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

Mudanças climáticas, seus impactos na cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro e estratégias de manejo para mitigação das perdas

Paola de Figueiredo Bongiovani

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

Piracicaba
2020

Paola de Figueiredo Bongiovani
Engenheira Agrônoma

**Mudanças climáticas, seus impactos na cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro e
estratégias de manejo para mitigação das perdas**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2020

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

Bongiovani, Paola de Figueiredo

Mudanças climáticas, seus impactos na cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro e estratégias de manejo para mitigação das perdas / Paola de Figueiredo Bongiovani. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

158 p.

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

1. Mandioca 2. Modelos de simulação de cultura 3. Mudanças climáticas 4. Mitigação I. Título

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, pelo incentivo, pelo apoio incondicional, pela união e por todos os momentos felizes.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas, pela confiança depositada, pelos ensinamentos, pela paciência e pela oportunidade.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), nossa Gloriosa, pela formação profissional, pelas amizades e oportunidades.

Ao Programa de Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do Mestrado.

Ao Prof. Dr. Mauricio Antonio Coelho Filho e o MSc. Diego Magalhães de Melo, da Embrapa, pela disponibilidade e por fornecerem informações experimentais essenciais para a realização do presente projeto.

Ao Prof. Dr. Gerrit Hoogenboom e MSc. Patricia Moreno pela orientação e ensinamentos no período de intercâmbio na Universidade da Flórida, EUA.

Aos colegas e ex-colegas da Cúpula, pela amizade, por todo o auxílio, pelo apoio e pelos momentos inesquecíveis. Em especial, à Fabi Bender e ao Rafael Battisti, que, pacientemente, tanto me ensinaram e ajudaram ao longo da realização do projeto.

Ao financiamento concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) para o desenvolvimento do processo nº 2017/21745-5. E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento inicial deste projeto.

À minha outra família, República Alforria, por ser um porto seguro e me permitir conviver e aprender com tantas mulheres (e profissionais) incríveis.

A todos que de alguma maneira contribuíram com a minha formação pessoal e profissional ao longo da condução desse trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
1.1. INTRODUÇÃO	9
1.2. OBJETIVOS	10
1.2.1. Objetivos específicos	10
1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
1.3.1. A cultura da mandioca	11
1.3.2. Semiárido brasileiro (SAB)	17
1.3.3. Mudanças climáticas globais	18
1.3.4. Modelos de simulação na agricultura	20
1.3.5. Modelos de simulação, impactos da variabilidade e das mudanças climáticas na agricultura e estratégias de manejo e mitigação	24
REFERÊNCIAS	25
2. CALIBRAÇÃO, AVALIAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS CSM-CROPSIM-CASSAVA E CSM-MANIHOT-CASSAVA PARA A CULTURA DA MANDIOCA, CULTIVAR BRS FORMOSA	38
RESUMO	38
ABSTRACT	38
2.1. INTRODUÇÃO	39
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	41
2.2.1. Dados experimentais	41
2.2.2. Dados meteorológicos	42
2.2.3. Dados de solo	43
2.2.4. Modelos de simulação da cultura da mandioca	43
2.2.5. Calibração, avaliação e combinação (“ensemble”) dos modelos	44
2.2.6. Análise estatística	46
2.2.7. Análise de sensibilidade	47
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
2.3.1. Calibração e avaliação do modelo CSM-CROPSIM- <i>Cassava</i>	48
2.3.2. Calibração e avaliação do modelo CSM-MANIHOT- <i>Cassava</i>	53
2.3.3. Análise dos “ensembles” dos modelos para estimação da produtividade	60
2.3.4. Análise de sensibilidade	63
2.4. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	69
3. VULNERABILIDADE DA PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO NOS CENÁRIOS ATUAL E DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	77
RESUMO	77
ABSTRACT	77
3.1. INTRODUÇÃO	78
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	80
3.2.1. Modelo de simulação de cultura da mandioca	80
3.2.2. Locais de estudo	81

3.2.3. Dados de solo	82
3.2.4. Dados meteorológicos e cenários de mudanças climáticas	85
3.2.5. Simulações dos impactos do clima atual e futuro na produtividade da mandioca ..	86
3.2.6. Avaliação geral	86
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
3.3.1. Simulações da produtividade da mandioca para o clima atual	91
3.3.2. Simulações dos impactos do clima futuro na produtividade da mandioca.....	92
3.3.3. Espacialização das produtividades atingíveis da cultura da mandioca no SAB	98
3.3.4. Índice de vulnerabilidade (IV) da cultura da mandioca no SAB	102
3.4. CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS	108
4. ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA MANDIOCA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	117
RESUMO	117
ABSTRACT	117
4.1. INTRODUÇÃO	118
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	120
4.2.1. Modelo de simulação de cultura	120
4.2.2. Locais de estudo	121
4.2.1. Dados de solo	122
4.2.2. Dados meteorológicos e cenários de mudanças climáticas	123
4.2.3. Simulações de estratégias para mitigação dos impactos do clima atual e futuro na produtividade da mandioca.....	124
4.2.4. Avaliação geral	125
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	125
4.3.1. Estratégias de mitigação das perdas de produtividade da mandioca no SAB por classe de vulnerabilidade	125
4.4. CONCLUSÕES	138
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICES	147

RESUMO

Mudanças climáticas, seus impactos na cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro e estratégias de manejo para mitigação das perdas

A mandioca é uma das culturas mais importantes nos países tropicais. Devido a sua tolerância a condições de clima e solo adversos, ela tem sido cultivada como uma cultura estratégica em regiões semiáridas. Considerando as previsões de mudanças nas condições climáticas, é imprescindível compreender como a produção de mandioca pode ser afetada nessas regiões, de modo a antecipar ações cruciais que previnam e/ou atenuem possíveis impactos e preparem a população para lidar com futuras mudanças. Nesse contexto, modelos de simulação de cultura são ferramentas eficientes para quantificar o efeito do clima futuro nas produtividades das culturas. Os objetivos deste estudo foram: i) calibrar e validar os modelos de simulação da cultura da mandioca DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava* para simular a produtividade da cultivar BRS Formosa de mandioca e analisar a sensibilidade desses modelos; ii) aplicar o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* para determinar a produtividade da mandioca na região do Semiárido Brasileiro (SAB), sob clima atual (1980-2010) e sob projeções futuras do clima a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, para os cenários de emissão intermediária (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) de gases de efeito estufa (GEEs), e criar um índice de vulnerabilidade para a sua produção na região; iii) aplicar o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* para avaliar possíveis estratégias de manejo, como épocas de semeadura e irrigação, para minimização dos possíveis impactos, em quatro localidades do SAB. Os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava* apresentaram bom desempenho na simulação da produtividade da BRS Formosa, com erro absoluto média (EAM) de 1193 e 1315 kg ha⁻¹ e índice c de 0,87 e 0,81, respectivamente. O “ensemble” dos modelos apresentou melhor desempenho do que o do CSM-MANIHOT-*Cassava*, porém pior que o do CSM-CROPSIM, com EAM intermediário, de 1239 kg ha⁻¹, e c = 0,85. A análise de sensibilidade confirmou que ambos os modelos apresentaram respostas expressivas às variações de temperatura média do ar e aumento na [CO₂], os quais impactaram as produtividades de forma inversa e direta, respectivamente. Para as variações de chuva, o CSM-MANIHOT-*Cassava* apresentou baixa sensibilidade, especialmente, na localidade mais seca. Em geral, o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* obteve maiores desvios em relação às variações de temperatura do ar, chuva e [CO₂], apresentando maior sensibilidade do que o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* e sendo, portanto, mais adequado para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade da cultura da mandioca. A produtividade de mandioca apresentou queda em todos os cenários futuros, chegando a -29% na produtividade potencial (PP) e -22% na produtividade atingível (PA), no cenário mais pessimista. Os mapas de PA mostraram que as áreas das regiões de menores produtividades no cenário atual (estados do PI, CE, PE e BA) tendem a se manter nos cenários futuros, enquanto as de maiores produtividades (sudeste do estado da BA e norte de MG), tendem a diminuir. A vulnerabilidade da produção de mandioca no SAB às mudanças climáticas foi maior a longo prazo (2070-2100), em ambos os cenários de emissão de GEEs (RCP4.5 e RCP8.5). Houve variação espacial da vulnerabilidade no SAB, com perdas mais expressivas estando, em geral, na região sudoeste do SAB (estados do PI, BA e MG), e as menores, à norte e nordeste. Em geral, houve efeito negativo das mudanças climáticas na produtividade da mandioca no SAB, além de aumento das áreas de risco para a sua produtividade na região. As estratégias para mitigação das perdas de produtividade, associadas ao ajuste da data de plantio e uso da irrigação, evidenciaram a possibilidade de mitigação das perdas de produtividade nas condições de clima futuro. Em todos os locais, a data base esteve entre as que obtiveram as maiores produtividades, em todos os cenários, embora em alguns outros meses tenha havido aumento da produtividade nos cenários futuros na condição de sequeiro. O uso da irrigação proporcionou incrementos nos níveis de produtividade, sendo que os maiores incrementos foram obtidos com a lâmina de 6 mm para todos os locais.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz, Modelos de simulação de culturas, Risco climático, Vulnerabilidade

ABSTRACT

Climate change, its impacts on cassava production in Brazilian Semi-arid region and management strategies for mitigation of losses

Cassava is one of the most important crops in tropical countries. Due to its tolerance to adverse weather and soil conditions, it has been cultivated as a strategic crop in semi-arid regions. With the predictions of future climate changes, it is imperative to understand in which ways cassava production might be affected in these regions, in order to anticipate crucial actions to prevent and/or attenuate possible impacts and prepare the population to deal with that. In this context, crop simulation models are effective tools to quantify the future climate effect on crop yields. The objectives of this study were: i) to calibrate and evaluate the cassava simulation models DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava and CSM-MANIHOT-Cassava to simulate the yields of the BRS Formosa cassava cultivar and analyze the sensitivity of these models; ii) to apply the DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava model to determine cassava yields in the Brazilian Semi-arid region (SAB), under actual (1980-2010) and future climate projections, in medium (2040-2070) and long (2070-2100) terms, for intermediate (RCP4.5) and high (RCP8.5) greenhouse gases emissions (GHGs) scenarios, and to elaborate a vulnerability index (IV) for cassava production in the region; iii) to apply the DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava model to evaluate potential management strategies, associated to planting dates and irrigation, in order to minimize possible climate impacts, in four locations of SAB. The DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava and CSM-MANIHOT-Cassava models presented good performance for simulating Cassava BRS Formosa yields, with mean absolute error (MAE) of 1193 and 1315 kg ha⁻¹, and c index of 0,87 and 0,81, respectively. The ensemble had a better performance than CSM-MANIHOT-Cassava, but worse than CSM-CROPSIM-Cassava, presenting an intermediary MAE, of 1239 kg ha⁻¹, and c index = 0,85. The sensitivity analysis showed that both models are sensitive to variations in mean air temperature and [CO₂], in a direct and inverse way, respectively. As for the rainfall, CSM-MANIHOT-Cassava presented low sensitivity, especially for the driest region, whereas CSM-CROPSIM was very responsive. In general, the CSM-CROPSIM model presented higher yield deviations in relation to the variations of air temperature, rainfall and [CO₂] than CSM-MANIHOT-Cassava model, being more suitable for evaluation of climate change impacts on cassava yield. The cassava yields were reduced in all future scenarios, reaching -29% for potential yield (PP) and -22% for attainable yield (PA), at the most pessimist one. The PA maps showed that the areas of the regions with lowest yields at the actual scenario (states of PI, CE, PE and BA) tend to remain unchanged at future scenarios, while the ones with the highest yields (Southeast of BA and North of MG) tend to be reduced. The vulnerability of cassava production in SAB to climate change was greater at long term (2070-2100), in both GHGs emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). A spatial variation of cassava vulnerability to climate change was noticed at SAB, with the most expressive losses occurring at Southwest region (PI, BA and MG states), and the lowest, at North and Northeast. In general, climate change affected negatively the cassava yield in SAB, along with the increase of risk areas for its production in the same region. The strategies for mitigating losses, related to the adjustment of the planting date and use irrigation, showed to be viable for reducing cassava yield losses in SAB in the future climate scenarios. In every assessed location, the default planting date was among the ones that obtained the highest yields, in all scenarios, although some other months presented yield increase in the future climate scenarios under rainfed condition. Under irrigated conditions, the yield levels increased for all scenarios. The highest cassava yield increments were obtained when the crop was irrigated with 6 mm.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz, Crop simulation models, Climate risk, Vulnerability

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Introdução

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), juntamente com o milho, a cana-de-açúcar e o arroz, constitui uma das fontes mais importantes de energia da dieta humana da maioria dos países tropicais (CEBALLOS et al., 2011). Desde o início deste século, sua produção mundial aumentou em cerca de 100 milhões de toneladas (FAO, 2013). Isto se deu por inúmeros fatores, tais como a demanda da Ásia por amido e matéria seca de mandioca para alimentação animal e para a indústria e a expansão de mercado para produtos derivados de mandioca na África (FAO, 2013). Este aumento permitiu que milhões de produtores em países tropicais tivessem a oportunidade de intensificar suas produções, aumentar sua renda e incentivar o suprimento de alimentos em locais de extrema necessidade (FAO, 2013). Atualmente, a mandioca contribui significativamente tanto para a economia de inúmeros países da região tropical (ZANETTI et al., 2014), como para a segurança alimentar, compondo a alimentação básica de mais de 800 milhões de pessoas (FAO, 2013).

O clima tem grande importância para a produção agrícola. Assim como outras culturas, a mandioca é altamente dependente das condições meteorológicas ao longo de seu ciclo, exigindo temperaturas médias diárias entre 25 °C e 29 °C para crescimento e produção ótimos (PINTO et al., 2008) e boa disponibilidade de água no solo, principalmente nos primeiros meses após seu plantio (FAO, 2013). Em função disso, e considerando que a maior parte da produção mundial de mandioca é realizada sem irrigação (FAO, 2013), qualquer alteração nas condições climáticas pode impactar essa cultura e, conseqüentemente, as pessoas que dependem dessa fonte de alimento.

As projeções de mudanças climáticas (MCs) futuras deverão afetar ainda mais as culturas (LOBELL; GOURDJI, 2012; BENDER, 2018). As MCs, mediante o aumento da temperatura e a mudança nos padrões de chuvas (MOSS et al., 2010), poderão influenciar a produção agrícola de diversas maneiras, causando modificações nos níveis de produtividade, por meio de alterações nas condições de umidade do solo, no desenvolvimento de plantas daninhas (JARVIS; LANE; HIJMANS, 2008; JARVIS et al., 2010), na infestação de pragas e doenças (JARVIS; LANE; HIJMANS, 2008; MORAES et al., 2011); por meio do efeito fertilizador de carbono (LOBELL; FIELD, 2008), decorrência do aumento na [CO₂], o qual apresenta potencial para estimular um crescimento acelerado das culturas e aumento na taxa de fotossíntese, biomassa total, índice de colheita e a produtividade (BOOTE et al., 2005; CHALLINOR; WHEELER, 2008), desde que os níveis de temperatura e disponibilidade de água no solo não sejam limitantes para tal, entre outros.

A cultura da mandioca é considerada altamente resiliente, apresentando pouca sensibilidade às variações de clima (JARVIS et al., 2012). Embora a cultura consiga manter seu crescimento e a produção de biomassa sob temperaturas em torno de 40 °C, desde que em condições adequadas de umidade do solo, a exportação da sacarose das folhas e a síntese de amido nas raízes podem ser penalizados sob tal condição (GABRIEL et al., 2014), aumentando a lignificação (AMTHOR, 2003). Indiretamente, as mudanças climáticas poderiam resultar em aumento da incidência de pragas e doenças, tornando a cultura mais vulnerável e eventualmente reduzindo sua produtividade (CEBALLOS et al., 2011). Finalmente, a alta [CO₂] pode limitar a produção de raízes, afetando o desenvolvimento da planta e a produção de mandioca já que essa cultura mostrou ser excepcionalmente sensível às altas concentrações de CO₂, resultando em redução da assimilação líquida de gás carbônico e da produtividade (GLEADOW et al., 2009).

Algumas medidas sugeridas para minimizar esses impactos são a alteração na data de plantio da cultura, a utilização de diferentes variedades (medidas relativamente acessíveis), o desenvolvimento de novas variedades e otimização de aspectos da irrigação (ROSENZWEIG; PARRY, 1994). Essas duas últimas, provavelmente, trariam maiores benefícios, porém necessitam de investimentos elevados (BURTON; VAN AALST, 2004) e podem ser menos viáveis para produtores com renda limitada. Segundo El-Sharkawy (2014), os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento são os menos preparados para lidar com os impactos das MC, e assim, os mais vulneráveis a elas.

A possibilidade de redução da produção da mandioca, cultura conhecida como “cultura da seca, da guerra e da fome do mundo em desenvolvimento” (do inglês “drought, war and famine crop of the developing world”) (PEARCE, 2007) é muito preocupante. Com base nessa problemática, identificar possíveis impactos climáticos futuros na produtividade da mandioca é imprescindível, principalmente devido a sua importância ao Semiárido Brasileiro (SAB). Une-se à essa urgência, o fato do SAB ser conhecido historicamente como uma área de elevada vulnerabilidade climática, devido à limitada disponibilidade hídrica e à alta densidade populacional, fatores decisivos para índices de migração rural significativos (KROL et al., 2001; KROL; BRONSTERT, 2007).

Uma das formas de se abordar os aspectos relativos ao impacto da variabilidade e das mudanças do clima na produtividade das culturas é por meio dos modelos de simulação de culturas, os quais envolvem aspectos do genótipo, do solo, do clima e do manejo. Esses modelos são utilizados para estimar respostas das culturas as mais variadas condições, permitindo simular a produtividade de uma dada cultura sob diferentes condições de solo e clima. De acordo com White et al. (2011), os modelos suportam a escolha das melhores estratégias de manejo sob diferentes cenários de condições ambientais.

Desse modo, a hipótese deste estudo é de que os modelos de simulação podem ser utilizados para analisar as respostas da cultura da mandioca às condições climáticas atuais e futuras e identificar ações de manejo para mitigar os possíveis impactos das MC na produtividade dessa importante fonte de energia para a alimentação humana e animal, minimizando a vulnerabilidade do SAB.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste projeto é empregar os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e DSSAT CSM-MANIHOT-*Cassava* para identificar e analisar os impactos das mudanças climáticas na produtividade da mandioca, elaborar um índice de vulnerabilidade para a região e avaliar as possíveis estratégias de manejo para mitigação das perdas no Semiárido brasileiro (SAB).

1.2.1. Objetivos específicos

- a) Calibrar e testar os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, DSSAT CSM-MANIHOT-*Cassava* e o “ensemble” deles para simular o desenvolvimento e a produtividade da cultura da mandioca para o Semiárido brasileiro;
- b) Avaliar a sensibilidade dos modelos, alterando-se os valores das variáveis meteorológicas (temperatura do ar e chuva) e a concentração de dióxido de carbono, e identificando as condições que exercem maior influência sobre a sua produtividade;

- c) Estimar a produtividade da mandioca sob condições climáticas atuais com base nos modelos calibrados e avaliados;
- d) Estimar a produtividade da mandioca em diferentes condições de mudanças climáticas, com base em sete modelos climáticos globais (CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, InmCM4, MIROC-ESM e MPI-ESM-LR), considerando-se os cenários de média (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa;
- e) Elaborar um índice de vulnerabilidade para a cultura da mandioca no SAB tanto para a condição climática atual como futura, de modo a identificar as regiões de maiores riscos para a produção;
- f) Avaliar diferentes estratégias de manejo da cultura (data de plantio, espaçamento e irrigação) da mandioca para minimização dos impactos das mudanças climáticas na produtividade.

1.3. Revisão bibliográfica

1.3.1. A cultura da mandioca

1.3.1.1. Importância socioeconômica

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura muito importante nas regiões situadas entre as latitudes de 30°N e 30°S e até 1.800 m de altitude (CEBALLOS et al., 2007). Atualmente, o Brasil é o quinto maior produtor de mandioca do mundo, com produção de quase 19 milhões de toneladas em 2017 (FAOSTAT, 2017). O país está atrás da Nigéria, da República Democrática do Congo, da Tailândia e da Indonésia, cujas produções médias variaram de 19 a 59 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2017). Em 2017, a mandioca foi o quinto produto de maior importância em valor para o Brasil, atrás da soja, cana-de-açúcar, milho e café, com produtividade média de 14,35 t ha⁻¹ (IBGE, 2017). As safras de 2018 e 2019 mantiveram esse patamar, com produtividades de 14,17 e 14,88 t ha⁻¹, respectivamente (IBGE, 2019). Os principais estados brasileiros produtores de mandioca são, em ordem decrescente: Pará (PA), Paraná (PR), Bahia (BA), Maranhão (MA), São Paulo (SP), Rio Grande do Sul (RS) e Amazonas (AM). Desses, somente os estados da BA e MA apresentam municípios pertencentes à região denominada Semiárido Brasileiro (SAB).

Comercialmente, a mandioca é dividida em mandioca de mesa, também conhecida como aipim, macaxeira e mandioca doce, e mandioca para a indústria (ALVES, 2006). O principal produto da mandioca é a raiz de reserva, mas suas folhas também são utilizadas como alimento em diversos países (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). Além de ser um alimento humano, a planta da mandioca também é utilizada na alimentação animal e na indústria (LEBOT, 2009; FAO, 2013; PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). Na indústria, a mandioca é empregada como matéria-prima na produção de tecidos, papel, cola, bebidas (KLEIH et al., 2013; UCHECHUKWU-AGUA; CALEB; OPARA, 2015) e biocombustível (DE VRIES et al., 2010).

A mandioca é produzida, principalmente, por pequenos produtores, e sem uso expressivo de insumos agrícolas, em razão de sua tolerância às condições adversas (DE TAFUR; EL-SHARKAWY; CALLE, 1997). De maneira geral, a propagação da mandioca tem baixo custo pois é feita por meio de pedaços de caule denominados manivas (CÂMARA; GODOY, 1998; FAO, 2013). Embora existam cultivares de mandioca com alto potencial produtivo, chegando a valores entre 60 (FUKUDA; FUKUDA; NUNES, 2002) e 80 t ha⁻¹ (FAO, 2013), a produtividade obtida por pequenos produtores ainda é incipiente, principalmente devido aos eventos climáticos

adversos, solos degradados, baixo controle de pragas e doenças e baixo uso de tecnologias (EL-SHARKAWY, 2004; VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018).

1.3.1.2. Aspectos agronômicos

A mandioca é uma cultura perene cultivada como cultura anual (CEBALLOS et al., 2011). Em geral, seu desenvolvimento pode ser dividido em cinco principais fases: 1) emergência; 2) desenvolvimento do sistema foliar e radicular; 3) estabelecimento do dossel; 4) expressiva translocação de carboidratos; e 5) dormência (ALVES, 2006; LEBOT, 2009). A duração e a ocorrência dessas fases podem variar entre genótipos, condições ambientais e manejo (ALVES, 2006).

A emergência inicia-se entre 5 e 15 dias após o plantio (DAP) das manivas e finaliza-se aos 20 DAP (LEBOT, 2009). Raízes adventícias começam a surgir a partir da porção basal da maniva, seguida da emergência dos primeiros brotos (ALVES, 2006). A posição da maniva influencia a emergência, uma vez que quando plantada verticalmente, há elevada dominância apical, podendo resultar em plantas de um caule só, e quando plantada horizontalmente, outros brotos podem germinar e produzir mais caules (LEBOT, 2009). A fase de desenvolvimento foliar e radicular ocorre entre 20 e 90 DAP (LEBOT, 2009), a qual depende, até cerca de 30 DAP, unicamente das reservas da maniva-semente (ALVES, 2006). Aos 30 DAP, as folhas começam a se expandir, elevando suas taxas de fotossíntese, o que contribui para o crescimento das plantas (LEBOT, 2009). Raízes fibrosas começam a substituir as primeiras raízes adventícias, dentre as quais algumas se tornarão raízes de reserva (ricas em amido) (ALVES, 2006).

A fase de estabelecimento do dossel ocorre entre 90 e 180 DAP, período que corresponde às maiores taxas de crescimento do caule e das folhas (LEBOT, 2009). Após 120 DAP, as raízes de reserva continuam o processo de tuberização (ALVEZ, 2006) e o dossel atinge seu tamanho máximo, com produção, em média, de 20 a 40 folhas por mês, as quais permanecem ativas entre 50 e 140 dias (LEBOT, 2009). Se a planta apresentar ramificações, a área foliar pode ser reduzida (LEBOT, 2009). Essa fase termina quando o índice de área foliar (IAF) total já atingiu seu máximo e começou a diminuir (ALVES, 2002). A fase de expressiva translocação de carboidratos para as raízes ocorre entre 180 e 300 DAP. Nessa fase, a senescência e queda foliar aumentam e os caules tornam-se mais lignificados, reflexo da intensificação de partição dos fotoassimilados para as raízes (LEBOT, 2009). A fase de dormência, entre 300 e 360 DAP, é caracterizada pela redução na produção de folhas, pela paralização do crescimento e acúmulo máximo de matéria seca nas raízes (Figura 1.1). Quando a planta completa seu ciclo um ano após o plantio, uma nova fase de crescimento pode ocorrer, seguido pelo acúmulo de matéria seca e dormência (ALVES, 2006; LEBOT, 2009).

Figura 1.1. Partição da matéria seca total, em porcentagem (%), ao longo do ciclo da mandioca, em dias após o plantio (DAP). Adaptado de Alves (2002).

O conteúdo de matéria seca das raízes de mandioca pode variar de 17% a 47%, mas geralmente encontra-se entre 20 e 40% (BRAIMA et al., 2000), dos quais cerca de 90% é de amido e açúcares (LEBOT, 2009). Seus níveis de proteína e lipídio são muito baixos (SHIGAKI, 2016), o que exige que a alimentação humana seja suplementada com outros alimentos (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). Embora a mandioca com raízes brancas seja uma boa fonte de vitamina C e cálcio, em geral, ela é uma fonte escassa de muitas vitaminas e minerais, como potássio, zinco e manganês (LEBOT, 2009; SHIGAKI, 2016). Por outro lado, as folhas da planta de mandioca, em especial as mais novas, são uma fonte razoável de proteína e vitaminas C e A, e minerais, tais como o magnésio, fósforo e potássio (LATIF; MÜLLER, 2015), sendo recomendadas para consumo como complemento às raízes, em comunidades economicamente desfavorecidas (LANCASTER; BROOKS, 1983; BOKANGA, 1994).

O ciclo da mandioca pode variar de 6 a 24 meses, dependendo da região de cultivo (ALVES, 2006), do genótipo e da situação do mercado (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). A mandioca é, raramente, colhida após 24 meses, pois plantas mais velhas tendem a produzir raízes lignificadas e serem mais susceptíveis a tombamento e podridão (LEBOT, 2009). Recomenda-se colher as raízes quando o conteúdo de amido é máximo e a lignificação é mínima (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). Raízes jovens contêm elevada umidade e menor concentração de amido, enquanto as mais velhas, acima de 12 meses, apresentam maior conteúdo de amido, porém maiores níveis de lignificação (SRIROTH et al., 1999).

Apesar de seu elevado consumo mundial, as raízes frescas da mandioca são altamente perecíveis (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017), o que as faz serem consideradas uma espécie sensível à deterioração fisiológica pós-colheita (AN; YANG; ZHANG, 2012). Essa deterioração é um dos principais obstáculos para a produção de mandioca, por ser impulsionada por danos inevitáveis que ocorrem na colheita (IYER; MATTINSON; FELLMAN, 2010; SALCEDO; SIRITUNGA, 2011; SARAVANAN et al., 2016). Esses danos alteram o equilíbrio de processos fisiológicos naturais de células expostas, causando oxidação (DJABOU et al., 2017) e favorecendo as infecções microbianas (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). Desse modo, a vida útil da mandioca fresca é reduzida, variando de dois a sete dias (LEBOT, 2009).

1.3.1.3. Influência do ambiente na produção

Experimentos demonstraram que o fotoperíodo ótimo para a produção de mandioca é cerca de 12 horas (LEBOT, 2009). Em regiões tropicais, onde o fotoperíodo varia pouco, ele pode não prejudicar a mandioca, diferentemente do que ocorre em outras regiões (ALVES, 2006). O fotoperíodo pode influenciar diferentes processos da planta de mandioca. Dias mais longos promovem crescimento vegetativo e reduzem o desenvolvimento de raízes de reserva, enquanto dias mais curtos têm efeito contrário (ALVES, 2002). A mandioca requer elevada radiação solar. Caso haja sombreamento, o crescimento e o número de raízes podem ser prejudicados (LEBOT, 2009).

A temperatura do ar também afeta o crescimento da planta (LEBOT, 2009) como evidenciado na Tabela 1.1. A temperatura afeta a brotação das manivas, assim como a formação e tamanho das folhas e raízes de reserva (ALVES, 2006). Por se tratar de uma cultura tropical, ela é sensível às baixas temperaturas (HUANG et al., 2005). Essas podem retardar a brotação das manivas, reduzir a expansão foliar e a produtividade, além de favorecer a necrose das folhas (ALVES, 2002), a redução de absorção de nutrientes do solo e da taxa fotossintética (HUANG et al., 2005).

Tabela 1. Efeitos da temperatura do ar no crescimento da cultura da mandioca.

Temperatura do ar (°C)	Efeitos fisiológicos
< 15	Crescimento da planta inibido
< 17 ou > 37	Brotação prejudicada
< 17	Redução na taxa de produção total, de folhas e raízes
16 a 38	Planta de mandioca pode crescer
16 a 30	Taxa de transpiração cresce linearmente e depois diminui
20 a 24	Tamanho e taxa de produção de folhas aumentam; redução da vida da folha
25 a 29	Ótimo para crescimento da mandioca
25 a 30	Maiores taxas de fotossíntese em estufas
28	Maior queda de folhas; redução no número de ramificações
28,5 a 30	Rápida brotação (ótimo)
30 a 40	Maiores taxas de fotossíntese no campo

Adaptado de Alves (2002).

A mandioca é cultivada em regimes pluviais distintos, variando de menos de 600 mm por ano em regiões semiáridas (DE TAFUR; EL-SHARKAWY; CALLE, 1997) à mais de 1.000 mm em regiões subúmidas e úmidas (PELLET; EL-SHARKAWY, 1997). FAO (2013) menciona que, uma vez estabelecida a planta de mandioca, 400 mm de precipitação anual é suficiente para que ela produza, embora suas produtividades sejam mais elevadas com maior suprimento de água. Pinto et al. (2008) sugerem que o desenvolvimento ótimo da mandioca ocorre quando a chuva varia de 1.000 a 1.500 mm, bem distribuídos ao longo do ano. El-Sharkawy (2004) afirma que o potencial produtivo da planta de mandioca é manifestado em condições de precipitação anual acima de 600 mm e sob elevada incidência de radiação solar. Em condições de baixas temperaturas e/ou de déficit hídrico prolongado, a planta de mandioca passa por um período de dormência ou de repouso (ALVES, 2006).

A mandioca consegue alcançar produtividades de raízes satisfatórias em condições adversas de clima e solo, enquanto algumas culturas anuais são extremamente afetadas (EL-SHARKAWY; COCK, 1987). Sua

capacidade de produção a fez ser reconhecida como uma cultura estratégica no combate à fome, principalmente em regiões onde a seca é mais frequente e duradoura (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; BURNS et al., 2010). Sua tolerância à seca a inclui entre as culturas tropicais mais adaptáveis às mudanças climáticas. Sob estresse, a mandioca consegue aumentar sua temperatura ótima e reduzir sua necessidade de água para processos como fotossíntese, crescimento e produção de biomassa (EL-SHARKAWY, 2014). Sob déficit hídrico, a planta de mandioca é capaz de reduzir o crescimento da parte aérea até o próximo fornecimento de água (FAO, 2013), sendo o crescimento de folhas e hastes mais prejudicado que o de raízes (EL-SHARKAWY, 1993).

Cruz et al. (2016) afirmaram que altos níveis de CO₂ atmosférico resultam em aumento da produtividade de mandioca. Jarvis et al. (2012) concluíram, em estudo em todo o continente africano, que as mudanças climáticas podem ser algo positivo para a produção da mandioca, podendo fazê-la variar de -3,7% a +17,5% em relação à produção atual, o que foi consistente com o trabalho de Lobell et al. (2008). Por outro lado, estudos realizados por Gleadow et al. (2009) e Gleadow e Woodrow (2002) indicaram que o aumento da [CO₂] pode resultar em redução da produção de raízes, já que essa cultura tem alta sensibilidade às altas concentrações de CO₂, resultando em redução da assimilação líquida de gás carbônico e, consequentemente, da produtividade.

1.3.1.4. Conceitos de produtividade e “Yield gap” da mandioca

A produtividade agrícola de uma cultura é definida como a razão entre a massa do produto final e a superfície cultivada (FISCHER, 2015). A produtividade média mundial da mandioca varia entre 12,8 (FAO, 2013) e 40 t ha⁻¹ (NTAWURUHUNGA et al., 2006). Sob condições ótimas, a mandioca pode atingir produtividades de 80 t ha⁻¹ (FAO, 2013), ou mais, como constatado por El-Sharkawy et al. (1990) em experimento na Colômbia, onde a produtividade chegou a 90 toneladas de mandioca por hectare (ou cerca de 27 toneladas de matéria seca por hectare). Essas diferenças ocorrem devido às variações nas cultivares, no ambiente de produção (clima e solo) e no manejo agrícola utilizado (preparo e correção do solo e controle de pragas, doenças e plantas daninhas, etc). Bhatia et al. (2008) afirmam que a variação na produtividade da mandioca observada no campo ocorre em função de fatores climáticos, edáficos, hidrológicos, fisiológicos e de manejo.

A produtividade das culturas pode ser subdividida em três tipos: produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA) e produtividade real (PR). Os fatores determinantes da PP são o genótipo da cultura, a radiação solar, a temperatura, o fotoperíodo e a população de plantas (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A PA é obtida com a penalização da PP pelo déficit hídrico. A PR depende dos fatores determinantes e limitantes da PA, além de ser definida por fatores redutores, os quais estão relacionados ao manejo agrícola, que envolve o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, adubação e preparo do solo (BINDRABAN et al., 2000; FERMONT et al., 2009; SENTELHAS et al., 2015).

As razões PA/PP e PR/PA geram coeficientes denominados, respectivamente, Eficiência Climática (EC) (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014) e Eficiência Agrícola (EA) (MARIN et al., 2008). A EC demonstra quantitativamente quanto de perda de produtividade ocorreu devido ao déficit hídrico, representando um modo eficiente para a determinação de riscos climáticos na produção (BATTISTI et al., 2013), enquanto a EA demonstra quantitativamente o quanto de perda se deve ao manejo subótimo.

1.3.1.4.1. Produtividade potencial

A produtividade potencial (PP) é um conceito teórico, função do material genético, da população de plantas, da radiação solar, do fotoperíodo e da temperatura do ar (fatores determinantes). Ela é definida como a máxima produtividade que uma cultura pode atingir sob determinada condição climática (DE PONTI; RIJK; VAN ITTERSUM, 2012), sem que haja limitações hídricas e nutricionais (fatores limitantes) e ocorrência de pragas, de doenças e de plantas daninhas (fatores redutores da produção). Evans e Fischer (1999) e Fischer (2015) definiram a PP como aquela que se espera ao se utilizar a variedade mais bem adaptada ao ambiente escolhido (normalmente, é a mais recente), juntamente com a melhor gestão de insumos e com a ausência de estresses bióticos e abióticos gerenciáveis.

A PP pode ser estimada ou determinada por meio de modelos de simulação ou por meio de experimentos no campo, nos quais assume-se que há a perfeita gestão agrônômica, sem a presença de fatores limitantes ou redutores (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009). Ela é determinada, unicamente, pela radiação solar, temperatura, CO₂ atmosférico, interceptação luminosa pelo dossel da cultura e características genéticas que regem a duração do crescimento (VAN ITTERSUM et al., 2013).

1.3.1.4.2. Produtividade atingível

A produtividade atingível (PA) é aquela que, ainda se considerando condições de manejo agrícola ótimo, é obtida sob condições de sequeiro, em que há penalização da PP pelo déficit hídrico (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; BHATIA et al., 2008), o qual se estabelece quando a evapotranspiração real é menor que a evapotranspiração máxima da cultura, sendo que quanto maior ele for, maior o seu impacto sobre a perda da produtividade (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A PA também pode ser estimada por meio de modelos de simulação de culturas, os quais utilizam dados de clima e da cultura para estimar o crescimento, desenvolvimento e produtividade.

Segundo El-Sharkawy (2004), a planta da mandioca tem capacidade de tolerar condições de seca por mais de três meses. Oliveira, Macedo e Porto (1982) constataram que o déficit hídrico ocorrido entre 30 e 150 dias após o plantio reduziu a produtividade em até 62%, porém, após esse intervalo, não houve redução significativa pelo estresse hídrico. El-Sharkawy e Cadavid (2002) relataram que houve redução na concentração de nutrientes nas raízes, quando o déficit hídrico ocorreu na metade do ciclo.

1.3.1.4.3. Produtividade real

A produtividade real (PR) é definida como aquela que sofre efeito de fatores determinantes, limitantes e redutores, ou seja, é a PA penalizada em função da eficiência do manejo nutricional, de pragas, doenças, plantas daninhas e do preparo do solo (fatores redutores), sendo também função das condições biofísicas e socioeconômicas da região de cultivo (BINDRABAN et al., 2000). Geralmente, a PR é menor que a PA (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012).

As pragas podem ter um efeito significativo na cultura da mandioca. Perdas em torno de 20 e 35% podem ser causadas por ataque de *Cervosporidium manibotis* e *Cervospora vicosae* (TAKATSU; FUKUDA, 1990), de percevejo-de-renda (FIALHO et al., 2001) e de mosca branca. Em casos extremos, essas pragas podem causar perdas de até 80% (SCHIMITT, 2002). Além disso, a ocorrência de plantas daninhas. Principalmente até 50 dias após o plantio, podem

afetar o crescimento da mandioca, com perdas que podem chegar a 40% (ALBUQUERQUE et al., 2008). Segundo Fukuda, Romeiro e Fukuda (1984), a mandioca também pode ser prejudicada por patógenos, como a *Xanthomonas campestris* pv. *Manihoti*, que pode reduzir a produtividade em até 50%. Segundo Herrera Campo, Hyman e Belotti (2011) e Jarvis et al. (2012), a principal fraqueza da cultura da mandioca está relacionada à sua alta susceptibilidade às pragas e doenças, as quais podem gerar perdas significativas de produtividade.

1.3.1.4.4. “Yield gap”

O “yield gap” (YG) consiste na diferença entre dois diferentes tipos de produtividade (SADRAS et al., 2015). Ele também é conhecido como quebra de produtividade, que pode se dar devido ao déficit hídrico ($YG_{DH} = PP - PA$) ou pelo déficit de manejo agrícola ($YG_M = PA - PR$) (FISCHER, 2015). Segundo Sentelhas et al. (2016), o YG é capaz de fornecer base para identificação das principais causas das perdas de produtividade das culturas e contribuir, conseqüentemente, para a definição de estratégias para aumento da sustentabilidade de produção. Esse conceito vem sendo amplamente utilizado em estudos com diversas culturas, como feijão (MEIRELES et al., 2003), girassol (MARIN; SENTELHAS; UNGARO, 2000), milho (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012; AFFHOLDER et al., 2013; DUARTE, 2018), soja (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012; SENTELHAS et al., 2015), cana-de-açúcar (DIAS; SENTELHAS, 2018; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017) e mandioca (VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018).

Em regiões tropicais, Affholder et al. (2013) afirma que a dificuldade de determinação do YG ocorre pela alta variabilidade climática interanual, em especial quanto à distribuição de chuvas e sua variação espacial. Visses, Sentelhas e Pereira (2018) observaram elevada disparidade do YG da mandioca entre regiões do Brasil. Municípios da região Nordeste e do norte do estado de Minas Gerais (MG), apresentaram elevados YG_{DH} (22 a 51 t ha⁻¹) e YG_M (17 a 30 t ha⁻¹), enquanto os da região Centro-Sul, apresentaram eficiência climática e de manejo, com YG_{DH} entre 10,7 e 23,1 t ha⁻¹ e YG_M entre 5,5 e 17,6 t ha⁻¹ (VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018). Fermont et al. (2009) relatam em seu estudo que dentre as causas do YG da mandioca cultivada no leste africano destacam-se a baixa fertilidade do solo, como principal fator, e a restrição hídrica durante o desenvolvimento da cultura. Além disso, o difícil acesso à mão de obra qualificada, particularmente para controle de plantas daninhas, e a colheita antecipada, também tiveram efeito no YG (FERMONT et al., 2009).

