	0,44	0,42
MGUB	0,73	0,41	0,40	0,40	0,40	0,41	0,40
MGPM	0,65	0,33	0,31	0,31	0,32	0,33	0,32
MGUN	0,78	0,41	0,39	0,39	0,40	0,40	0,38
MSIV	0,88	0,53	0,51	0,51	0,52	0,52	0,47
MSPA	0,88	0,50	0,48	0,48	0,49	0,50	0,46
MTDI	0,57	0,93	0,91	0,71	0,93	0,90	0,69
GOCA	0,84	0,47	0,45	0,45	0,46	0,47	0,44
GOJA	0,91	0,55	0,53	0,53	0,54	0,54	0,52
DFBR	0,88	0,58	0,56	0,55	0,57	0,57	0,54
BABJ	0,62	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25
BABA	0,71	0,35	0,33	0,32	0,34	0,33	0,32
BARR	0,45	0,20	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19
PIBJ	0,61	0,33	0,33	0,32	0,33	0,32	0,32
MAAP	0,84	0,55	0,53	0,52	0,54	0,52	0,50
MACA	0,90	0,65	0,64	0,63	0,65	0,64	0,63
MABC	0,74	0,49	0,49	0,48	0,49	0,50	0,49
TOTA	0,83	0,53	0,52	0,51	0,52	0,52	0,52
TOPN	0,88	0,58	0,58	0,57	0,58	0,57	0,59
TOPA	0,72	0,48	0,48	0,48	0,47	0,49	0,50
PASF	0,98	0,76	0,77	0,76	0,76	0,77	0,76
PAMA	0,94	0,72	0,72	0,70	0,72	0,71	0,70
Média	0,82	0,54	0,53	0,52	0,53	0,53	0,51

ANEXO U - Manejos de semeadura, ciclo da cultivar, irrigação e adubação, adotados nas simulações pelo modelo DSSAT/CERES-Maize para a avaliação das combinações das melhores estratégias para mitigação dos impactos dos cenários de clima futuro, para o milho da 1ª safra

Manejo	Local	Atual	RCP4.5			RCP8.5		
		1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Semeadura	RSCA	Nov15	Dez3	Dez3	Set1	Dez3	Set1	Set1
	MGPM	Nov15	Out2	Out2	Out2	Out2	Out2	Out2
	MSIV	Nov15	Dez1	Dez2	Dez1	Dez1	Dez2	Dez2
	MTDI	Nov15	Nov1	Nov2	Nov2	Nov1	Nov2	Nov2
	PIBJ	Nov15	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3
	PASF	Nov15	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3	Dez3
Ciclo do cultivar	RSCA	CM	CST	CST	CST	CST	CST	CST
	MGPM	CM	CST	CST	CST	CST	CST	CST
	MSIV	CM	CST	CST	CST	CST	CST	CST
	MTDI	CM	CST	CST	CST	CST	CST	CST
	PIBJ	CM	CST	CST	CST	CST	CST	CST
	PASF	CM	CST	CST	CST	CST	CST	CST
Irrigação ¹	RSCA	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ
	MGPM	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ
	MSIV	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ
	MTDI	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ
	PIBJ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ
	PASF	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ
Irrigação ²	RSCA	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180
	MGPM	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180
	MSIV	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180
	MTDI	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L150
	PIBJ	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180
	PASF	SEQ	L180	L180	L120	L150	L150	L150
Adubação	RSCA	N150	N250	N200	N200	N250	N200	N200
	MGPM	N150	N250	N300	N300	N200	N200	N250
	MSIV	N150	N200	N200	N200	N200	N200	N250
	MTDI	N150	N250	N200	N250	N200	N250	N250
	PIBJ	N150	N200	N100	N100	N150	N100	N200
	PASF	N150	N200	N200	N250	N250	N200	N150