1.3.2. Semiárido brasileiro (SAB)

O Semiárido Brasileiro (SAB), após nova delimitação em 2017, compreende uma área de 1.128.697 km², que envolve a maior parte da região Nordeste do país, se estendendo até a porção mais ao norte do Sudeste. No total, são 1.262 municípios, dos quais 38 pertencem ao estado de Alagoas (AL), 278 ao estado da Bahia (BA), 175 ao estado do Ceará (CE), 2 ao estado do Maranhão (MA), 91 ao estado de Minas Gerais (MG), 194 ao estado da Paraíba (PA), 123 ao estado de Pernambuco (PE), 185 ao estado do Piauí (PI), 147 ao estado do Rio Grande do Norte (RN) e 29 ao estado de Sergipe (SE) (BRASIL, 2017). A delimitação do SAB é baseada em três critérios técnicos sobrepostos: precipitação pluviométrica anual igual ou inferior a 800 mm; índice de aridez de até 0,5 - calculado pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial; e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, ao considerar todos os dias do ano (BRASIL, 2017).

Em regiões com longos períodos de seca, tais como o SAB, recomenda-se, estrategicamente, o cultivo de algumas culturas tolerantes a esse fenômeno (CRUZ et al., 2016), dentre as quais, destaca-se a cultura da mandioca. Contudo, as produtividades obtidas por pequenos produtores no SAB são consideradas baixas (MARGULIS; DUBEUX, 2010) (Figura 1.2).

Figura 1.2. Delimitação do Semiárido Brasileiro e a produtividade média de mandioca por município em 2017, em toneladas por hectare. Adaptado de BRASIL (2017) e IBGE (2018).

1.3.3. Mudanças climáticas globais

A [CO₂] atmosférico já atingiu 410 ppm (DLUGOKENCKY; TANS, 2019) e está prevista para atingir níveis entre 730 e 1020 ppm até o fim deste século (MEEHL et al., 2007; IPCC, 2014). O CO₂ é um gás de efeito estufa (GEE) que contribui com o aquecimento global (MEEHL et al., 2007; FORSTER et al., 2007). O aumento da concentração de CO₂ modifica os padrões de uso da água pela planta, podendo aumentar a eficiência no seu uso (MORGAN et al., 2004), por contribuir para a redução na condutância estomática e, consequentemente, para a diminuição do consumo de água (BARTON et al., 2011; BATTIPAGLIA et al., 2013) e secagem dos tecidos (PINTO et al., 2008). Por tratar-se do substrato primário para a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004), maiores

concentrações atmosféricas de CO₂ estimulam a sua taxa, aumentando a produtividade das culturas (BARTON et al., 2011).

Entretanto, os benefícios ocasionados pelo aumento da [CO₂] podem não compensar possíveis prejuízos ligados ao aumento da temperatura do ar (STRECK, 2005) e à seca, decorrentes das mudanças climáticas (PERRY et al., 2013). De acordo com Streck (2005), um aumento de apenas 1 °C na temperatura do ar poderia anular os benefícios da elevada [CO₂] na produtividade agrícola. Além disso, previsões indicam alterações tanto na quantidade como na distribuição de chuvas com o aumento de [CO₂] na atmosfera (ALLEN; INGRAM, 2002), o que é especialmente alarmante, visto que o déficit hídrico está entre os principais fatores que limitam a produção de alimentos (WULLSCHLEGER; TSCHAPLINSKI; NORBY, 2002).

Em regiões áridas e semiáridas já se nota uma queda na intensidade de chuvas, com déficits hídricos mais longos durante a estação chuvosa e aumento na evapotranspiração das plantas, em decorrência do aumento da temperatura (BATISANI; YARNAL, 2010; PINGALE et al., 2014). Modificações no regime e quantidade de chuvas afetam diretamente a agricultura, uma vez que as chuvas são a única fonte de água para cerca de 80% das propriedades rurais do mundo (FAO, 2013). Modificações no regime de chuvas, associadas a temperaturas mais elevadas, aumentam o risco de seca (CRUZ et al., 2016).

A terceira geração de cenários do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (“Intergovernmental Panel on Climate Change” - IPCC), Grupo de Trabalho 1, 2 e 3, são os chamados Caminhos Representativos de Concentrações ou RCPs (do inglês “Representative Concentration Pathways”) (IPCC, 2014). Eles são constituídos por quatro cenários futuros para diferentes condições de forçantes radioativas: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5, sendo que cada uma delas apresenta dois valores fixados para o ano de 2100 (o quanto o planeta esquentou e a concentração de GEE) (IPCC, 2014). De acordo com o IPCC (2014) esses cenários são:

- ✓ RCP2.6: cenário em que a forçante radioativa permanecerá em torno de 2,6 W m⁻² e a [CO₂] equivalente atingirá seu ápice em cerca de 490 ppm antes de 2100 (MOSS et al., 2010);
- ✓ RCP4.5: cenário futuro em que a forçante radioativa é próxima a 4,5 W m⁻² e a [CO₂] em torno de 650 ppm (MOSS et al., 2010). Cenário de estabilização da forçante radioativa total logo após 2100, sem que haja seu aumento além desse limite (CLARKE et al., 2007; WISE et al., 2009);
- ✓ RCP6: cenário em que a forçante radioativa é, aproximadamente, 6,0 W m⁻² e a [CO₂] é cerca de 650 ppm (MOSS et al., 2010). Cenário de estabilização da perturbação radioativa total logo após 2100, sem haver ultrapassagem desse limite, devido à interferência tecnológica e estratégica humana na redução de emissões de GEE (FUJINO et al., 2006; HIJOKA et al., 2008);
- ✓ RCP8.5: cenário em que a forçante radioativa é maior que 8,5 W m⁻² e a [CO₂] equivalente maior do que 1.370 ppm (MOSS et al., 2010). É caracterizado pelo aumento crescente de emissões de GEE e representa o cenário que indica altos níveis de [GEE] (RIAHY; GRUEBLER; NAKICENOVIC, 2007).

Os cenários de clima futuro podem ser gerados por meio do método do delta (ROSENZWEIG et al., 2015). Esse método se baseia no incremento da mudança entre os cenários presente e futuro, determinado 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; MEEHL, 2012), avaliados no AR5 do IPCC (2014).

No caso do Brasil, todos os MCGs apresentam projeções de aumento das temperaturas. Isso não ocorre com relação à chuva, já que alguns modelos apresentam provável aumento e enquanto outros, redução, para uma

mesma região (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO, 2009; PBMC, 2013; TORRES; MARENGO, 2013; CHOU et al., 2014; REBOITA et al., 2014; SÁNCHEZ et al., 2015). De acordo com estudos de Silveira et al. (2013) e Pinheiro et al. (2014), os MCGs que apresentaram melhor performance na simulação do campo de chuva atual sobre o Brasil foram: CNRMCM5 (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 divergências quanto à suas resoluções, que variam de aproximadamente 1,25 a 2,8 graus (Tabela 1.2), e quanto à dinâmica dos oceanos e da circulação atmosférica (BENDER, 2017).

Tabela 1.2. Modelos Climáticos Globais do conjunto CMIP5, os respectivos institutos de desenvolvimento e a resolução horizontal aproximada (latitude/longitude)

Modelo	Instituição, País	Resolução
CNRM-CM5	<i>National Centre for Meteorological Research</i> , França	1.5° x 1.5°
CSIRO-MK3-6-0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i> , Austrália	1.8° x 1.8°
GISS-E2-R	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies</i> , Nova York	2.0° x 2.5°
HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i> , Reino Unido	1.875° x 1.25°
inmCM4	<i>Institute of Numerical Mathematics</i> , Rússia	2.0° x 1.5°
MIROC-ESM	<i>Center for Climate System Research</i> , Japão	2.8° x 2.8°
MPI-ESM-LR	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i> , Alemanha	1.8° x 1.8°

Adaptado de Bender (2017).

1.3.4. Modelos de simulação na agricultura

O’Leary (2000) afirma que a complexidade dos processos da natureza dificulta a compreensão do sistema real como um todo, e que uma estratégia facilitadora seria a descrição desses sistemas e dos processos envolvidos utilizando-se modelos matemáticos. Modelos matemáticos podem ser definidos como um grupo de algoritmos que descrevem um sistema (JAME; CUTFORTH, 1996). Eles podem servir como ferramenta para aprofundar o conhecimento e auxiliar no desenvolvimento da agricultura (THORNLEY; JOHNSON, 2000).

Os modelos de simulação de culturas (MSCs) são constituídos por equações matemáticas que possibilitam fazer uma estimativa do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade de uma cultura de interesse, a partir de coeficientes genéticos das variedades e variáveis ambientais (MONTEITH, 1996). Os MSCs são capazes de simular o crescimento de culturas em cenários climáticos bem diferentes das condições atuais (FINGER; SCHMID, 2008), além de extrapolar as simulações a partir de um único ano ou campo experimental, o qual é essencial para calibração e validação dos MSCs (HUNT; BOOTE, 1998), de modo que eles possam ser utilizados em diferentes locais e condições climáticas (JONES et al., 2003). Sendo assim, no contexto das mudanças climáticas, os MSCs são fundamentais para avaliar como será a resposta das culturas aos cenários futuros (LEHMANN et al., 2013) e analisar estratégias para se amenizar efeitos negativos que esses cenários possam causar nas produtividades (MATTHEWS et al., 2013).

1.3.4.1. Sistema DSSAT

Dentre os principais sistemas que utilizam MSCs, destaca-se o Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT, do inglês “Decision Support System for Agrotechnology Transfer”). O

DSSAT é um sistema que inclui um conjunto de modelos, desenvolvido em um projeto americano na Universidade do Havaí, para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de diferentes culturas. Em suas versões mais recentes (DSSAT, v.4.6 e v.4.7), a plataforma apresenta MSCs combinados em um sistema modular denominado “Cropping System Model” (CSM). Dentro deste, o mesmo conjunto de submódulos é utilizado para a simulação da dinâmica da água, do nitrogênio, do carbono e da matéria orgânica, enquanto o desenvolvimento e crescimento da planta são simulados dentro do módulo da própria cultura (JONES et al., 2003). Dentre os modelos disponíveis, tem-se o CROPGRO para soja e feijão, CERES para milho, trigo, arroz e sorgo, o CROPSIM para a mandioca, além de outros modelos.

O DSSAT tem a função de simular o crescimento e o desenvolvimento de diferentes culturas, armazenando os resultados em seu banco de dados, a partir de informações sobre o solo, o clima, o manejo do cultivo e os aspectos genéticos da cultura/cultivar de interesse (JONES et al., 2003). O sistema inclui também programas para análises sazonais e sequenciais, que permitem avaliar riscos climáticos e econômicos, e impactos associados à irrigação, fertilização do solo e mudanças climáticas (HOOGENBOOM et al., 2017).

1.3.4.1.1. Modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava

O modelo CSM-CROPSIM (“Cropping System Model – Crop Environment Resource Synthesis”) inserido na plataforma DSSAT, é voltado para a simulação do crescimento e desenvolvimento, em especial, da mandioca, sob diferentes condições de solo, clima e manejo. Este modelo passou por avaliações no Centro Internacional de Agricultura Tropical, na Colômbia (CONNOR; COCK; PARRA, 1981) e em Queensland, na Austrália (KEATING; EVENSON; FUKAI, 1982). Trata-se de uma versão modificada do modelo GUMCAS de Matthews e Hunt (1994), para simular os processos de crescimento e desenvolvimento de cultivares de mandioca no DSSAT (SARAWAT et al., 2000; MITHRA; RAVINDRAN; SREEKUMAR, 2000).

Para a simulação da mandioca, são definidas três fases fenológicas: (i) plantio à emergência, (ii) emergência ao surgimento da primeira ramificação (estágio reprodutivo), e (iii) surgimento da primeira ramificação à maturidade ou colheita, sendo que, no modelo, a duração das fases (ii) e (iii) variam com a cultivar (MATTHEWS; HUNT, 1994). Segundo Matthews e Hunt (1994), nas simulações, os fatores que mais afetam as fases vegetativa e reprodutiva são a temperatura e o estresse hídrico. Também se simula o efeito do fotoperíodo no desenvolvimento reprodutivo. A necessidade biológica (Bd) da mandioca equivale a um dia cronológico sob temperatura e fotoperíodo ótimos, sem limitação de água e nutrientes (MATTHEWS; HUNT, 1994). Assim, quando há limitações, a cultivar não atinge a Bd e o número de dias do seu ciclo tende a aumentar.

Além disso, o modelo CSM-CROPSIM tem a capacidade de simular o crescimento das ramificações laterais (importantes para determinar o número inicial de hastes por unidade de área) e simpodiais (importantes por influenciar a área foliar do dossel) (MATTHEWS; HUNT, 1994), o qual é reduzido sob déficit hídrico (SINGH et al., 1998). O modelo usa a temperatura e o fotoperíodo para simular o momento da primeira ramificação, característico de cada variedade (SINGH et al., 1998). As ramificações subsequentes se desenvolvem de forma linear, sendo o período entre uma ramificação e outra um aspecto genotípico (SINGH et al., 1998). Outros parâmetros genotípicos descrevem a ramificação da planta: o número máximo de gemas axilares (ou laterais) entre ramos e o número máximo de gemas axilares por planta (SINGH et al., 1998).

O modelo CROPSIM-Cassava descreve quatro processos:

i. Crescimento e expansão foliar: o crescimento e a expansão foliar da mandioca é função do aparecimento e taxa de expansão foliar. A temperatura (T) é o principal fator ambiental que afeta a taxa de aparecimento foliar (LAR, folhas por dia), sendo utilizadas as temperaturas mínima ($T_{\min}$) e máxima ($T_{\max}$) diárias em seu cálculo. Além dela, fatores como a taxa de crescimento foliar específico do cultivar (LNOIS, folhas Bd^{-1}) na emergência e o período de crescimento do número de folhas (LNOIP, Bd após emergência) também afetam o seu aparecimento. O LAR também é função da idade de desenvolvimento da cultura desde a emergência (DAGE, Bd). Um recurso adicional do modelo CROPSIM é a capacidade de simular a redução no LAR devido ao déficit hídrico e o incremento compensatório do LAR para valores acima daqueles encontrados quando a planta não sofreu estresse (SINGH et al., 1998). Para a área foliar, usa-se a relação empírica de Cock et al. (1979), com três parâmetros genéticos: área foliar máxima (LALX, cm^2 de folha), a idade em que o LALX é atingida (LALXA, Bd após emergência) e a área foliar 300 dias após emergência (LAL3) para determinar o tamanho foliar. O modelo também explica o crescimento foliar compensatório quando ocorre estresse por seca em uma mesma posição. A área foliar específica, usada para estimar o crescimento foliar, é afetada pela razão entre área foliar específica do cultivar e o peso (LAWS, $cm^2 g^{-1}$), pela temperatura e pelo déficit hídrico (SINGH et al., 1998).

ii. Produção de biomassa: o crescimento potencial (PCARB) para um determinado Índice de Área Foliar (LAI) é obtido em função da taxa máxima de fotossíntese do dossel (PHCX), um parâmetro da cultura, que varia de 25 a 27 $g m^{-2} dia^{-1}$. O crescimento atual é estimado usando os fatores temperatura, radiação solar, estresse hídrico e déficit de vapor de pressão (DVP) (SINGH et al., 1998).

iii. Partição de assimilados: segundo Matthews e Hunt (1994), o modelo assume que o crescimento do caule e folhas ocorre a uma taxa abaixo daquela de suprimento de assimilados, e os assimilados remanescentes são armazenados nas raízes. A partição de assimilados para as raízes fibrosas diminui com o aumento da idade da planta (SINGH et al., 1998).

iv. Senescência: a senescência foliar é estimada em função da temperatura e do sombreamento. A longevidade potencial da folha, parâmetro específico da cultura, também a afeta. O modelo simula o efeito tanto da duração quando da intensidade da exposição da cultura à temperatura e ao estresse do sombreamento. Sob temperaturas moderadamente baixas, o modelo simula queda foliar nas plantas mais velhas (SINGH et al., 1998).

1.3.4.1.2. Modelo DSSAT CSM-MANIHOT-Cassava

Recentemente desenvolvido e adicionado ao DSSAT, o modelo CSM-MANIHOT-Cassava teve como objetivo compensar algumas limitações dos modelos precedentes (MORENO-CADENA, 2018). De acordo com Moreno-Cadena (2018), um dos principais aprimoramentos no novo modelo de mandioca é que ele assume um desenvolvimento indeterminado da cultura, o que não foi considerado pela maioria dos modelos para mandioca. Além disso, outros aspectos do modelo foram aprimorados ou incluídos, tais como a curva que define a área potencial da folha, algoritmos para considerar a germinação dos brotos das manivas, o desenvolvimento do conceito de “cohort”, que representa um conjunto de nós que são gerados ao mesmo tempo, e a curva que define o aumento da taxa de biomassa dos internódios e da duração das folhas (MORENO-CADENA, 2018).

No CSM-MANIHOT-Cassava, a germinação das manivas ocorre em função, principalmente, do tempo térmico, estimado pela temperatura do solo na base da maniva. Os graus dias ($^{\circ}Cd$) padrão necessários para a germinação (variável PGERM) é de 120 $^{\circ}Cd$ e pode ser alterado. Os graus dias acumulados são calculados todos os dias e comparados com o PGERM, e quando atingido ou ultrapassado esse valor, ocorre a germinação. Além disso, a

germinação pode ser retardada quando o conteúdo de água no solo for menor do que a capacidade de campo (cc, DUL_L no DSSAT). Quando o conteúdo de água no solo for igual ao ponto de murcha permanente (pmp, LL_L no DSSAT), não há acúmulo de graus dias e quando acima de pmp ocorre estresse de germinação (WFGEi). As temperaturas mínima e máxima ótimas do solo para a germinação são, respectivamente, 30 e 35 °C (MORENO-CADENA, 2018).

As ramificações da planta de mandioca também são calculadas com base no acúmulo de graus dias (tempo térmico), utilizando-se as temperaturas base, ótima e máxima de, respectivamente, 13, 24 e 42,5 °C. O momento da primeira ramificação é definido pelo parâmetro de cultivar B01ND, que permite diferenciar variedades precoces das tardias. Após a primeira ramificação, as próximas ocorrem de maneira constante, com base no B12ND. O número de ramas de cada ramificação é definido pelos parâmetros BR1FX a BR4FX (MORENO-CADENA, 2018).

O número de folhas formadas por planta diminui com a idade da planta. A taxa de formação de folhas é definida em função da temperatura do ar. Por outro lado, essa taxa é afetada pelo conteúdo de água no solo, diariamente. Esse parâmetro pode ser alterado no parâmetro de cultivar LNSLP (MORENO-CADENA, 2018). A duração de uma folha é dividida em três fases, calculadas em função do tempo térmico: expansão ou crescimento, fase fotossinteticamente ativa e senescência. A duração diminui com o aumento da temperatura, variando de 200 dias a 20 °C a 80 dias a 28 °C, sendo que a temperatura ótima é de 30 °C (MORENO-CADENA, 2018). Na fase de expansão foliar, o aumento de tamanho diário potencial da folha varia de acordo com a idade da planta e a temperatura média do dia em que ela está crescendo sem estresse (condição potencial). Quando ocorre estresse hídrico, nutricional ou não há carboidratos suficientes para atingir o crescimento potencial das folhas e caules, este crescimento é reduzido proporcionalmente de acordo com o fator mais limitante dentre eles. Assim que o crescimento da folha cessa, inicia-se a fase fotossinteticamente ativa da “cohort”, cuja única função é produzir fotoassimilados sem demandar energia adicional para crescimento. Quando é finalizada esta etapa, inicia-se a fase de senescência, com duração em termos de tempo térmico definida pelo parâmetro LLIFS (MORENO-CADENA, 2018).

O crescimento potencial da planta é resultado da soma das taxas de incremento de peso dos caules e de incremento de biomassa das folhas, multiplicado por 1,1, assumindo crescimento de 10% das raízes fibrosas. O incremento de biomassa das folhas é calculado pela expansão das folhas, em cm^2 , dividida pela área foliar específica, em $cm^2 g^{-1}$ (parâmetro de cultivar SLAS) (MORENO-CADENA, 2018). O modelo considera a eficiência de uso da radiação (RUE, em inglês) e, a partir da radiação solar, define-se um limite máximo de incremento de biomassa diário, valor que é comparado com o incremento potencial de biomassa da planta toda. Quando o limite máximo é maior que o crescimento potencial, considera-se que não há estresse ou limitação por carboidrato. Por outro lado, quando o limite máximo é menor, o índice de estresse por carboidrato (AFLF) é definido pela divisão entre o limite máximo de incremento de biomassa e o crescimento potencial. Destaca-se que, nesse modelo, não foi considerada a diminuição do RUE por estresse hídrico e nutricional (MORENO-CADENA, 2018).

Quanto ao estresse hídrico, este afeta a germinação, a formação de folhas, a ramificação, a área foliar e o aumento no peso da planta. Diferentemente de outros modelos que utilizam o índice entre a evapotranspiração real e a potencial para definir o estresse hídrico, o CSM-MANIHOT-*Cassava* utiliza somente o conteúdo de água no solo. Para o cálculo do estresse hídrico durante a germinação (WFGEi), utiliza-se o conteúdo de água disponível no horizonte do solo (L) em que a maniva está (SW_L), o qual é estimado pelo balanço hídrico de Ritchie e Otter (1985), a cc, o pmp e o parâmetro de espécie WFGEM, de acordo com a Equação 1.1. O WFGEi é então multiplicado pelo acúmulo de tempo térmico para o dia (IT_{GEMi}) usando as temperaturas definidas para a germinação, gerando a idade

para a germinação (DAGERMi) (Equação 1.2). A planta germina quando DAGERMi atinge os graus dias requeridos, definidos no PGERM (MORENO-CADENA, 2018).

$$WFGEi = \max \left(0, \min \left(1, \frac{\frac{SW(L)-LL(L)}{DUL(L)-LL(L)}}{WFGEM} \right) \right) \quad (1.1)$$

$$DAGERMi = \sum (TT(GEMi) \times WFGEi) \quad (1.2)$$

O estresse hídrico que ocorre desde a germinação até a colheita, calculado por dia (WFGi), também considera o WFGEi, porém também leva em conta a densidade de raízes em cada camada do solo (RLV), para estimar a quantidade de água disponível por horizonte (RAW), em função do potencial de absorção das raízes (MORENO-CADENA, 2018). Além deles, parâmetros que definem o conteúdo mínimo de água que não causa estresse na planta (WFGU) e o que define o conteúdo de água que cessa o seu crescimento (WFGL) podem ser alterados para coincidir com a variedade de interesse (Equações 1.3 e 1.4). Os valores padrões de WFGU e WFGL são 1 e 0, respectivamente, onde 1 representa a cc e 0 o pmp. O WFGi afeta as taxas de crescimento das folhas e caules (MORENO-CADENA, 2018).

$$RAWi = \frac{\sum_{L=1}^{Camada\ raiz} \left[\left(\frac{SW(L)-LL(L)}{DUL(L)-LL(L)} \right) \times RLV(L) \right]}{\sum_{L=1}^{Camada\ raiz} RLV(L)} \quad (1.3)$$

$$WFGi = \frac{RAWi - WFGL}{WFGU - WFGL} \quad (1.4)$$

O nitrogênio é um nutriente requerido de maneira constante pelas folhas, pelos caules e raízes fibrosas ao longo do ciclo da mandioca. No modelo, esse requerimento é definido como fração do peso para cada um dos órgãos. A demanda de nitrogênio é calculada com base no incremento potencial de biomassa e os requerimentos por órgão. Se a demanda é maior que o nitrogênio disponível no solo e reservas, o índice de estresse por nitrogênio (NFLF) é calculado, dividindo-se a quantidade de nitrogênio disponível pela demanda (MORENO-CADENA, 2018).

Os índices de estresse AFLF, WFGi e NFLF são, então, comparados e o que apresentar menor valor, é considerado o mais limitante. Este é, em seguida, multiplicado pela taxa de crescimento potencial das folhas e caules para gerar a taxa de crescimento real (MORENO-CADENA, 2018).

1.3.5. Modelos de simulação, impactos da variabilidade e das mudanças climáticas na agricultura e estratégias de manejo e mitigação

O aumento na [CO₂] apresenta potencial para elevar a produtividade de algumas espécies agrícolas (MORAES et al., 2011). Entretanto, unindo-se a isso a elevação na temperatura do ar, os incrementos de produtividade podem ser menos significativos, devido ao possível encurtamento do ciclo de desenvolvimento das culturas (STRECK, 2005).

Estudos confirmam as incertezas sobre as respostas das culturas às MC. Alguns desses estudos apontam aumento na produtividade de culturas das espécies C3 e C4 de 30% e 10%, respectivamente, quando a [CO₂] é

duplicada (STRECK, 2005). Outros, que as espécies C4 serão menos afetadas pelo aumento da $[CO_2]$, pois apresentam fechamento estomatal mais eficiente, além de melhor incremento na fotossíntese (MARIN; NASSIF, 2013).

Siqueira, De Farias e Sans (1994) e Siqueira, Steinmetz e Salles (2001) avaliaram o efeito do aumento de CO_2 nas produções das culturas de milho, trigo e soja, a nível nacional, utilizando as respectivas versões dos modelos no DSSAT na época (CERES-Maize, CERES-Wheat e CROPGRO-Soybean). Tanto para o milho quanto para o trigo, as simulações apresentaram reduções médias nas produtividades da ordem de 16% e 31%, respectivamente. Para a soja, houve incremento de 27%, dado o efeito positivo do aumento de $[CO_2]$.

No caso da mandioca, na tentativa de avaliar o efeito das MC em sua produtividade no estado do Rio Grande do Sul (RS), Tironi et al. (2017) utilizaram o modelo Simanihot (TIRONI, 2016), também criado a partir de modificações no modelo GUMCAS (MATTHEWS; HUNT, 1994), e obtiveram resultados promissores para o acúmulo de biomassa no cenário RCP4.5: tanto a cultivar para forragem quanto aquela para consumo humano apresentaram maiores produtividades.

As estratégias de manejo mais avaliadas para aumentar a resiliência das plantas às MC são alterações nas datas de semeadura (EWERT et al., 2015) e nos sistemas de plantio, como, por exemplo, utilizar diferentes cultivares e fazer rotação de culturas (NENDEL et al., 2014). García et al. (2001) investigaram a melhor data de semeadura da mandioca em dois locais do estado de Cojedes, Venezuela, com base na produtividade, na sua estabilidade e na oportunidade de plantio, usando o modelo CROPSIM-Cassava. Em ambos os locais, embora a estabilidade tenha sido afetada por diferentes fatores, as produtividades mais altas foram as simuladas no início da estação chuvosa, e as melhores datas de plantio no fim dessa (GARCÍA et al., 2001). Fagundes et al. (2010) simularam o efeito das MC na produtividade de tubérculos de batata para as épocas de cultivo: primavera e outono, na região de Santa Maria, RS, e observaram que o aumento da temperatura foi suficiente para anular o efeito positivo da $[CO_2]$ na produtividade, para o cultivo de primavera, porém, praticamente, não a afetou no cultivo de outono.

Entretanto, novas práticas, tais como tipo de fertilização e revolvimento do solo com máquinas, interações entre práticas (como manejo das datas de plantio e irrigação) e o aprimoramento das características das cultivares, ainda não foram suficientemente estudadas (WHITE et al., 2011). Nesse sentido, Nendel et al. (2014) reforçaram a importância do uso de modelagem associado a práticas agrícolas alternativas como estratégia para adequação das culturas agrícolas às MC, em especial, no contexto da agricultura familiar, cuja capacidade de adaptação é limitada e, ao mesmo tempo, de extrema importância.

REFERÊNCIAS

- AFFHOLDER, F.; POEYDEBAT, C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; TITTONELL, P. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics. Assessment and analysis through field surveys and modelling. **Field Crops Research**, v. 143, p. 106-118, 2013.
- ALBUQUERQUE, J. A. A.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A.; CARNEIRO, J. E. S.; CECON, P. R.; ALVES, J. M. A. Interferência de plantas daninhas sobre a produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*). **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 279-289, 2008.
- ALLEN, M. R.; INGRAM, W. J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. **Nature**, v. 419, p. 228-232, 2002.

- ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLOCKS, R. J.; THRESH, J. M.; BELLOTTI, A. C. ed. **Cassava, Biology, Production and Utilization**. CAB International, Wallingford, UK, p. 67-89, 2002.
- ALVES, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: **Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, cap. 7, p. 138-169, 2006.
- 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, p. 73, 2007.
- AMTHOR, J. S. Efficiency of lignin biosynthesis: A quantitative analysis. **Annals of Botany**, v. 91, n. 6, p. 673-695, 2003.
- AN, D.; YANG, J.; ZHANG, P. Transcriptome profiling of low temperature treated cassava apical shoots showed dynamic responses of tropical plant to cold stress. **BMC Genomics**, v. 13, p. 64, 2012.
- BARTON, C. V. M.; DUURSMA, R. A.; MEDLYN, B. E.; ELLSWORTH, D. S.; EAMUS, D.; TISSUE, D. T.; ADAMS, M. A.; CONROY, J.; CROUS, K. Y.; LIBERLOO, M.; LÖW, M.; LINDER, S.; McMURTRIE, R. E. Effects of elevated atmospheric [CO₂] on instantaneous transpiration efficiency at leaf and canopy scales in *Eucalyptus saligna*. **Global Change Biology**, v. 18, p. 585-595, 2011.
- BATISANI, N.; YARNAL, B. Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: implications for climate change adaptation policy. **Applied Geography**, v. 30, p. 483-489, 2010.
- BATTIPAGLIA, G.; SAURER, M.; CHERUBINI, P.; CALFAPIETRA, C.; McCARTHY, H. R.; NORBY, R. J.; COTRUFO, M. F. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. **New Phytologist**, v. 197, p. 544-554, 2013.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Agricultural efficiency of soybean, corn and wheat production in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, between 1980 and 2008 | Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, v. 42, n. 1, p. 24-30, 2012.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Climatic efficiency for soybean and wheat crops in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in different sowing date | Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 390-396, 2013.
- BENDER, F. D. 2017. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- BHATIA, V. S.; SINGH, P.; WANI, S. P.; CHAUHAN, G. S.; KESAVA RAO, A. V. R.; MISHRA, A. K.; SRINIVAS, K. Analysis of potential yields and yield gaps of non-irrigated soybean in India using CROPGRO-Soybean model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 8-9, p. 1252-1265, 2008.

- BINDRABAN, P.; STOORVOGEL, J. J.; JANSEN, D. M. VLAMING, J.; GROOT, J. J. R. Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 81, n. 2, p. 103-112, 2000.
- BOKANGA, M. Processing of Cassava leaves for human consumption. **Acta Horticulturae**, v. 375, p. 203-207, 1994.
- BOOTE, K. J.; ALLEN, L. H.; PRASAD, P. V. V.; BAKER, J. T.; GESCH, R. W.; SNYDER, A. M.; PAN, D.; THOMAS, J. M. Elevated Temperature and CO₂ Impacts on Pollination, Reproductive Growth, and Yield of Several Globally Important Crops. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 60, n. 5, p. 469-474, 2005.
- BRAIMA, J.; YANINEK, F.; NEUENSCHWANDER, H.; CUDJOE, J. P.; MODDER, W.; ECHENDU N.; TOKO M. **Pest Control in Cassava farms**. IPM Field Guide for Extension Agents. Wordsmiths Printers, Lagos, Nigeria, p. 36, 2000.
- BRASIL. Resolução n.º 115, de 23 de novembro de 2017. Acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL n.º 107, de 27 de julho de 2017. **Diário Oficial da União**, n. 232, p. 32, 5 dez. 2017. Seção 1. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br/images/arquivos/semiario/arquivos/resolucao115-23112017-delimitacaodosemiarido-DOU.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2019.
- BURNS, A.; GLEADOW, R.; CLIFF, J.; ZACARIAS, A.; CAVAGNARO, T. Cassava: The drought, war and famine crop in a changing world. **Sustainability**, v. 2, n. 11, p. 3572-3607, 2010.
- BURTON, I.; VAN AALST, M. **Look before you leap - A risk management approach for incorporating Climate Change adaptation into World Bank Operations**. The World Bank, p. 55, 2004.
- CÂMARA, G. M. S.; GODOY, O. P. Desempenho vegetativo e produtivo de cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) a partir de manivas com diferentes diâmetros. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 326-333, 1998.
- CEBALLOS, H.; FREGENE, M.; PEREZ, J. C.; MORANTE, N.; CALLE, F. Cassava Genetic Improvement. In: KANG, M. S.; PRIYADARSHAN, P. M. ed. **Breeding Major Food Staples**, Blackwell Publishing, Ames, IA, p. 365-391, 2007.
- CEBALLOS, H.; RAMIREZ, J.; BELLOTTI, C.; JARVIS, A.; ALVAREZ, E. Adaptation of Cassava to Changing Climates. In: YADAV, S. S. et al. ed. **Crop Adaptation to Climate Change**. 1. ed., John Wiley & Sons, Ltd., p. 411-425, 2011.
- CHALLINOR, A. J.; WHEELER, T. R. Crop yield reduction in the tropics under climate change: processes and uncertainties. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 3, p. 343-356, 2008.
- 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**, Modesto, v. 3, p. 512-527, 2014.
- CLARKE, L.; EDMONDS, J.; JACOBY, H.; PITCHER, H.; REILLY, J.; RICHEL, R. **Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations**. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, DC, p. 154, 2007. Disponível em: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1011&context=usdoepub>. Acesso em: 18 abr. 2017.

COCK, J. H.; FRANKLIN, D.; SANDOVAL, G.; JURI, P. The Ideal Cassava Plant for Maximum Yield. **Crop Science**, v. 19, n. 2, p. 271-279, 1979.

CONNOR, D. J.; COCK, J. H.; PARRA, G. E. Response of cassava to water shortage I. Growth and yield. **Field Crops Research**, v. 4, p. 181-200, 1981.

CRUZ, J. L.; ALVES, A. A. C.; LeCAIN, D. R.; ELLIS, D. D.; MORGAN, J. A. Elevated CO₂ concentrations alleviate the inhibitory effect of drought on physiology and growth of Cassava plants. **Scientia Horticulturae**, v. 210, p. 122-129, 2016.

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

DE TAFUR, S. M.; EL-SHARKAWY, M. A.; CALLE, F. Photosynthesis and yield performance of Cassava in seasonally dry and semiarid environments. **Photosynthetica**, v. 33, p. 229-257, 1997.

DE VRIES, S. C.; VAN DE VEN, G. W. J.; VAN ITTERSUM, M. K.; GILLER, K. E. Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques. **Biomass & Bioenergy**, v. 34, p. 588-601, 2010.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of The Total Environment**, v. 637-638, p. 127-136, 2018.

DJABOU, A. S. M.; CARVALHO, L. J. C. B.; LI, Q. X.; NIEMENAK, N.; CHEN, S. Cassava postharvest physiological deterioration: a complex phenomenon involving calcium signaling, reactive oxygen species and programmed cell death. **Acta Physiology Plant**, v. 39, p. 91, 2017.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmosphere Carbon Dioxide – Global**. National Oceanic & Atmospheric Administration/ Earth System Research Laboratory, 2019. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 21 mai. 2019.

DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho: uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 2018.

EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H. Response of cassava to water stress. **Plant and Soil**, v. 100, n. 1-3, p. 345-360, 1987.

EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H.; LYNAM, J. K.; HERNANDEZ, A. D. P.; CADAVID, L. F. Relationships between biomass, root- yield and single-leaf photosynthesis in field-grown Cassava. **Field Crops Research**, v. 25, p. 183-201, 1990.

EL-SHARKAWY, M. A. Drought-tolerant Cassava for Africa, Asia, and Latin America Breeding projects work to stabilize productivity without increasing pressures on limited natural resources. **BioScience**, v. 43, n. 7, p. 441-451, 1993.

EL-SHARKAWY, C. J.; CADAVID, L. F. Response of cassava to prolonged water wtress imposed at different stages of growth. **Experimental Agriculture**, v. 38, p. 333-350, 2002.

- EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant Molecular Biology**, p. 481-501, 2004.
- EL-SHARKAWY, M. A. Global warming: Causes and impacts on agroecosystems productivity and food security with emphasis on Cassava comparative advantage in the tropics/subtropics. **Photosynthetica**, v. 52, n. 2, p. 161-178, 2014.
- EVANS, L. T.; FISCHER, R. A. Yield Potential: Its definition, measurement, and significance. **Crop Science**, v. 39, n. 6, p. 1544-1551, 1999.
- EWERT, F.; RÖTTER, R. P.; BINDI, M.; WEBBER, H.; TRNKA, M.; KERSEBAUM, K. C.; OLESEN, J. E.; VAN ITTERSUM, M. K.; JANSSEN, S.; RIVINGTON, M.; SEMENOV, M. A.; WALLACH, D.; PORTER, J. R.; STEWART, D.; VERHAGEN, J.; GAISER, T.; PALOSUO, T.; TAO, F.; NENDEL, C.; ROGGERO, P. P.; BARTOSOVÁ, L.; ASSENG, S. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 287-303, 2015.
- FAGUNDES, J. D.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A.; SCHWANTES, A. P.; ALBERTO, C. M. Produtividade simulada de tubérculos de batata em cenários de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 4, p. 351-360, 2010.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Save and Grow: Cassava - A Guide to Sustainable Production Intensification**, p. 142, 2013.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics. **Statistics Division**, 2017. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 22 mai. 2019.
- FERMONT, A. M.; ASTEN, P. J. A. van; TITTONELL, P. A.; WIJK, M. T. van; GILLER, K. E. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. **Field Crops Research**, v. 112, n. 1, p. 24-36, 2009.
- FIALHO, J. DE F.; OLIVEIRA, M. A. S.; ALVES, R. T.; PEREIRA, A. V.; JUNQUEIRA, N. T. V.; GOMES, A. C. Danos do Percevejo-de-Renda na Produtividade da Mandioca no Distrito Federal. **Comunicado técnico** - Embrapa Cerrados, n. 48, p. 1-3, 2001.
- FINGER, R.; SCHMID, S. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change. **Agricultural Finance Review**, v. 68, n. 1, p. 25-41, 2008.
- FISCHER, R. A. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. **Field Crops Research**, v. 182, p. 9-18, 2015.
- FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULTZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. **Change**, v. 30, n. 22, p. 129-234, 2007.
- FUJINO, J.; NAIR, R.; KAINUMA, M.; MASUI, T.; MATSUOKA, Y. Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using Aim global model. Multi-gas Mitigation and Climate Policy. **The Energy Journal Special Issue**, p. 343-354, 2006.
- FUKUDA, C.; ROMEIRO, R. S.; FUKUDA, W. M. G. Avaliação de resistência de cultivares de mandioca a

Xanthomonas axonopodis pv. *manihotis*. **Revista Brasileira de Mandioca**, v. 3, p. 7-12, 1984.

FUKUDA, W. M. G.; FUKUDA, C.; NUNES, L. C. Clones de mandioca resistentes a podridão de raízes recomendados para o Estado de Sergipe. Cruz das Almas: Embrapa-CNPMP, **Circular Técnica**, n. 46, p. 65, 2002.

GABRIEL, L. F.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; SILVA, M. R. da.; SILVA, S. D. da. Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 90-98, 2014.

GARCÍA, V.; PUCHE, M.; SILVA, O.; WARNOCK, R.; FIGUEROA, R. Evaluation of planting-date strategies for cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) with a Crop Simulation Model. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 2, p. 53-60, 2001.

GLEADOW, R. M.; WOODROW, I. E. Constraints on effectiveness of cyanogenic glycosides in herbivore defense. **Journal of Chemical Ecology**, v. 28, n. 7, p. 1301-1313, 2002.

GLEADOW, R. M.; EVANS, J. R.; McCAFFERY, S.; CAVAGNARO, T. R. Growth and nutritive value of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) are reduced when grown in elevated CO₂. **Plant Biology**, v. 11, n. SUPPL.1, p. 76-82, 2009.

HERRERA CAMPO, B. V.; HYMAN, G.; BELLOTTI, A. Threats to cassava production: known and potential geographic distribution of four key biotic constraints. **Food Security**, p. 1-17, 2011.

HIJOKA, Y.; MATSUOKA, Y.; NISHIMOTO, H.; MASUI, T.; KAINUMA, M. Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. **Journal of Global Environmental Engineering**, v. 13, p. 97-108, 2008.

HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; OGOSHI, R.; LIZASO, J. I.; KOO, J.; ASSENG, S.; SINGELS, A.; MORENO, L. P.; JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)**. Version 4.7 (www.dssat.net). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA, 2017.

HUANG, L.; YE, Z.; BELL, R. W.; DELL, B. Boron nutrition and chilling tolerance of warm climate crop species. **Annals of Botany**, v. 96, p. 755-767, 2005.

HUNT, L. A.; BOOTE, K. J. Data for model operation, calibration, and evaluation. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Ac. Pub., ch. 2, p. 9-40, 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2017**, v. 44, p. 1-8, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>. Acesso em: 27 nov. 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/lspa/tabelas>. Acesso em: 22 dez. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **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

[Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. ed. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

IYER, S.; MATTINSON D. S.; FELLMAN, J. K. Study of the early events leading to cassava root postharvest deterioration. **Tropical Plant Biology**, v. 3, n. 3, p. 151-165, 2010.

JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 76, p. 9-19, 1996.

JARVIS, A.; LANE, A.; HIJMANS, R. J. The effect of climate change on crop wild relatives. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 126, p. 13-23, 2008.

JARVIS, A.; RAMÍREZ-VILLEGAS, J.; ANDERSON, B.; LEIBING, C.; AGGARWAL, P. K. Scenarios of climate change within the context of agriculture. In: REYNOLDS, M. P. **Climate change and crop production**. Wallingford UK, CAB International, p. 9-37, 2010.

JARVIS, A.; RAMÍREZ-VILLEGAS, J.; HERRERA CAMPO, B. V.; NAVARRO-RACINES, C. E. Is Cassava the answer to African climate change adaptation? **Tropical Plant Biology**, v. 5, n. 1, p. 9-29, 2012.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.

KEATING, B. A.; EVENSON, J. P.; FUKAI, S. Environmental effects in growth and development of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). I. Crop development. **Field Crops Research**, v. 5, p. 271-281, 1982.

KLEIH, U.; PHILLIPS, D.; WORDEY, M. T.; KOMLAGA, G. **Cassava market and value chain analysis: Ghana case study**. Final Report. Natural Resources Institute, University of Greenwich, and Accra, Ghana: Food Research Institute, UK, 2013. Disponível em: https://cava.nri.org/images/documents/publications/GhanaCassavaMarketStudy-FinalFebruary2013_anonymised-version.pdf. Acesso em: 23 mai. 2019.

KROL, M. S.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; KRYWKOW, J. The semi-arid integrated model (SIM), a regional integrated model assessing water availability, vulnerability of ecosystems and society in NE-Brazil. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 26, n. 7-8, p. 529-533, 2001.

KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 2, p. 259-268, 2007.

LANCASTER, P. A.; BROOKS, J. E. Cassava leaves as human food. **Economic Botany**, v. 3, n. 3, p. 331-348, 1983.

LATIF, S.; MÜLLER, J. Potential of Cassava leaves in human nutrition: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 44, n. 2, p. 147-158, 2015.

LEBOT, V. Tropical root and tuber crops: cassava, sweet potato, yams and aroids. **Crop Production Science in Horticulture**. CABI Publishing, Oxfordshire, UK, n. 17, 2009.

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**, v. 117, p. 55-65, 2013.

- LOBELL, D.B.; FIELD, C.B. Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961. **Global Change Biology**, v. 14, p. 39-45, 2008.
- LOBELL, D. B.; BURKE, M. B.; TEBALDI, C.; MASTRANDREA, M. D.; FALCON, W.; NAYLOR, R. L. Prioritizing climate change adaptation need for food security in 2030. **Science**, v. 319, p. 607-610, 2008.
- 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.
- LOBELL, D. B.; GOURDJI, S. The influence of climate change on global crop productivity. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1686-1697, 2012.
- 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. Parte III - Variabilidade Climática, p. 407-424, 2009.
- MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades - Resumo Executivo. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, v. 4, p. 6, 2010.
- MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 1, 2000.
- MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1449-1455, 2008.
- MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.17, p. 232-239, 2013.
- MATTHEWS, R. B.; HUNT, L. A. GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz). **Field Crops Research**, v. 36, p. 69-84, 1994.
- MATTHEWS, R. B.; RIVINGTON, M.; MUHAMMED, S.; NEWTON, A. C.; HALLETT, P. D. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. **Global Food Security**, v. 2, n. 1, p. 24-28, 2013.
- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z.-C. Global climate projections. In: SOLOMON, S. et al. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, p. 686-688, 2007.
- MEIRELLES, E. J. L.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163-171, 2003.
- MITHRA, V. S. S.; RAVINDRAN, C. S.; SREEKUMAR, J. The development of a cassava growth model in India. In: **Proceedings of the 6th Regional Cassava Workshop**. Ho Chi Minh city, Vietnam. Cassava's Potential in Asia in the 21st Century: Present Situation and Future Research and Development Needs, 2000.

- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 264-276, 2014.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model. **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272-283, 2017.
- MONTEITH, J. The quest balance in crop model. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 695-697, 1996.
- MORENO-CADENA, L. P. **Modelo de simulación de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el trópico**. 2018. Dissertation (Mestrado em Crop Physiology) – Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia, 2018.
- MORAES, W. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 2, p. 3-14, 2011.
- MORGAN, J. A.; PATAKI, D. E.; KÖRNER, C.; CLARK, H.; DEL GROSSO, S. J.; GRÜNZWEIG, J. M.; KNAPP, A. K.; MOSIER, A. R.; NEWTON, P. C. D.; NIKLAUS, P. A.; NIPPERT, J. B.; NOWAK, R. S.; PARTON, W. J.; POLLEY, H. W.; SHAW, M. R. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. **Oecologia**, v. 140, p. 11-25, 2004.
- 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.; 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**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010.
- 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**, v. 52, p. 47-56, 2014.
- NTAWURUHUNGA, P.; SSEMAKULA, G. N.; OJULONG, H.; BUA, A.; RAGAMA, P.; KANOBE, C.; WHYTE, J. Evaluation of Advanced Cassava Genotypes in Uganda. **African Crop Science Society**, 2006. Disponível em: <http://www.bioline.org.br/pdf?cs06002>. Acesso em: 14 abr. 2017.
- O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, v. 68, p. 97-111, 2000.
- OLIVEIRA, S. L. DE; MACEDO, M. M. C.; PORTO, M. C. M. Efeito do déficit de água na produção de raízes de mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 1, p. 121-124, 1982.
- PARMAR, A.; STURM, B.; HENSEL, O. Crops that feed the world: Production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. **Food Security**, v. 9, p. 907-927, 2017.
- 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, p. 24, 2013.
- PEARCE, F. Cassava comeback. **New Scientist**, v. 194, p. 38-39, 2007.
- PELLET, D.; EL-SHARKAWY, M. A. Cassava varietal response to fertilization: growth dynamics and implications for cropping sustainability. **Experimental Agriculture**, v. 33, p. 353-365, 1997.

- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Agropecuária, p. 478, 2002.
- PERRY, L. G.; SHAFROTH, P.; BLUMENTHAL, D. M.; MORGAN, J. A.; LECAIN, D. Elevated CO₂ does not offset greater water stress predicted under climate change for native and exotic riparian plants. **New Phytologist**, v. 197, p. 532-543, 2013.
- PINGALE, S. M.; KHARE, D.; JAT, M. K.; ADAMOWSKI, J. Spatial and temporal trends of mean and extreme rainfall and temperature for the 33 urban centers of the arid and semi-arid state of Rajasthan, India. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 73-90, 2014.
- 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. 7, p. 891-904, 2014.
- PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, S. F.; DE AVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. R.; MACEDO JR, C.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Embrapa-Unicamp, 2008.
- 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.
- RIAH, K.; GRUEBLER A.; NAKICENOVIC N. Scenarios of long-term socioeconomic and environmental development under climate stabilization. Greenhouse Gases - Integrated Assessment. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 887-935, 2007.
- RITCHIE, J. R.; OTTER, S. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. ARS Wheat Yield Project. ARS-38. **National Technical Information Service**, Springfield, Missouri, 1985.
- ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; ANTLE, J. M.; RUANE, A. C.; MUTTER, C. Z. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: Phase I activities by a global community of science. In: **Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1**. ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. ed. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation. Imperial College Press, v. 3, p. 3-24, 2015.
- ROSENZWEIG, C.; PARRY, M. L. Potential impact of climate change on world food supply. **Nature**, v. 367, p. 133-138, 1994.
- SADRAS, V. O.; CASSMAN, K. G. G.; GRASSINI, P.; HALL, A. J.; BASTIAANSEN, W. G. M.; LABORTE, A. G.; MILNE, A. E.; SILESHI, G.; STEDUTO, P. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies. **Rome: FAO Water Reports**, v. 41, p. 82, 2015.
- SALCEDO, A.; SIRITUNGA, D. Insights into the physiological, biochemical and molecular basis of postharvest deterioration in Cassava (*Manihot esculenta*) roots. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 1, n. 4, p. 414-431, 2011.

- 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.
- SARAVAN, R.; RAVI, V.; STEPHEN, R.; THAJUDHIN, S.; GEORGE, J. Post-harvest Physiological Deterioration of Cassava (*Manihot esculenta*) - a review. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 86, n. 11., p. 1383-1390, 2016.
- SARAWAT, V.; RATANASRIWONG, S.; PUANGPRAKON, K.; JINTRAWET, A. The development of a Cassava growth model in Thailand. In: **Proceedings of the 6th Regional Cassava Workshop**. Ho Chi Minh city, Vietnam. Cassava's Potential in Asia in the 21st Century: Present Situation and Future Research and Development Needs, 2000.
- SCHIMITT, A. T. Principais insetos pragas da mandioca e seu controle. In: CEREDA, M. P. (Ed.). **Agricultura: tuberosas amiláceas latino-americanas (Cultura de tuberosas amiláceas latino americanas, 2)**. São Paulo, Fundação Cargill, p. 350-369, 2002.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 2015.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSES, F. de A. Yield gap: Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9-12, 2016.
- SHIGAKI, T. Cassava: Nature and uses. In: CABALLERO, B.; FINGLAS, P.; TOLDRA, F. ed. **Encyclopedia of food and health**, Oxford: Elsevier Ltd, UK, p. 687-693, 2016.
- 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.
- SINGH, U.; MATTHEWS, R. B.; GRIFFIN, T. S.; RITCHIE, J. T.; HUNT, L. A.; GOENAGA, R. Modeling growth and development of root and tuber crops. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. **Understanding Options for Agricultural Production**, p. 129-156, 1998.
- SIQUEIRA, O. J. F.; DE FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture: applied simulation studies for wheat, maize and soybeans. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 115-129, 1994.
- SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. de. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Embrapa Meio Ambiente, p. 33-63, 2001.

- SRIROTH, K.; SANTISOPASRI, V.; PETCHALANUWAT, C.; KUROTJANAWONG, K.; PIYACHOMKWAN, K.; OATES, C. Cassava starch granule structure–function properties: Influence of time and conditions at harvest on four cultivars of Cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 38, n. 2, p. 161-170, 1999.
- STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. Porto Alegre: **Artemed**. 3 ed., p. 719, 2004.
- TAKATSU, A.; FUKUDA, C. Current status of cassava diseases in Brazil. In: **Integrated pest management for tropical root and tuber crops: proceedings of the workshop on the global status of and prospects for integrated pest management of root and tuber crops in the tropics held in Ibadan, Nigeria**. Ibadan, Nigéria: International Institute of Tropical Agriculture, p. 127-134, 1990.
- 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.
- THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. **Plant and crop modelling - A mathematical approach to plant and crop physiology**. 1 ed. The Blackburn Press, p. 669, 2000.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. **Climatology**, vol. VIII, n. 1, p. 104, 1955.
- TIRONI, L. F. **Simanihot: Um modelo de simulação da cultura da mandioca e sua aplicação em clima futuro no Rio Grande do Sul**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- TIRONI, L.; STRECK, N. A.; SANTOS, A. T. L.; FREITAS, C. P. O.; UHLMANN, L. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, W. C.; FERRAZ, S. E. T. Estimating cassava yield in future IPCC climate scenarios for the Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 10, 2017.
- 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.
- UCHECHUKWU-AGUA, A. D.; CALEB, O. J.; OPARA, U. L. Postharvest handling and storage of fresh cassava root and products: a review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, n. 4, p. 729-748, 2015.
- VAN ITTERSUM, M. K. VAN; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4-17, 2013.
- VISSES, F. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security - an example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, p. 1191-1202, 2018.
- 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.
- WISE, M.; CALVIN, K.; THOMSON, A.; CLARKE, L.; BOND-LAMBERTY, B.; SANDS, R.; SMITH, S. J.; JANETOS, A.; EDMONDS, J. Implications of Limiting CO₂ concentrations for land use and energy. **Science**, v. 324, p. 1183-1186, 2009.

WULLSCHLEGER, S. D.; TSCHAPLINSKI, T. J.; NORBY, R. J. Plant water relations at elevated CO₂ – implications for water-limited environments. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 319-331, 2002.

ZANETTI, E. G. B.; CARDOSO, E. M. G.; DOURADO, D. P.; REINA, E.; MURAISHI, C. T. Performance of two cassava varieties submitted to different spacings, grown in the Cerrado region. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 7, n. 1, p. 39-46, 2014.

2. CALIBRAÇÃO, AVALIAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS CSM-CROPSIM-CASSAVA E CSM-MANIHOT-CASSAVA PARA A CULTURA DA MANDIOCA, CULTIVAR BRS FORMOSA

RESUMO

A mandioca é uma cultura essencial para a economia da maioria dos países tropicais. No Brasil, ocupa a quinta posição das culturas mais importantes em valor. Embora a mandioca esteja entre as culturas tropicais com maior adaptação a diferentes condições climáticas, é difícil se prever o que irá ocorrer com a cultura sob as projeções de clima futuro. Modelos de simulação de culturas têm sido utilizados para quantificar os efeitos do clima futuro nas produtividades, de modo que se possa avaliar as possíveis estratégias de mitigação e adaptação a essas mudanças. Entretanto, o emprego desses modelos requer ajustes para que possam simular as produtividades adequadamente em função das variações climáticas. Desse modo, o presente estudo teve por objetivos: i) calibrar e testar os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava e CSM-MANIHOT-Cassava para simular a produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa; ii) avaliar os ajustes realizados nos modelos para a estimação da produtividade dessa cultivar, tanto individualmente como em conjunto (“ensemble”); iii) analisar a sensibilidade desses modelos às variações de temperatura do ar, chuva e [CO₂], visando o uso dos mesmos em estudos dos impactos das mudanças climáticas na cultura da mandioca no Brasil. A calibração dos modelos foi realizada com base nos dados dos tratamentos irrigados dos experimentos da Embrapa, conduzidos em Cruz das Almas, BA (2017/18) e em Petrolina, PE (2015/16), enquanto a avaliação dessa calibração foi feita com base nos dados dos tratamentos com déficit hídrico dos mesmos experimentos, além dos tratamentos irrigado e sequeiro do experimento conduzido em Cruz das Almas, BA, em 2018/19. Essas etapas foram simuladas com estresse hídrico, porém sem estresse nutricional. Os parâmetros do modelo CSM-CROPSIM-Cassava ajustados foram: BxyND, HMPC, LAFND, LAXS, LAXND, LLIFA, PHINT, SRFR, STFR, BRxFx, DUSRI, HTSTD e PHTV; enquanto para o CSM-MANIHOT-Cassava foram alterados os coeficientes: BxyND, BRxFx, LAXS, LLIFA, LNSLP, NODWT, PGERM, TBLSZ e PHTV. O desempenho do modelo foi verificado analisando-se a relação entre os dados observados e os simulados pelos modelos, com base nos índices estatísticos: R², d, c, EAM, REQm e RREQm. Ambos os modelos apresentaram bom desempenho na simulação da produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa, com EAM de 1193 e 1315 kg ha⁻¹ e índice c de 0,87 e 0,81, respectivamente para os modelos CSM-CROPSIM-Cassava e CSM-MANIHOT-Cassava. Já o “ensemble” apresentou melhor desempenho do que o do CSM-MANIHOT-Cassava, porém pior que o do CSM-CROPSIM-Cassava, com EAM intermediário, de 1239 kg ha⁻¹, e c de 0,85. Quanto à análise de sensibilidade, ambos os modelos apresentaram respostas mais expressivas às variações de temperatura média do ar e aumento na [CO₂], os quais impactaram as produtividades de forma inversa e direta, respectivamente. Para as variações de chuva, o CSM-MANIHOT-Cassava apresentou pouca sensibilidade, principalmente, na localidade mais seca. Em geral, o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava obteve maiores desvios em relação às variações de temperatura do ar, chuva e [CO₂], apresentando maior sensibilidade do que o modelo CSM-MANIHOT-Cassava e sendo, portanto, mais adequado para estudos que avaliem os impactos das mudanças climáticas na produtividade da cultura da mandioca.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz, Modelos de simulação, Ajuste e validação

ABSTRACT

Cassava is an essential crop for the economy of most tropical countries. In Brazil, it is the fifth most important crop in value. Although cassava is a crop well adapted to different climates, it is difficult to project what is going to happen with this crop under the future climate scenarios. Crop simulation models have been used to quantify the future climate effects on crop yields giving support to the evaluation of strategies to mitigate or adapt to these changes. However, to use these models several adjustments are required so they can properly simulate crop yields under climate change. Therefore, this study aimed to: i) calibrate and test the DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava and CSM-MANIHOT-Cassava models to estimate the BRS Formosa yields; ii) to evaluate the adjustments done in these models to estimate cassava, cultivar BRS Formosa, yields, individually and in an ensemble; iii) analyze the sensitivity of these models for variations in air temperature, rainfall and [CO₂] their use in the studies about the impact of climate change on cassava yield. The models were calibrated based on the irrigated treatments of Embrapa's experiments conducted in Cruz das Almas, BA (2017/18) and Petrolina, PE (2015/16); and evaluated based on the water deficit treatments of the same experiments, as well as the irrigated and water deficit treatments from the experiment conducted in Cruz das Almas, BA, in 2018/19. Both phases were performed with water deficit, but no nutritional stress. The adjusted parameters of CSM-CROPSIM-Cassava were: BxyND, HMPC, LAFND, LAXS, LAXND, LLIFA, PHINT, SRFR, STFR, BRxFx, DUSRI, HTSTD and PHTV; whereas for CSM-MANIHOT-Cassava the parameters changed were: BxyND, BRxFx, LAXS, LLIFA, LNSLP, NODWT, PGERM,

TBLSZ and PHTV. The performance of the model was assessed by analyzing the relation between the experimental and simulated data, using the statistics indexes: R^2 , d, c, EAM, REQM e RREQM. Both models presented good performance for simulating cassava BRS Formosa yields, with MAE of 1193 and 1315 kg ha⁻¹, and c index of 0,87 and 0,81, respectively for CSM-CROPSIM-Cassava and CSM-MANIHOT-Cassava. The ensemble had a better performance than CSM-MANIHOT-Cassava, but it was not superior to CSM-CROPSIM-Cassava. The ensemble presented an intermediary MAE, of 1239 kg ha⁻¹, and c index of 0,85. Considering the sensitivity analysis, both models showed to be sensitive to variations in mean air temperature and [CO₂], in a direct and inverse way, respectively. For rainfall, CSM-MANIHOT-Cassava presented low sensitivity, whereas CSM-CROPSIM-Cassava was responsive to this variable. In general, the CSM-CROPSIM-Cassava model presented higher yield deviations in relation to the variations of air temperature, rainfall and [CO₂] than CSM-MANIHOT-Cassava model, being more suitable for studies about the impact of climate change on cassava crop yield.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz, Crop simulation models; Adjust and validation

2.1. Introdução

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura que contribui significativamente para a economia da maioria dos países tropicais (ZANETTI et al., 2014), além de servir como alimento básico para mais de 800 milhões de pessoas (FAO, 2013). A produtividade média mundial da mandioca varia entre 12,8 (FAO, 2013) e 40 t ha⁻¹ (NTAWURUHUNGA et al., 2006), porém, sob condições ótimas, a mandioca pode atingir produtividades de 80 t ha⁻¹ (FAO, 2013) ou mais (EL-SHARKAWY et al., 1990). Entre os cinco maiores produtores de mandioca, o Brasil produziu quase 19 milhões de toneladas em 2017 (FAOSTAT, 2017), mesmo ano em que a mandioca foi o quinto produto de maior importância em valor para o país, atrás das culturas da soja, da cana-de-açúcar, do milho e do café, com uma produtividade média de 14,35 toneladas por hectare (IBGE, 2017a). As diferenças que podem ocorrer na produtividade da mandioca são função de fatores climáticos, edáficos, hidrológicos, fisiológicos e de manejo (BHATIA et al., 2008).

A produtividade agrícola é altamente dependente das condições meteorológicas. A interação entre o genótipo e as condições de radiação solar, fotoperíodo e temperatura do ar, em uma população de plantas, define a produtividade potencial (PP) de uma cultura (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A produtividade atingível (PA) é obtida quando ocorre a penalização da PP pelo déficit hídrico, a qual define a produtividade máxima a ser atingida por culturas de sequeiro sob condições ótimas de manejo. Quando a PA é limitada por práticas de manejo, como o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, adubação e preparo do solo, obtém-se a produtividade real (PR) (BINDRABAN et al., 2000; FERMONT et al., 2009; LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; BATTISTI et al., 2013; FISCHER, 2015; SENTELHAS et al., 2016), a qual costuma ser menor que a PA (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012).

No caso da cultura da mandioca, ela consegue alcançar produtividades de raízes satisfatórias em condições adversas de clima e solo (EL-SHARKAWY; COCK, 1987), o que a fez ser reconhecida tanto como cultura estratégica no combate à fome, principalmente em regiões mais secas (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; BURNS et al., 2010), como uma das culturas tropicais mais adaptáveis às mudanças climáticas (MCs). Sob estresse, a mandioca consegue aumentar sua temperatura ótima e reduzir sua necessidade de água para que os processos de fotossíntese, crescimento e produção de biomassa permaneçam ativos (EL-SHARKAWY, 2014). Sob estresse de déficit hídrico, ela é capaz de reduzir o crescimento da parte aérea até o próximo fornecimento de água (FAO, 2013), de modo que o crescimento de folhas e hastes é mais prejudicado do que o das raízes (EL-SHARKAWY, 1993).

Atualmente, a variabilidade climática tem afetado os sistemas de produção agrícola (KARL et al., 2008) e as projeções de mudanças do clima futuro deverão afetar as culturas ainda mais (LOBELL; GOURDJI, 2012; BENDER, 2018). O aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, que já atingiu 410 ppm (DLUGOKENCKY; TANS, 2019) e está previsto para atingir níveis entre 730 e 1020 ppm até o fim deste século (MEEHL et al., 2007; IPCC, 2014), modifica padrões de uso da água pela planta. Ele é capaz de aumentar a eficiência no uso da água (MORGAN et al., 2004), pela redução na condutância estomática e, consequente, diminuição do consumo de água pela planta (BARTON et al., 2011; BATTIPAGLIA et al., 2013) e secagem dos tecidos (PINTO et al., 2008), além de estimular a taxa fotossintética e apresentar potencial para elevar a produtividade de algumas culturas (MORAES et al., 2011; BARTON et al., 2011). Por outro lado, por contribuir para o aquecimento global (MEEHL et al., 2007; FORSTER et al., 2007), os benefícios da alta $[\text{CO}_2]$ podem não compensar os efeitos da elevação na temperatura do ar, a qual pode favorecer o encurtamento do ciclo de desenvolvimento das culturas e reduzir rendimentos (STRECK, 2005). Além disso, previsões indicam que o aumento de $[\text{CO}_2]$ causará alterações na quantidade e distribuição de chuvas (ALLEN; INGRAM, 2002), o que é alarmante, visto que o déficit hídrico está entre os principais fatores que limitam a produção de alimentos (WULLSCHLEGER; TSCHAPLINSKI; NORBY, 2002). Une-se a isso o fato de que temperaturas mais elevadas, associadas às modificações no regime de chuvas, aumentam o risco de seca (CRUZ et al., 2016). Assim, compreender a interação do sistema planta-solo-água e $[\text{CO}_2]$ é imprescindível.

A complexidade dos processos da natureza dificulta o entendimento do sistema real como um todo, e uma estratégia facilitadora é a descrição desses sistemas e dos processos envolvidos utilizando-se modelos matemáticos (O'LEARY, 2000). Os modelos de simulação de culturas (MSCs) são constituídos de um grupo de equações matemáticas que possibilitam estimar o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de uma dada cultura de interesse, a partir das condições ambientais (clima e solo), dos coeficientes genéticos das cultivares empregadas e de ações de manejo (MONTEITH, 1996). Os MSCs são capazes de simular o crescimento de culturas em cenários atuais e futuros (FINGER; SCHMID, 2008), e fazer simulações a partir de um único ano ou campo experimental, o qual é essencial para calibração e validação dos MSCs (HUNT; BOOTE, 1998), para que eles possam ser, então, utilizados em estudos de diferentes locais e condições climáticas (JONES et al., 2003). Sendo assim, no contexto de mudanças climáticas, os MSCs são fundamentais para avaliar como será a resposta das culturas (LEHMANN et al., 2013) e analisar estratégias para amenizar efeitos negativos na produtividade (MATTHEWS et al., 2013).

O “Decision Support System for Agrotechnology Transfer” (DSSAT), versão 4.7 (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2017), está entre os principais sistemas que empregam MSCs. Dentre os modelos que fazem parte do DSSAT, destacam-se o CSM-CROPSIM-*Cassava* e o CSM-MANIHOT-*Cassava*, empregados para a simulação da cultura da mandioca. O CSM-CROPSIM-*Cassava* é derivado do modelo GUMCAS (MATTHEWS; HUNT, 1994), que foi modificado e adaptado para ser inserido na estrutura do CSM (do inglês “Cropping System Model”) na plataforma DSSAT (SARAWAT et al., 2000; MITHRA; RAVINDRAN; SREEKUMAR, 2000). O CSM-MANIHOT-*Cassava*, recentemente adicionado à plataforma e ainda em desenvolvimento, visou superar limitações dos modelos de mandioca que o precederam (MORENO-CADENA, 2018).

Por outro lado, os MSCs apresentam muitas incertezas, reflexo de seu sistema complexo, o qual pode variar de acordo com as interações dos processos envolvidos nas simulações (BATTISTI, 2016), do número de parâmetros a serem ajustados e da quantidade de dados de entrada (DUARTE, 2018). A abordagem que tem sido recomendada em resposta a essa questão é o uso de modelos em conjunto (“ensemble”), que considera a média entre

os modelos, tendo como objetivo minimizar as incertezas associadas a cada um dos modelos quando estes são empregados individualmente (ASSENG et al., 2013; BASSU et al., 2014; GRASSINI et al., 2015; BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017) e a avaliar a sensibilidade dos modelos às variações do clima (MARIN et al., 2015; LI et al., 2015). O uso do “ensemble” tem se mostrado relevante na estimativa da produtividade de diferentes culturas (ASSENG et al., 2013; MARTRE et al., 2014; DUARTE, 2018) e na compreensão das respostas dos modelos às condições de clima (BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017; BENDER, 2017).

Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivos: i) calibrar e testar os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava* para simular a produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa; ii) avaliar os ajustes realizados nos modelos para a estimação da produtividade dessa cultivar, tanto individualmente como em conjunto (“ensemble”); e iii) analisar a sensibilidade desses modelos às variações de temperatura do ar, chuva e [CO₂], visando o uso dos mesmos em estudos dos impactos das mudanças climáticas na cultura da mandioca no Brasil.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Dados experimentais

Para a calibração de modelos, é indicada a utilização de dados de experimentos oriundos de ensaios conduzidos sem estresse, de modo a obter produtividades as mais próximas do potencial. Assim, os dados utilizados para a calibração foram obtidos somente em experimentos irrigados e fertilizados, conduzidos entre 2015 e 2018. Os experimentos de campo foram conduzidos pela Embrapa Mandioca e Fruticultura, em duas localidades do Nordeste brasileiro: Petrolina, PE (Lat 9°23' S, Long 40°30' W, Alt 376 m) e Cruz das Almas, BA (Lat 12°40' S, Long 39°6' W, Alt 225 m). A cultivar de mandioca utilizada nos experimentos de campo foi a BRS Formosa, uma cultivar industrial, com alto conteúdo de amido (CONCEIÇÃO, 1979). O manejo da cultura foi realizado de acordo com as recomendações da Embrapa (EMBRAPA, 2003). Manivas com cerca de 16 cm foram plantadas a 10 cm de profundidade, com espaçamento de 90 cm entrelinhas e 80 cm entre plantas. Sua densidade foi estimada em 1,388 plantas por m².

O experimento de Petrolina foi conduzido entre novembro de 2015 e novembro de 2016, e os dados de produtividade foram coletados quatro, cinco, sete e 12 meses após o plantio. O experimento de Cruz das Almas foi conduzido entre novembro de 2017 e dezembro de 2018, o qual teve suas análises e coleta de dados feitas ao longo do período experimental objetivando obter informações específicas que concordassem com as variáveis de cultivar e ecotipo dos modelos de mandioca. Os dados coletados foram divididos em dados não-destrutivos, como o número total de folhas e número total de cicatrizes de folhas e longevidade ou duração da folha, e dados destrutivos, como biomassa de raízes, caules e folhas, área foliar total e índice de área foliar (IAF).

Para a avaliação dos modelos com dados independentes, dois grupos de dados experimentais foram utilizados. O primeiro grupo foi compreendido por dados coletados durante os mesmos experimentos usados na calibração, porém considerando somente os tratamentos com déficit hídrico. O segundo grupo consistiu nos dados de um experimento conduzido em Cruz das Almas, BA, plantado em janeiro de 2019. Os dados deste experimento foram aqueles relativos aos primeiros 130 dias de ciclo, em condição de sequeiro e de irrigação, sendo esta efetuada aos 60 e 90 dias após o plantio.

As localidades nas quais os experimentos foram realizados apresentam diferentes condições de clima e solo, o que é importante para os processos de calibração e avaliação de modelos de simulação de culturas. A classificação climática de Köppen para Cruz das Almas é zona tropical com inverno seco (Aw), enquanto para Petrolina é uma zona semiárida seca (BSh) (ALVARES et al., 2013) (Figura 2.1).

Figura 2.1. Classificação climática de Köppen para as localidades dos dados experimentais: Cruz das Almas, BA, e Petrolina, PE. Adaptado de Alvares et al. (2013).

2.2.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos empregados neste estudo foram obtidos a partir das bases de dados das estações meteorológicas convencionais pertencentes ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), disponíveis na região em que foram realizados os experimentos. Foram coletados dados climáticos diários de temperatura máxima e mínima, insolação, chuva, velocidade do vento e umidade relativa. Além desses, foi adicionada a média global de $[CO_2]$, em partes por milhão (ppm), referente a cada ano de experimento, sendo 392 ppm para 2012, 395 ppm para 2013, 397 ppm para 2014, 399 ppm para 2015, 403 ppm para 2016, 405 ppm para 2017, 407 para 2018 e 410 para 2019 (DLUGOKENCKY; TANS, 2019).

A plataforma DSSAT requer séries climáticas contínuas para cada uma das variáveis meteorológicas, o que pode exigir preenchimento de possíveis falhas (GARCÍA et al., 2001). Para o preenchimento de falhas dos dados de precipitação das séries do INMET, foram utilizados dados obtidos pela rede pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA), instaladas em um raio de abrangência de no máximo 20 km de distância da estação meteorológica do INMET utilizada ou local do experimento, sendo escolhida a estação que apresentasse série histórica mais completa no período do estudo. Para o preenchimento de falhas remanescentes de chuva e das demais variáveis meteorológicas, foram utilizados dados do banco de Xavier, King e Scanlon (2016), extraídos em grade de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

2.2.3. Dados de solo

Os dados dos solos se referem às informações do perfil de solo dos locais onde foram realizados os experimentos, tais como a classificação taxonômica, a profundidade do solo, propriedades físicas e químicas em diferentes camadas (textura, densidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, saturação de água, pH e porcentagem de carbono orgânico).

O solo dos campos experimentais em Cruz das Almas foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico Típico, apresentando textura franco argilo-arenosa (LIMA FILHO et al., 2013). Características como teores de argila, silte e areia, densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, entre outros, ao longo do perfil do solo, foram obtidas junto à Embrapa (EMBRAPA, 2001). A textura do solo dos campos experimentais em Petrolina (PE) foi classificada como franco arenosa (OLIVEIRA et al., 2017). Com base nessa informação, e utilizando o mapa do IBGE (2019), o solo foi definido como Argissolo Vermelho Amarelo. Suas demais características foram, então, obtidas junto ao banco de dados do RADAMBRASIL (1974), sendo posteriormente utilizadas para criar o perfil de solo similar ao de outro solo de mesma classificação, já existente no sistema DSSAT. Baseado nos teores de areia do solo, a capacidade de campo, a saturação e o ponto de murcha permanente foram determinados utilizando-se funções de pedotransferência desenvolvidas por Lopes-Assad et al. (2001), demonstradas nas equações (2.1), (2.2) e (2.3). As características dos solos estão resumidas na Tabela 2.1.

$$\theta_{cc} = 39,07988535 - 0,04098682 \times (Areia)^{1,455456594} \quad (2.1)$$

$$\theta_{pmp} = 26,16995195 - 0,05451078 \times Areia \times \ln(Areia) \quad (2.2)$$

$$\theta_{AD} = 12,76278562 - 0,0000098726 \times (Areia)^3 \quad (2.3)$$

em que: θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$), θ_{pmp} é a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$), θ_{AD} é a água disponível ($m^3 m^{-3}$) e areia (%). Mais detalhes sobre o perfil dos solos podem ser encontrados no APÊNDICE B.

Tabela 2.1. Características gerais dos solos nas áreas experimentais da Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas, BA, e em Petrolina, PE, as quais foram empregadas nos processos de calibração (C) e de avaliação (A) da cultivar de mandioca BRS Formosa com os modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Local	Características do solo								Uso
	Areia	Silte	Argila	Drenagem	pH	Carbono	Nitrogênio	Prof. Máxima do solo	
	(%)								
Latossolo Amarelo Distrófico									
Cruz das Almas	73,2	8,7	18,1	Moderado	6,2	0,43	4,0	160	C e A
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico									
Petrolina	55,0	29,0	16,0	Moderado	6,1	0,27	4,0	95	C e A

2.2.4. Modelos de simulação da cultura da mandioca

2.2.4.1. Modelo CSM-CROPSIM-Cassava

O modelo CSM-CROPSIM-Cassava é uma versão modificada do modelo GUMCAS (MATTHEWS; HUNT, 1994). As simulações das fases vegetativas e reprodutivas com esse modelo são mais afetadas pela temperatura e estresse hídrico (MATTHEWS; HUNT, 1994). Três fases fenológicas são definidas nas simulações: (i) plantio à emergência; (ii) emergência à primeira ramificação (estágio reprodutivo); e (iii) primeira ramificação à maturidade ou colheita (MATTHEWS; HUNT, 1994). O modelo usa temperatura e fotoperíodo para simular o momento da primeira ramificação, o qual é específico para cada cultivar, e as ramificações seguintes são desenvolvidas linearmente (SINGH et al., 1998). O aparecimento foliar é mais afetado pela temperatura e sua senescência é influenciada pela temperatura e sombreamento (SINGH et al., 1998). Como reportado por Matthews e Hunt (1994), o modelo assume que o crescimento das hastes e folhas ocorrem em uma taxa menor que o suprimento de assimilados e os assimilados remanescentes são estocados nas raízes. Mais detalhes sobre este modelo podem ser obtidos no Capítulo 1, seção 1.3.4.1.1.

2.2.4.2. Modelo CSM-MANIHOT-Cassava

De acordo com Moreno-Cadena (2018), um dos principais aprimoramentos no CSM-MANIHOT-Cassava para a cultura da mandioca é que ele assume um desenvolvimento indeterminado da cultura, o que não foi considerado pela maioria dos modelos que o precederam. Além disso, outros aspectos do modelo foram aprimorados ou incluídos, tais como a curva que define a área potencial da folha, algoritmos para considerar a germinação dos brotos das manivas, o desenvolvimento do conceito de “cohort”, o qual representa um conjunto de nós que são gerados ao mesmo tempo, e a curva que define o aumento da taxa de biomassa dos internódios e da duração das folhas (MORENO-CADENA, 2018). Apesar deste modelo ainda estar em fase de testes, ele já se encontra disponível para uso na plataforma do DSSAT. Mais detalhes sobre este modelo podem ser obtidos no Capítulo 1, seção 1.3.4.1.2.

2.2.5. Calibração, avaliação e combinação (“ensemble”) dos modelos

A calibração dos modelos foi realizada com base nos dados dos tratamentos irrigados dos experimentos da Embrapa, conduzidos em Cruz das Almas, BA, em 2017/18, e em Petrolina, PE, em 2015/16. No caso do experimento de Cruz das Almas, pelo fato de algumas análises terem sido realizadas em um intervalo de tempo muito grande, houve a necessidade de estimar valores para datas intermediárias com base nos dados reais e, no caso da área foliar, em modelos matemáticos (GUIMARÃES et al., 2019), o que permitiu um melhor ajuste de curvas de resposta do modelo durante a calibração. Além disso, a calibração foi realizada desabilitando-se o submodelo de fertilização, já que o fornecimento de nutrientes (nitrogênio, especificamente) em ambos os experimentos foi considerado ótimo, por seguirem as recomendações de adubação estipuladas pela própria empresa. Por outro lado, habilitou-se o submodelo que capta o estresse hídrico, de modo que o crescimento e desenvolvimento da mandioca foram influenciados somente por ele, caso o mesmo ocorresse.

A avaliação dos modelos foi realizada com base nos dados dos tratamentos com déficit hídrico dos mesmos experimentos, além dos tratamentos irrigado e sequeiro do experimento que conduzido em Cruz das Almas, BA, em

2018/19. Esta etapa apresentou as mesmas especificações da etapa anterior, sendo efetuada com déficit hídrico, porém sem estresse nutricional.

Para simular o crescimento da mandioca para o SAB utilizando os modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*, realizou-se, primeiramente, a calibração dos modelos. Este processo consistiu em variar os parâmetros dos modelos até que se atingisse a melhor relação entre as variáveis simuladas e observadas nos experimentos de campo (CONFALONIERI et al., 2009; WALLACH, 2011; COSTA, 2015). Em seguida, realizou-se o processo de avaliação dessa calibração, ou seja, verificou-se se as simulações realizadas pelo modelo conseguiram, de fato, simular o sistema para o qual o modelo foi proposto, empregando-se, para tanto, dados independentes, ou seja, que não foram utilizados na fase de calibração. Esses processos são imprescindíveis para que se possa gerar resultados compatíveis com a realidade do campo, sendo necessários ajustes principalmente em função das diferenças existentes entre os diversos genótipos disponíveis (ANGULO et al., 2013; LIU et al., 2015).

A primeira etapa para a calibração dos modelos foi criar o arquivo “file.csx” no Xbuild do sistema DASSAT, o qual corresponde ao arquivo de cultura e experimento de mandioca. Neste arquivo, são inseridas todas as informações relacionadas ao experimento, como seu nome, tipo de solo, estação meteorológica, variedade, data de plantio, densidade de plantio, espaçamento, irrigação, fertilizantes e outras condições ambientais. Os dados de solo e clima são inseridos no sistema por meio, respectivamente, dos módulos Sbuild e “WeatherMan” do mesmo sistema.

As opções de simulação foram escolhidas no “file.csx”, onde é possível habilitar ou desabilitar os submodelos de manejo, tais como irrigação, plantio e fertilização. Após criar o “file.csx”, a nova cultivar foi calibrada alterando-se os parâmetros genéticos da mandioca referentes a cultivar (Tabela 2.2), encontrados no arquivo “file.cul”, e, quando necessário, alterou-se também parâmetros genéticos referentes à espécie (“file.spe”) e ao ecotipo (“file.eco”). A calibração de uma determinada variedade, normalmente, resume-se às alterações nos valores de parâmetros genéticos de cultivar, até que se atinja a melhor relação entre as variáveis simuladas e observadas, expressa em termos de índices estatísticos. Neste estudo, houve também a necessidade de se alterar parâmetros de espécie e ecotipo, específicos de cada modelo. Após esse processo, a nova cultivar foi inserida nos arquivos “CSCAS047.cul” e “CYCAS047.cul”, respectivamente para os modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Tabela 2.2. Parâmetros genéticos de cultivar dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Modelo	Parâmetros	Definição do parâmetro
CROPSIM e MANIHOT	BxyND	Duração do ramo x até o ramo y
	HMPC	Conteúdo de água no produto colhido (%)
	LA1S	Área por folha (cm ²) das primeiras folhas quando desenvolvidas sem estresse
	LAXS	Valor máximo de área por folha (cm ²)
	LLIFA	Tempo termal entre máxima expansão foliar e o começo da senescência (°Cd)
	LPEFR	Fração do pecíolo da folha (fração da lâmina + pecíolo)
	PPSn	Sensibilidade ao fotoperíodo por fase “n” (% queda/10h de alteração no fotoperíodo)
	SLAS	Área específica da lâmina da folha quando cultura desenvolvida sem estresse (cm ² /g)
CROPSIM	LAFND	Número do nó em que LAXS é alcançado no fim do ciclo (#)
	LAFS	Área por folha no fim do ciclo (cm ²)
	LAXND	Número do nó quando o potencial máximo de área por folha é alcançado (#)
	LAXN2	Número do nó quando o potencial de área por folha começa a reduzir (#)
	PHINT	Intervalo entre o aparecimento do meristema foliar e a primeira folha (°Cd)
	SRFR	Fração de assimilados designados para o dossel que foi direcionado à raiz (#)

	SR#W	Número de raízes por unidade de peso do dossel (#/g)
	STFR	Fração de assimilados do caule destinado ao crescimento do dossel (#)
	BRxFX	Número de ramificações por ramificação na ramificação x (#)
	LNSLP	Inclinação de produção de folhas (0,8: baixo, 1,0 médio e 1,2 taxa alta)
MANIHOT	NODWT	Peso do nó do primeiro caule antes de se ramificar a 3400°Cd (g)
	NODLT	Comprimento do internódio (cm) do primeiro caule antes de ramificar quando lignificado

Adaptado de DSSAT, versão 4.7. Fonte: Hoogenboom et al. (2017).