¹Sequeiro para cenário atual e de clima futuro; ²Sequeiro para clima atual e irrigado em cenário de clima futuro; CM – cultivar de ciclo médio; CT – cultivar de ciclo tardio; N0 – sem aplicação de N; N50 – dose parcelada de 50 kg N ha⁻¹; N100 – dose parcelada de 100 kg N ha⁻¹; N150 – dose parcelada de 150 kg N ha⁻¹; N200 – dose parcelada de 200 kg N ha⁻¹; N250 – dose parcelada de 250 kg N ha⁻¹; N300 – dose parcelada de 300 kg N ha⁻¹ na forma de ureia aplicados na semeadura e 45 dias após a semeadura (DAS), na proporção de 33 e 67%, respectivamente; SEQ – sequeiro; L30 – lâmina de 30 mm aplicada a 45 DAS; L60 – lâminas de 30 mm aplicadas a 45 e 60 DAS; L90 – lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45 e 60 DAS; L120 – lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45, 60 e 75 DAS; L150 – lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; L180 – lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; RCP4.5 – cenário sob emissão intermediária; RCP8.5 – cenário sob alta emissão; RSCA – Cruz Alta, RS; MGPM – Patos de Minas, MG; MSIV – Ivinhema, MS; MTDI – Diamantino, MT; PIBJ – Bom Jesus do Piauí, PI; PASF – São Félix do Xingu, PA

ANEXO V - Manejo de semeadura, ciclo do cultivar, irrigação e adubação, adotados nas simulações para avaliação de combinação das melhores estratégias de manejo para mitigação dos impactos sob cenários de clima futuro, no modelo DSSAT/CERES-*Maize*, para milho 2ª safra

Manejo	Local	Atual	RCP4.5				RCP8.5		
		1980-2009	2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099	
Semeadura	RSCA	Fev15	Fev3	Fev3	Fev3	Mar2	Mar2	Abr2	
	MGPM	Fev15	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	
	MSIV	Fev15	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	
	MTDI	Fev15	Jan2	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	
	PIBJ	Fev15	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	Jan1	
	PASF	Fev15	Jan2	Jan2	Jan3	Jan1	Jan2	Jan3	
Ciclo do cultivar	RSCA	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	
	MGPM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	
	MSIV	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	
	MTDI	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	
	PIBJ	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	
	PASF	CM	CM	CM	CM	CM	CM	CM	
Irrigação ¹	RSCA	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	
	MGPM	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	
	MSIV	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	
	MTDI	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	
	PIBJ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	
	PASF	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	SEQ	
Irrigação ²	RSCA	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180	
	MGPM	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180	
	MSIV	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180	
	MTDI	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L120	
	PIBJ	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180	
	PASF	SEQ	L180	L180	L180	L180	L180	L180	
Adubação	RSCA	N150	N250	N200	N200	N250	N200	N200	
	MGPM	N150	N250	N300	N300	N200	N200	N250	
	MSIV	N150	N200	N200	N200	N200	N200	N250	
	MTDI	N150	N250	N200	N250	N200	N250	N250	
	PIBJ	N150	N200	N100	N100	N150	N100	N200	
	PASF	N150	N200	N200	N250	N250	N200	N150	

¹Sequeiro para cenário atual e de clima futuro; ²Sequeiro para clima atual e irrigado em cenário de clima futuro; CM – cultivar de ciclo médio; CT – cultivar de ciclo tardio; N0 – sem aplicação de N; N50 – dose parcelada de 50 kg N ha⁻¹; N100 – dose parcelada de 100 kg N ha⁻¹; N150 – dose parcelada de 150 kg N ha⁻¹; N200 – dose parcelada de 200 kg N ha⁻¹; N250 – dose parcelada de 250 kg N ha⁻¹; N300 – dose parcelada de 300 kg N ha⁻¹ na forma de ureia aplicados na semeadura e 45 dias após a semeadura (DAS), na proporção de 33 e 67%, respectivamente; SEQ – sequeiro; L30 – lâmina de 30 mm aplicada a 45 DAS; L60 – lâminas de 30 mm aplicadas a 45 e 60 DAS; L90 – lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45 e 60 DAS; L120 – lâminas de 30 mm aplicada a 30, 45, 60 e 75 DAS; L150 – lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; L180 – lâminas de 30 mm aplicada a 15, 30, 45, 60 e 75 DAS; RCP4.5 – cenário sob emissão intermediária; RCP8.5 – cenário sob alta emissão; RSCA – Cruz Alta, RS; MGPM – Patos de Minas, MG; MSIV – Ivinhema, MS; MTDI – Diamantino, MT; PIBJ – Bom Jesus do Piauí, PI; PASF – São Félix do Xingu, PA