Para a calibração dos modelos, para uma dada cultivar, a sequência de etapas gerais recomendada por Hunt e Boote (1998) foi adaptada para a cultura da mandioca:

1) Ciclo de vida da cultura: ajustar florescimento, datas de primeiro plantio e maturidade e características de sensibilidade ao fotoperíodo (PPSn) e duração das fases do ciclo de vida (BxyND, LLIFA e PHINT);

2) Acúmulo de matéria seca: se o acúmulo de matéria seca parecer muito rápido ou muito lento, será necessário ajustar os parâmetros que afetam a fotossíntese da parte aérea e acúmulo de amido nas raízes, como os LAFS, LA1S, NODWT e SRFR;

3) Índice de área foliar e área foliar específica: ajustar parâmetros de folha, tais como LAXS, LPEFR e SLAS;

4) Acúmulo de matéria seca: após corrigir os parâmetros de folha, é necessário retornar à etapa de acúmulo de biomassa e reajustar os parâmetros;

5) Maturidade: ajustar o período entre primeiro plantio e maturidade.

Após o processo de calibração dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*, esses foram avaliados quanto às suas capacidades de simular as diferentes variáveis de crescimento e desenvolvimento da mandioca, de forma individual e em conjunto (“ensemble”), sendo este último o valor médio das simulações feitas pelos dois modelos testados. Tal procedimento visou garantir que o modelo fosse adequadamente ajustado para a cultivar BRS Formosa. Quando esta parte foi finalizada, o modelo pôde ser usado para simulações.

2.2.6. Análise estatística

O desempenho dos modelos em relação aos dados observados, individualmente e em conjunto, foi verificado com base nos indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (r^2), índice de concordância (d) de Willmott (1982), índice de confiança ou de desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e raiz do erro quadrático médio relativo (RREQM). Esses índices são obtidos pelas equações 2.4 a 2.9.

$$R^2 = \frac{\sum (E_i - \bar{O})^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (2.4)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (2.5)$$

$$c = d \cdot \sqrt{R^2} \quad (2.6)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum |E_i - O_i|$$

(2.7)

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{n}}$$

(2.8)

$$RREQM = \frac{REQM}{\bar{O}}$$

(2.9)

em que: E_i corresponde aos valores estimados pelos modelos; O_i aos valores observados; $\bar{O}$ é a média dos valores observados; e n é o número total de valores observados ou estimados.

2.2.7. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade dos modelos foi realizada para compreender suas respostas às alterações de determinadas variáveis meteorológicas para simular os possíveis cenários de mudanças climáticas, sendo essas alterações efetuadas nas temperaturas mínima e máxima, nos níveis de $[CO_2]$ e na chuva. Para tal análise, as simulações foram realizadas ao longo de 31 anos (1980-2010).

As simulações foram semelhantes aos dos experimentos utilizados nos processos de calibração e avaliação, ou seja, utilizando manivas de 16 cm, profundidade de plantio de 10 cm, densidade populacional de 1,388 plantas m^{-2} e espaçamento entrelinhas de 90 cm. A data de semeadura foi definida como o dia 15 do mês mais recomendado para o plantio de mandioca, de acordo com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), e a colheita foi realizada 18 meses após a semeadura, totalizando 29 ciclos no período. A cultura da mandioca foi conduzida em condição de sequeiro, com as simulações pelos modelos sendo efetuadas para considerar condições de ausência de déficit nutricional.

Para as simulações da análise de sensibilidade foram selecionadas duas localidades com diferentes características climáticas (ALVARES et al., 2013) e tipos de solo: Inhambupe (BA), que apresenta clima característico de região subtropical úmida, com inverno seco, e solo classificado como argissolo; e Juazeiro (BA), que apresenta clima de região seca com baixas latitude e altitude, com ocorrência de chuvas, principalmente, entre os meses novembro e abril, e solo classificado como planossolo (Tabela 2.3). No período compreendido entre 1980 e 2010, Inhambupe apresentou valores médios diários de temperaturas máxima e mínima do ar de 30,0 °C e 20,1 °C, respectivamente, e valor médio anual de chuva de 923 mm; enquanto, para o mesmo período, Juazeiro apresentou valores médios diários de temperaturas máxima e mínima do ar de 31,6 °C e 21,2 °C, respectivamente, e valor médio anual de chuva em torno de 471 mm.

Tabela 2.3. Locais empregados na análise de sensibilidade dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*, para estimação da produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, com respectivas siglas, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura do solo e classificação climática de Köppen.

Local, Estado	Sigla	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Tipo de solo	Textura	Classificação climática de
---------------	-------	----------	-----------	----------	--------------	---------	----------------------------

							Köppen
Inhambupe, BA	INHA	-11,78	-38,34	158	Argissolo	Arenosa	Aw
Juazeiro, BA	JUZA	-9,67	-40,60	396	Planossolo	Arenosa	BSh

2.2.7.1. Análise de sensibilidade dos modelos CSM-CROPSIM-Cassava e CSM-MANIHOT-Cassava

Para realizar a análise, as temperaturas mínima e máxima diárias foram alteradas pela adição ou subtração de 1, 2, 3, 4 e 5 °C em relação aos valores diários da série histórica atual (1980-2015). Para a chuva, foram considerados tratamentos com variações percentuais nos valores diários de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$ e $\pm 50\%$ em relação à série histórica atual (1980-2010), para os quais o número de dias secos e úmidos não foram alterados. Por se tratar de uma região muito seca e com boa parte do ano sem chuva, foram considerados também duas outras alterações em que se incluiu chuvas de 1 e 2 mm nos dias sem chuva. Para as variações nas $[\text{CO}_2]$, foram considerados valores variando de 362 ppm até 762 ppm, com incrementos de 100 ppm em relação à média de $[\text{CO}_2]$ da série histórica atual (362 ppm), representando os diferentes cenários de mudanças climáticas previstos. As simulações para análise das respostas dos modelos às alterações das temperaturas máxima e mínima do ar, da chuva e da $[\text{CO}_2]$ foram conduzidas mantendo-se o módulo de balanço hídrico ativado e o de balanço nutricional desativado, de modo que a produtividade ficou condicionada, além das variáveis mencionadas, à ocorrência de eventos de chuva ao longo do ciclo da mandioca.

2.2.7.2. Avaliação da análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada considerando-se as variações percentuais na produtividade de raízes de mandioca em relação às condições atuais, por meio dos valores médios para os 31 anos de simulações, que corresponderam a 29 valores simulados de produtividade. Com base nessas produtividades, determinou-se a variação relativa de produtividade (ΔP , em %):

$$\Delta P(\%) = \left[1 - \left(\frac{P_{\text{alterado}}}{P_{\text{atual}}} \right) \right] \times 100 \quad (2.10)$$

em que: P_{alterado} e P_{atual} são as produtividades simuladas para os cenários de alterações nas temperaturas do ar, na chuva e na $[\text{CO}_2]$ e para o cenário atual, sem alteração, respectivamente. Um fluxograma com as etapas desse Material e Métodos pode ser encontrado no APÊNDICE A.

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Calibração e avaliação do modelo CSM-CROPSIM-Cassava

2.3.1.1. Ajuste de parâmetros

Os parâmetros genéticos de cultivar do modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* ajustados com base nos dados experimentais da cultivar de mandioca BRS Formosa foram: BxyND, HMPC, LAFND, LAXS, LAXND, LLIFA, PHINT, SRFR e STFR (Tabela 2.2). Além deles, os de ecotipo BRxFx (número de ramificações por ramificação na ramificação “x”), DUSRI (Graus-dia quando o número de raízes foi determinado, em °Cd) e HTSTD (altura padrão do dossel) foram ajustados. O parâmetro de espécie PHTV (limite a partir do qual o déficit de pressão de vapor começa a afetar a fotossíntese, em kPa), cujo valor padrão é 5,0 kPa, foi testado e alterado para 2,0 kPa. Todos os novos valores dos parâmetros do modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Parâmetros genéticos do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* calibrados para a cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, em condições brasileiras.

Parâmetros genéticos							
Ramificação						Raiz	
B01ND	B12ND	B23ND	B34ND	B45ND	B56ND	SRFR	HMPC
(número de nós)							(%)
80	40	20	30	100	100	0,20	57
Folha					Haste	Espécie	
LAFND	LAXS	LAXND	LLIFA	PHINT	STFR	PHTV	
	(cm²)		(Tu)	(°Cd)		(kPa)	
110	350	80	899	27	0,43	2,0	
Ecotipo							
BR1FX	BR2FX	BR3FX	BR4FX	BR5FX	BR6FX	DUSRI	HTSTD
1,5	2,6	2,0	1,5	1,5	1,5	800	170

2.3.1.2. Performance do modelo

As simulações para os diferentes dados obtidos no experimento em Cruz das Almas foram realizadas com o PHTV = 2,0 kPa (Figura 2.2, Tabela 2.5). Na etapa de calibração, o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* foi capaz de simular inúmeras variáveis de crescimento da cultura apropriadamente. Para o número de ramificações, o índice d alcançou 0,56 (Figura 2.2a). A relação entre o número de folhas por haste observado e simulado foi alta ($R^2 = 0,98$), com o REQM de 6,3 folhas e RREQM de 9,7% (Figura 2.2b). O peso das folhas (Figura 2.2c) e o IAF (Figura 2.2d) apresentaram relação muito baixa entre os valores simulados e observados, com R^2 de 0,07 e 0,53 e índice d de 0,52 e 0,65, respectivamente. Quanto às outras variáveis, a relação entre os dados observados e simulados foi boa, com $R^2 = 0,67$, REQM = 1096,9 kg ha⁻¹ e RREQM = 40,0% para peso das hastes (Figura 2.2e) e $R^2 = 0,70$, REQM = 3224,5 kg ha⁻¹ e RREQM = 29,5% para o peso total (Figura 2.2f).

Figura 2.2. Evolução dos valores observados e simulados, pelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, do número de ramificações (a), número de folhas por haste (b), peso das folhas (c), índice de área foliar (IAF) (d), peso das hastes (e) e peso total (f), para diferentes dias após plantio (DAP), para o experimento irrigado em Cruz das Almas, BA.

As simulações de produtividade de raízes para os experimentos de Cruz das Almas e Petrolina na etapa de calibração são apresentadas na Figura 2.3 e Tabela 2.5. O CSM-CROPSIM-*Cassava* foi capaz de simular a matéria seca das raízes adequadamente para ambas as localidades, com boa a alta precisão, já que o R^2 foi de 0,92 para Petrolina e 0,80 para Cruz das Almas. A acurácia também foi boa, com REQm e RREQm alcançando os valores 1094,0 kg ha⁻¹ e 30,7% em Petrolina e REQm e RREQm de 2317,0 kg ha⁻¹ e 32,7% em Cruz das Almas, respectivamente. Além disso, as duas localidades apresentaram resultados de simulação consistentes, com índice d = 0,92 para Cruz das Almas e d = 0,94 para Petrolina.

Figura 2.3. Evolução dos valores observados e simulados, pelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, de produtividade de raízes de mandioca, em kg MS ha⁻¹, cultivar BRS Formosa, para diferentes dias após plantio (DAP), para o experimento irrigado em Cruz das Almas, BA, e Petrolina, PE.

Tabela 2.5. Desempenho do modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* para a estimação do número de ramificações, do número de folhas por haste, do índice de área foliar (IAF), do peso das folhas, hastes, raízes e peso total, em kg MS ha⁻¹, da cultivar de mandioca BRS Formosa, em Cruz das Almas (BA) e Petrolina (PE), na fase de calibração.

Variável	Unidade	Local	REQM	RREQM (%)	R ²	d
Ramificações	-		0,41	27,6	0,99	0,56
Folhas por haste	-		6,3	9,7	0,98	0,98
IAF	-		0,38	37,1	0,53	0,65
Peso das folhas	kg MS ha ⁻¹	Cruz das Almas	587,3	59,9	0,07	0,52
Pesos das hastes	kg MS ha ⁻¹		1096,9	40,0	0,67	0,77
Peso total	kg MS ha ⁻¹		3224,5	29,5	0,70	0,89
Peso das raízes	kg MS ha ⁻¹		2317,1	32,7	0,80	0,92
	kg MS ha ⁻¹	Petrolina	1094,0	30,7	0,92	0,94

REQM = raiz do erro quadrático médio; RREQM = raiz do erro quadrático médio relativo;
R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância.

Na etapa de avaliação da calibração do modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, por insuficiência de dados do experimento de 2019 em Cruz das Almas, BA, os três experimentos realizados nessa localidade foram analisados estatisticamente juntos. Nessa etapa, o modelo também foi capaz de simular a maioria das variáveis de crescimento da cultura de modo apropriado (Figura 2.4, Tabela 2.6). Quanto ao número de ramificações, única variável em que se utilizou somente dados do experimento de 2017/18, o índice d alcançou 0,64 (Figura 2.4a). A relação entre o número de folhas por haste observado e simulado foi boa ($R^2 = 0,88$), com o REQM de 7,7 folhas e RREQM de 15,4% (Figura 2.4b). O peso das folhas (Figura 2.4c) e o IAF (Figura 2.4d) apresentaram relação baixa e muito baixa, com R^2 de 0,50 e 0,25, e índice d de 0,16 e 0,52, respectivamente. Quanto às demais variáveis, a relação entre os dados observados e simulados foi razoável, com $R^2 = 0,70$, REQM = 516,8 kg ha⁻¹ e RREQM = 32,3% para peso das hastes (Figura 2.4e) e $R^2 = 0,73$, REQM = 2200,8 kg ha⁻¹ e RREQM = 33,6% para o peso total (Figura 2.4f).

Figura 2.4. Evolução dos valores observados e simulados, pelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, do número de ramificações (a), número de folhas por haste (b), peso das folhas (c), índice de área foliar (IAF) (d), peso das hastes (e) e peso total (f), para diferentes dias após plantio (DAP), para os experimentos com déficit hídrico conduzidos em Cruz das Almas, BA, em 2017/18 e 2018/19 e irrigado em 2018/19.

As simulações de produtividade de raízes de mandioca para os experimentos de Cruz das Almas e Petrolina na etapa de avaliação são apresentadas na Figura 2.5 e Tabela 2.6. O CSM-CROPSIM-*Cassava* foi capaz de simular a matéria seca das raízes adequadamente para ambas as localidades, com razoável precisão, já que o R^2 foi de 0,72 para Petrolina e 0,84 para Cruz das Almas. A acurácia também foi aceitável, com REQm e RREQm alcançando os valores 535,4 kg ha⁻¹ e 55,3% em Petrolina e REQm e RREQm de 1542,8 kg ha⁻¹ e 39,7% em Cruz das Almas, respectivamente. Ainda, as duas localidades apresentaram resultados de simulação consistentes, com índice d de 0,94 para Cruz das Almas e 0,70 para Petrolina.

Figura 2.5. Evolução dos valores observados e simulados, pelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, de produtividade de raízes de mandioca, em kg MS ha⁻¹, cultivar BRS Formosa, para diferentes dias após plantio (DAP), para os experimentos conduzidos em Cruz das Almas, BA, com déficit hídrico em 2017/18 e 2018/19 e irrigado em 2018/19, e com déficit hídrico em Petrolina, PE.

Tabela 2.6. Desempenho do modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* para a estimação do número de ramificações, do número de folhas por haste, do índice de área foliar (IAF), do peso das folhas, hastes, raízes e peso total, em kg MS ha⁻¹, da cultivar de mandioca BRS Formosa, em Cruz das Almas (BA) e Petrolina (PE), na fase de avaliação.

Variável	Unidade	Local	REQM	RREQM (%)	R ²	d
Ramificações	-		0,39	24,0	0,99	0,64
Folhas por haste	-		7,7	15,4	0,88	0,96
IAF	-		0,8	68,2	0,25	0,52
Peso das folhas	kg MS ha ⁻¹	Cruz das Almas	564,2	51,6	0,50	0,16
Pesos das hastes	kg MS ha ⁻¹		516,8	32,3	0,70	0,89
Peso total	kg MS ha ⁻¹		2200,8	33,6	0,73	0,91
Peso das raízes	kg MS ha ⁻¹		1542,8	39,7	0,84	0,94
	kg MS ha ⁻¹	Petrolina	535,4	55,3	0,72	0,70

REQM = raiz do erro quadrático médio; RREQM = raiz do erro quadrático médio relativo; R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância.

2.3.2. Calibração e avaliação do modelo CSM-MANIHOT-*Cassava*

2.3.2.1. Ajuste de parâmetros

Os parâmetros genéticos de cultivar do modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* que foram ajustados com base nos dados experimentais foram: BxyND, BRxFx, LAXS, LLIFA, LNSLP e NODWT (Tabela 2.2). Além deles, alguns parâmetros de ecotipo tiveram de ser ajustados, tais como o PGERM, que é a duração da germinação em unidades térmicas (Tu), determinado pela soma de unidades térmicas entre o plantio e a germinação das plantas de mandioca, e o TBLSZ, que é a temperatura base para o desenvolvimento foliar, considerado como 13 °C.

O parâmetro de espécie PHTV, que, tal como no modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, representa o limite a partir do qual o déficit de pressão de vapor (DPV) começa a afetar a fotossíntese (em kPa), foi o principal parâmetro nas fases de calibração e avaliação deste modelo. O valor padrão desse parâmetro (0,8 kPa) estava superestressando

as plantas nas simulações para os experimentos em locais secos. Assim, ele teve que ser testado, de modo a evitar o efeito excessivo deste nas regiões avaliadas. Os valores testados apresentados nesse estudo foram 0,8 e 2,0 kPa, os quais se encontram dentro do intervalo (0,8 a 3,0 kPa) mencionado por El-Sharkawy, Tafur e López (2013). Todos os valores calibrados dos parâmetros do CSM-MANIHOT-*Cassava* para a cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7. Parâmetros genéticos do modelo DSSAT CSM-MANIHOT-*Cassava* calibrados para a cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, em condições brasileiras.

Parâmetros genéticos						
Ramificação						Haste
B01ND	B12ND	BR1FX	BR2FX	BR3FX	BR4FX	NODWT
(Tu)						(g)
724	500	1,5	2,6	2,0	1,5	4,00
Folha		Espécie		Ecótipo		
LAXS	LLIFA	LNSLP	PHTV	PARUE	TBLSZ	PGERM
(cm ²)	(Tu)		(kPa)	(g/MJ)	(°C)	(Tu)
350	899	0,70	0,8	2,10	13,0	180

2.3.2.2. Performance do modelo

Os diferentes dados coletados durante os experimentos conduzidos entre 2017 e 2018 em Cruz das Almas, BA, com a cultivar BRS Formosa, permitiu realizar uma comparação detalhada dos dados observados e simulados ao longo do ciclo da mandioca (Figura 2.6, Tabela 2.8). O parâmetro PHTV demonstrou influenciar as simulações de modo que os resultados diferissem entre as regiões subúmidas e semiáridas. As simulações para a localidade de Cruz das Almas (clima subúmido) foram, então, realizadas com o valor padrão de PHTV = 0,8 kPa (Figura 2.6) e o ajustado, de 2,0 kPa.

Na etapa da calibração, utilizando o PHTV padrão, observa-se que, para a maioria das variáveis, o modelo foi capaz de acompanhar as fases do desenvolvimento da cultura no campo. A fase de crescimento da planta foi definida relatando-se em que dia após o plantio (DAP) o número de ramificação aumentou. O modelo foi capaz de simular isto adequadamente, com o índice $d = 0,99$ (Figura 2.6a). O número de folhas por haste foi obtido com a soma das folhas e cicatrizes de folhas de cada caule analisado. A relação entre os dados observados e simulados de número de folhas por haste foi positiva ($R^2 = 0,98$), com REQM de 5,6 folhas e RREQM de 8,6% (Figura 2.6b). O peso das folhas (Figura 2.6c) e o IAF (Figura 2.6d) apresentaram correspondências satisfatórias, com R^2 de 0,72 e 0,79, d de 0,60 e 0,88, respectivamente. Para o peso das hastes (Figura 2.6e) e peso total (Figura 2.6f), a relação entre os dados observados e simulados apresentaram R^2 de 0,65 e 0,73, REQM de 1230,0 e 3038,7 kg ha⁻¹, e RREQM de 45,0% e 27,8%, respectivamente. Quando alterado o valor do PHTV para 2,0 kPa, observou-se pouca ou nenhuma variação em relação ao PHTV padrão quanto ao número de ramificação e de folhas, ao IAF, ao peso das folhas e dos caules (Tabela 2.8), motivo pelo qual optou-se por não inserir figuras para esse PHTV. Por outro lado, o modelo superestimou o peso total das plantas, apresentando REQM de 6657,3 kg ha⁻¹ e RREQM de 61,0% (Tabela 2.8).

Figura 2.6. Evolução dos valores observados e simulados, pelo modelo CSM-MANIHOT-*Cassava*, do número de ramificações (a), número de folhas por haste (b), peso das folhas (c), índice de área foliar (IAF) (d), peso das hastes (e) e peso total (f), para diferentes dias após plantio (DAP), para o experimento irrigado em Cruz das Almas, BA, considerando-se PHTV = 0,8 kPa.

As produtividades das raízes obtidas com as simulações para os experimentos de Cruz das Almas e Petrolina em pregando-se valores de PHTV de 0,8 kPa e de 2,0 kPa são apresentadas na Figura 2.7 e Tabela 2.8. Nota-se que o valor original de PHTV do modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* (0,8 kPa) (Figura 2.7a) estressa as plantas demasiadamente, levando a uma subestimativa da matéria seca de raízes em Petrolina, enquanto o PHTV = 2,0 kPa (Figura 2.7b), superestima a produtividade em ambas as localidades. A simulação para Cruz das Almas apresentou o mesmo nível de variabilidade para ambos os valores de PHTV ($R^2 = 0,83$). Entretanto, a REQM e a RREQM quase que duplicaram, variando de 2369,8 kg ha⁻¹ e 33,5%, com o valor padrão de PHTV, para 4824,6 kg ha⁻¹ e 68,3% para o PHTV de 2,0 kPa. Para Petrolina, considerando-se o efeito potencial do VDP quando simulado

com o PHTV original, mesmo com um baixo nível de concordância entre os valores ($d = 0,58$) e alto RREQM (79,4%), o R^2 e o REQM foram melhorados, alcançando, respectivamente, 0,90 e 2821,8 kg ha⁻¹. Por outro lado, com o valor de PHTV ajustado, apesar do índice d ter sido melhor (0,65) e o R^2 semelhante (0,89), ambos os REQM e RREQM apresentaram valores mais elevados (3730,3 kg ha⁻¹ e 179,3%, respectivamente).

Figura 2.7. Evolução dos valores observados e simulados, pelo modelo CSM-MANIHOT-Cassava, de produtividade de raízes de mandioca, em kg MS ha⁻¹, cultivar BRS Formosa, para diferentes dias após plantio (DAP), para os experimentos irrigados em Cruz das Almas, BA, e Petrolina, PE, considerando-se PHTV = 0,8 kPa (a) e PHTV = 2,0 kPa (b).

Tabela 2.8. Desempenho do modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* para a estimação do número de ramificações, do número de folhas por haste, do índice de área foliar (IAF), do peso das folhas, hastes, raízes e peso total, em kg MS ha⁻¹, para a cultivar de mandioca BRS Formosa, em Cruz das Almas (BA) e Petrolina (PE), na fase de calibração, considerando-se PHTV de 0,8 e 2,0 kPa.

Variável	Unidade	Local	REQM		RREQM (%)		R ²		d	
			0,8	2,0	0,8	2,0	0,8	2,0	0,8	2,0
Ramificações	-								0,99	0,99
Folhas por haste	-		5,6	5,6	8,6	8,6	0,98	0,98	0,98	0,98
IAF	-		0,178	0,193	17,0	18,4	0,79	0,81	0,88	0,87
Peso das folhas	kg MS ha ⁻¹	Cruz das Almas	536,1	522,2	54,7	53,3	0,72	0,78	0,60	0,62
Pesos das hastes	kg MS ha ⁻¹		1230,0	1248,9	45,0	45,7	0,65	0,65	0,86	0,86
Peso total	kg MS ha ⁻¹		3038,7	6657,3	27,8	61,0	0,73	0,73	0,91	0,78
Peso das raízes	kg MS ha ⁻¹		2369,8	4824,6	33,5	68,3	0,83	0,83	0,91	0,81
	kg MS ha ⁻¹	Petrolina	2821,8	3730,3	79,4	179,3	0,90	0,89	0,58	0,65

REQM = raiz do erro quadrático médio; RREQM = raiz do erro quadrático médio relativo; R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância.

Assim como no modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, na avaliação, a comparação entre as simulações feitas com o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* e os dados observados nos experimentos realizados em Cruz das Almas foi feita de forma conjunta. Nessa etapa, o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* também foi capaz de simular a maioria das variáveis de crescimento da cultura de modo apropriado (Figura 2.8, Tabela 2.9). Quanto ao número de ramificações, único em que se utilizou somente os dados do experimento de 2017/18, o índice d alcançou 0,97 (Figura 2.8a). A relação entre o número de folhas por haste observado e simulado foi ótima (R² = 0,93), com a REQM de 7,0 folhas e a RREQM de 13,9% (Figura 2.8b). O peso das folhas (Figura 2.8c) e o IAF (Figura 2.8d) apresentaram relação baixa e muito baixa, com R² de 0,47 e 0,11, e índice d de 0,57 e 0,42, respectivamente. Quanto às demais variáveis, o desempenho do modelo foi considerado “muito bom” para o peso total, porém somente “sofrível” para o peso dos caules. A relação entre os dados observados e simulados para o peso dos caules foi razoável, com R² = 0,50, REQM = 1369,9 kg ha⁻¹ e RREQM = 85,8% (Figura 2.8e) e boa para o peso total, com R² = 0,74, REQM = 2979,7 kg ha⁻¹ e RREQM = 45,6% (Figura 2.8f). Assim como na etapa da calibração, quando alterado o valor do PHTV para 2,0 kPa, observou-se pouca ou nenhuma variação em relação ao PHTV padrão quanto ao número de ramificação e de folhas, ao IAF, ao peso das folhas e dos caules (Tabela 2.9). Entretanto, o modelo voltou a simular o peso total das plantas muito acima do PHTV padrão, com REQM de 6521,9 kg ha⁻¹ e RREQM de 99,8%, e com um nível de concordância entre os valores simulados e observados mais baixo (0,71).

Figura 2.8. Evolução dos valores observados e simulados, pelo modelo CSM-MANIHOT-*Cassava*, do número de ramificações (a), número de folhas por haste (b), peso das folhas (c, índice de área foliar (IAF) (d), peso das hastes (e), e peso total (f), para diferentes dias após plantio (DAP), para o experimentos com déficit hídrico em Cruz das Almas, BA, em 2017/18 e 2019 e irrigado em 2018/19.

As simulações de produtividade de raízes para os experimentos de Cruz das Almas e Petrolina, na etapa de avaliação, são apresentadas na Figura 2.9 e Tabela 2.9. Observa-se que o modelo superestimou as produtividades quando o PHTV = 2,0 kPa utilizado, o que não ocorreu quando utilizado seu valor padrão. No caso do PHTV = 0,8 kPa, o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* foi capaz de simular a matéria seca das raízes adequadamente somente para Cruz das Almas, cuja precisão foi razoável, com R^2 foi de 0,88, contra 0,51 para Petrolina. A acurácia também foi razoável, com REQM e RREQM alcançando os valores 579,5 kg ha⁻¹ e 59,9% em Petrolina e REQM e RREQM de 1360,1 kg ha⁻¹ e 35,0% em Cruz das Almas, respectivamente. Além disso, as duas localidades apresentaram resultados de simulação consistentes, com índice d de 0,95 para Cruz das Almas e de 0,71 para Petrolina, porém o desempenho do modelo foi considerado “ótimo” para Cruz das Almas e “sofrível” para Petrolina, de acordo com índice de

Camargo e Sentelhas (1997). Quando o PHTV foi alterado para 2,0 kPa, embora a sua precisão tenha aumentado ($R^2 = 0,91$), os índices d (0,76) e c (bom) apresentaram resultados piores para Cruz das Almas. Por outro lado, em Petrolina houve piora mais expressiva na precisão ($R^2 = 0,44$) e no índice de concordância ($d = 0,17$), além de o desempenho ter sido classificado como péssimo e os valores de REQM e RREQM terem aumentado para 5651,0 kg ha⁻¹ e 584,5%, respectivamente.

Figura 2.9. Evolução dos valores observados e simulados, pelo modelo CSM-MANIHOT-*Cassava*, de produtividade de raízes de mandioca, em kg MS ha⁻¹, cultivar BRS Formosa, para diferentes dias após plantio (DAP), para os experimentos com déficit hídrico em Cruz das Almas, BA, em 2017/18 e 2018/19 e irrigado em 2018/19, e com déficit hídrico em Petrolina, PE, considerando-se PHTV = 0,8 kPa (a) e PHTV = 2,0 kPa (b).

Tabela 2.9. Desempenho do modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* para a estimação do número de ramificações, do número de folhas por haste, do índice de área foliar (IAF), do peso das folhas, hastes, raízes e peso total, em kg MS ha⁻¹, da cultivar de mandioca BRS Formosa, em Cruz das Almas (BA) e Petrolina (PE), na fase de avaliação, considerando-se PHTV de 0,8 e 2,0 kPa.

Variável	Unidade	Local	REQM		RREQM (%)		R ²		d	
			0,8	2,0	0,8	2,0	0,8	2,0	0,8	2,0
Ramificações	-								0,97	0,42
Folhas por haste	-		7,0	6,9	13,9	13,6	0,93	0,93	0,97	0,98
IAF	-		0,937	0,885	76,3	72,1	0,11	0,16	0,42	0,38
Peso das folhas	kg MS ha ⁻¹	Cruz das Almas	748,6	695,8	75,9	70,5	0,47	0,27	0,57	0,52
Pesos das hastes	kg MS ha ⁻¹		1369,9	1328,0	85,8	83,2	0,50	0,51	0,73	0,73
Peso total	kg MS ha ⁻¹		2979,7	6521,9	45,6	99,8	0,74	0,78	0,89	0,71
Peso das raízes	kg MS ha ⁻¹		1360,1	4720,0	35,0	121,3	0,88	0,91	0,95	0,76
	kg MS ha ⁻¹	Petrolina	579,5	5651,0	59,9	584,5	0,51	0,44	0,71	0,17

REQM = raiz do erro quadrático médio; RREQM = raiz do erro quadrático médio relativo; R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância.

2.3.3. Análise dos “ensembles” dos modelos para estimação da produtividade

Durante o processo de calibração dos modelos, os modelos avaliados, assim como a combinação deles, foram capazes de simular a produtividade da mandioca em diferentes condições de clima e solo (Figura 2.10). Nesta fase, a estimativa da produtividade de raízes da cultivar de mandioca BRS Formosa realizada pelo modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* foi superior aos demais ($R^2 = 0,85$; $d = 0,93$; $c = 0,8673$), como observado na Figura 2.10a e Tabela 2.10. De modo geral, tanto o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* (Figura 2.10b) quanto a análise dos modelos em conjunto (Figura 2.10c) apresentaram leve tendência a subestimar a produtividade da mandioca, demonstrando, assim, uma piora das estimativas em relação ao modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*. A média dos erros absolutos (EAM) para o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* foi de 1916,4 kg ha⁻¹, enquanto para a análise em conjunto foi inferior, de 1649,7 kg ha⁻¹ (Tabela 2.10). O EAM para o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* foi o menor, de 1456,1 kg ha⁻¹. Embora a análise dos modelos em conjunto tenha obtido maior precisão ($R^2 = 0,84$) que o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* sozinho ($R^2 = 0,78$), ambos apresentaram desempenho considerado “muito bom” pelo índice de Camargo e Sentelhas (1997), atingindo os valores 0,8442 e 0,7802, respectivamente. Por outro lado, quando o PHTV foi alterado para 2,0 kPa (Figura 2.11b, Tabela 2.10), apesar do modelo YUCA apresentar maior precisão do que o valor padrão ($R^2 = 0,82$), seu EAM foi elevado, de 3713,2 kg ha⁻¹. A nova análise em conjunto foi similar a anterior, obtendo R^2 de 0,84 (Figura 2.11c) e EAM de 1632,0 kg ha⁻¹.

Figura 2.10. Relação entre as produtividades de raízes de mandioca observadas em experimentos irrigados em Cruz das Almas, BA, e em Petrolina, PE, e as simuladas pelos modelos CSM-CROPSIM-Cassava (a), CSM-MANIHOT-Cassava, PHTV = 0,8 kPa (b) e pelo “ensemble” (c), na fase de calibração dos modelos.

Figura 2.11. Relação entre as produtividades de raízes de mandioca observadas em experimentos irrigados em Cruz das Almas, BA, e em Petrolina, PE, e as simuladas pelos modelos CSM-CROPSIM-Cassava (a), CSM-MANIHOT-Cassava, PHTV = 2,0 kPa (b) e pelo “ensemble” (c), na fase de calibração dos modelos.

Na avaliação da calibração dos modelos, os modelos avaliados, assim como as combinações deles, conseguiram simular a produtividade da mandioca com eficiência (Figuras 2.12 e 2.13, Tabela 2.10). Diferentemente da calibração, nesta fase a estimativa da produtividade da BRS Formosa realizada pelo modelo CSM-CROPSIM-Cassava foi inferior aos demais ($R^2 = 0,82$; $d = 0,94$; $c = 0,8579$), como mostra a Figura 2.12a e a Tabela 2.10. Tanto o modelo CSM-MANIHOT-Cassava, com PHTV de 0,8 kPa (Figura 2.12b) quanto a análise dos modelos em conjunto (Figura 2.12c) apresentaram alta precisão ao estimar a produtividade, obtendo R^2 de 0,85 e 0,84, respectivamente. Os erros absolutos médios (EAM) para a análise em conjunto foi de 955,1 kg ha⁻¹, enquanto para o modelo CSM-MANIHOT-Cassava foi inferior, de 897,7 kg ha⁻¹. O EAM para o modelo CSM-CROPSIM-Cassava foi o mais elevado, de 1012,5 kg ha⁻¹. Apesar disso, todos as análises apresentaram desempenhos considerados como “ótimo” pelo índice de Camargo e Sentelhas (1997), atingindo valores entre 0,8579 e 0,8872. Entretanto, quando o PHTV foi alterado para 2,0 kPa (Figura 2.13 e Tabela 2.10), tanto o modelo CSM-MANIHOT-Cassava (Figura 2.13b) quanto a análise em conjunto dos modelos (Figura 2.13c) apresentaram não só menor precisão, com R^2 de 0,75 e 0,79, como também maiores EAM, de 4070,7 e 1980,1 kg ha⁻¹, respectivamente.

Figura 2.12. Relação entre as produtividades de raízes de mandioca observadas em experimentos irrigados em Cruz das Almas, BA, e Petrolina, PE, e a simuladas pelos modelos CSM-CROPSIM-Cassava (a), CSM-MANIHOT-Cassava, PHTV = 0,8 kPa (b) e pelo “ensemble” (c), na fase de avaliação dos modelos.

Figura 2.13. Relação entre as produtividades de raízes de mandioca observadas em experimentos irrigados em Cruz das Almas, BA, e Petrolina, PE, e a simuladas pelos modelos CSM-CROPSIM-Cassava (a), CSM-MANIHOT-Cassava, PHTV = 2,0 kPa (b) e pelo “ensemble” (c), na fase de avaliação dos modelos.

Tabela 2.10. Desempenho dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava*, CSM-MANIHOT-*Cassava* (PHTV de 0,8 e 2,0 kPa) e os “ensembles” para a estimação da produtividade (P) da cultivar de mandioca BRS Formosa, nas fases de calibração e avaliação.

Modelo	P _{média} observada	P _{média} estimada	EAM	R ²	d	c
	kg MS ha ⁻¹					
Calibração						
CROPSIM		4373,1	1456,1	0,85	0,93	0,8673
MANIHOT (PHTV = 0,8 kPa)		3639,2	1916,4	0,78	0,87	0,7802
Ensemble	5504,3	4006,2	1649,7	0,84	0,91	0,8442
MANIHOT (PHTV = 2,0 kPa)	(± 4099,7)	9217,6	3713,2	0,82	0,79	0,7237
Ensemble		6795,3	1632,0	0,84	0,92	0,8542
Avaliação						
CROPSIM		2576,7	1012,5	0,82	0,94	0,8579
MANIHOT (PHTV = 0,8 kPa)		2720,8	897,7	0,85	0,95	0,8872
Ensemble	2990,2	2648,8	955,1	0,84	0,95	0,8763
MANIHOT (PHTV = 2,0 kPa)	(± 2966,4)	7060,9	4070,7	0,75	0,69	0,6067
Ensemble		4818,8	1980,1	0,79	0,85	0,7634

EAM = erro absoluto médio; R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.

Tanto na calibração quanto na avaliação, observou-se desempenho superior de um dos modelos individualmente em relação ao conjunto dos modelos. Isso é contrário ao observado em estudos com trigo (ASSENG et al., 2013; MARTRE et al., 2014), soja (BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017) e milho (BENDER, 2017; DUARTE, 2018). Apesar disso, houve bom desempenho de todos os modelos e dos “ensembles”, o que possibilitaria se admitir o uso de qualquer um deles para trabalhos futuros. No entanto, de acordo com Grassini et al. (2015), muitas vezes é preferível se empregar um menor número de modelos mais bem calibrados do que vários com baixo desempenho.

2.3.4. Análise de sensibilidade

As análises de sensibilidade, conduzidas para as localidades INHA e JUZA, para as simulações das produtividades da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, pelos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava* (para valores de PHTV de 0,8 e 2,0) e para o “ensemble” deles, para as variações nas temperaturas máxima e mínima do ar, na chuva e na [CO₂], são apresentadas nas Figuras 2.14 e 2.15.

Figura 2.14. Análise de sensibilidade dos modelos CSM-CROPSIM-Cassara e CSM-MANIHOT-Cassara, este último com PHTV igual a 0,8 kPa (a, b, c) e 2,0 kPa (d, e, f), e do “ensemble” deles para a estimação da produtividade da cultura da mandioca (média de 31 anos, 1980-2010), cultivar BRS Formosa, em função das alterações nas temperaturas máxima e mínima do ar, na chuva e nas concentrações de CO_2 atmosférico, em relação à série histórica atual (SH), em Inhambupe, BA, representando um local de clima subúmido.

Figura 2.15. Análise de sensibilidade dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*, este último com PHTV igual a 0,8 kPa (a, b, c) e 2,0 kPa (d, e, f), e o “ensemble” deles para a estimação da produtividade da cultura da mandioca (média de 31 anos, 1980-2010), cultivar BRS Formosa, em função das alterações nas temperaturas máxima e mínima do ar, na chuva e nas concentrações de CO₂ atmosférico em relação à série histórica atual (SH), em Juazeiro, BA, representando um local de clima semiárido.

As produtividades médias da cultivar BRS Formosa obtidas pelo modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* para as localidades de INHA e de JUZA, para o cenário atual, foram, respectivamente, de 9024,2 e 785,9 kg ha⁻¹ (Figuras 2.14a, 2.14b, 2.15a e 2.15b). A análise de sensibilidade mostrou que houve um aumento progressivo das produtividades com o decréscimo da temperatura do ar de até 3 °C para INHA (Figuras 2.14a e 2.14b) e de até 4 °C para JUZA (Figuras 2.15a e 2.15b). Para os decréscimos de temperatura além desses limites houve redução das produtividades. Com o acréscimo progressivo das temperaturas em relação aos níveis atuais, observou-se tendência de redução das produtividades, chegando a haver reduções da ordem de 71% em INHA e 72% em JUZA para o incremento de 5 °C. Quando foi empregado o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* com valor de PHTV = 0,8 kPa, os valores médios simulados para as temperaturas atuais foram de 3181,5 e 1592,8 kg ha⁻¹ (Figuras 2.14a e 2.15a). Quando as temperaturas foram reduzidas houve aumento das produtividades da ordem de 36% para INHA e redução de 19% para JUZA, para a diminuição de 5 °C. Quando as temperaturas foram aumentadas até 5 °C houve

redução gradativa das produtividades, em relação ao cenário atual, nas duas localidades, chegando a 79% em INHA e 88% JUZA. Para o “ensemble” dos modelos, as produtividades médias foram de 6102,8 kg ha⁻¹ para INHA (Figura 2.14a) e 1189,3 kg ha⁻¹ para JUZA (Figura 2.15a). Para INHA, houve aumento das produtividades de cerca de 3% com o decréscimo de 5°C, enquanto para JUZA, nessa mesma condição, houve redução de 14%. Já para o aumento das temperaturas, houve redução das produtividades de 73% para INHA e de 83% para JUZA, quando acrescidos 5 °C.

Quando o PHTV no modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* foi alterado para 2,0 kPa, as produtividades médias foram alteradas para 6561,5 kg ha⁻¹ para INHA (Figura 2.14d) e para 3369,7 kg ha⁻¹ para JUZA (Figura 2.15d). Quando houve redução nas temperaturas do ar, o modelo simulou aumento progressivo das produtividades médias para ambos os locais até 3 °C para INHA e até 2 °C para JUZA, havendo, além disso, tendência de redução das produtividades da mandioca tanto para INHA (Figura 2.14d) como para JUZA (Figura 2.15d). Por outro lado, as produtividades simuladas tenderam a diminuir gradativamente com o aumento das temperaturas para ambas as localidades, chegando esse decréscimo a ser da ordem de 65% em relação ao cenário atual para ambas as localidades na condição de +5 °C. O “ensemble” para essa nova condição resultou em produtividades médias de 7792,8 kg ha⁻¹ para INHA (Figura 2.14d) e de 2077,8 kg ha⁻¹ para JUZA (Figura 2.15d). Da mesma forma que para os resultados dos modelos individuais, houve aumento na produtividade com o decréscimo da temperatura até cerca de 2 °C de decréscimo e tendência de redução das produtividades para decréscimos de temperatura mais acentuados.

Esses resultados evidenciam a sensibilidade dos dois modelos às variações da temperatura do ar, mostrando que na região estudada o aumento das temperaturas resultou em decréscimos expressivos na produtividade de mandioca. Isso se deu principalmente devido aos efeitos dessa variável meteorológica na duração do ciclo da cultura e no processo fotossintético, como discutido por Streck (2005). Por outro lado, esses resultados divergem dos trabalhos de Gabriel et al. (2014), que concluiu que, em geral, as projeções de mudanças no clima não devem reduzir a produtividade da mandioca, e de Gleadow et al. (2009), que observaram que sob elevadas concentrações de CO₂ a mandioca produziu menos. Por outro lado, a diminuição das temperaturas resultou em ligeiro aumento das produtividades para valores de decréscimo menores e ligeira redução dessas para reduções mais acentuadas das temperaturas, o que está de acordo com os resultados obtidos por Alves (2002) e Huang et al. (2005).

Apesar da elevada disparidade observada entre as simulações da produtividade da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para o cenário atual e para as duas localidades, em todos os casos as produtividades simuladas para INHA foram mais elevadas do aquelas obtidas em JUZA, o que reflete a realidade. De acordo com dados do IBGE (2017b), entre os anos 2008 e 2017, INHA apresentou produtividades de mandioca mais elevadas, variando de 12 a 16 t ha⁻¹ (média de 14,5 t ha⁻¹) enquanto em JUZA as produtividades oscilaram entre 2,3 e 15,6 t ha⁻¹ (média de 10,3 t ha⁻¹). As diferenças observadas entre os dados do IBGE e das simulações deste estudo se devem ao fato de que, nessas áreas, durante a estação seca, os agricultores empregam diferentes níveis de irrigação, além de haver diferentes tipos de solo num mesmo município, condicionando diferentes capacidades de água disponível e, consequentemente, diferentes níveis de produtividade para a cultura da mandioca.

Por apresentar elevada temperatura ótima para crescimento, um efeito mais severo do aquecimento global na produtividade de mandioca poderia surgir da interação entre a elevação das temperaturas e a ocorrência de secas prolongadas (BROWN et al., 2016). FAO (2013) menciona que, uma vez estabelecida, a planta de mandioca consegue produzir razoavelmente com 400 mm de precipitação anual. Isso, no entanto, não implica que a mesma terá altas produtividades, uma vez que sob condições de déficit hídrico prolongado, a planta de mandioca passa por

um período de dormência (ALVES, 2006), sendo capaz de reduzir o seu crescimento até a próxima disponibilidade de água (FAO, 2013), o que reduz o crescimento das raízes de reserva.

De acordo com as Figuras 2.14b, 2.14e, 2.15b e 2.15e, as produtividades médias da mandioca simuladas pelo modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, para a cultivar BRS Formosa, para o cenário de 30% de decréscimos da chuva, foram reduzidas em 30% em INHA (Figuras 2.14b e 2.14e) e em 25% em JUZA (Figuras 2.15b e 2.15e), em relação às produtividades simuladas para o cenário atual. Para a condição de 30% de aumento na chuva, as produtividades aumentaram em 18% para INHA e em 15% para JUZA. Nos cenários em que os dias sem chuva foram substituídos por chuvas de 1 e 2 mm, em ambas as localidades houve aumento das produtividades, sendo este maior na região mais seca (JUZA), onde as produtividades aumentaram em 253%. Na região mais úmida (INHA), tal aumento foi menor, sendo da ordem de 45%, quando incluídas chuvas de 2 mm. Essa variação entre as localidades se deveu ao fato de JUZA apresentar menos dias com eventos de chuva ao longo do ano. Já o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava*, com PHTV de 0,8 kPa, simulou pouca variação das produtividades entre os cenários de alteração da chuva em JUZA (Figura 2.15b), onde as produtividades variaram de -4% para o cenário de redução das chuvas em 30%, a +4% quando foram incluídos 2 mm de chuva nos dias secos. Em INHA (Figura 2.14b), essa variação foi mais acentuada, oscilando de -13% quando a chuva foi reduzida em 30% a +13% quando houve incremento de 30% nas chuvas. O “ensemble” dos modelos apresentou redução das produtividades da ordem de 26% em INHA (Figura 2.14b) e de 11% em JUZA (Figura 2.15b) sob o cenário de redução da chuva em 30%. Por outro lado, quando a frequência e volume de chuvas foram aumentados houve aumento das produtividades da ordem de 36% em INHA e de 86% em JUZA.

O modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* com PHTV = 2,0 kPa, assim como para as simulações com PHTV = 0,8 kPa, apresentou pouca variabilidade nas produtividades quando a chuva foi alterada na localidade mais seca (Figura 2.15d), onde houve redução de 5% da produtividade com menos 30% de chuva e aumento de 5% no cenário de com aumento da frequência e volume das chuvas. Para INHA (Figura 2.14d), houve redução de 19% na produtividade da mandioca quando as chuvas foram reduzidas em 30% de chuva e aumento de 21% quando os dias sem chuva da série histórica receberam 2 mm. O “ensemble” dos dois modelos apresentou maior variabilidade do que o CSM-MANIHOT-*Cassava*, com menores valores para o cenário de menos 30% de chuva (redução da produtividade de 26% para INHA e de 9% para JUZA) e maiores para o cenário com 2 mm de chuva, sendo as produtividades 35% maiores do que o cenário atual em INHA (Figura 2.14d) e 52% maiores em JUZA (Figura 2.15d).

Esses resultados demonstram que as respostas nos níveis de produtividade da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para a alteração no acumulado total das chuvas foram mais expressivas quando se empregou o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, seguido dos “ensembles” dos modelos, os quais geraram maiores quebras na produtividade sob restrição hídrica. O modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* foi pouco responsivo a essa variação, notadamente na localidade mais seca (JUZA). A menor sensibilidade desse modelo pode estar associada ao fato de ele ainda estar em fase de desenvolvimento, além de ele estar sendo desenvolvido com base em experimentos realizados em condições menos extremas de disponibilidade hídrica do que as simuladas nessa análise, mencionadas por Ramirez-Villegas et al. (2018), resultando em subestimativas das quebras. Essa pouca resposta às variações de chuva limita o uso do modelo em estudo de mudanças climáticas, já que é esperado que sob maiores temperaturas, mesmo que as chuvas não se alterem, haja aumento das taxas de evapotranspiração da cultura e, consequentemente, dos déficits hídricos. Isso corrobora o que já foi observado por Bender (2018) para a cultura do milho, para a qual o modelo MONICA apresentou menor sensibilidade às variações da chuva.

A sensibilidade dos modelos ao aumento na $[CO_2]$ é apresentada nas Figuras 2.14e e 2.14f para INHA, e Figuras 2.15e e 2.15f para JUZA. O modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* apresentou incrementos na produtividade da ordem de 57% para INHA (Figuras 2.14e e 2.14f) e 83% para JUZA (Figuras 2.15e e 2.15f) no cenário de 862 ppm. Já o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* com PHTV = 0,8 kPa simulou para o cenário de maior $[CO_2]$ aumentos na produtividade de 60% para INHA (Figura 2.14e) e de 64% para JUZA (Figura 2.15e). Para o “ensemble” desses modelos, houve aumentos na produtividade da ordem de 58% para INHA e de 70% para JUZA. Quando o PHTV for alterado para 2,0 kPa, o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* no cenário de maior elevação da $[CO_2]$ simulou incrementos de produtividade de 51% em INHA (Figura 2.14f) e de 45% em JUZA (Figura 2.15f). O novo “ensemble” obteve valores de incremento de 54% e 52% para INHA e JUZA, respectivamente. Esses resultados ultrapassam o aumento de 30% no rendimento de plantas C3 quando dobrada a $[CO_2]$, como mencionado por Streck (2005), e corroboram com o que foi encontrado por Cruz et al. (2016), em experimento em estufa. Em condições de déficit hídrico, a alta $[CO_2]$ promove aumento da taxa fotossintética e da eficiência do uso da água da mandioca, resultando em maior acúmulo de biomassa (CRUZ et al., 2016; CRUZ et al., 2018). Embora estudos mencionem que o aumento na temperatura do ar poderia reduzir os benefícios do aumento na $[CO_2]$ em algumas culturas e condições (STRECK, 2005; FAGUNDES et al., 2010), Rosenthal e Ort (2012) afirmam que, no caso da mandioca, a $[CO_2]$ em torno de 585 ppm poderia elevar a temperatura ótima da fotossíntese, tornando-a ainda mais adaptada às mudanças climáticas.

De um modo geral, a sensibilidade dos modelos de simulação da produtividade da mandioca, CSM-CROPSIM-*Cassava*, CSM-MANIHOT-*Cassava* e o “ensemble” deles, às alterações na temperatura média do ar, chuva e $[CO_2]$ foi variável, como mostram as Figuras 8 e 9. A sensibilidade dos modelos na estimação da produtividade da mandioca foi mais acentuada para as variações de temperatura do ar e da $[CO_2]$. Para as variações na chuva, o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* foi mais sensível, gerando maior variabilidade interanual, principalmente na localidade mais seca. Por outro lado, o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava* não apresentou grande sensibilidade às variações da chuva, especialmente na região mais seca.

Embora os resultados apresentados nas fases de calibração (Figuras 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.10 e 2.11) e validação (Figuras 2.4, 2.5, 2.8, 2.9, 2.12 e 2.13) terem indicado que ambos os modelos, assim como o conjunto deles, são adequados para a estimação da produtividade da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para condições brasileiras, os resultados da análise de sensibilidade (Figuras 2.14 e 2.15) demonstraram que o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* foi, em geral, mais responsivo às variações das variáveis temperatura, $[CO_2]$ e chuva, o que o qualifica como mais adequado para estudos sobre a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade dessa cultura, especialmente em regiões onde as condições de disponibilidade de água no solo são majoritariamente mais restritivas para a mandioca, como em condições de clima semiárido.

2.4. Conclusões

Os parâmetros calibrados para os modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*, da plataforma DSSAT, permitiram desempenho satisfatório para a estimação da produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, o que foi comprovado na fase de avaliação. Além disso, as estimativas de produtividade da cultivar por meio do conjunto dos modelos (“ensemble”), apresentaram desempenho igual ou inferior às estimativas obtidas pelos modelos de simulação quando empregados individualmente.

A análise de sensibilidade dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava* para estimação da produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, mostrou que ambos os modelos são sensíveis às variações de temperatura do ar e [CO₂]; no entanto, o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* foi mais responsivo às variações de chuva do que o modelo CSM-MANIHOT-*Cassava*, o que o qualifica como mais adequado para estudos dos impactos das mudanças climáticas na cultura da mandioca.

Referências

- ALLEN, M. R.; INGRAM, W. J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. **Nature**, v. 419, p. 228-232, 2002.
- 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.
- ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLOCKS, R. J.; THRESH, J. M.; BELLOTTI, A. C. ed. **Cassava, Biology, Production and Utilization**. CAB International, Wallingford, UK, p. 67-89, 2002.
- ALVES, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: **Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, cap. 7, p. 138-169, 2006.
- 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.
- ASSENS, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C. J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTLE, K. J.; THORBURN, P. J.; RÖTTER, R. P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MATRE, P.; AGGARWAL, P. K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HEING, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MULLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. A.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; STOCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J. W.; WILLIAMS, J. R.; WOLF, J. Uncertainty in simulation wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 827-832, 2013.
- BARTON, C. V. M.; DUURSMA, R. A.; MEDLYN, B. E.; ELLSWORTH, D. S.; EAMUS, D.; TISSUE, D. T.; ADAMS, M. A.; CONROY, J.; CROUS, K. Y.; LIBERLOO, M.; LÖW, M.; LINDER, S.; McMURTRIE, R. E. Effects of elevated atmospheric [CO₂] on instantaneous transpiration efficiency at leaf and canopy scales in *Eucalyptus saligna*. **Global Change Biology**, v. 18, p. 585-595, 2011.
- BASSU, S.; BRISSON, N.; DURAND, J. L.; BOOTLE, 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.

BATTIPAGLIA, G.; SAURER, M.; CHERUBUNI, P.; CALFAPIETRA, C.; McCARTHY, H. R.; NORBY, R. J.; COTRUFO, M. F. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. **New Phytologist**, v. 197, p. 544-554, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Agricultural efficiency of soybean, corn and wheat production in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, between 1980 and 2008 | Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, v. 42, n. 1, p. 24-30, 2012.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Climatic efficiency for soybean and wheat crops in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in different sowing date | Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, 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.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 200, p. 28-37, 2017

BHATIA, V. S.; SINGH, P.; WANI, S. P.; CHAUHAN, G. S.; KESAVA RAO, A. V. R.; MISHRA, A. K.; SRINIVAS, K. Analysis of potential yields and yield gaps of non-irrigated soybean in India using CROPGRO-Soybean model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 8-9, p. 1252-1265, 2008.

BENDER, F. D. 2017. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

BINDRABAN, P.; STOOORVOGEL, J. J.; JANSEN, D. M. VLAMING, J.; GROOT, J. J. R. Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 81, n. 2, p. 103-112, 2000.

BROWN, A. L.; CAVAGNARO, T. R.; GLEADOW, R.; MILLER, R. E. Interactive effects of temperature and drought on cassava growth and toxicity: implications for food security? **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3461-3473, 2016.

BURNS, A.; GLEADOW, R.; CLIFF, J.; ZACARIAS, A.; CAVAGNARO, T. Cassava: The drought, war and famine crop in a changing world. **Sustainability**, v. 2, n. 11, p. 3572-3607, 2010.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CONCEIÇÃO, A. J. da. **A mandioca**. Cruz das Almas: UFBA-Embrapa, 1979.

CONFALONIERI, R.; ACUTIS, M.; BELLOCCHI, G.; DONATELLI, M. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. **Ecological Modelling**, v. 220, p. 1395-1410, 2009.

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

CRUZ, J. L.; ALVES, A. A. C.; LeCAIN, D. R.; ELLIS, D. D.; MORGAN, J. A. Elevated CO₂ concentrations alleviate the inhibitory effect of drought on physiology and growth of cassava plants. **Scientia Horticulturae**, v. 210, p. 122-129, 2016.

CRUZ, J. L.; LECAIN, D. R.; ALVES, A. A. C.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. Elevated CO₂ reduces whole transpiration and substantially improves root production of cassava grown under water deficit. **Archives of Agronomy and Soil Science**, n. 12, p. 1623-1634, 2018.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmosphere Carbon Dioxide – Global**. National Oceanic & Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory, 2019. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 21 mai. 2019.

DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho: uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 2018.

EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H. Response of cassava to water stress. **Plant and Soil**, v. 100, n. 1-3, p. 345-360, 1987.

EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H.; LYNAM, J. K.; HERNANDEZ, A. D. P.; CADAVID, L. F. Relationships between biomass, root- yield and single-leaf photosynthesis in field-grown cassava. **Field Crops Research**, v. 25, p. 183-201, 1990.

EL-SHARKAWY, M. A. Drought-tolerant cassava for Africa, Asia, and Latin America breeding projects work to stabilize productivity without increasing pressures on limited natural resources. **BioScience**, v. 43, n. 7, p. 441-451, 1993.

EL-SHARKAWY, A. J.; TAFUR, S. M. de; LÓPEZ, Y. Cassava productivity, photosynthesis, ecophysiology, and response to environmental stresses in the Tropics: A multidisciplinary approach to crop improvement and sustainable production. In: OSPINA, B.; CEBALLOS, H. (ed.). **Cassava in the Third Millenium: Modern Production, Processing, Use, and Marketing Systems**, CIAT, Cali, Colombia, p. 29-88, 2012.

EL-SHARKAWY, M. A. Global warming: Causes and impacts on agroecosystems productivity and food security with emphasis on cassava comparative advantage in the tropics/subtropics. **Photosynthetica**, v. 52, n. 2, p. 161-178, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Caracterização físico-hídrica de solos da área do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2001.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo da mandioca para a região semiárida**. Sistemas de Produção Embrapa, 2003. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/home>. Acesso em 30/06/2017.

FAGUNDES, J. D.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A.; SCHWANTES, A. P.; ALBERTO, C. M. Produtividade simulada de tubérculos de batata em cenários de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 4, p. 351-360, 2010.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Save and grow: Cassava - A guide to sustainable production intensification**, p. 142, 2013.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics. **Statistics Division**, 2017. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 22 mai. 2019.

FERMONT, A. M.; ASTEN, P. J. A. van; TITTONELL, P. A.; WIJK, M. T. van; GILLER, K. E. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. **Field Crops Research**, v. 112, n. 1, p. 24-36, 2009.

FINGER, R.; SCHMID, S. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change. **Agricultural Finance Review**, v. 68, n. 1, p. 25-41, 2008.

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

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULTZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. **Change**, v. 30, n. 22, p. 129-234, 2007.

GABRIEL, L. F.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; SILVA, M. R. da; SILVA, S. D. da. Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 90-98, 2014.

GARCÍA, V.; PUCHE, M.; SILVA, O.; WARNOCK, R.; FIGUEROA, R. Evaluation of planting-date strategies for cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) with a crop simulation model. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 2, p. 53-60, 2001.

GLEADOW, R. M.; EVANS, J. R.; McCAFFERY, S.; CAVAGNARO, T. R. Growth and nutritive value of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) are reduced when grown in elevated CO₂. **Plant Biology**, v. 11, n. SUPPL.1, p. 76-82, 2009.

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.

GUIMARÃES, M. J. M.; COELHO FILHO, M. A.; JUNIOR, F. A. G.; SILVA, M. A. M.; LOPES, IUG. Modelos matemáticos para a estimativa da área foliar de mandioca. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, 2019.

HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; OGOSHI, R.; LIZASO, J. I.; KOO, J.; ASSENG, S.; SINGELS, A.; MORENO, L. P.; JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)**. Version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA, 2017.

HUANG, L.; YE, Z.; BELL, R. W.; DELL, B. Boron nutrition and chilling tolerance of warm climate crop species. **Annals of Botany**, v. 96, p. 755-767, 2005.

HUNT, L. A.; BOOTE, K. J. Data for model operation, calibration, and evaluation. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Ac. Pub., ch. 2, p. 9-40, 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2017**, v. 44, p. 1-8, 2017a.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola – Lavoura Temporária**, 2017b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 08 jun. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas interativos: solos**, 2019. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 jan. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. ed. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.

KARL, T. R.; MEEHL, G. A.; MILLER, C. D.; HASSOL, S. J.; WALPE, A. M.; MURRAY, W. L. Weather and climate extremes in a changing climate. **Synthesis and Assessment Product 3.3**. Report by the US Climate Change Science Program (CCSP) and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Commerce, NOAA National Climate Data Center, Washington, DC, 2008.

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**, v. 117, p. 55-65, 2013.

LI, T.; HASEGAWA, T.; YIN, X.; ZHU, Y.; BOOTE, K.; ADAM, M.; BREGAGLIO, S.; BUIS, S.; CONFALONIERI, R.; FUMOTO, T.; GAYDON, D.; MARCAIDA, M.; NAKAGAWA, H.; ORIOL, P.; RUANE, A. C.; RUGET, F.; SINGH, B.; SINGH, U.; TANG, L.; TAO, F.; WILKENS, P.; YOSHIDA, H.; ZHANG, Z.; BOUMAN, B. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. **Global Change Biology**, v. 21, p. 1328-1341, 2015.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no Recôncavo Baiano através do modelo CROPGRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1294-1300, 2013.

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**, v. 34, p. 179-204, 2009.

LOBELL, D. B.; GOURDJI, S. The influence of climate change on global crop productivity. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1686-1697, 2012.

LOPES-ASSAD, M. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

MARIN, F. R.; THORBURN, P. J.; NASSIF, D. S. P.; COSTA, L. G. Sugarcane model intercomparison: structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 72, p. 372-386, 2015.

MARTRE, P.; WALLACH, D.; ASSENG, S.; EWERT, F.; JONES, J. W.; ROTTER, R. P.; BOOTE, K. J.; RUANE, A. C.; THORBURNE, P. J.; CAMMARANO, D.; HATFIELD, J. L.; ROSENZWEIG, C.; AGGARWAL, P. K.; ÂNGULO, C.; BASSO, B.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; BRISSON, N.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R. F.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MULLER, C.; KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. A.; OSBORNE, T.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STOCKLE, C. O.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WHITE, J. W.; WOLF, J. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, p. 911-925, 2014.

MATTHEWS, R. B.; HUNT, L. A. GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz). **Field Crops Research**, v. 36, p. 69-84, 1994.

MATTHEWS, R. B.; RIVINGTON, M.; MUHAMMED, S.; NEWTON, A. C.; HALLETT, P. D. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. **Global Food Security**, v. 2, n. 1, p. 24-28, 2013.

MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITTOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z.-C. Global climate projections. In: SOLOMON, S. et al. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, p. 686-688, 2007.

MITHRA, V. S. S.; RAVINDRAN, C. S.; SREEKUMAR, J. The development of a cassava growth model in India. In: **Proceedings of the 6th Regional Cassava Workshop**. Ho Chi Minh city, Vietnam. Cassava's Potential in Asia in the 21st Century: Present Situation and Future Research and Development Needs, 2000.

MONTEITH, J. The quest balance in crop model. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 695-697, 1996.

- MORAES, W. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 2, p. 3-14, 2011.
- MORGAN, J. A.; PATAKI, D. E.; KÖRNER, C.; CLARK, H.; DEL GROSSO, S. J.; GRÜNZWEIG, J. M.; KNAPP, A. K.; MOSIER, A. R.; NEWTON, P. C. D.; NIKLAUS, P. A.; NIPPERT, J. B.; NOWAK, R. S.; PARTON, W. J.; POLLEY, H. W.; SHAW, M. R. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. **Oecologia**, v. 140, p. 11-25, 2004.
- MORENO-CADENA, L. P. **Modelo de simulación de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el trópico**. 2018. Dissertation (Mestrado em Crop Physiology) – Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia, 2018.
- NTAWURUHUNGA, P.; SSEMAKULA, G. N.; OJULONG, H.; BUA, A.; RAGAMA, P.; KANOBE, C.; WHYTE, J. Evaluation of advanced cassava genotypes in Uganda. **African Crop Science Society**, 2006. Disponível em: <http://www.bioline.org.br/pdf?cs06002>. Acesso em: 14 abr. 2017.
- O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, v. 68, p. 97-111, 2000.
- OLIVEIRA, E. J.; MORGANTE, C. V.; AIDAR, S. T.; CHAVES, A. R. M.; ANTONIO, R. P.; CRUZ, J. L.; COELHO FILHO, M. A. Evaluation of cassava germplasm for drought tolerance under field conditions. **Euphytica**, v. 213, n. 8, p. 188-208, 2017.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Agropecuária, p. 478, 2002.
- PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, S. F.; DE AVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. R.; MACEDO JR, C.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. **Embrapa**, 2008.
- RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, v. 4, p. 374, 1974.
- RAMIREZ-VILLEGAS, J.; AMARILES, D. A.; MORENO-CADENA, L. P.; TORO, M.; AYE, T. M.; COCK, J. H.; FISHER, M. J. **Towards an improved cassava simulation model to aid management decisions in the Tropics**. Palmira, Colombia, 2018.
- ROSENTHAL, D. M.; ORT, D. R. Examining cassava's potential to enhance food security under climate change. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 3-4, p. 145-250, 2012.
- SARAWAT, V.; RATANASRIWONG, S.; PUANGPRAKON, K.; JINTRAWET, A. The development of a Cassava growth model in Thailand. In: **Proceedings of the 6th Regional Cassava Workshop**. Ho Chi Minh city, Vietnam. Cassava's Potential in Asia in the 21st Century: Present Situation and Future Research and Development Needs, 2000.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSÉS, F. de. A. Yield gap: Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9-12, 2016.
- SINGH, U.; MATTHEWS, R. B.; GRIFFIN, T. S.; RITCHIE, J. T.; HUNT, L. A.; GOENAGA, R. Modeling growth and development of root and tuber crops. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. **Understanding Options for Agricultural Production**, p. 129-156, 1998.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

WALLACH, D. Crop model calibration: A statistical perspective. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 4, p. 1144-1151, 2011.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

WULLSCHLEGER, S. D.; TSCHAPLINSKI, T. J.; NORBY, R. J. Plant water relations at elevated CO₂ – implications for water-limited environments. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 319-331, 2002.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

ZANETTI, E. G. B.; CARDOSO, E. M. G.; DOURADO, D. P.; REINA, E.; MURAISHI, C. T. Performance of two Cassava varieties submitted to different spacings, grown in the Cerrado region. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 7, n. 1, p. 39-46, 2014.

3. VULNERABILIDADE DA PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO NOS CENÁRIOS ATUAL E DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO

Atualmente, o Brasil é o quinto maior produtor de mandioca do mundo. No país, a mandioca ocupa a quinta posição entre as culturas mais importantes em valor. Como a produtividade dessa cultura é influenciada por diversos fatores, como clima, solo e manejo, espera-se que as projeções de mudanças climáticas globais, consequência do aumento dos gases de efeito estufa, afete seu potencial produtivo. Embora a mandioca esteja entre as culturas tropicais mais adaptáveis às diferentes condições climáticas, é difícil se prever o que irá ocorrer com a cultura sob as projeções de clima futuro. Nesse sentido, os modelos de simulação de culturas têm se mostrado como ferramentas eficientes na quantificação dos efeitos do clima futuro nas produtividades, de modo que se possa avaliar as possíveis estratégias de mitigação e adaptação a essas mudanças. Assim, o presente estudo teve por objetivos: i) aplicar o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, devidamente calibrado e avaliado, para determinar a produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa no Semiárido Brasileiro (SAB), sob condições climáticas atuais (1980-2009); ii) estimar a produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa no SAB utilizando o modelo CSM-CROPSIM-Cassava, para os cenários de mudanças climáticas do CMIP5, de intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, a médio (2040-2069) e longo (2070-2099) prazos; iii) elaborar um índice de vulnerabilidade (IV) para a cultura de mandioca no SAB, de modo a identificar as áreas de maiores riscos nessa região. As simulações foram realizadas sem e com estresse hídrico, porém sem estresse nutricional, obtendo-se as produtividades potencial (PA) e atingível (PA). O plantio em cada um dos 50 locais foi determinado com base na janela sugerida pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) e nos tipos predominantes de solo em cada local. As PAs futuras foram comparadas percentualmente com as do cenário atual e analisou-se a variabilidade de PA de cada cenário futuro. Em seguida, com as PAs e as coordenadas geográficas de cerca de 2/3 das localidades, criou-se mapas de produtividade para a região do SAB, para os cenários atual e futuros. Com as PAs atual e futura, criou-se um Índice de Vulnerabilidade (IV), que representa a variação percentual da PA entre os cenários, o qual foi espacializado para o SAB nos quatro cenários futuros avaliados. A produtividade de mandioca apresentou queda em todos os cenários futuros, chegando a -29% na PP e -22% na PA no cenário mais pessimista. Os mapas de PA mostraram que as áreas das regiões de menores produtividades no cenário atual (estados do PI, CE, PE e BA) tendem a se manter nos cenários futuros, enquanto as de maiores (sudeste do estado da BA e norte de MG), tendem a diminuir. A vulnerabilidade da produção de mandioca no SAB às mudanças climáticas foi maior à longo prazo (2070-2100), tanto no RCP4.5 quanto RCP8.5. Houve variação espacial da vulnerabilidade no SAB, com a região em que há perdas mais expressivas estando, em geral, a sudoeste (estados do PI, BA e MG), e na que há menos, à norte e nordeste. Em geral, houve efeito negativo das mudanças climáticas na produtividade da mandioca no SAB, além de aumento das áreas de risco para a sua produtividade na região, sendo, portanto, necessários mais estudos que avaliem estratégias de adaptação para mitigação dessas perdas.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz, DSSAT/CSM-CROPSIM-Cassava, Aquecimento global

ABSTRACT

Currently, Brazil is the fifth largest producer of cassava in the world. In this country, cassava is also the fifth most important crop in value. As cassava yield is affected by different factors, such as climate, soil and crop management, the global climate change projections, consequence of the elevated greenhouse gases emissions, are expected to affect it. Although this crop is among the most adapted to different climate conditions ones, it is difficult to project its performance under future climate scenarios. Thus, crop simulation models appear as an effective tool to quantify the future climate effect on crop yields, giving support to the evaluation of strategies to mitigate or adapt the crops to these changes. Therefore, this study aimed to: i) apply the DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava model, properly calibrated and evaluated, to determine cassava yield, cultivar BRS Formosa at the Brazilian Semi-arid (SAB) region, under current climate (1980-2010); ii) apply the calibrated and evaluated DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava model to determine cassava yield, cultivar of BRS Formosa, under CMIP5 climate change scenarios, in an intermediate (RCP4.5) and high (RCP8.5) emissions of greenhouse gases, for a medium (2040-2070) and long (2070-2100) term periods; iii) elaborate a vulnerability index for cassava at the SAB, to identify the areas where this crop will most likely be impacted by climate change. The simulations were conducted with and without crop water stress, but without nutritional stress, obtaining the potential (PP) and attainable (PA) yields. The planting dates for each of the 50 assessed locations were determined based on the periods recommended by Agricultural Climatic Risk Zoning (ZARC) and the predominant soil type of each location. The future PAs were compared to the actual ones, in percentage, and its variability was analyzed in each future scenario. With the cassava PAs and the geographic coordinates of about 2/3 of the locations, yield maps were created for SAB region. The actual and future PAs were, then, used to create a Vulnerability Index (IV), which was spatialized creating maps for all future scenarios. The

cassava yields were reduced in all future scenarios, reaching -29% in PP and -22% in PA at the most pessimist one. The PA maps showed that the areas of the regions with lowest yields at the actual scenario (states of PI, CE, PE and BA) tend to remain unchanged at future scenarios, while the ones with the highest yields (Southeast of BA and North of MG), tend to be reduced. The vulnerability of cassava production in SAB to climate change was greater at long term (2070-2100), in both RCP4.5 and RCP8.5. It was noticed a spatial variation of vulnerability at SAB, with the most expressive losses being at Southwest region (PI, BA and MG states), and the lowest, at North and Northeast. In general, the climate change affected negatively the cassava yield in SAB, along with the increase of risk areas for its production in the same region, being, therefore, necessary more studies to evaluate adaptation strategies to mitigate these losses.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz, DSSAT/CSM-CROPSIM-Cassava, Global warming

3.1. Introdução

A agricultura está intimamente associada com as condições climáticas, as quais condicionam a produção agrícola, sendo, assim, fator determinante da variabilidade global da produção de alimentos, fibras e energia (SELVARAJU; GOMMES; BERNARDI, 2011). O volume e padrão das chuvas definem as características da estação chuvosa, dos sistemas agrícolas e da produção agropecuária. Ambas as variabilidades interanuais e intrasazonais das chuvas limitam a produção agrícola, sendo que esta última pode gerar eventos climáticos extremos, os quais impactam diretamente a cultura, as oportunidades de produção e subsistência no setor agrícola (SELVARAJU, 2012). Além disso, temperaturas do ar mais elevadas podem impactar drasticamente a produtividade agrícola e, consequentemente, a segurança alimentar (BATTISTI; NAYLOR, 2009).

Tanto a variabilidade climática quanto os eventos climáticos extremos resultantes das mudanças climáticas (MC) já têm afetado os sistemas de produção agrícola (KARL et al., 2008), e as projeções de mudanças futuras deverão afetar ainda mais a produtividade das culturas (LOBELL; GOURDJI, 2012). Os efeitos das MCs nas culturas agrícolas poderão se dar de diversas formas, tais como: por meio do aumento da temperatura e da mudança nos padrões de chuvas (MOSS et al., 2010), causando modificações nas condições de umidade do solo, no desenvolvimento de plantas daninhas (JARVIS; LANE; HIJMANS, 2008; JARVIS et al., 2010), das pragas e das doenças (JARVIS; LANE; HIJMANS, 2008; MORAES et al., 2011); assim como nos níveis de produtividade, por meio do aumento na [CO₂] e consequente efeito fertilizador de carbono (LOBELL; FIELD, 2008). Esse efeito resulta em crescimento acelerado das culturas e aumento da taxa de fotossíntese, biomassa total, índice de colheita e produtividade (BOOTE et al., 2005; CHALLINOR; WHEELER, 2008), desde que haja disponibilidade suficiente de água no solo para tais processos.

Dentre as culturas tropicais supostamente mais adaptáveis às MCs encontra-se a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). Essa percepção se dá pelo fato dessa cultura apresentar tolerância à seca (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; BURNS et al., 2010). A mandioca está entre as dez culturas mais produzidas (FAOSTAT, 2017) e constitui o alimento básico de mais de 800 milhões de pessoas (FAO, 2013). O Brasil ocupa a posição de quinto maior produtor mundial de mandioca, tendo atingido quase 19 milhões de toneladas em 2017 (FAOSTAT, 2017), e produtividades em torno de 14 t ha⁻¹ (IBGE, 2017, 2018, 2019a). Embora existam cultivares de mandioca com elevado potencial produtivo, chegando a 80 t ha⁻¹ (FAO, 2013), essa cultura é produzida, principalmente, por pequenos produtores (DE TAFUR; EL-SHARKAWY; CALLE, 1997), os quais muitas vezes obtêm baixas produtividades devido, entre outros fatores, às condições climáticas adversas, aos solos degradados ou à baixa tecnologia de produção empregada (EL-SHARKAWY, 2004; VISSÉS; SENTELHAS; PEREIRA, 2018).

Apesar disso, a mandioca é uma cultura capaz de obter produtividades de raízes satisfatórias em condições adversas de clima e solo (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; LEBOT, 2009; FAO, 2013), o que permitiu à mesma ser reconhecida como uma cultura estratégica no combate à fome (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; BURNS et al., 2010). Em condições de estresse, a mandioca aumenta sua temperatura ótima e reduz sua necessidade hídrica para processos como a fotossíntese, o crescimento e a produção de biomassa (EL-SHARKAWY, 2014). Em condições de déficit hídrico, a planta consegue reduzir o crescimento vegetativo até que a água esteja disponível novamente (FAO, 2013), de modo que a produção de folhas e hastes é mais prejudicada do que a de raízes (EL-SHARKAWY, 1993). No entanto, a mandioca ainda necessita de disponibilidade hídrica suficiente no começo de seu desenvolvimento, em torno de 30% da capacidade de campo, para a germinação e o crescimento inicial das plantas (FAO, 2013). Após seu estabelecimento, embora a planta consiga se desenvolver em locais com precipitação anual de até 400 mm (FAO, 2013; PARMAR; STURM; HENSEL, 2017) e sem irrigação suplementar, a produtividade da mandioca é afetada em regiões áridas (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017).

Nas regiões áridas e semiáridas, a intensidade de chuvas tem sofrido redução (BATISANI; YARNAL, 2010; PINGALE et al., 2014), o que associado ao aumento da demanda evaporativa, causado pela elevação das temperaturas, tem provocado déficits hídricos mais longos durante a estação chuvosa (BATISANI; YARNAL, 2010; PINGALE et al., 2014). Esse quadro vem sendo ainda mais grave nas áreas com solos com baixa capacidade de retenção de água e alto potencial de escoamento (MUCHOW; BELLAMY, 1991; CRUZ et al., 2016). O Semiárido Brasileiro (SAB), inserido quase que totalmente no Nordeste, região de elevada vulnerabilidade sócio-climática (TORRES et al., 2012), apresenta período chuvoso muito curto, o que torna essa região bastante vulnerável às mudanças climáticas (MARENGO, 2008). Variações na distribuição e quantidade de chuvas afetam diretamente a agricultura, uma vez que as chuvas são a única fonte de água para cerca de 80% das propriedades rurais do mundo (FAO, 2013). Além disso, as previsões indicam que o aumento de $[CO_2]$ também poderá afetar a distribuição de chuvas (ALLEN; INGRAM, 2002), o que é particularmente preocupante, visto que o déficit hídrico está entre os principais fatores que limitam a produção de alimentos (WULLSCHLEGER; TSCHAPLINSKI; NORBY, 2002).

Por outro lado, o aumento da $[CO_2]$ atmosférico irá modificar os padrões de uso de água pelas plantas, podendo aumentar a eficiência no uso da água (MORGAN et al., 2004), pela redução na condutância estomática e consequente diminuição do consumo de água pelas plantas (BARTON et al., 2011; BATTIPAGLIA et al., 2013). Por tratar-se do substrato primário para a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004), maiores $[CO_2]$ estimulam a sua taxa, aumentando a produtividade das culturas (BARTON et al., 2011), desde que não haja limitação de ordem hídrica. Entretanto, por contribuir para o aquecimento global (MEEHL et al., 2007; FORSTER et al., 2007), os benefícios gerados pelo aumento da $[CO_2]$, a qual já atingiu 410 ppm (DLUGOKENCKY; TANS, 2019) e está prevista para atingir níveis entre 730 e 1020 ppm até o fim do século (MEEHL et al., 2007; IPCC, 2014), podem não compensar os efeitos da elevação na temperatura do ar, cujo incremento previsto em um cenário mais pessimista varia entre 2,6 a 4,8 °C (IPCC, 2014). Esta elevação na temperatura pode favorecer o encurtamento do ciclo de desenvolvimento das culturas (STRECK, 2005), reduzindo sua produtividade (STRECK, 2005; BATTISTI; NAYLOR, 2009) e impactando a segurança alimentar (BATTISTI; NAYLOR, 2009).

Nesse sentido, os modelos de simulação de culturas (MSC) tornam-se fundamentais, pois são capazes de simular o crescimento de culturas em cenários climáticos diferentes das condições atuais (FINGER; SCHMID, 2008), de modo a avaliar como será a resposta das culturas às projeções de clima futuro (LEHMANN et al., 2013) e analisar estratégias para se amenizar efeitos negativos que eles possam eventualmente causar nas produtividades (MATTHEWS et al., 2013). Dentre os principais MSCs para a cultura da mandioca destaca-se o CSM-CROPSIM-

Cassava (“Cropping System Model – Crop Environment Resource Synthesis”), o qual faz parte do Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT, do inglês “Decision Support System for Agrotechnology Transfer”) e simula o crescimento e o desenvolvimento dessa cultura sob diferentes condições de solo, clima e manejo.

Considerando-se a grande importância da cultura da mandioca para a agricultura e a segurança alimentar, é de suma importância compreender como essa cultura será afetada pelo aumento dos níveis de CO₂ na atmosfera e às alterações nas temperaturas e na chuva. Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivos: i) aplicar o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, devidamente calibrado e avaliado, para determinar a produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, no SAB sob condições climáticas atuais (1980-2010); ii) estimar a produtividade da mandioca, cultivar mandioca BRS Formosa, utilizando o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, para os cenários de mudanças climáticas do CMIP5, de intermediária (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos no SAB; e iii) elaborar um índice de vulnerabilidade para a cultura de mandioca no SAB, de modo a identificar as áreas de maiores riscos para essa cultura na região nos cenários futuros de clima.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Modelo de simulação de cultura da mandioca

O modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, devidamente calibrado e validado, foi empregado para estimar as produtividades da mandioca (em quilos de matéria seca por hectare), cultivar de mandioca BRS Formosa, no Semiárido Brasileiro. Os parâmetros genéticos calibrados para esta cultivar são apresentados na Tabela 3.1. O desempenho do modelo nas fases de calibração e validação é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Parâmetros genéticos do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* calibrados para a cultivar de mandioca BRS Formosa, em condições brasileiras.

Parâmetros genéticos							
Ramificação						Raiz	
B01ND	B12ND	B23ND	B34ND	B45ND	B56ND	SRFR	HMPC
(número de nós)						(#)	(%)
80	40	20	30	100	100	0,20	57
Folha						Haste	Espécie
LAFND	LAXS	LAXND	LLIFA	PHINT		STFR	PHTV
#	(cm ²)	#	(Tu)	(°Cd)			(kPa)
110	350	80	899	27		0,43	2,0
Ecotipo							
BR1FX	BR2FX	BR3FX	BR4FX	BR5FX	BR6FX	DUSRI	HTSTD
(#)							
1,5	2,6	2,0	1,5	1,5	1,5	800	170

Tabela 3.2. Desempenho dos modelos CSM-CROPSIM-*Cassava* para a estimação da produtividade (P) da cultivar de mandioca BRS Formosa, nas fases de calibração e avaliação.

Modelo	$\frac{\text{EAM}}{\text{kg ha}^{-1}}$	R^2	d	c
Calibração				
CROPSIM	1456,1	0,85	0,93	0,8673
Avaliação				
	1012,5	0,82	0,94	0,8579
EAM = erro absoluto médio; R^2 = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.				

3.2.2. Locais de estudo

As simulações para avaliação dos impactos dos cenários atual e de mudanças climáticas na produtividade da cultura da mandioca foram realizadas para 50 localidades bem distribuídos na região do Semiárido Brasileiro, identificados na Figura 3.1. Essas localidades foram selecionadas com base na disponibilidade de dados de chuva da Agência Nacional de Águas (ANA), para o período de 1980 a 2010.

Figura 3.1. Locais empregados para a simulação da produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, no cenário atual e de clima futuro.

3.2.3. Dados de solo

Os tipos de solo presentes em cada um dos 50 locais foram obtidos utilizando-se o mapa de solos do IBGE (2019b). A partir dos principais solos encontrados em cada uma das localidades, selecionou-se os cinco principais tipos de solo para realizar as simulações. Os dados de textura e perfil dos solos foram obtidos a partir de análises de solo de estudos realizados na região, sendo utilizado o estudo de Da Silva et al. (2005) para argissolo, neossolo e plantossolo, de Ribeiro (2016) para latossolo, e Oliveira et al. (2009) para luvisolo. A Tabela 3.3 contém a classificação, a textura, o teor médio de areia, silte e argila, assim como as umidades na capacidade de campo (cc) e no ponto de murcha permanente (pmp) para cada tipo de solo utilizado. Baseado nos teores de areia, a cc e o pmp foram determinados utilizando-se as funções de pedotransferência desenvolvidas por Lopes-Assad et al. (2001), demonstradas nas equações (3.1), (3.2) e (3.3).

$$\theta_{cc} = 39,07988535 - 0,04098682 \times (\text{Areia})^{1,455456594} \quad (3.1)$$

$$\theta_{pmp} = 26,16995195 - 0,05451078 \times \text{Areia} \times \ln(\text{Areia}) \quad (3.2)$$

$$\theta_{AD} = 12,76278562 - 0,0000098726 \times (\text{Areia})^3 \quad (3.3)$$

em que θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{pmp} é a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_{AD} é a água disponível ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e Areia, a porcentagem do teor de areia no solo. Mais detalhes sobre o perfil dos solos podem ser encontrados no APÊNDICE B.

Tabela 3.3. Classificação dos solos, teores médios de areia, silte e argila, e a umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, para os solos usados neste estudo.

Classificação	Areia	Silte	Argila	θ_{cc}	θ_{pmp}	Fonte	
	(%)			(m ³ m ⁻³)			
Argissolo Vermelho-Amarelo	80,0	10,0	10,0	14,9	7,0	Da Silva et al. (2005)	
Neossolo Quartzarênico	94,0	4,0	2,0	8,6	2,9		
Plantossolo Crômico	82,0	10,0	8,0	14,0	6,5		
Latossolo	83,9	4,8	11,1	13,2	5,9	Ribeiro (2016)	
Luvissolo	60,0	24,4	15,6	23,2	12,7	Oliveira et al. (2009)	

Na Tabela 3.4 é apresentada a lista das localidades empregadas neste estudo, com suas respectivas siglas de identificação, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura do solo considerados para as simulações com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava.

Tabela 3.4. Locais avaliados quanto ao impacto na produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa, sob os cenários atual e de clima futuro, com as suas siglas, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura de solo.

Estado	Municípios	Sigla	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Tipo de solo	Textura
AL	Delmiro Gouveia	DLGA	-9,39	-37,99	235	Planossolo	Arenosa
AL	Pão de Açúcar	PAOA	-9,75	-37,45	9	Planossolo	Arenosa
BA	Iaçu	IACA	-12,76	-40,21	236	Luvissolo	Média
BA	Brotas de Macaúbas	BRMA	-12,00	-42,63	834	Neossolo	Arenosa
BA	Formosa do Rio Preto	FRMA	-11,05	-45,20	488	Neossolo	Arenosa
BA	Inhambupe	INHA	-11,78	-38,35	158	Argissolo	Arenosa
BA	Cipó	CIPA	-11,10	-38,51	126	Latossolo	Arenosa
BA	Andaraí	ANDA	-12,80	-41,33	431	Latossolo	Arenosa
BA	Miguel Calmon	MICA	-11,43	-40,60	558	Latossolo	Arenosa
BA	Planalto	PLNA	-14,74	-40,74	928	Latossolo	Arenosa
BA	Juazeiro	JUZA	-9,68	-40,60	396	Planossolo	Arenosa
BA	Tanhaçu	TANA	-14,10	-41,29	332	Argissolo	Arenosa
BA	Santana	SANA	-13,29	-43,91	435	Latossolo	Arenosa
BA	Carinhanha	CARA	-14,30	-43,77	452	Neossolo	Arenosa
BA	Queimadas	QIMA	-10,97	-39,63	271	Planossolo	Arenosa
BA	Cotegipe	CTGA	-11,61	-44,16	422	Latossolo	Arenosa
BA	Itaguaçu da Bahia	ITCA	-10,99	-42,34	420	Neossolo	Arenosa
BA	Curaca	CURA	-9,12	-39,94	364	Luvissolo	Média
CE	Aracoiaba	ARCA	-4,37	-38,80	139	Planossolo	Arenosa
CE	Parambu	PRBA	-6,22	-40,70	497	Latossolo	Arenosa
CE	Uruburetama	URBA	-3,62	-39,50	129	Argissolo	Arenosa
CE	Boa Viagem	BVGA	-5,13	-39,72	305	Luvissolo	Média
CE	Bela Cruz	BCRA	-3,06	-40,17	23	Argissolo	Arenosa
CE	Jaguaribara	JGBA	-5,46	-38,46	99	Neossolo	Arenosa
CE	Potengi	PTGA	-7,10	-40,02	565	Argissolo	Arenosa
CE	Ibiapina	IBPA	-3,92	-40,88	873	Latossolo	Arenosa
MG	Januária	JNRA	-14,84	-45,17	827	Neossolo	Arenosa
MG	S. Joao do Paraiso	SJPA	-15,32	-42,02	849	Latossolo	Arenosa
MG	Itinga	ITGA	-16,62	-41,77	257	Argissolo	Arenosa
MG	Buritzeiro	BTZA	-16,66	-45,08	475	Latossolo	Arenosa
MG	Almenara	AMNA	-16,12	-40,74	202	Argissolo	Arenosa
MG	Varzelândia	VRZA	-15,70	-44,03	748	Latossolo	Arenosa
PB	S. Joao do Rio do Peixe	SJRA	-6,74	-38,45	246	Argissolo	Arenosa
PB	Boqueirão	BQRA	-7,53	-36,00	335	Neossolo	Arenosa
PE	Floresta	FLTA	-8,54	-38,19	378	Luvissolo	Média
PE	Caruaru	CRRRA	-8,30	-36,01	533	Planossolo	Arenosa
PE	Parnamirim	PNMA	-8,26	-39,85	380	Luvissolo	Média
PE	Flores	FLRA	-7,87	-37,97	462	Luvissolo	Média
PI	S. Francisco do Piauí	SFPA	-7,25	-42,54	153	Latossolo	Arenosa
PI	Simplício Mendes	SPMA	-7,85	-41,92	271	Argissolo	Arenosa
PI	S. Raimundo Nonato	SRNA	-9,02	-42,68	386	Argissolo	Arenosa
PI	Castelo do Piauí	CTPA	-5,22	-41,74	122	Neossolo	Arenosa
PI	Barras	BRRA	-4,41	-42,20	102	Neossolo	Arenosa
PI	Cristino Castro	CRCA	-8,81	-44,22	264	Latossolo	Arenosa
PI	Prata do Piauí	PRPA	-5,67	-42,21	99	Neossolo	Arenosa
RN	S. Miguel	SMGA	-6,21	-38,43	538	Argissolo	Arenosa
RN	Upanema	UPMA	-5,64	-37,26	40	Planossolo	Arenosa
RN	Santa Cruz	SCRA	-6,24	-35,99	220	Luvissolo	Média
RN	Ielmo Marinho	IEMA	-5,85	-35,52	93	Argissolo	Arenosa
SE	Propriá	PPRA	-10,22	-36,82	15	Argissolo	Arenosa

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

3.2.4. Dados meteorológicos e cenários de mudanças climáticas

Foram empregados dados meteorológicos de 31 anos, de 1980 a 2010, que compuseram a série histórica atual. Os dados de chuva foram obtidos a partir das bases de dados da rede pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) para os locais selecionados. Os demais dados meteorológicos (temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa e radiação) foram obtidos a partir do banco de dados em grade de Xavier, King e Scanlon (2016), bem como dados de chuva, os quais também foram utilizados para o preenchimento de falhas nas séries da ANA. O preenchimento de falhas é uma etapa fundamental, já que a plataforma DSSAT requer séries climáticas contínuas para cada uma das variáveis meteorológicas (GARCÍA et al., 2001). Mais detalhes sobre a variação climatológica das temperaturas máxima e mínima, radiação solar global, chuva mensal, velocidade do vento e umidade relativa nos locais de estudo, podem ser encontrados no APÊNDICE C.

As séries meteorológicas sob projeções futuras foram geradas com base na série atual de 1980-2010, sem falhas, por meio do método do delta (ROSENZWEIG et al., 2015), ou seja, pelo incremento da mudança entre os cenários presente e futuro determinado 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; MEEHL, 2012), sendo avaliados no quinto relatório de avaliação (“Fifth Assessment Report” - AR5, IPCC-AR5) do IPCC (2014). Os MCGs selecionados foram os que apresentaram melhor performance em simular a chuva atual sobre o Brasil (SILVEIRA et al., 2013; PINHEIRO et al., 2014). Os incrementos previstos para a temperatura do ar foram, então, adicionados aos valores de temperaturas máxima e mínima, enquanto os incrementos percentuais previstos para a chuva, foram multiplicados aos seus valores, gerando as séries futuras. Foram consideradas projeções sob cenários de emissão de gases de efeito estufa intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão e considerando-se os períodos a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, empregando-se sete MCGs distintos: CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, InmCM4, MIROC-ESM e MPI-ESM-LR, conforme utilizado por Bender (2017).

Para as simulações em cada um dos períodos considerados, os valores das $[CO_2]$ foram assumidos em 362 ppm para a série histórica atual, referente à concentração média desse período, e 499 e 532 ppm para o RCP4.5, e de 571 e 801 ppm para o RCP8.5, a médio e longo prazos, respectivamente, cada um representando a concentração referente ao ano central do período de 31 anos nos cenários futuros, conforme recomendado pelo projeto AgMIP (ROSENZWEIG et al., 2015) e descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. 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.

Cenário e período	Anos de referência	Ano central	$[CO_2]$ (ppm)
Série histórica	1980 – 2010	-	362
RCP4.5 – Médio prazo	2040 – 2070	2055	499
RCP8.5 – Médio prazo	2040 – 2070	2055	571
RCP4.5 – Longo prazo	2070 – 2100	2085	532
RCP8.5 – Longo prazo	2070 – 2100	2085	801

Adaptado de Rosenzweig et al. (2015).

3.2.5. Simulações dos impactos do clima atual e futuro na produtividade da mandioca

Para a determinação dos impactos das condições de clima futuro na produtividade da mandioca, cultivar de BRS Formosa, em relação ao clima atual, foram feitas simulações com o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* sob condições sem estresse hídrico e de sequeiro, em que o fornecimento de água à cultura foi limitado à ocorrência de chuvas. Desse modo, o consumo hídrico da cultura da mandioca foi um fator limitante para a produtividade. Sob condições de sequeiro, foram avaliadas as influências das condições de clima futuro em relação ao clima atual sobre a produtividade da mandioca, considerando-se os efeitos da temperatura, da chuva e da [CO₂].

Para as simulações, definiu-se uma data de plantio para cada um dos 50 locais com base na janela de plantio definida pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019), como descrito na Tabela 3.6. Outros aspectos foram padronizados nas simulações dos locais, tais como: condição inicial do solo de 70% de água disponível, calculada automaticamente pelo modelo com a ferramenta “Recalculate” no item “Profile”; plantio de manivas de 16 cm realizados no dia 15 de cada mês selecionado; espaçamento de 0,90 m entre linhas; densidade populacional de 1,388 plantas por m²; e colheita aos 180 dias após o plantio (DAP).

Tabela 3.6. Datas de plantio de cada local para as simulações realizadas com a cultivar de mandioca BRS Formosa.

Data de plantio	Sigla do local*
15 de janeiro	CRCA, MICA, SPMA
15 de março	ARCA, BCRA, BQRA, BRRA, BVGA, CTPA, CURA, FLRA, FLTA, IBPA, JUZA, JGBA, PRBA, PRPA, PTGA, SCRA, SFPA, SJRA, SRNA, SMGA, UPMA, URBA
15 de maio	CIPA, IEMA
15 de julho	CRRA, DLGA, INHA, PAOA, PNMA, PPRA
15 de novembro	AMNA, ANDA, BRMA, BTZA, CARA, CTGA, FRMA, IACA, ITCA, ITGA, JNRA, PLNA, QIMA, SANA, SJPA, TANA, VRZA

* As siglas correspondem às localidades apresentadas na Tabela 3.4.

3.2.6. Avaliação geral

3.2.6.1. Simulações com o modelo

Todas as simulações efetuadas pelo modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* sob as condições climáticas futuras foram conduzidas para cada um dos sete MCGs. No entanto, os resultados foram apresentados em valores médios do conjunto de saídas (“ensemble”) desses modelos climáticos. A avaliação do impacto do clima futuro em relação ao atual na produtividade da mandioca foi realizada pelos valores médios dos 29 ciclos, nos 31 anos de dados (1980-2010), levando-se em consideração a variação relativa percentual da produtividade atingível (ΔP , em %), conforme a Equação (3.4).

$$\Delta P(\%) = \left[1 - \left(\frac{P_{futura}}{P_{atual}} \right) \right] \times 100 \quad (3.4)$$

em que: P_{futura} e P_{atual} são as produtividades simuladas para os cenários futuros de temperatura do ar, chuva e $[CO_2]$ e para o cenário atual, respectivamente.

Além disso, para análise do impacto do déficit hídrico nas produtividades, utilizou-se o fator de estresse hídrico para o crescimento da cultura (WFGD, “Water Factor for Growth”) calculado pelo modelo, considerando-se o valor médio por ciclo para cada um dos cenários simulados. O valor de WFGD varia de zero a um, sendo zero a condição sem estresse e um, o máximo nível de estresse hídrico (ISHAQUE, 2015).

3.2.6.2. Espacialização da produtividade atingível da mandioca no SAB

Os mapas de latitude, longitude e altitude compuseram a base para a elaboração dos mapas de PA. Para criar os mapas da Lat e da Long, a planilha contendo as variáveis geográficas dos 50 locais das simulações, além de alguns pontos a mais nas extremidades, foi inserida no QGIS 3.4 e transformada em arquivo *shapefile*. Em seguida, realizou-se uma interpolação dessas variáveis, de modo que os mapas compreendessem toda a região do SAB. O mapa da Alt para a região foi, em seguida, obtido a partir da imagem SRTM (do inglês “Shuttle Radar Topographic Mission”), para a resolução de 90 m.

A criação de mapas de PA envolveu uma etapa de calibração, seguida de uma etapa de avaliação dessa calibração, com dados independentes. Assim, os 50 locais foram divididos em dois grupos: o primeiro com 35 locais para a confecção dos mapas, e o segundo com 15 locais, sendo esses selecionados de modo a se ter cinco locais com valores de PA baixas, moderadas e altas no cenário atual (Tabela 3.7), para a avaliação dos mesmos.

Tabela 3.7. Divisão dos locais selecionados para as etapas de confecção e avaliação dos mapas de produtividade atingível (PA) da mandioca no SAB.

Etapa	Locais*
Confecção	ANDA, ARCA, BCRA, BQRA, BRRA, BVGA, CIPA, CRCA, CTGA, CTPA, CURA, FRMA, IBPA, IEMA, INHA, ITCA, JNRA, MICA, PAOA, PLNA, PNMA, PPRA, PRBA, PRPA, PTGA, QIMA, SANA, SCRA, SFPA, SJPA, SJRA, SMGA, SRNA, TANA, UPMA
Avaliação	AMNA, BRMA, BTZA, CARA, CRRA, DLGA, FLRA, FLTA, IACA, ITGA, JGBA, JUZA, SPMA, URBA, VRZA

* As siglas das localidades correspondem àquelas listadas na Tabela 3.4

Com os valores das latitudes, longitudes, altitudes e das PAs para as 35 localidades da fase de confecção dos mapas, obteve-se os coeficientes da regressão linear múltipla (RLM) para estimação da PA em função das coordenadas geográficas para o cenário atual e para cada um dos quatro cenários futuros (Equação 3.6):

$$PA_{estimada}(kg\ ha^{-1}) = \left(\frac{a + b \times Lat + c \times Long + d \times Alt + e \times Lat \times Long + f \times Long \times Alt + g \times Lat \times Alt + h \times Lat^2 + i \times Long^2 + j \times Alt^2}{1} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

em que $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ e j são os coeficientes da regressão linear múltipla entre a PA e as coordenadas geográficas latitude (Lat) e longitude (Long) e a altitude (Alt).

A avaliação do desempenho desse modelo de estimação da PA foi feita por meio dos seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (r^2), índice de concordância (d) de Willmott (1982), índice de confiança ou

de desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), erro absoluto médio (EAM) e erro médio (EM). Esses índices são obtidos pelas Equações 3.7 a 3.11.

$$R^2 = \frac{\sum (E_i - \bar{O})^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.7)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (3.8)$$

$$c = d \cdot \sqrt{R^2} \quad (3.9)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum |E_i - O_i| \quad (3.10)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum E_i - O_i \quad (3.11)$$

em que: E_i corresponde aos valores estimados pelos modelos; O_i aos valores observados; $\bar{O}$ é a média dos valores observados; e n é o número total de valores observados (ou simulados) ou estimados.

Para a espacialização dos dados de PA, utilizou-se a ferramenta “Calculadora Raster” do QGIS, na qual foi inserida a Equação (3.6), substituindo-se os valores dos coeficientes de cada cenário futuro e selecionando-se os mapas de Lat, Long e Alt.

Visando reduzir os erros presentes nos mapas gerados pelas equações, calculou-se os desvios das PAs para cada cenário. Os desvios foram obtidos por meio da diferença entre a PA simulada pelo modelo de crescimento de cultura e a PA estimada pelo modelo linear (Equação 3.6), como apresentado abaixo (Equação 3.12):

$$Desvio(kg\ ha^{-1}) = PA_{simulada} - PA_{estimada} \quad (3.12)$$

em que: $PA_{simulada}$ e $PA_{estimada}$ são as produtividades atingíveis da cultura da mandioca simuladas pelo modelo CROPSIM-Cassava e as produtividades estimadas pelo modelo de regressão linear múltipla (Equação 3.6).

Os desvios foram interpolados pelo método da ponderação pelo inverso da distância (IDW), pela ferramenta “Interpolação IDW” do QGIS. A escolha do melhor método de interpolação foi baseada no desempenho delas em reproduzir os desvios no mapa. A interpolação gerou mapas que foram somados aos mapas de PA elaborados pelos modelos lineares para cada cenário, com a ferramenta “Calculadora Raster”, de modo a gerar novos mapas, conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2. Etapas para elaboração do mapa final da produtividade atingível (PA) da cultura da mandioca para cada um dos cenários climáticos, empregando-se a soma dos mapas de PA, obtidos pelos modelos de regressão linear múltipla, e dos mapas dos desvios.

A validação dos mapas finais foi realizada obtendo-se os valores de produtividade atingível dos pixels do mapa final de cada cenário correspondente aos 15 locais que não foram utilizados na geração dos coeficientes da Equação 3.6 e avaliando-se a relação com a PA simulada, a partir dos mesmos indicadores estatísticos da fase de calibração (Equações 3.7 a 3.11).

3.2.6.3. Índice de Vulnerabilidade (IV) para a mandioca no SAB

3.2.6.3.1. Determinação do IV

Com os valores médios de PA para os 29 ciclos, obtidos para os 50 locais, para os cenários atual e futuros, criou-se um índice de vulnerabilidade (IV), o qual expressa a variação relativa da produtividade atingível da mandioca entre o cenário futuro e o atual, de acordo com a Equação (3.13). O IV serviu para identificar as áreas mais vulneráveis à redução da produtividade da mandioca em função das mudanças climáticas, sendo que maior a vulnerabilidade quanto menor o IV.

$$IV(\%) = \left[\frac{(PA_{futura} - PA_{atual})}{PA_{atual}} \right] \times 100 \quad (3.13)$$

em que: PA_{futura} e PA_{atual} são as produtividades atingíveis simuladas para os cenários futuros de temperatura do ar, chuva e $[CO_2]$ e para o cenário atual, respectivamente.

3.2.6.3.2. Espacialização do IV

A confecção dos mapas de IV seguiu os mesmos procedimentos empregados para se obter os mapas de PA, utilizando-se os mesmos 50 locais divididos em dois grupos diferentes (Tabela 3.8), sendo o primeiro com 35 locais para o desenvolvimento do modelo de regressão linear múltipla (Equação 3.14), visando a espacialização do IV, e o segundo, com 15 locais para avaliação do mapa. A confecção dos mapas foi realizada empregando-se os mesmos procedimentos utilizados para os mapas de PA, aplicando-se os mesmos indicadores estatísticos (Equações 3.7 a 3.11).

Tabela 3.8. Divisão dos locais selecionados para as etapas de confecção e avaliação dos mapas do Índice de Vulnerabilidade da produtividade de mandioca no SAB.

Etapa	Locais*
Confecção	ANDRA, ARCA, BCRA, BRMA, BRRA, BTZA, BVGA, CARA, CIPA, CRCA, CRRA, CTPA, DLGA, FLRA, FLTA, FRMA, IACA, IEMA, INHA, ITCA, ITGA, JNRA, JUZA, PLNA, PNMA, PPRA, PRPA, PTGA, QIMA, SANA, SCRA, SJPA, SJRA, SPMA,UPMA

Avaliação	AMNA, BQRA, CTGA, CURA, IBPA, JGBA, MICA, PAOA, PRBA, SFPA, SMGA, SRNA, TANA, URBA, VRZA
-----------	--

* As siglas das localidades correspondem àquelas listadas na Tabela 3.4

$$IV_{estimado}(\%) = \left(\frac{a + b \times Lat + c \times Long + d \times Alt + e \times Lat \times Long + f \times Long \times Alt + g \times Lat \times Alt + h \times Lat^2 + i \times Long^2 + j \times Alt^2}{100} \right) \times 100 \quad (3.14)$$

em que $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ e j são os coeficientes obtidos da regressão linear múltipla entre o IV e as coordenadas geográficas latitude (Lat) e longitude (Long) e a altitude (Alt).

Após a espacialização dos dados de IV, estes foram organizados em seis classes de vulnerabilidade, conforme apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Classes do Índice de vulnerabilidade (IV) para a cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro, sua interpretação e a cor referente utilizada nos mapas.

Classe IV (%)	Interpretação	Cor no mapa
$\geq 0,0$	Sem vulnerabilidade	Azul
-9,9 a -0,1	Muito baixa	Verde escuro
-19,9 a -10,0	Baixa	Verde claro
-29,9 a -20,0	Moderada	Laranja claro
-39,9 a -30,0	Alta	Laranja escuro
$\leq -40,0$	Muito alta	Vermelho

A validação dos modelos lineares foi realizada calculando-se os IV estimados para os 15 locais restantes, utilizando-se os modelos de regressão linear múltipla, e verificando-se a relação entre o IV calculado a partir das PAs e o estimado para cada local, com base nos mesmos indicadores estatísticos da fase de confecção dos mapas (Equações 3.7 a 3.11). Em seguida, para a validação dos mapas, verificou-se se a classe dos IVs estimados, para cada um dos locais para cada cenário futuro, correspondia à classe interpolada nos mapas (Tabela 3.9), de modo a obter a porcentagem de acertos, como indicado na Equação (3.15). Para os casos em que os valores de IV estiveram no limiar entre duas classes, verificou-se também quantos IVs estavam em classes imediatamente acima ou abaixo, de acordo com a Equação (3.16).

$$Acerto(\%) = \left(\frac{\text{Número de acertos}}{15} \right) \times 100 \quad (3.15)$$

$$Erro \pm 1 \text{ classe}(\%) = \left(\frac{\text{Erros} \pm 1 \text{ classe}}{\text{Número de erros}} \right) \times 100 \quad (3.16)$$

em que: *Acerto (%)* corresponde aos acertos percentuais das classes de IV no mapa; *Número de acertos* é a quantidade absoluta de localidades em que as classes de IV do mapa correspondiam ao valor calculado com as PAs; *Erro ± 1 Classe (%)* é a porcentagem de classes de IV imediatamente acima ou abaixo da classe correta; *Erro ± 1 Classe* é o número absoluto de classes de IV imediatamente acima ou abaixo da classe correta; e *Número de erros* é o total de erros cometidos na classificação do IV. Um fluxograma com as etapas desse Material e Métodos pode ser encontrado no APÊNDICE A.

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Simulações da produtividade da mandioca para o clima atual

Os dados de produtividade potencial (PP) e atingível (PA), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, dos 50 locais de estudo simulados pelo modelo DSSAT CROPSIM-*Cassava* para os 29 ciclos no cenário atual são apresentados na Figura 3.3 e no APÊNDICE D. Observou-se elevada variabilidade das PP entre os locais analisados (Figura 3.3), com valores oscilando entre 1730,6 e 21147,4 kg ha⁻¹, com média geral de 7,4 t ha⁻¹. Dentre esses locais, destacam-se seis, que apresentaram PP médias mais elevadas, sendo eles CRRA (21147,4 kg ha⁻¹), PLNA (17906,0 kg ha⁻¹), PPRA (16378,1 kg ha⁻¹), INHA (15226,3 kg ha⁻¹), TANA (15134,9 kg ha⁻¹) e IACA (14600,4 kg ha⁻¹).

Para as PAs (Figura 3.4), os valores obtidos variaram entre 783,0 e 10123,6 kg ha⁻¹, com média geral de 3316,9 kg ha⁻¹, evidenciando o efeito drástico do déficit hídrico na produtividade da mandioca no SAB, com redução média superior a 50%. As localidades com as menores PAs médias foram JUZA, SFPA e SRNA, que obtiveram valores médios para os 29 ciclos de, respectivamente, 785,9 kg ha⁻¹, 829,5 kg ha⁻¹ e 830,2 kg ha⁻¹, seguidas por CURA, com 884,8 kg ha⁻¹. Essas localidades estão, também, entre aquelas que apresentaram os maiores níveis de estresse hídrico (Figura 3.4) e os menores totais acumulados de chuva no cenário atual (APÊNDICE E, Tabela E.3), dos quais os menores foram de JUZA e CURA, que atingiram menos da metade do requerimento hídrico mínimo da cultura da mandioca após seu estabelecimento, de cerca de 400 mm (FAO, 2013), o que definitivamente contribuiu para a queda brusca de produtividade. Por outro lado, semelhante à PP, os maiores valores de PA média foram obtidos nas localidades PLNA (10123,6 kg ha⁻¹), INHA (9024,2 kg ha⁻¹), AMNA (8957,5 kg ha⁻¹), PPRA (7535,1 kg ha⁻¹) e ANDA (7249,4 kg ha⁻¹). Nessas localidades, os valores de WFGD médios foram relativamente baixos, variando entre 0,24 e 0,35 (APÊNDICE G, Tabela G.1), o que se deu pelos elevados totais de chuva, cujas médias dos ciclos oscilaram entre 972 e 1794 mm (APÊNDICE E, Tabela E.3), e as médias anuais, entre 781 e 1035 mm. Esses resultados estão de acordo com os apresentados por El-Sharkawy (2004), que observou que o potencial produtivo da planta de mandioca é manifestado em condições de precipitação anual acima de 600 mm, além de elevada incidência de radiação solar.

Figura 3.3. Produtividades potenciais (PP) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, estimada pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* para as 50 localidades do Semiárido Brasileiro, no período de 1980 a 2010.

Figura 3.4. Variabilidade interanual do fator de estresse hídrico (WFGD - a) e da produtividade atingível (PA - b) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para o cenário atual, simuladas pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

3.3.2. Simulações dos impactos do clima futuro na produtividade da mandioca

Os resultados referentes aos impactos das mudanças climáticas, para médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos e considerando-se os cenários intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, na produtividade da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, em relação à produtividade atual (1980-2010), são apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6.

Figura 3.5. Variação das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob o cenário de intermediária (RCP4.5) emissão de gases de efeito estufa, em relação ao período atual (1980-2010), simuladas por meio do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Figura 3.6. Variação das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob o cenário de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, em relação ao período atual (1980-2010), simuladas por meio do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Observa-se que, na maioria das localidades consideradas, houve redução na produtividade para todos os cenários, sendo essa redução maior para a PP do que para a PA (Figuras 3.5 e 3.6). Esse resultado é contrário ao sugerido por Cruz et al. (2016), que afirmaram que altos níveis de CO_2 atmosférico aumentam a produtividade da mandioca, porém concorda com Gleadow et al. (2009) e Gleadow e Woodrow (2002), cujos estudos indicaram que o aumento da $[\text{CO}_2]$ pode reduzir a produção de raízes, já que essa cultura tem alta sensibilidade às altas concentrações de gás carbônico, resultando em redução da assimilação líquida de CO_2 e, consequentemente, do crescimento e da produtividade. Por outro lado, a média da variação da PP e da PA para os 50 locais não diferiu tanto entre cenários futuros, atingindo valores de -29 a -11% para a PP (APÊNDICE F, Tabela F.1) e de -22 a -1% para a PA

(APÊNDICE F, Tabela F.2), para os cenários RCP4.5 à médio prazo e RCP8.5 à longo prazo, respectivamente. A baixa variação da PA média entre os diferentes cenários pode ser explicada pelo fato de o estresse hídrico ter se mantido relativamente estável, com valores de WFGD entre 0,42 e 0,46 (APÊNDICE G, Tabela G.1).

SJPA foi a localidade que apresentou os maiores acréscimos de PP em relação ao cenário atual, em ambos os cenários futuros (Figura 3.5, APÊNDICE F). O acréscimo foi de 67% no RCP4.5 (Figura 3.5, Tabela F.1) e de 58% no RCP8.5 (Figura 3.6, Tabela F.2), ambos à médio prazo. Quanto à PA, a localidade com os maiores acréscimos em relação ao cenário atual foi IEMA, também em todos os cenários futuros (Figura 3.5, APÊNDICE F). Seu maior aumento atingiu 74% em relação à PA atual a médio prazo, no cenário RCP4.5, seguido por SJPA, com aumento de 63% para o mesmo cenário. Isso concorda com os resultados obtidos por Tironi et al. (2017) que, utilizando o modelo Simanihot (TIRONI, 2016), obtiveram maiores produtividades no cenário RCP4.5, tanto para cultivar destinada à forragem quanto ao consumo humano, no estado do Rio Grande do Sul. Além disso, IEMA atingiu o segundo maior acréscimo (54%) de todas as localidades, seguida por SJPA (48%), à médio prazo no cenário RCP8.5, no qual a $[CO_2]$ foi de 571 ppm. Esse resultado sugere a adaptabilidade da cultura às variações nas condições climáticas, o que também foi observado por Rosenthal e Ort (2012), em cujo trabalho admitiu-se a possibilidade de a $[CO_2]$ em torno de 585 ppm elevar a temperatura ótima da fotossíntese da mandioca, tornando-a ainda mais adaptada às projeções de clima futuros.

Por outro lado, embora as temperaturas máxima e mínima do ar nesses períodos tenham sido semelhantes em IEMA e SJPA (APÊNDICE E, Tabelas E.1 e E.2), e o WFGD médio tenha se mantido entre 0,33 e 0,38 (Figuras 3.7 e 3.8, APÊNDICE G, Tabela G.1), houve elevada disparidade em relação à chuva acumulada, com IEMA apresentando menos da metade de chuva observada em SJPA, tanto no cenário RCP4.5 (430 mm em IEMA e 1198 mm em SJPA) quanto no RCP8.5 (362 mm em IEMA e 1173 mm em SJPA), ambos a médio prazo. O mesmo pôde ser observado nas localidades BQRA e DLGA. Nos cenários futuros, BQRA apresentou chuva acumulada variando entre 263 e 297 mm e DLGA, entre 123 e 152 mm (APÊNDICE E, Tabela E.3) e WFGD médios variando entre 0,38 e 0,42 e entre 0,56 e 0,60, respectivamente para BQRA e DLGA (APÊNDICE G, Tabela G.1). Apesar disso, ambas as localidades apresentaram aumento nas PAs em todos os cenários futuros, sendo este maior para BQRA (de 15 a 22%) do que para DLGA (de 4 a 15%). Esses resultados podem ser um indicativo de que o período recomendado para o plantio nas regiões mais secas (IEMA, principalmente, BQRA e DLGA), visando o aproveitamento da estação chuvosa na fase mais crítica do desenvolvimento da mandioca, não deve precisar ser ajustado nas condições de clima futuro, simuladas nesse estudo.

Figura 3.7. Variabilidade interanual do fator de estresse hídrico (WFGD - a) e da produtividade atingível (PA - b) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob emissão de gases de efeito estufa intermediária (RCP4.5), simuladas pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Figura 3.8. Variabilidade interanual do fator de estresse hídrico (WFGD - a) e da produtividade atingível (PA - b) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob emissão de gases de efeito estufa intermediária (RCP8.5), simuladas pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Nesse mesmo sentido, embora as localidades JUZA, CURA, DLGA, SRNA, FLTA e CIPA tenham apresentado os menores totais acumulados de chuva no período atual, abaixo de 250 mm (APÊNDICE E, Tabela E.3), exceto em DLGA onde houve aumento das produtividades, elas não sofreram reduções tão bruscas nos cenários de mudanças climáticas (Figura 3.6), o que foi contrário ao encontrado por Bender (2017), em estudo com milho. As PAs mais afetadas, com redução entre 50 e 54% em relação às condições atuais, foram BRMA, CRCA, CTGA, ITCA, ITGA e JNRA, e ocorreram no cenário RCP8.5 a longo prazo (Figura 3.6, APÊNDICE F, Tabela F.2). Exceto para CRCA, que apresentou chuva acumulada de 458 mm, os demais locais apresentaram chuva acumulada elevada, entre 969 e 1805 mm, considerando que a média geral foi de 690 mm para o mesmo cenário. Essa redução de produtividade pode estar associada à variabilidade interanual da variação sazonal e da intensidade das chuvas em cada local e dos estresses hídricos que ocorreram como consequência disso (Figura 3.9). Esses resultados reforçam aqueles encontrados por Gabriel et al. (2014) que, em experimentos com modelos numéricos, mostraram que a resposta da cultura da mandioca às mudanças climáticas difere em função da região e da variabilidade interanual das chuvas em cada uma delas.

Figura 3.9. Variabilidade interanual do fator de estresse hídrico (WFGD - a) e da produtividade atingível (PA - b) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a longo (2070-2100) prazo, sob alta emissão de gases de efeito estufa (RCP8.5), simuladas pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

No cenário RCP4.5 a longo (2070-2100) prazo, os acréscimos e decréscimos nas PAs em relação a PA atual alcançaram nível intermediário (Figura 3.5), explicado pela semelhança dos valores médios das variáveis temperaturas máxima e mínima, chuva (APÊNDICE E) e $[CO_2]$ (532 ppm) daqueles apresentados por ambos os cenários a médio prazo (RCP 4.5 e RCP8.5). As localidades com os maiores acréscimos na PA foram IEMA (52%) e SJPA (31%), como neste mesmo cenário à longo (2070-2100) prazo, discutido acima. As localidades com os maiores decréscimos, apesar do WFGD permanecer entre 0,30 e 0,35 (Figura 3.10, APÊNDICE G, Tabela G.1), foram

ITGA (37%) e JNRA (35%), semelhante ao cenário RCP8.5 a longo prazo, seguidas por BTZA, CTGA e VRZA, as quais apresentaram redução de 32% (APÊNDICE F, Tabela F.2).

Figura 3.10. Variabilidade interanual do fator de estresse hídrico (WFGD - a) e da produtividade atingível (PA - b) da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a longo (2070-2100) prazo, sob emissão de gases de efeito estufa intermediária (RCP4.5), simuladas pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

De um modo geral, embora as localidades estejam em uma região delimitada, entre outros fatores, por semelhanças no nível de chuvas, em se tratando da produtividade da mandioca, ocorreram disparidades importantes. Houve redução da produtividade da mandioca sob clima futuro na maioria dos locais pela redução na disponibilidade hídrica, consequência, principalmente, da combinação do aumento das temperaturas, com consequente elevação nas taxas de evapotranspiração, e redução das chuvas (APÊNDICE E). Esses resultados concordam com os obtidos para as culturas da cana-de-açúcar (VIANNA; SENTELHAS, 2014), do milho (BENDER, 2017) e da soja (BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017), em diferentes regiões do Brasil. Entretanto, também houve aumento da produtividade da mandioca em locais com acumulados de chuva muito baixos (APÊNDICE E, Tabela E.3), o que se deu pelos baixos níveis de estresse ao longo das fases mais críticas do ciclo da cultura (Figuras 3.7 a 3.10).

3.3.3. Espacialização das produtividades atingíveis da cultura da mandioca no SAB

Os dados de PA simulados de cada local para cada cenário (em quilos de matéria seca por hectare), juntamente com as respectivas coordenadas geográficas, foram submetidos à uma regressão linear múltipla (RLM). Os coeficientes obtidos com a RLM foram utilizados para o cálculo das PAs estimadas, as quais foram, em seguida, comparadas estatisticamente com as PAs simuladas (Tabela 3.10). Observa-se que a estimativa das PAs pelas

equações lineares apresentou baixos erros em relação à PA simulada (EAM entre 817,0 e 1081,9 kg ha⁻¹), além de apresentar resultados consistentes, com índices d entre 0,85 e 0,87, e com o desempenho considerado “bom” para todos os cenários, de acordo com índice de confiança Camargo e Sentelhas (1997), como pode ser observado na Tabela 3.10. Assim, confirmou-se a viabilidade da criação dos mapas de PAs a partir desse modelo linear.

Tabela 3.10. Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla e suas avaliações estatísticas para estimar a produtividade atingível (PA) da mandioca no Semiárido Brasileiro, em função das coordenadas geográficas (latitude e longitude) e altitude e suas combinações e valores quadráticos, no cenário atual e nos quatro cenários de mudanças climáticas.

Coeficientes	Cenários				
	Atual	RCP4.5		RCP8.5	
	(1980-2010)	(2040-2070)	(2070-2100)	(2040-2070)	(2070-2100)
a	147209,0481	161376,2002	151382,4833	166470,9390	140420,2091
b	-3368,8548	-2961,9702	-3429,6754	-3640,9413	-2857,5119
c	7719,9746	8362,8225	7898,3905	8686,2731	7172,1136
d	4,2932	14,6260	6,5559	8,8806	2,5265
e	-126,7670	-117,6569	-125,0944	-135,6312	-106,9973
f	0,0226	0,3229	0,1294	0,1754	0,0684
g	0,2678	0,0930	0,0641	0,0652	0,0139
h	127,7966	123,6987	110,5628	124,2198	95,0641
i	105,1158	112,6495	106,9296	117,6316	95,5486
j	-0,0009	-0,0002	-0,0002	-0,0006	0,0009
Índices estatísticos					
EAM (kg ha ⁻¹)	1081,9	1004,1	922,8	961,7	817,0
r	0,76	0,78	0,78	0,78	0,77
d	0,85	0,87	0,86	0,87	0,86
c	0,6522	0,6808	0,6704	0,6804	0,6611

EAM = erro absoluto médio; EM = erro médio; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.

Os mapas das PAs no SAB para os cenários atual e futuros foram criados com base nos modelos lineares apresentados na Tabela 3.10. Para minimização dos erros, os desvios obtidos entre as PAs calculadas e as estimadas foram interpolados e somados aos mapas das PAs. Assim, foram obtidos os mapas finais apresentados na Figura 3.11.

Após a criação dos mapas finais, verificou-se a relação entre as PAs calculadas para os 15 locais restantes e os valores de PA dos pixels dos mapas finais referentes à cada local. A avaliação confirmou a performance da soma da espacialização dos valores de PA pelas equações e da interpolação dos desvios (Tabela 3.11), apresentando elevada concordância e correlação entre as PAs calculadas e as obtidas nos mapas finais (índice d entre 0,75 e 0,83 e r entre 0,67 e 0,81), além de EM baixos.

Tabela 3.11. Desempenho dos mapas finais na espacialização da produtividade atingível (PA) da mandioca no Semiárido Brasileiro, na fase de avaliação.

Índices	Cenários				
	Atual (1980-2010)	RCP4.5		RCP8.5	
		(2040-2070)	(2070-2100)	(2040-2070)	(2070-2100)
EAM (kg ha ⁻¹)	1586,3	1657,1	1399,6	1522,1	1118,3
EM (kg ha ⁻¹)	1082,8	1182,3	979,3	1078,8	701,5
r	0,81	0,76	0,72	0,76	0,67
d	0,83	0,76	0,75	0,76	0,76
c	0,6716	0,5805	0,5455	0,5764	0,5087

EAM = erro absoluto médio; EM = erro médio; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.

Observa-se que a região de menores produtividades no cenário atual ($< 2.000,1$ kg ha⁻¹), no qual encontram-se porções dos estados do PI, CE, PE e BA (Figura 3.11a), tende a se manter nos demais cenários, apresentando aumento significativo dessa região somente no cenário a longo prazo do RCP8.5 (Figura 3.11e), quando atingiu também o estado da PB e mais áreas da BA. Esses resultados eram esperados, considerando-se que grande parte dessa região se encontra na zona semiárida seca (BSh), segundo Alvares et al. (2013), clima mais seco do país. De acordo com estudo dos efeitos das mudanças climáticas no SAB, realizado por Marengo (2008), um aumento na temperatura média da ordem de 3 °C tornaria ainda mais seco os locais de maiores déficits hídricos dessa região, praticamente inviabilizando a produção agrícola de subsistência.

As regiões de maiores produtividades ($> 8.000,1$ kg ha⁻¹) no cenário atual, incluindo o Sudeste da BA e o Nordeste de MG, diminuiu gradativamente ao longo do tempo, em ambos os cenários de emissão (RCP4.5 e RCP8.5), apresentando menor área a longo prazo (Figuras 3.11c e 3.11e). Isso indica que as áreas mais aptas para a produção da mandioca atualmente tendem a se tornar cada vez menos aptas nos cenários futuros.

Por outro lado, as regiões mais ao norte e nordeste do SAB, onde as PAs obtidas encontram-se entre 2.000,1 e 6.000,0 kg ha⁻¹ no cenário atual (Figura 3.11a), não apresentaram variações significativas, mantendo-se nesse patamar de produtividade em todos os cenários futuros (Figuras 3.11b a 3.11e), o que indica que essa região é onde a produtividade de mandioca sofrerá efeitos menos drásticos das mudanças climáticas.

Figura 3.11. Produtividade atingível (PA) de mandioca, no Semiárido brasileiro, para os cenários atual (1980-2010) (a) e futuros de emissão moderada de gases de efeito estufa (RCP4.5), à médio (b) e longo (c) prazos, e alta (RCP8.5), à médio (d) e longo (e) prazos.

3.3.4. Índice de vulnerabilidade (IV) da cultura da mandioca no SAB

3.3.4.1. Determinação do IV

Os Índices de vulnerabilidade (IV) obtidos para as 50 localidades do Semiárido Brasileiro referentes aos impactos das mudanças climáticas, para médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos e considerando-se os cenários intermediário (RCP4.5) e de alta emissão (RCP8.5) de emissão de gases de efeito estufa, na produtividade da cultura da mandioca são apresentados na Tabela 3.12.

Observa-se que as médias dos IVs são maiores a longo prazo, em ambos os cenários, possivelmente reflexo da variação da PA ter sido mais elevada em relação às do cenário atual nesses casos, com médias de -11,7% para o RCP4.5 e de -21,8% para o RCP8.5, contra médias de -3,8% e -7,5% para os mesmos cenários, respectivamente, à médio prazo (APÊNDICE F, Tabela F.2). Além disso, observa-se que os valores de IV dos locais de um mesmo cenário apresentam elevada variabilidade, sendo maior no cenário mais pessimista, com os valores variando de -20,5 a 22,7% e -33,4 a 17,0% para médio e longo prazos do RCP4.5, e de -27,0 a 19,8% e -51,8 a 31,6% para médio e longo prazos do RCP8.5, respectivamente (Tabela 3.12).

Os locais que apresentaram os maiores níveis de vulnerabilidade e, portanto, maiores quebras na produtividade, foram JNRA (-51,8%), CTGA (-51,7%), ITCA (-50,2%), ITGA (-47,9%), BTZA (-47,8%) e BRMA (-47,4%) (Tabela 3.12). Exceto por BTZA, esses locais correspondem aos locais com as maiores reduções das PAs em relação ao cenário atual, ambos no cenário RCP8.5 à longo prazo (Figura 3.6, APÊNDICE F, Tabela F.2), como discutido anteriormente. Além disso, os locais BTZA, ITGA e JNRA também foram os locais com maiores quebras de produtividade no RCP4.5, com IV de -20,5% (JNRA), -19,8% (ITGA) e -18,1% (BTZA) à médio prazo, e -33,4% (ITGA), -32,8% (JNRA) e -31,3% (BTZA) à longo prazo (Figura 3.9). No RCP 8.5 à médio prazo, CTGA foi o local com maior IV (-27,0%), seguido de JNRA (-25,4%) e ITGA (-24,6%).

Quanto aos locais que não apresentaram vulnerabilidade para as projeções de clima futuro ($IV \geq 0,0$), estes foram mais numerosos à médio prazo, com um total de 17 e 15 locais para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, enquanto, a longo prazo, ambos os cenários apresentaram oito locais cada. Os locais ARCA, BCRA, BQRA, CRRA, DLGA, FLRA, IEMA e URBA não apresentaram quebra de produtividade em nenhum dos cenários, sendo considerados não vulneráveis às projeções de mudanças climáticas avaliadas.

Tabela 3.12. Índices de vulnerabilidade da produtividade atingível da mandioca para as projeções de clima futuro a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, conforme simulado pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para as 50 localidades no Semiárido Brasileiro. Quanto menor o valor de IV, maior a vulnerabilidade do local.

Local	Índice de vulnerabilidade (%)			
	RCP4.5		RCP8.5	
	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
AMNA	-12,0	-22,9	-19,2	-38,2
ANDA	-10,5	-24,0	-18,4	-40,8
ARCA	15,5	13,4	18,7	31,6
BCRA	5,0	2,0	5,7	2,5
BQRA	15,5	12,7	19,8	18,2
BRMA	-12,1	-28,1	-21,6	-47,4
BRRA	-2,9	-8,8	-2,1	-15,3
BTZA	-18,1	-31,3	-21,3	-47,8
BVGA	-5,0	-10,9	-10,7	-21,6
CARA	-8,8	-25,7	-16,9	-40,6
CIPA	-9,7	-10,2	-13,6	-25,5
CRCA	-4,8	-16,7	-15,0	-41,2
CRRA	4,3	4,2	9,0	10,8
CTGA	-14,2	-29,1	-27,0	-51,7
CTPA	3,9	-3,0	3,9	-8,5
CURA	-5,3	-13,1	-16,8	-28,7
DLGA	1,7	8,2	3,6	15,4
FLRA	6,3	3,4	10,1	14,2
FLTA	0,1	-8,1	-5,9	-4,6
FRMA	-7,9	-21,6	-18,4	-45,2
IACA	-15,1	-23,1	-12,9	-42,5
IBPA	-5,1	-11,7	-7,2	-19,2
IEMA	22,7	17,0	19,5	20,3
INHA	-13,0	-16,9	-8,5	-33,1
ITCA	-9,7	-27,7	-23,0	-50,2
ITGA	-19,8	-33,4	-24,6	-47,9
JGBA	0,8	-6,1	-5,5	-16,8
JNRA	-20,5	-32,8	-25,4	-51,8
JUZA	-8,0	-9,7	-10,4	-23,6
MICA	-3,3	-2,2	1,4	-22,3
PAOA	-6,5	-2,4	-6,4	-7,0
PLNA	0,0	-9,7	-3,9	-23,6
PNMA	-2,0	-9,7	-12,7	-22,6
PPRA	-7,0	-9,1	-6,1	-9,2
PRBA	0,6	-7,0	-6,1	-17,6
PRPA	6,1	-5,0	1,2	-12,5
PTGA	3,1	-0,1	1,5	-4,5
QIMA	-14,4	-22,8	-20,5	-39,4
SANA	-8,8	-24,6	-21,6	-45,6
SCRA	0,6	-5,8	5,1	-9,5
SFPA	-2,9	-12,5	-7,0	-23,9
SJPA	18,8	-2,8	8,9	-21,8
SJRA	-4,0	-12,3	-13,3	-27,3
SMGA	-10,3	-16,3	-9,7	-23,7
SPMA	-3,2	-12,0	-11,1	-32,5
SRNA	-6,5	-17,4	-12,6	-35,6
TANA	-5,7	-19,2	-11,9	-35,3
UPMA	-5,0	-9,3	1,8	-7,1
URBA	3,9	1,0	4,7	3,9
VRZA	-15,3	-30,1	-20,6	-43,8
Média	-3,8	-11,7	-7,5	-21,8

3.3.4.2. Espacialização do IV

Os dados de IV calculados de cada local para cada cenário, juntamente com as respectivas coordenadas geográficas, foram empregados na confecção de modelos de regressão linear múltipla, visando a estimação do IV. Os modelos de regressão obtidos (Tabela 3.13) foram utilizados tanto para a geração dos mapas dos IVs no SAB (Figura 3.12).

Observa-se que a estimativa dos IVs pelas equações foi eficiente, apresentando erros muito baixos em relação aos IVs calculados (EAM entre 5,0 e 8,4%), além de resultados consistentes, com índices d entre 0,86 e 0,92, e com desempenho considerado “bom”, para o cenário RCP4.5 à curto prazo, e “muito bom” para os demais cenários, de acordo com índice de confiança de Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 3.10), o que possibilitou a confecção de mapas confiáveis de IVs (Figuras 3.12).

Tabela 3.13. Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla e suas avaliações estatísticas para estimar os Índices de Vulnerabilidade da cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro, em função das coordenadas geográficas (latitude e longitude) e altitude e suas combinações e valores quadráticos, nos quatro cenários de mudanças climáticas.

Coeficientes	Cenários			
	RCP4.5		RCP8.5	
	(2040-2070)	(2070-2100)	(2040-2070)	(2070-2100)
a	419,8258	551,6577	718,4204	851,7762
b	-6,6676	-11,2062	-6,1808	4,5881
c	21,0260	27,7401	35,1600	38,0034
d	0,0649	0,0555	0,1088	0,1875
e	-0,2766	-0,4152	-0,3324	-0,1287
f	0,0023	0,0018	0,0035	0,0051
g	-0,0082	-0,0061	-0,0063	-0,0047
h	0,0378	0,1062	0,2052	0,2797
i	0,2773	0,3609	0,4496	0,4393
j	-0,00005	-0,00004	-0,00002	-0,00001
Índices estatísticos				
EAM (%)	5,019	5,485	5,226	8,485
r	0,77	0,86	0,86	0,87
d	0,86	0,92	0,92	0,92
c	0,6610	0,7838	0,7878	0,7998

EAM = erro absoluto médio; EM = erro médio; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.

Figura 3.12. Vulnerabilidade da cultura da mandioca na região do Semiárido brasileiro nos cenários futuros de mudanças climáticas, com emissão moderada de gases de efeito estufa (RCP4.5), à médio (a) e longo (b) prazos, e alta emissão de gases de efeito estufa (RCP8.5), à médio (c) e longo (d) prazos.

A avaliação dos modelos lineares de estimativa de vulnerabilidade da cultura da mandioca às mudanças climáticas, observou-se elevada consistência dos dados espacializados, apresentando índice d entre 0,72 e 0,94, além de EM entre -1,9 e 1,0% (Tabela 3.14). Quanto à validação dos mapas, embora a porcentagem de acerto dos IVs dos locais nas classes estimadas tenha sido aceitável (53,3 a 66,6%), observou-se que a maioria dos erros obtidos foi devido ao fato de seus valores encontrarem-se muito próximos aos limiares entre duas classes e acabarem na classe não correspondente à estimada (80,0 a 100,0%).

Tabela 3.14. Avaliação estatística do desempenho dos coeficientes em estimar os Índices de Vulnerabilidade da produtividade atingível da mandioca no Semiárido Brasileiro, na fase de validação, porcentagem de acerto e de erros quando ocorrem em classes imediatamente acima ou abaixo da classe correta.

Índices	Cenários			
	RCP4.5		RCP8.5	
	(2040-2070)	(2070-2100)	(2040-2070)	(2070-2100)
EAM (%)	5,87	5,49	5,95	6,02
EM (%)	-1,9	-1,6	-0,9	1,0
r	0,58	0,81	0,78	0,89
d	0,72	0,89	0,88	0,94
c	0,4170	0,7169	0,6850	0,8359
Acerto (%)	66,6	53,3	60,0	66,6
Erro $\pm$ 1 classe (%)	80,0	100,0	100,0	100,0

EAM = erro absoluto médio; EM = erro médio; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.

Analisando-se os mapas de IV, observa-se que as mudanças climáticas deverão causar aumento da vulnerabilidade do SAB para a produção de mandioca, com predominância de reduções nos valores de PA (Figura 3.12). As áreas já vulneráveis se tornarão ainda mais críticas para a produção de mandioca, enquanto grande parte das áreas não vulneráveis, apresentarão algum grau de vulnerabilidade no futuro. Esses resultados corroboram o obtido por Pinto et al. (2008), que, ao estudar os efeitos dos cenários futuros do quarto relatório de avaliação (AR4) do IPCC (2007), concluiu que o aumento na temperatura poderá acarretar aumento importante das áreas de alto risco para a produção dessa raiz na região. Além disso, observa-se que os menores níveis de vulnerabilidade do SAB ocorrerão à médio prazo, para ambos os cenários de emissão de gases de efeito estufa, sendo o de emissão intermediária (RCP4.5) menos vulnerável (Figura 3.12a) do que o de alta emissão (RCP8.5) (Figura 3.12c). O mesmo ocorre nos cenários à longo prazo, havendo menor vulnerabilidade no RCP4.5 (Figura 3.12b) do que no RCP8.5 (Figura 3.12d), de modo que esse último permanece o mais pessimista quanto à vulnerabilidade da cultura da mandioca às mudanças climáticas.

A região de maior vulnerabilidade está localizada à sudoeste do SAB, que inclui parte dos estados do PI, da BA e de MG, onde a vulnerabilidade variou de muito baixa a baixa no cenário a médio prazo para moderada a alta a longo prazo, no RCP4.5 (Figuras 3.12a e 3.12b), e de baixa a moderada para alta a muito alta, no RCP8.5 (Figura 3.12c e 3.12d). Por outro lado, nota-se que a porção mais ao norte e nordeste do SAB, incluindo parte dos estados do PI, PA, CE, RN, PB, PE e AL, tende a apresentar baixa ou nenhuma vulnerabilidade em todos os cenários projetados.

Estudos dos impactos e vulnerabilidade às mudanças climáticas, tal como este, fornecem informações importantes sobre como o clima futuro possivelmente afetará as produtividades das culturas e produção de alimentos, como destacado por Lobell et al. (2008) e Thornton et al. (2011). Embora a gravidade dos impactos possa variar bastante de acordo com os recursos biofísicos e com o manejo, entre outras características de cada região (LOBELL et al., 2008), eventos climáticos extremos decorrentes dessas mudanças, como secas mais severas, poderão causar danos expressivos à agricultura e, como consequência, às comunidades rurais (REN, 2007). Assim, estudos sobre a vulnerabilidade de culturas agrícolas em dada região auxiliam não só para se mitigar as possíveis perdas, mas também para garantir a segurança alimentar (FARHANGFAR et al., 2015).

Além disso, a modelagem da interação cultura-clima é essencial para o desenvolvimento do panorama futuro da agricultura, podendo auxiliar na criação de políticas públicas e/ou tomadas de decisão ao nível de campo

(PORTER et al., 2014). Estudos de impactos das mudanças climáticas, a partir do uso do “ensemble” de GCMs e de modelos de culturas vem sendo utilizados para orientar políticas públicas sobre a adaptação às mudanças climáticas, tanto em escala nacional como internacional (CHALLINOR et al., 2009; ROSENZWEIG et al., 2015; CORBEELS et al., 2018), para a criação de programas de desenvolvimento e para investimentos de medidas de adaptação na agricultura (CORBEELS et al., 2018). No entanto, além dos impactos específicos previstos para cada região, as políticas, as estratégias e os incentivos para assistir à adaptação climática devem considerar a capacidade adaptativa individual e/ou da comunidade (BRISKE et al., 2015) e a dificuldade de se fazer adaptações em sistemas agrícolas específicos (LOBELL et al., 2008). Apesar do número crescente de estudos sobre as mudanças climáticas e seus impactos em vários segmentos das atividades humanas (CEBALLOS et al., 2011; EWERT et al., 2015; MACHADO FILHO et al., 2016; PBMC, 2016; BENDER, 2017), Marshall (2010) e Joyce et al. (2013) sugerem que há um subaproveitamento desse conhecimento na etapa de adaptação, visto que os procedimentos para incorporar informações climáticas na tomada de decisão ainda não foram adequadamente desenvolvidos.

Nesse contexto, ao contabilizar as incertezas inerentes ao uso dos modelos (climáticos e de culturas), Lobell et al. (2008) sugerem que os investimentos em estratégias de adaptação devem visar as culturas e regiões em que há previsão de maior vulnerabilidade às mudanças climáticas. Para isso, os modelos de culturas são ferramentas essenciais por identificarem quais práticas de manejo poderão ser apropriadas para o processo de adaptação, como defendido por Matthews et al. (2013). Isso corrobora o estudo de Reidsma et al. (2010) sobre a agricultura na Europa, no qual estratégias de manejo e adaptação reduziram drasticamente os impactos das mudanças climáticas simuladas, não só nas produtividades das culturas, como também no rendimento dos produtores.

As estratégias de manejo mais avaliadas para adaptação e mitigação até então foram: ajustes nas datas de plantio (EWERT et al., 2015; DO RIO et al., 2016); variação das cultivares empregadas (NENDEL et al., 2014); utilização de plantas de cobertura (KAYE; QUEMADA, 2017); e rotação de culturas (NENDEL et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2018). Como os impactos das projeções de clima futuro tendem a variar entre culturas e cultivares (CHALLINOR et al., 2007), há também a necessidade de se escolher as cultivares que melhor se adequem a eles (KASSIE et al., 2015). Assim, o melhoramento genético e desenvolvimento de novas cultivares mais adaptadas aos estresses térmico e hídrico, como ressaltado por Angulo et al. (2013), Wang, Burow e Burke (2014), Burke e Chen (2015) e Battisti et al. (2017), também poderão contribuir para a minimização dos impactos a serem causados pelo clima futuro. Entretanto, mais estudos nesse tema ainda são necessários, como destacado por White et al. (2011) e Abberton et al. (2015).

3.4. Conclusões

Houve elevada variação das produtividades potencial e atingível no cenário atual no Semiárido Brasileiro, o que também ocorreu nos cenários futuros de mudanças climáticas. Nesses, as produtividades sofreram tanto reduções quanto incrementos, porém os efeitos das projeções de clima futuro foram predominantemente negativos. As reduções nas produtividades observadas deverão se dar, principalmente, pela variação dos acumulados e na distribuição das chuvas nos cenários futuros e pelo consequente aumento do déficit hídrico nas fases críticas da cultura da mandioca.

A área das regiões de menores produtividades atingíveis no cenário atual no SAB (estados do PI, CE, PE e BA) apresentou tendência a se manter nos cenários climáticos futuros, enquanto a área das regiões de maiores produtividades (sudeste do estado da BA e norte de MG), diminuiu gradativamente.

A vulnerabilidade da produção de mandioca às mudanças climáticas no SAB foi maior à longo prazo (2070-2100), em ambos os cenários de emissão de gases de efeito estufa (RCP4.5 e RCP8.5). Entretanto, houve variação espacial da vulnerabilidade no SAB. A região de maior vulnerabilidade foi, em geral, a sudoeste do SAB (estados do PI, BA e MG), enquanto a de menor, se localiza ao norte e nordeste. Diante disso, estudos de medidas de adaptação específicas para cada local, por meio de estratégias de manejo da cultura da mandioca, são fundamentais para se minimizar as regiões vulneráveis e, consequentemente, as perdas na produtividade dessa cultura, a qual é de grande importância para a segurança alimentar da região.

Referências

- ABBERTON, M.; BATLEY, J.; BENTLEY, A.; BRYANT, J.; CAI, H.; COCKRAM, J.; DE OLIVEIRA, A. C.; CSEKE, L. J.; DEMPEWOLF, H.; DE PACE, C.; EDWARDS, D.; GEPTS, P.; GREENLAND, A.; HALL, A. E.; HENRY, R.; HORI, K.; HOWE, G. T.; HUGHES, S.; HUMPHREYS, M.; LIGHTFOOT, D.; MARSHALL, A./MAYES, S.; NGUYEN, H. T.; OGBONNAYA, F. C.; ORTIZ, R.; PATERSON, A. H.; TUBEROSA, R.; VALLIYODAN, B.; VARSHNEY, R. K.; YANO, M. Global agricultural intensification during climate change: a role for genomics. **Plant Biotechnology Journal**, v. 14, n. 4, p. 1095-1098, 2015.
- ALLEN, M. R.; INGRAM, W. J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. **Nature**, v. 419, p. 228-232, 2002.
- 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.
- 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.
- BARTON, C. V. M.; DUURSMA, R. A.; MEDLYN, B. E.; ELLSWORTH, D. S.; EAMUS, D.; TISSUE, D. T.; ADAMS, M. A.; CONROY, J.; CROUS, K. Y.; LIBERLOO, M.; LÖW, M.; LINDER, S.; McMURTRIE, R. E. Effects of elevated atmospheric [CO₂] on instantaneous transpiration efficiency at leaf and canopy scales in *Eucalyptus saligna*. **Global Change Biology**, v. 18, p. 585-595, 2011.
- BATISANI, N.; YARNAL, B. Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: implications for climate change adaptation policy. **Applied Geography**, v. 30, p. 483-489, 2010.
- BATTIPAGLIA, G.; SAURER, M.; CHERUBINI, P.; CALFAPIETRA, C.; MCCARTHY, H. R.; NORBY, R. J.; COTRUFO, M. F. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. **New Phytologist**, v. 197, p. 544-554, 2013.
- BATTISTI, D. S.; NAYLOR, R. L. Historical warnings of future food security with unprecedented seasonal heat. **Science**, v. 323, p. 240-244, 2009.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their Ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 200, p. 28-37, 2017.
- BENDER, F. D. 2017. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e**

estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

BOOTE, K. J.; ALLEN, L. H.; PRASAD, P. V. V.; BAKER, J. T.; GESCH, R. W.; SNYDER, A. M.; PAN, D.; THOMAS, J. M. Elevated Temperature and CO₂ impacts on pollination, reproductive growth, and yield of several globally important crops. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 60, n. 5, p. 469-474, 2005.

BRISKE, D. D.; JOYCE, L. A.; POLLEY, H. W.; BROWN, J. R.; WOLTER, K.; MORGAN, J. A.; McCARL, B. A.; BAILEY, D. W. Climate-change adaptation on rangelands: linking regional exposure with diverse adaptive capacity. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 13, p. 249-256, 2015.

BURKE, J. J.; CHEN, J. Enhancement of reproductive heat tolerance in plants. **PLoS One**, v. 10, n. 4, 2015.

BURNS, A.; GLEADOW, R.; CLIFF, J.; ZACARIAS, A.; CAVAGNARO, T. Cassava: The drought, war and famine crop in a changing world. **Sustainability**, v. 2, n. 11, p. 3572-3607, 2010.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CEBALLOS, H.; RAMIREZ, J.; BELLOTTI, C.; JARVIS, A.; ALVAREZ, E. Adaptation of cassava to changing climates. In: YADAV, S. S. et al. ed. **Crop Adaptation to Climate Change**. 1. ed., John Wiley & Sons, Ltd., p. 411-425, 2011.

CHALLINOR, A.; WHEELER, T.; CRAUFURD, P.; FERRO, C.; STEPHENSON, D. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 119, n. 1, p. 190-204, 2007.

CHALLINOR, A. J.; WHEELER, T. R. Crop yield reduction in the tropics under climate change: processes and uncertainties. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 3, p. 343-356, 2008.

CHALLINOR, A.; EWERT, F.; ARNOLD, S.; SIMELTON, E.; FRASER, E. Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2775-2789, 2009.

CORBEELS, M.; BERRE, D.; RUSINAMHODZI, L.; LOPEZ-RIDAURA, S. Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256-257, p. 46-52, 2018.

CRUZ, J. L.; ALVES, A. A. C.; LeCAIN, D. R.; ELLIS, D. D.; MORGAN, J. A. Elevated CO₂ concentrations alleviate the inhibitory effect of drought on physiology and growth of cassava plants. **Scientia Horticulturae**, v. 210, p. 122-129, 2016.

DA SILVA, F. H. B. B.; DA SILVA, M. S. L.; CAVALCANTI, A. C.; CUNHA, T. J. F. **Principais solos do Semi-árido do Nordeste do Brasil: “Dia de Campo”**. Embrapa, 2005.

DE TAFUR, S. M.; EL-SHARKAWY, M. A.; CALLE, F. Photosynthesis and yield performance of cassava in seasonally dry and semiarid environments. **Photosynthetica**, v. 33, p. 229-257, 1997.

- DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmosphere Carbon Dioxide – Global**. National Oceanic & Atmospheric Administration/ Earth System Research Laboratory, 2019. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 21 mai. 2019.
- 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**, v. 36, p. 3664-3672, 2016.
- EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H. Response of cassava to water stress. **Plant and Soil**, v. 100, n. 1-3, p. 345-360, 1987.
- EL-SHARKAWY, M. A. Drought-tolerant cassava for Africa, Asia, and Latin America breeding projects work to stabilize productivity without increasing pressures on limited natural resources. **BioScience**, v. 43, n. 7, p. 441-451, 1993.
- EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant Molecular Biology**, p. 481-501, 2004.
- EL-SHARKAWY, M. A. Global warming: Causes and impacts on agroecosystems productivity and food security with emphasis on Cassava comparative advantage in the tropics/subtropics. **Photosynthetica**, v. 52, n. 2, p. 161-178, 2014.
- EWERT, F.; RÖTTER, R. P.; BINDI, M.; WEBBER, H.; TRNKA, M.; KERSEBAUM, K. C.; OLESEN, J. E.; VAN ITTERSUM, M. K.; JANSSEN, S.; RIVINGTON, M.; SEMENOV, M. A.; WALLACH, D.; PORTER, J. R.; STEWART, D.; VERHAGEN, J.; GAISER, T.; PALOSUO, T.; TAO, F.; NENDEL, C.; ROGGERO, P. P.; BARTOSOVÁ, L.; ASSENG, S. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 287-303, 2015.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Save and Grow: Cassava - A Guide to Sustainable Production Intensification**, p. 142, 2013.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics. **Statistics Division**, 2017. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 22 mai. 2019.
- FARHANGFAR, S.; BANNAYAN, M.; KHAZAEI, H. R.; BAYGI, M. M. Vulnerability assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 13, p. 37-51, 2015.
- FINGER, R.; SCHMID, S. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change. **Agricultural Finance Review**, v. 68, n. 1, p. 25-41, 2008.
- FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULTZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. **Change**, v. 30, n. 22, p. 129-234, 2007.
- GABRIEL, L. F.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; SILVA, M. R. da; SILVA, S. D. da. Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 90-98, 2014.

- GARCÍA, V.; PUCHE, M.; SILVA, O.; WARNOCK, R.; FIGUEROA, R. Evaluation of planting-date strategies for cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) with a crop simulation model. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 2, p. 53-60, 2001.
- GLEADOW, R. M.; WOODROW, I. E. Constraints on effectiveness of cyanogenic glycosides in herbivore defense. **Journal of Chemical Ecology**, v. 28, n. 7, p. 1301-1313, 2002.
- GLEADOW, R. M.; EVANS, J. R.; McCAFFERY, S.; CAVAGNARO, T. R. Growth and nutritive value of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) are reduced when grown in elevated CO₂. **Plant Biology**, v. 11, n. SUPPL.1, p. 76-82, 2009.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2017**, v. 44, p. 1-8, 2017.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>. Acesso em: 27 nov. 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/lspa/tabelas>. Acesso em: 22 dez. 2019a.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas interativos: solos**, 2019. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 jan. 2019b.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change**, 2007.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. ed. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.
- ISHAQUE, W. **Modeling water productivity in wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed and irrigated conditions**. 2015. Tese (Doutorado em Environmental Sciences) - Department of Environmental Science & Engineering, Government College University, Faisalabad, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Wajid_Ishaque/publication/282358889_Simulation_of_wheat_growth_by_AquaCrop_model_applying_irrigations_at_different_growth_stages/links/5b6b3021299bf14c6d953cf8/Simulation-of-wheat-growth-by-AquaCrop-model-applying-irrigations-at-different-growth-stages.pdf?origin=publication_detail. Acesso em: 20 mar. 2019.
- JARVIS, A.; LANE, A.; HIJMANS, R. J. The effect of climate change on crop wild relatives. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 126, p. 13-23, 2008.
- JARVIS, A.; RAMÍREZ-VILLEGAS, J.; ANDERSON, B.; LEIBING, C.; AGGARWAL, P. K. Scenarios of climate change within the context of agriculture. In: REYNOLDS, M. P. **Climate change and crop production**. Wallingford UK, CAB International. p. 9-37, 2010.
- JOYCE, L. A.; BRISKE, D. D.; BROWN, J. R.; POLLEY, H. W.; McCARL, B. A.; BAILEY, D. W. Climate change and North American rangelands: assessment of mitigation and adaptation strategies. **Rangeland and Ecology Management**, v. 66, p. 512-528, 2013.

KARL, T. R.; MEEHL, G. A.; MILLER, C. D.; HASSOL, S. J.; WAPLE, A. M.; MURRAY, W. L. Weather and climate extremes in a changing climate. **Synthesis and Assessment Product 3.3**. Report by the US Climate Change Science Program (CCSP) and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Commerce, NOAA National Climate Data Center, Washington, DC, 2008.

KASSIE, B. T.; ASSENG, S.; ROTTER, R. P.; HENGSDIJK, H.; RUANE, A. C.; ITTERSUM, M. K. Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models. **Climatic Change**, v. 129, p. 145-158, 2015.

KAYE, J. P.; QUEMADA, M. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, p. 4, 2017.

LEBOT, V. Tropical root and tuber crops: Cassava, sweet potato, yams and aroids. **Crop Production Science in Horticulture**, n. 17, CABI Publishing, Oxfordshire, UK, 2009.

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**, v. 117, p. 55-65, 2013.

LOBELL, D. B.; BURKE, M. B.; TEBALDI, C.; MASTRANDREA, M. M.; FALCON, W. P.; NAYLOR, R. L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. **Science**, v. 319, p. 607-610, 2008.

LOBELL, D.B.; FIELD, C.B. Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961. **Global Change Biology**, v. 14, p. 39-45, 2008.

LOBELL, D. B.; GOURDJI, S. The influence of climate change on global crop productivity. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1686-1697, 2012.

LOPES-ASSAD, M. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

MACHADO FILHO, H.; MORAES, C.; BENNATI, P.; RODRIGUES, R. A.; GUILLES, M.; ROCHA, P.; LIMA, A.; VASCONCELOS, I. **Mudança do clima e os impactos na agricultura familiar no Norte e Nordeste do Brasil**. Working Paper, Centro Internacional de Políticas para o Crescimento Inclusivo (IPC-IG), n. 141, p. 69, 2016.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola de risco climático**, 2019. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/zoneamento-agricola>. Acesso em: 05 fev. 2019.

MARSHALL, N. A. Understanding social resilience to climate variability in primary enterprises and industries. **Global Environmental Change**, v. 20, p. 36-43, 2010.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no Semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF, n. 27, 2008.

MATTHEWS, R. B.; RIVINGTON, M.; MUHAMMED, S.; NEWTON, A. C.; HALLETT, P. D. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. **Global Food Security**, v. 2, n. 1, p. 24-28, 2013.

- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z.-C. Global climate projections. In: SOLOMON, S. et al. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, p. 686-688, 2007.
- MORAES, W. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 2, p. 3-14, 2011.
- MORGAN, J. A.; PATAKI, D. E.; KÖRNER, C.; CLARK, H.; DEL GROSSO, S. J.; GRÜNZWEIG, J. M.; KNAPP, A. K.; MOSIER, A. R.; NEWTON, P. C. D.; NIKLAUS, P. A.; NIPPERT, J. B.; NOWAK, R. S.; PARTON, W. J.; POLLEY, H. W.; SHAW, M. R. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. **Oecologia**, v. 140, p. 11-25, 2004.
- 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.; 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**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010.
- MUCHOW, R. C.; BELLAMY, J. A. **Climatic risk in crop production: models and management for the semi-arid tropics and subtropics**. Wallingford, UK, CAB International, 1991.
- 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**, v. 52, p. 47-56, 2014.
- OLIVEIRA, L. D. de; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Morfologia e classificação de luvisolos e planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do Nordeste brasileiro. Seção V – Gênese, morfologia e classificação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1333-1345, 2009.
- PARMAR, A.; STURM, B.; HENSEL, O. Crops that feed the world: production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. **Food Security**, v. 9, p. 907-927, 2017.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas. In: MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. ed. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, p. 184, 2016.
- PINGALE, S. M.; KHARE, D.; JAT, M. K.; ADAMOWSKI, J. Spatial and temporal trends of mean and extreme rainfall and temperature for the 33 urban centers of the arid and semi-arid state of Rajasthan, India. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 73-90, 2014.
- 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. 7, p. 891-904, 2014.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, S. F.; DE AVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. R.; MACEDO JR, C.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. **Embrapa**, 2008.

PORTER, J. R.; XIE, L.; CHALLINOR, A. J.; COCHRANE, K.; HOWDEN, M.; IQBAL, M. M.; LOBELL, D. B.; TRAVASSO, M. I. Chapter 7. Food Security and Food Production Systems. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Working Group II. Contribution to the IPCC 5th Assessment Report, Geneva, Switzerland, 2014.

REIDSMA, P.; EWERT, F.; LANSINK, A. O.; LEEMANS, R. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. **European Journal of Agronomy**, v. 32, p. 91-102, 2010.

REN, X. Agricultural vulnerability to drought in Southern Alberta: A quantitative assessment. **University of Lethbridge**, Canada, 2007.

RIBEIRO, A. K. F. de S. **Atributos de solos sob sistemas de uso agropecuários na mesorregião do Oeste Potiguar - RN**. 2016. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, RN, Brasil, 2016.

ROSENTHAL, D. M.; ORT, D. R. Examining cassava's potential to enhance food security under climate change. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 3-4, p. 145-250, 2012.

ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; ANTLE, J. M.; RUANE, A. C.; MUTTER, C. Z. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: Phase I activities by a global community of science. In: **Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1**. ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. ed. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation, Imperial College Press, v. 3, p. 3-24, 2015.

SELVARAJU, R.; GOMMES, R.; BERNARDI, M. Climate science in support of sustainable agriculture and food security. **Climate Research**, v. 47, p. 95-110, 2011.

SELVARAJU, R. Climate risk assessment and management in agriculture. In MEYBECK, A.; LANKOSKI, J.; REDFERN, S.; AZZU, N.; GITZ, V. ed. **Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector**, Rome: Food and Agriculture Organization, p. 71-90, 2012.

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.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed. 3 ed., p. 719, 2004.

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.

TEIXEIRA, E. I.; DE RUITER, J.; AUSSEIL, A.-G.; DAIGNEAULT A.; JOHNSTONE, P.; HOLMES, A.; TAIT, A.; EWERT, F. Adapting crop rotations to climate change in regional impact modelling assessments. **Science of the Total Environment**, v. 616-617, p. 785-795, 2018.

THORNTON, P. K.; JONES, P. G.; ERICKSEN, P. J.; CHALLINOR, A. J. Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4 C+ world. **Philosophical Transactions of Royal Society A**, v. 369, p. 117-136, 2011.

TIRONI, L. F. **Simanihot: Um modelo de simulação da cultura da mandioca e sua aplicação em clima futuro no Rio Grande do Sul**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

TIRONI, L.; STRECK, N. A.; SANTOS, A. T. L.; FREITAS, C. P. O.; UHLMANN, L. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, W. C.; FERRAZ, S. E. T. Estimating cassava yield in future IPCC climate scenarios for the Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 10, 2017.

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

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

VISSER, F. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security - an example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, v. 10, p. 1191-1202, 2018.

WANG, Y.-H.; BUROW, G.; BURKE, J. Genetic mapping of abiotic stress responses in sorghum. In: **Genetics**. CRC Press, Genomics and Breeding of Sorghum, p. 182-197, 2014.

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.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

WULLSCHLEGER, S. D.; TSCHAPLINSKI, T. J.; NORBY, R. J. Plant water relations at elevated CO₂ – implications for water-limited environments. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 319-331, 2002.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

4. ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA MANDIOCA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

No Brasil, a mandioca ocupa a quinta posição entre as culturas mais importantes em valor. Sua produtividade é influenciada por diversos fatores, como clima, solo e manejo, o que a torna susceptível aos efeitos do clima futuro. Embora a mandioca seja considerada altamente adaptável às diferentes condições climáticas, o mais provável é que haja redução de sua produtividade sob as projeções de clima futuro, especialmente em áreas mais vulneráveis às mudanças do clima, como no Semiárido Brasileiro. Nesse sentido, os modelos de simulação de culturas têm sido utilizados como ferramentas tanto para a quantificação dos efeitos do clima futuro nas produtividades, quanto para a avaliação de estratégias de mitigação e adaptação a essas mudanças. Assim, o presente estudo teve por objetivos: i) avaliar diferentes épocas de plantio da cultura da mandioca aplicando o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, devidamente calibrado e avaliado, sob condições climáticas atuais (1980-2009); ii) avaliar diferentes estratégias de manejo da cultura da mandioca, como épocas de plantio e irrigação por gotejamento, para minimização dos impactos das mudanças climáticas, simulados por meio do modelo CSM-CROPSIM-Cassava, para os cenários de mudanças climáticas do CMIP5, de intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, a médio prazo (2040-2069). Os locais selecionados para a análise das estratégias de manejo foram Propriá (SE), Brotas de Macaúbas (BA), Almenara e Januária (MG). Essas localidades foram selecionadas com base em sua vulnerabilidade às mudanças climáticas, de modo a representarem as seguintes classes: “muito baixa”; “baixa”; “moderada”; e “alta” a “muito alta”. As datas de plantio foram consideradas como sendo no dia 15 de cada mês, tendo como data base a janela sugerida pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para cada local (julho para Propriá e novembro para as demais), e a irrigação realizada sempre que necessária, com lâminas de 2, 4, 6, 8 e 10 mm. A análise de incrementos na produtividade foi realizada em termos dos valores absolutos e percentuais em relação à produtividade no cenário atual. As estratégias de ajuste da data de plantio e de uso da irrigação evidenciaram a possibilidade de mitigação das perdas de produtividade nas condições de clima futuro. Em todos os locais, a data base esteve entre as que obtiveram as maiores produtividades, em todos os cenários, embora em alguns meses tenha havido aumento da produtividade nos cenários futuros na condição de sequeiro. O uso da irrigação proporcionou incrementos nos níveis de produtividade, sendo que os maiores incrementos foram obtidos com a reposição de água com lâmina de 6 mm, sempre que necessário, para todos os locais.

Palavras-chave: *Manihot esculenta*, DSSAT/CSM-CROPSIM-Cassava, Aquecimento global, Adaptação

ABSTRACT

In Brazil, cassava is the fifth most important crop in value. Its productivity is affected by different factors, such as those related to climate, soil and crop management, which makes cassava susceptible to the effects of climate change. Even though cassava is considered highly adapted to different climate conditions, it is most likely that it would suffer yield reductions at the Brazilian Semi-arid (SAB) region under future climate scenarios. Also, the areas with high vulnerability for its production in SAB is expected to increase. The best way to evaluate that is by applying crop simulation models, which allow not only to quantify the impacts of future climate on crop yields, but also to evaluate how different management strategies can contribute for mitigating the losses. Therefore, this study aimed to: i) evaluate different planting dates for cassava by applying the DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava model, properly calibrated and evaluated, under actual climate conditions (1980-2009); ii) evaluate different management strategies for cassava production, more specifically planting dates and drip irrigation, for reduction of climate change impacts on cassava yield, by applying the CSM-CROPSIM-Cassava model, for CMIP5 climate change scenarios, for moderate (RCP4.5) and high (RCP8.5) greenhouse gases emission, a medium term (2040-2069). The selected locations for that were Propriá (SE), Brotas de Macaúbas (BA), Almenara e Januária (MG). The planting dates were simulated every 15th day of each month, considering as a reference planting dates those recommended by Climate Risk Agricultural Zoning (ZARC) for each location (July for Propriá and November for the others), and added irrigation whenever necessary, with amounts of 2, 4, 6, 8 e 10 mm. The yield changes promoted by these two strategies were evaluated in terms of absolute and percentual values, considering the yields obtained for the present scenario as reference. The adjustment of the planting date and the use irrigation showed to be viable for reducing cassava yield losses in SAB in the future climate scenarios. In all assessed locations, the default planting date was among the ones that obtained the highest yields, in all scenarios, although some months presented yield increase in the future climate scenarios under rainfed condition. Under irrigated conditions, the yield levels increased for all cases. The highest cassava yield increments were obtained when the crop was irrigated with 6 mm, when necessary.

Keywords: *Manihot esculenta*, DSSAT/CSM-CROPSIM-Cassava, Global warming, Adaptation

4.1. Introdução

As mudanças climáticas (MC) (MEEHL et al., 2007; IPCC, 2014) e seus potenciais impactos nos setores da sociedade têm sido amplamente discutidos (ALLEN; INGRAM, 2002; ASSAD et al., 2004; CHALLINOR; WHEELER, 2008; FINGER; SCHIMID, 2008; MARENGO, 2008; CEBALLOS et al., 2011; EWERT et al., 2015; MACHADO FILHO et al., 2016; PBMC, 2016; BENDER, 2017). De modo geral, espera-se que os efeitos das mudanças do clima difiram de uma região a outra do planeta. No Brasil, devido à sua dimensão continental, à diversidade de climas, de condições topográfica e de tipos de solo, os impactos das MCs deverão variar regionalmente (AMBRIZZI et al., 2007; NOBRE et al., 2011). No Nordeste brasileiro (NE), região de alta vulnerabilidade sócio-climática (TORRES et al., 2012), houve incremento na temperatura máxima do ar da ordem de 1,5 a 2,0 °C nas últimas cinco décadas, diferentemente do menor aumento observado no restante do país (MARENGO, 2008). Isso sugere que tal região pode estar entre as que mais serão afetadas pelas mudanças no clima futuro.

As alterações climáticas aumentam não só a vulnerabilidade do sistema como um todo, como também as incertezas quanto à disponibilidade hídrica (MARENGO, 2008). Nas regiões áridas e semiáridas, as chuvas têm sofrido redução (BATISANI; YARNAL, 2010; PINGALE et al., 2014). Alterações da quantidade e distribuição das chuvas, associadas ao aumento na demanda evaporativa, resultante das altas temperaturas do ar (BATISANI; YARNAL, 2010; PINGALE et al., 2014), e aos solos de baixa capacidade de retenção de água e alto potencial de escoamento (MUCHOW; BELLAMY, 1991), tem aumentado o risco de seca nessas áreas (CRUZ et al., 2016). O Semiárido Brasileiro (SAB), por exemplo, inserido quase totalmente na região Nordeste, apresenta histórico de elevada vulnerabilidade climática devido à disponibilidade hídrica limitada e alta densidade populacional (KROL et al., 2001; KROL; BRONSTERT, 2007). Com as MCs, essa região deverá ser altamente impactada, podendo se tornar árida (MARENGO, 2008).

As condições climáticas são as principais condicionadoras da produção agrícola e determinantes para a variabilidade da produção mundial de alimentos (SELVARAJU; GOMMES; BERNARDI, 2011), uma vez que a quantidade e a distribuição das chuvas definem as características da estação chuvosa, dos sistemas agrícolas e da produção agropecuária (SELVARAJU, 2012). Além disso, temperaturas mais elevadas podem impactar drasticamente a produtividade agrícola, a rentabilidade dos produtores e a segurança alimentar (BATTISTI; NAYLOR, 2009). Os efeitos das mudanças climáticas e dos eventos climáticos extremos, que impactam diretamente as culturas agrícolas (SELVARAJU, 2012), já estão sendo observados (KARL et al., 2008). Com as projeções de clima futuro, esses efeitos deverão ser exacerbados (LOBELL; GOURDJI, 2012).

As MCs poderão afetar as culturas agrícolas de inúmeras formas. O aumento da temperatura e alterações na quantidade e distribuição das chuvas (MOSS et al., 2010) poderão modificar as condições de umidade do solo, o desenvolvimento de plantas daninhas (JARVIS; LANE; HIJMANS, 2008; JARVIS et al., 2010) e a ocorrência de pragas e doenças (JARVIS; LANE; HIJMANS, 2008; MORAES et al., 2011); enquanto o aumento na [CO₂] terá efeito fertilizador, proporcionando não só aumento nos níveis de produtividade (LOBELL; FIELD, 2008), como também alterações nos padrões de uso da água pela planta, de modo a aumentar sua eficiência (MORGAN et al., 2004), basicamente, pela redução na condutância estomática e a consequente diminuição do consumo de água pelas

plantas (BARTON et al., 2011; BATTIPAGLIA et al., 2013). Apesar das maiores [CO₂] estimularem a taxa fotossintética, aumentando a produtividade das culturas (BARTON et al., 2011), essas também potencializam o aquecimento global (MEEHL et al., 2007; FORSTER et al., 2007). Assim, os benefícios decorrentes do aumento da [CO₂] talvez não compensem as consequências da elevação na temperatura do ar, como o encurtamento do ciclo das culturas (STRECK, 2005), que por sua vez reduz suas produtividades (STRECK, 2005; BATTISTI; NAYLOR, 2009), pondo em risco a segurança alimentar (BATTISTI; NAYLOR, 2009). Entretanto, há muitas incertezas sobre as respostas das culturas às MCs. Estudos mostram que tanto as espécies C3, como a soja (BENDER, 2017) e o trigo, quanto as C4, como o milho (SIQUEIRA; STEINMETZ; SALLES, 2001), sofrerão efeitos negativos nas projeções de clima futuro, sendo que esses poderão ser menores nas espécies C4, devido ao seu fechamento estomatal mais eficiente, além de melhor incremento na fotossíntese (MARIN; NASSIF, 2013). Outros trabalhos, no entanto, apontam aumento na produtividade de culturas de ambas as espécies (STRECK, 2005; HAO et al., 2014; STRECK; ALBERTO, 2016; TIRONI et al., 2017).

Dentre as culturas mais adaptáveis às MCs, a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das principais, já que esta é reconhecida como tolerante à seca (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; BURNS et al., 2010) e capaz de obter produtividades de raízes razoáveis em diferentes condições de clima e solo (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; LEBOT, 2009; FAO, 2013). Essas características fazem com que a mandioca seja considerada uma cultura estratégica na luta contra a fome (EL-SHARKAWY; COCK, 1987; BURNS et al., 2010). Em condições de estresse, a mandioca aumenta sua temperatura ótima e reduz sua necessidade hídrica para os processos de fotossíntese, crescimento e produção de biomassa (EL-SHARKAWY, 2014); e, em condições de déficit hídrico, a planta consegue reduzir o crescimento vegetativo até o fornecimento hídrico seja reestabelecido (FAO, 2013). Entretanto, no começo do seu desenvolvimento, a planta da mandioca necessita de boa disponibilidade de água no solo, de modo a garantir a germinação e o crescimento inicial das plantas (FAO, 2013). Após seu estabelecimento, embora a planta consiga se desenvolver em locais com precipitação anual de até 400 mm (FAO, 2013; PARMAR; STURM; HENSEL, 2017), um suprimento hídrico mínimo é requerido. Caso ela seja cultivada em regiões áridas, sua produtividade poderá ser drasticamente afetada (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017).

Diante das evidências de aumento crescente da [CO₂] (MEEHL et al., 2007; IPCC, 2014) e das temperaturas (IPCC, 2014), a adoção de estratégias de adaptação para minimização dos impactos dessas mudanças na produção agrícola se torna indispensável. As estratégias de manejo mais avaliadas para aumentar a resiliência das plantas nas condições de clima futuro são: alteração nas datas de plantio (EWERT et al., 2015; DO RIO et al., 2016); utilização de diferentes cultivares (NENDEL et al., 2014); utilização de plantas de cobertura (KAYE; QUEMADA, 2017); rotação de culturas (NENDEL et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2018); e uso da irrigação (WHITE et al., 2011; BENDER, 2017). Apesar disso, essas e outras práticas, como o tipo de fertilização, revolvimento do solo com máquinas, interações entre práticas (datas de plantio x irrigação) (WHITE et al., 2011) e o aprimoramento das características das cultivares, necessitam ser melhor estudadas (WHITE et al., 2011; ABBERTON et al., 2015). Com base nisso, Nendel et al. (2014) reforçam a importância do uso de modelos de simulação de culturas (MSC) para que essas práticas alternativas possam ser avaliadas como possíveis estratégias para a adequação das culturas às MCs, especialmente no caso da agricultura familiar, a qual apresenta capacidade de adaptação limitada.

Os MSCs tornam-se, portanto, ferramentas fundamentais para os estudos dos impactos das MCs na agricultura, já que eles possibilitam simular o crescimento e o desenvolvimento de distintas culturas em diferentes cenários climáticos (FINGER; SCHMID, 2008), permitindo se avaliar as respostas das culturas às projeções de clima futuro (LEHMANN et al., 2013), assim como analisar as estratégias de mitigação dos efeitos negativos que possam

eventualmente ocorrer nas produtividades (MATTHEWS et al., 2013). Dentre os principais sistemas que utilizam MSCs, destaca-se o Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT, do inglês “Decision Support System for Agrotechnology Transfer”). Inserido na plataforma DSSAT, o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* (“Cropping System Model – Crop Environment Resource Synthesis”) é utilizado para a simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura da mandioca, considerando as condições de solo, de clima e de manejo.

A possibilidade de redução da produtividade da mandioca, cultura conhecida como “cultura da seca, da guerra e da fome do mundo em desenvolvimento” (PEARCE, 2007), sob condições de clima futuro é preocupante. Com base nessa problemática, identificar medidas de mitigação para potenciais impactos do clima futuro na produtividade da mandioca é imprescindível, principalmente devido a sua importância no SAB. Assim, o presente estudo teve por objetivos: i) aplicar o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, devidamente calibrado e avaliado, para analisar o ajuste de data de plantio como medida de mitigação para os efeitos das MCs na produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, sob condições climáticas atuais (1980-2010) para as localidades Propriá, SE, Brotas de Macaúbas, BA, Almenara e Januária, MG; e ii) analisar os efeitos da alteração da data de plantio e do uso da irrigação na mitigação dos impactos das MCs na produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, para os cenários de intermediária (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, a médio prazo (2040-2070), para os mesmos locais.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Modelo de simulação de cultura

O modelo CSM-CROPSIM-*Cassava*, devidamente calibrado e validado, foi empregado para estimar as produtividades da cultivar de mandioca BRS Formosa no Semiárido Brasileiro sob diferentes estratégias de manejo. Os parâmetros genéticos calibrados para esta cultivar são apresentados na Tabela 4.1. Os desempenhos do referido modelo nas fases de calibração e validação são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1. Parâmetros genéticos do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* calibrados para a cultivar de mandioca BRS Formosa, em condições brasileiras.

Parâmetros genéticos							
Ramificação						Raiz	
B01ND	B12ND	B23ND	B34ND	B45ND	B56ND	SRFR	HMPC
(número de nós)						(#)	(%)
80	40	20	30	100	100	0,20	57
Folha						Haste	Espécie
LAFND	LAXS	LAXND	LLIFA	PHINT		STFR	PHTV
#	(cm ²)	#	(Tu)	(°Cd)			(kPa)
110	350	80	899	27		0,43	2,0
Ecotipo							
BR1FX	BR2FX	BR3FX	BR4FX	BR5FX	BR6FX	DUSRI	HTSTD
(#)							
1,5	2,6	2,0	1,5	1,5	1,5	800	170

Tabela 4.2. Desempenho do modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* para a estimação da produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa, nas fases de calibração e avaliação.

Modelo	EAM kg ha ⁻¹	R ²	d	c
Calibração				
CROPSIM	1456,1	0,85	0,93	0,8673
Avaliação				
	1012,5	0,82	0,94	0,8579

EAM = erro absoluto médio; R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de concordância; c = índice de confiança.

4.2.2. Locais de estudo

As simulações para avaliação das medidas de mitigação para os cenários atual e de mudanças climáticas na produtividade da cultura da mandioca foram realizadas para quatro locais da região do Semiárido Brasileiro: Propriá SE (PPRA), Brotas de Macaúbas BA, (BRMA), Almenara (AMNA) e Januária (JNRA), em MG, como identificado na Figura 4.1. Essas localidades foram selecionadas com base em sua vulnerabilidade às mudanças climáticas (Capítulo 3, item 3.3.4), de modo que elas apresentassem a mesma classe de vulnerabilidade em ao menos dois cenários futuros: “muito baixa” (PPRA), “baixa” (AMNA), “moderada” (BRMA), e “alta” a “muito alta” (JNRA), de acordo com a Tabela 4.3. As classes de vulnerabilidade “alta” e “muito alta” foram combinadas, porque esta última foi obtida somente em um cenário futuro de clima, o mais pessimista (RCP8.5 à longo prazo).

Figura 4.1. Locais do Semiárido Brasileiro empregados para a simulação de estratégias de mitigação de perdas na produtividade da mandioca, cultivar BRS Formosa, com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, no cenário clima futuro a médio prazo.

Tabela 4.3. Índices de vulnerabilidade (em %) da produtividade atingível da mandioca para as projeções de clima futuro a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), conforme simulado pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para as quatro localidades do Semiárido Brasileiro selecionadas para este estudo. Vulnerabilidade: $\geq 0,0$ – Nula (N); -9,9 a -0,1 – Muito Baixa (MB); -19,9 a -10,0 – Baixa (B); -29,9 a -20,0 – Moderada (M); -39,9 a -30,0 – Alta (A); $\leq -40,0$ – Muito Alta (MA).

Locais	Cenários de Mudanças Climáticas			
	RCP4.5		RCP8.5	
	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
Almenara	-12,0 (B)	-22,9 (M)	-19,2 (B)	-38,2 (A)
Brotas de Macaúbas	-12,1 (B)	-28,1 (M)	-21,6 (M)	-47,4 (MA)
Januária	-20,5 (M)	-32,8 (A)	-25,4 (M)	-51,8 (MA)
Propriá	-6,3 (MB)	-8,6 (MB)	-5,0 (MB)	-8,4 (MB)

A classificação climática de Köppen para as quatro localidades analisadas é de zona tropical com inverno seco (Aw) (ALVARES et al., 2013). Um maior detalhamento sobre a variação climatológica nos quatro locais pode ser encontrado no APÊNDICE C.

4.2.1. Dados de solo

Os tipos de solo presentes em cada um dos quatro locais foram obtidos utilizando-se o mapa de solos do IBGE (2019), selecionando-se o principal solo encontrados em cada uma das localidades. Os dados de textura e perfil dos solos foram obtidos a partir de análises de solo realizadas na região (DA SILVA et al., 2005) para ambos os solos: argissolo e neossolo. A Tabela 4.3 contém a classificação, a textura, o teor médio de areia, silte e argila, assim como as umidades na capacidade de campo (cc) e no ponto de murcha permanente (pmp) para cada tipo de solo utilizado, as quais foram estimadas em função do teor de areia do solo e de funções de pedotransferência desenvolvidas por Lopes-Assad et al. (2001), apresentadas a seguir:

$$\theta_{cc} = 39,07988535 - 0,04098682 \times (Areia)^{1,455456594} \quad (4.1)$$

$$\theta_{pmp} = 26,16995195 - 0,05451078 \times Areia \times \ln(Areia) \quad (4.2)$$

$$\theta_{AD} = 12,76278562 - 0,0000098726 \times (Areia)^3 \quad (4.3)$$

em que θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$), θ_{pmp} é a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$), θ_{AD} é a água disponível ($m^3 m^{-3}$) e *Areia*, o teor de areia no solo, em %. Mais detalhes sobre os perfis dos solos considerados neste estudo podem ser encontrados no APÊNDICE B.

Tabela 4.3. Classificação do solo, teor médio de areia, silte e argila, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, para os solos considerados para as localidades empregadas neste estudo.

Classificação	Areia	Silte	Argila	cc	pmp
	(%)	(%)	(%)	($m^3 m^{-3}$)	($m^3 m^{-3}$)
Argissolo Vermelho-Amarelo	80,0	10,0	10,0	14,9	7,0

Neossolo Quartzarênico	94,0	4,0	2,0	8,6	2,9
------------------------	------	-----	-----	-----	-----

Adaptado de Da Silva et al. (2005).

Na Tabela 4.4 é apresentada a lista das localidades empregadas neste estudo, com suas respectivas siglas de identificação, coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura do solo considerados para as simulações com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*.

Tabela 4.4. Locais avaliados quanto ao impacto na produtividade da cultivar de mandioca BRS Formosa, sob os cenários atual e de clima futuro, com as suas coordenadas geográficas, altitude, tipo e textura de solo.

Estado	Municípios	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Tipo de solo	Textura
BA	Brotas de Macaúbas	-12,00	-42,63	834	Neossolo	Arenosa
MG	Januária	-14,84	-45,17	827	Neossolo	Arenosa
MG	Almenara	-16,12	-40,74	202	Argissolo	Arenosa
SE	Propriá	-10,22	-36,82	15	Argissolo	Arenosa

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

4.2.2. Dados meteorológicos e cenários de mudanças climáticas

Foram obtidos dados meteorológicos de 1980 a 2010 (31 anos) para compor a série histórica atual. Os dados de chuva foram obtidos a partir das bases de dados da rede pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) dos locais selecionados. Os demais dados meteorológicos (temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar global) foram obtidos a partir do banco de dados em grade de Xavier, King e Scanlon (2016), bem como dados de chuva, utilizados também para o preenchimento de falhas. O preenchimento de falhas é uma etapa fundamental, já que a plataforma DSSAT requer séries climáticas contínuas para cada uma das variáveis meteorológicas (GARCÍA et al., 2001).

As séries meteorológicas sob projeções futuras foram geradas com base na série histórica atual, sem falhas, por meio do método do delta (ROSENZWEIG et al., 2015), ou seja, pelo incremento da mudança entre os cenários presente e futuro determinado 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; MEEHL, 2012), avaliados no quinto relatório de avaliação (“Fifth Assessment Report” - AR5, IPCC-AR5) do IPCC (2014). Os MCGs escolhidos para o estudo foram os que apresentaram melhor performance em simular o campo de chuva atual sobre o Brasil (SILVEIRA et al., 2013; PINHEIRO et al., 2014). Para gerar as séries futuras, os incrementos para a temperatura do ar previstos pelo método foram adicionados aos valores de temperaturas máxima e mínima, enquanto para a chuva, os incrementos percentuais foram multiplicados aos valores atuais. Foram consideradas projeções sob cenários de emissão de gases de efeito estufa intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) e considerando-se os períodos a médio prazo (2040-2070), empregando-se sete MCGs distintos: CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, InmCM4, MIROC-ESM e MPI-ESM-LR, conforme utilizado por Bender (2017).

Para as simulações em cada um dos períodos considerados, os valores das [CO₂] foram assumidos como sendo de 362 ppm para a série histórica atual, referente à concentração média desse período, e de 499 e de 571 ppm para o RCP4.5 e o RCP8.5, respectivamente, a médio prazo, cada um representando a concentração referente ao ano

central do período de 31 anos nos cenários futuros, conforme recomendado pelo projeto AgMIP (ROSENZWEIG et al., 2015) e descrito na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. 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 em questão.

Cenário e período	Anos de referência	Ano central	[CO ₂] (ppm)
Série histórica Atual	1980 – 2010	-	362
RCP4.5 – Médio prazo	2040 – 2070	2055	499
RCP8.5 – Médio prazo	2040 – 2070	2055	571

Adaptado de Rosenzweig et al. (2015).

4.2.3. Simulações de estratégias para mitigação dos impactos do clima atual e futuro na produtividade da mandioca

Para a determinação de estratégias de mitigação dos impactos das condições de clima futuro na produtividade da mandioca, cultivar de BRS Formosa, em relação ao clima atual, foram feitas simulações com o modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* para analisar as respostas da cultura às mudanças na data de plantio e ao uso da irrigação.

Para as simulações de estratégias de datas de plantio, definiu-se uma data ótima para cada um dos quatro locais de acordo com a janela de plantio definida pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019) (Tabela 4.6). Em seguida, foram realizadas simulações de plantio no dia 15 de todos os outros 11 meses do ano. Os dados de produtividade atingível obtidos para cada umas das datas alternativas de plantio foram comparados com a produtividade atingível simulada a data ótima.

Tabela 4.6. Datas de plantio para cada local recomendada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para as simulações realizadas com a cultivar de mandioca BRS Formosa.

Data de plantio	Local
15 de julho	Propriá
15 de novembro	Almenara, Brotas de Macaúbas e Januária

Para as simulações da cultura da mandioca empregando-se a irrigação, optou-se por ativar a função do modelo de irrigação automática quando necessário. Foram definidas cinco diferentes lâminas de irrigação por gotejamento para análise: 2, 4, 6, 8 e 10 mm. Os resultados de produtividade foram comparados com os obtidos nas simulações sob condições de sequeiro, em que o fornecimento de água à cultura foi limitado à ocorrência de chuva. Sob tais condições foram avaliadas as influências do clima futuro em relação ao atual sobre a produtividade da mandioca, considerando-se além dos efeitos da temperatura, da chuva e da [CO₂], os efeitos da alteração da data de plantio e do uso da irrigação, avaliando-se, assim, a possibilidade de minimização dos impactos das mudanças do clima na produtividade da mandioca no SAB.

Os demais aspectos da cultura da mandioca foram padronizados nas simulações de todos os locais, tais como: condição inicial do solo de 70% de água disponível, calculada pelo próprio modelo com a ferramenta “Recalculate” no item “Profile”; plantio de manivas de 16 cm realizados no dia 15 de cada mês; espaçamento de 0,90

m entre linhas; densidade populacional de 1,388 plantas por m²; desenvolvimento em sequeiro (quando não avaliada a estratégia de irrigação); e colheita aos 180 dias após o plantio (DAP).

4.2.4. Avaliação geral

Todas as simulações efetuadas pelo modelo CSM-CROPSIM-*Cassava* sob as condições climáticas futuras foram conduzidas para cada um dos sete MCGs. Entretanto, os resultados dos modelos climáticos foram apresentados em valores médios do conjunto de saídas (“ensemble”). A avaliação das estratégias de mitigação aos impactos do clima futuro em relação ao atual na produtividade da mandioca foi realizada pelos valores médios dos 29 ciclos, nos 31 anos de dados (1980-2010), tanto quanto ao valor absoluto da produtividade atingível como considerando a variação relativa percentual da mesma (ΔP , em %), conforme a Equação (4.4).

$$\Delta P(\%) = \left[\frac{(PA_{futura} - PA_{atual})}{PA_{atual}} \right] \times 100 \quad (4.4)$$

em que: PA_{futura} e PA_{atual} são as produtividades simuladas para os cenários futuros de temperatura do ar, chuva e $[CO_2]$ e para o cenário atual, respectivamente, e levando-se em consideração as diferentes estratégias de manejo relativas à data de plantio e uso da irrigação. Um fluxograma com as etapas desse Material e Métodos pode ser encontrado no APÊNDICE A.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Estratégias de mitigação das perdas de produtividade da mandioca no SAB por classe de vulnerabilidade

4.3.1.1. Vulnerabilidade muito baixa

Os resultados referentes às estratégias de mitigação para a região de Propriá (SE), representando as regiões de vulnerabilidade muito baixa aos impactos das mudanças climáticas, para médio prazo (2040-2070), considerando-se os cenários intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, na produtividade da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, em relação à produtividade atual (1980-2010), são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Observa-se que, em Propriá, a data de plantio selecionada (15 de julho) na janela recomendada pelo ZARC (maio a julho) apresentou a maior PA no cenário atual (sequeiro), com 7535,1 kg ha⁻¹, seguida pelo plantio em agosto (6963,1 kg ha⁻¹). Esse resultado era esperado dada a época de maior chuva acumulada se concentrar entre os meses de maio e agosto nesse local (APÊNDICE C, Figura C.1). Desse modo, com o aumento de chuvas a partir de maio, os plantios em julho e agosto coincidiam com um maior volume maior de água disponível no solo, favorecendo o início de desenvolvimento da cultura, sua fase mais crítica. Adicionalmente, essa data se manteve como a de maior PA em ambos os cenários futuros. No cenário de emissão intermediária de gases de efeito estufa (RCP4.5), as PAs

variaram de -7 a +108%, respectivamente para a condição de sequeiro e para a lâmina de irrigação de 10 mm (Tabela 4.7). No cenário de alta emissão (RP8.5), esse aumento foi similar, com variação de -6 a +109%, para as mesmas condições citadas acima (Tabela 4.8). Apesar de haver uma maior produtividade da mandioca irrigada com lâmina de 10 mm, não houve diferenças expressivas dessa condição com aquelas irrigadas com lâminas de 6 e 8 mm, em ambos os cenários. Isso se deu pelo fato de o volume de água irrigado ter sido semelhante, entre 1001 e 1010 mm no RCP4.5, e 1002 e 1011 mm, no RCP8.5.

As datas de plantio com as menores PAs foram em janeiro (2548,5 kg ha⁻¹) e junho (2867,3 kg ha⁻¹) não só para o cenário atual, como também em ambos os cenários futuros. O resultado para o mês de janeiro era esperado, já que essa época de plantio coincide com os meses mais secos do ano, com chuva acumulada extremamente baixa e elevadas temperaturas (máxima e mínima) e radiação solar, com consequente baixa umidade relativa do ar (APÊNDICE C, Figura C1). O plantio de junho, por outro lado, coincide com o início do período chuvoso, não havendo ainda água suficiente no solo para o bom desenvolvimento inicial da mandioca, além de que o solo dessa região é muito arenoso, retendo menos água (APÊNDICE B, Tabela B.3). As taxas de percolação de solos arenosos e franco-arenosos variam de 25 a 30 mm por dia, enquanto solos mais argilosos, 1 a 5 mm por dia (BOUMAN et al., 2007).

Tabela 4.7. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações (#Aplic) e quantidade total de água aplicada (Itotal), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob emissão intermediária (RCP4.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para Propriá, SE.

RCP4.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm por aplicação)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	2548,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2818,6	4706,2	5298,9	5354,8	5369,2	5380,9
		#Aplic	-	79	65	46	35	28
		Itotal (mm)	-	159	261	276	279	281
Fevereiro	3791,8	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	4122,9	5705,6	6100,9	6117,7	6128,1	6137,2
		#Aplic	-	57	44	30	23	19
		Itotal (mm)	-	115	175	181	182	186
Março	4918,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	5244,5	6590,0	6812,3	6823,1	6825,3	6832,3
		#Aplic	-	45	32	22	17	14
		Itotal (mm)	-	90	128	131	133	135
Abril	5114,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	5374,9	6757,7	7013,9	7022,2	7025,5	7027,2
		#Aplic	-	53	39	27	21	17
		Itotal (mm)	-	107	158	164	166	168
Maio	4166,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	4423,8	6109,0	6659,5	6661,7	6663,5	6664,2
		#Aplic	-	72	60	42	32	26
		Itotal (mm)	-	143	239	254	256	258
Junho	2867,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3007,5	4962,7	5924,0	5922,1	5923,3	5923,5
		#Aplic	-	94	85	62	47	37
		Itotal (mm)	-	189	338	372	373	374
Julho	7535,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7010,1	13080,6	15471,1	15701,1	15707,3	15710,0
		#Aplic	-	289	241	168	126	100
		Itotal (mm)	-	578	964	1010	1008	1001
Agosto	6963,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6589,4	12778,5	15008,0	15320,8	15327,0	15336,0
		#Aplic	-	316	257	180	135	107
		Itotal (mm)	-	632	1030	1080	1077	1071
Setembro	6644,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6374,5	12582,7	14687,1	15028,3	15050,6	15068,3
		#Aplic	-	331	264	185	138	110
		Itotal (mm)	-	662	1057	1109	1107	1101
Outubro	6566,8	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6340,8	12493,7	14606,0	14897,4	14928,5	14947,9
		#Aplic	-	331	262	182	136	108
		Itotal (mm)	-	663	1049	1089	1090	1085
Novembro	6635,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6535,3	12578,8	14698,4	14906,4	14938,4	14958,8
		#Aplic	-	317	253	174	130	104
		Itotal (mm)	-	634	1013	1042	1043	1041
Dezembro	6939,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6836,9	12876,6	14932,0	15076,5	15103,9	15129,7
		#Aplic	-	297	241	165	124	99
		Itotal (mm)	-	594	965	988	991	991

Tabela 4.8. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações ($\#Aplic$) e quantidade total de água aplicada ($Itotal$), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob alta emissão (RCP8.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para Propriá, SE.

RCP8.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm por aplicação)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	2548,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2873,7	4755,7	5319,5	5371,9	5382,0	5394,8
		$\#Aplic$	-	82	67	47	36	29
		$Itotal$ (mm)	-	164	276	284	286	289
Fevereiro	3791,8	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	4270,4	5852,8	6231,1	6247,0	6256,6	6265,0
		$\#Aplic$	-	60	45	31	23	19
		$Itotal$ (mm)	-	120	180	185	188	190
Março	4918,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	5424,5	6886,7	7111,6	7123,9	7123,8	7129,5
		$\#Aplic$	-	49	34	24	18	15
		$Itotal$ (mm)	-	97	138	141	144	146
Abril	5114,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	5629,5	7194,4	7479,5	7487,6	7490,0	7493,9
		$\#Aplic$	-	56	41	28	22	17
		$Itotal$ (mm)	-	111	165	170	172	174
Maio	4166,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	4704,9	6579,6	7180,0	7182,5	7183,1	7185,4
		$\#Aplic$	-	74	61	43	33	26
		$Itotal$ (mm)	-	148	243	259	261	262
Junho	2867,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3217,2	5365,1	6367,0	6365,0	6366,0	6366,5
		$\#Aplic$	-	97	86	63	48	38
		$Itotal$ (mm)	-	194	345	380	381	382
Julho	7535,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7079,0	13168,3	15530,9	15745,5	15750,4	15754,0
		$\#Aplic$	-	289	240	168	126	100
		$Itotal$ (mm)	-	579	961	1011	1008	1002
Agosto	6963,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6684,5	12848,5	15054,3	15345,9	15354,2	15360,3
		$\#Aplic$	-	317	257	181	135	107
		$Itotal$ (mm)	-	635	1029	1084	1081	1074
Setembro	6644,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6453,5	12707,3	14723,7	15051,2	15066,8	15081,8
		$\#Aplic$	-	334	266	187	140	111
		$Itotal$ (mm)	-	669	1064	1119	1117	1109
Outubro	6566,8	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6406,7	12664,1	14658,2	14929,8	14952,0	14970,8
		$\#Aplic$	-	337	265	184	138	110
		$Itotal$ (mm)	-	674	1062	1105	1105	1099
Novembro	6635,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6576,6	12778,8	14773,0	14960,0	14988,2	15008,0
		$\#Aplic$	-	323	256	176	132	105
		$Itotal$ (mm)	-	645	1025	1057	1058	1054
Dezembro	6939,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6852,8	13032,6	15009,7	15144,7	15170,7	15189,9
		$\#Aplic$	-	303	245	168	126	101
		$Itotal$ (mm)	-	606	978	1005	1008	1006

4.3.1.2. Vulnerabilidade baixa

Os resultados referentes às estratégias de mitigação para a região de Almenara, MG, representando as regiões de vulnerabilidade baixa aos impactos das mudanças climáticas, para médio prazo (2040-2070), considerando-se os cenários intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, na produtividade da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, em relação à produtividade atual (1980-2010), são apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

Em Almenara, a data de plantio selecionada (15 de novembro) na janela recomendada pelo ZARC (outubro a dezembro) para essa localidade está entre as três datas com maior PA no cenário atual (sequeiro), sendo a de maior em outubro (9212,2 kg ha⁻¹), seguida por setembro (9092,6 kg ha⁻¹) e novembro (8957,5 kg ha⁻¹). Esse resultado sugere que a antecipação do plantio para outubro pode gerar maiores ganhos que nos demais meses da janela. Por outro lado, as menores PAs foram obtidas nos meses de maio (1200,2 kg ha⁻¹) e junho (1310,0 kg ha⁻¹). Apesar do período de maiores chuvas acumuladas se iniciar em outubro (74 mm) e ultrapassar o dobro em dezembro (188 mm), Almenara possui clima favorável para a produção de mandioca ao longo do ano, já que o período seco desse local apresenta chuva acumulada com valores razoáveis, de 22 a 47 mm, entre maio e setembro, o que colabora para a moderada umidade relativa do ar (63 a 73%) nesses meses (APÊNDICE C, Figura C.1). Desse modo, embora haja diferença elevada entre as maiores e as menores PAs para esse local, estas ainda conseguiram manter valores aceitáveis, acima de 1200 kg ha⁻¹.

Além disso, as datas de maiores PAs se mantiveram em ambos os cenários futuros, sendo mais prejudicadas no cenário mais pessimista (RCP8.5) do que no cenário intermediário (RCP4.5). No cenário RCP4.5 (Tabela 4.9), a variação das PAs foi de -16 a +30% no plantio em setembro, -14 a +30% no plantio em outubro e -12 a quase +35% no plantio em novembro, respectivamente para a condição de sequeiro e para a irrigada com lâminas de 10 mm (Tabela 4.7). No cenário RCP8.5 (Tabela 4.10), a perda foi maior e o incremento menor, com variação de -24 a +20% em setembro, -22 a +21% em outubro e -19 a +25% em novembro, para as mesmas condições (Tabela 4.8). Apesar desses resultados, observou-se muito baixa variação da produtividade entre as estratégias de irrigação com lâminas a partir de 4 mm, em ambos os cenários. Isso se deu pelo fato de o volume de água irrigado ter se mantido muito semelhante, entre 530 e 579 mm no RCP4.5, considerando os três meses de plantio juntos; entre 561 e 592 mm em setembro; e entre 534 e 563 em outubro e novembro, no RCP8.5.

Tabela 4.9. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações ($\#Aplic$) e quantidade total de água aplicada ($Itotal$), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob emissão intermediária (RCP4.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para Almenara (MG).

RCP4.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	2667,7	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2786,8	3609,2	3742,6	3769,0	3776,9	3785,9
		$\#Aplic$	-	62	39	27	21	17
		$Itotal$ (mm)	-	124	158	164	168	171
Fevereiro	2399,7	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2458,0	3737,0	3811,5	3827,6	3831,4	3837,0
		$\#Aplic$	-	77	46	31	24	19
		$Itotal$ (mm)	-	155	183	186	189	191
Março	1956,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1935,3	3629,2	3703,1	3708,8	3714,7	3716,9
		$\#Aplic$	-	94	57	38	29	23
		$Itotal$ (mm)	-	189	228	231	232	233
Abril	1457,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1412,1	3137,1	3291,3	3297,1	3301,2	3304,9
		$\#Aplic$	-	102	67	46	34	28
		$Itotal$ (mm)	-	203	269	273	275	276
Maio	1200,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1083,6	2631,7	2884,4	2884,4	2887,7	2890,7
		$\#Aplic$	-	98	71	49	37	30
		$Itotal$ (mm)	-	197	283	292	295	295
Junho	1310,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1057,5	2404,7	2715,1	2717,3	2720,7	2722,6
		$\#Aplic$	-	86	66	47	35	28
		$Itotal$ (mm)	-	172	266	279	282	283
Julho	7954,8	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6784,7	11029,1	11604,1	11652,4	11667,5	11674,2
		$\#Aplic$	-	229	157	108	81	65
		$Itotal$ (mm)	-	457	628	647	652	653
Agosto	8561,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7183,1	11114,9	11647,1	11704,5	11727,0	11738,7
		$\#Aplic$	-	215	148	102	77	62
		$Itotal$ (mm)	-	430	590	612	617	623
Setembro	9092,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7614,1	11291,3	11771,6	11826,0	11842,3	11854,5
		$\#Aplic$	-	201	138	95	72	58
		$Itotal$ (mm)	-	402	550	570	575	579
Outubro	9212,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7914,8	11439,8	11949,6	12002,4	12015,2	12022,8
		$\#Aplic$	-	195	133	91	69	56
		$Itotal$ (mm)	-	390	530	548	552	557
Novembro	8957,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7881,9	11468,6	11992,1	12043,7	12054,7	12064,2
		$\#Aplic$	-	196	134	92	69	56
		$Itotal$ (mm)	-	393	535	552	556	558
Dezembro	8658,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7690,8	11445,8	11937,2	11989,2	12001,9	12011,7
		$\#Aplic$	-	201	135	93	70	57
		$Itotal$ (mm)	-	401	542	560	563	566

Tabela 4.10. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações ($\#Aplic$) e quantidade total de água aplicada ($Itotal$), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob alta emissão (RCP8.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para Almenara (MG).

RCP8.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	2667,7	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2787,2	3541,9	3664,7	3686,6	3694,9	3701,9
		$\#Aplic$	-	61	38	27	20	17
		$Itotal$ (mm)	-	121	154	160	164	167
Fevereiro	2399,7	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2497,4	3755,1	3826,2	3840,9	3845,4	3850,0
		$\#Aplic$	-	78	46	31	24	19
		$Itotal$ (mm)	-	155	183	187	189	191
Março	1956,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1992,5	3712,3	3785,9	3792,8	3797,7	3800,1
		$\#Aplic$	-	95	58	39	29	24
		$Itotal$ (mm)	-	190	231	233	235	236
Abril	1457,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1467,0	3267,0	3414,7	3419,2	3424,6	3427,9
		$\#Aplic$	-	104	69	47	35	28
		$Itotal$ (mm)	-	209	276	281	283	284
Maio	1200,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1113,5	2697,6	2942,0	2942,3	2945,7	2949,0
		$\#Aplic$	-	102	74	51	39	31
		$Itotal$ (mm)	-	205	295	307	308	309
Junho	1310,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1009,6	2369,4	2684,0	2686,3	2691,8	2693,2
		$\#Aplic$	-	91	71	50	38	30
		$Itotal$ (mm)	-	182	283	298	300	303
Julho	7954,8	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6245,4	10314,5	10845,7	10889,7	10902,7	10910,8
		$\#Aplic$	-	236	161	111	84	67
		$Itotal$ (mm)	-	473	645	666	669	671
Agosto	8561,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6496,3	10310,8	10786,4	10835,7	10855,0	10867,7
		$\#Aplic$	-	222	152	105	79	64
		$Itotal$ (mm)	-	445	609	630	636	641
Setembro	9092,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	6865,8	10434,7	10865,1	10911,4	10930,1	10940,2
		$\#Aplic$	-	206	140	97	73	59
		$Itotal$ (mm)	-	411	561	581	586	592
Outubro	9212,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7194,4	10603,0	11064,1	11109,7	11121,3	11130,1
		$\#Aplic$	-	195	133	92	70	56
		$Itotal$ (mm)	-	391	534	552	556	563
Novembro	8957,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7241,7	10650,4	11130,5	11177,7	11187,7	11196,7
		$\#Aplic$	-	195	134	92	70	56
		$Itotal$ (mm)	-	390	534	553	557	560
Dezembro	8658,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	7112,2	10659,8	11104,3	11148,6	11163,6	11169,9
		$\#Aplic$	-	200	136	94	71	57
		$Itotal$ (mm)	-	400	542	562	565	570

4.3.1.3. Vulnerabilidade moderada

Os resultados referentes às estratégias de mitigação das perdas de produtividade da mandioca em Brotas de Macaúbas, BA, que representa as regiões de vulnerabilidade moderada aos impactos das mudanças climáticas, para

médio prazo (2040-2070), considerando-se os cenários intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, são apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Brotas de Macaúbas apresentou as maiores PAs no cenário atual (sequeiro) nos meses de outubro (3563,1 kg ha⁻¹), novembro (3508,4 kg ha⁻¹) e dezembro (3325,6 kg ha⁻¹) (Tabelas 4.11 e 4.12), sendo este último o mês de plantio selecionado na janela recomendada pelo ZARC (novembro a janeiro). Esses resultados eram esperados, pois o período chuvoso nessa localidade inicia-se no mês de outubro, período que apresenta também temperaturas do ar elevadas (APÊNDICE C, Figura C.1), combinação que favorece o desenvolvimento inicial da mandioca.

Apesar de ter sido a segunda maior PA no cenário atual, a data de plantio em novembro manteve-se como a de maior PA em ambos os cenários futuros, para as lâminas de irrigação de 2 a 10 mm, seguida pelo plantio em dezembro. Para esses meses, no cenário de emissão intermediária de gases de efeito estufa (RCP4.5), o incremento nas PAs variou de -12 a +79% em novembro e de -13 a +88% em dezembro, respectivamente para a condição de sequeiro e para a condição irrigada, com lâmina de 6 mm (Tabela 4.11). No cenário de alta emissão (RCP8.5), esse aumento das PAs com irrigação foi menos expressivo, havendo perda de produtividade na condição de sequeiro da ordem de -21 a -24%, e incrementos na condição irrigada de +61% em novembro e de +68% em dezembro, para a mesma lâmina de 6 mm (Tabela 4.12). Apesar desses resultados, observou-se baixa variação da produtividade entre as estratégias de irrigação para as lâminas de 4 e 6 mm, em ambos os cenários para ambos os meses. Isso se deu pelo fato de o volume de água irrigado ter se mantido próximo nesses casos, com diferença de 2 a 6 mm no RCP4.5 e de 12 a 13 mm no RCP8.5, considerando os dois meses de plantio mencionados acima.

Por outro lado, os meses com menores PAs na região de Brotas de Macaúbas, BA, ocorreram em abril (172,9 kg ha⁻¹), maio (118,0 kg ha⁻¹) e junho (146,3 kg ha⁻¹) no cenário atual. Esses meses precedem o inverno seco típico do local, com chuvas acumuladas que começa a decrescer em abril (53 mm) e maio (11 mm), chegando a se tornar quase nula de junho a agosto (0 a 3 mm) (APÊNDICE C, Figura C1). Apesar de não terem atingido PAs elevadas em nenhum cenário, nesses meses especificamente, a estratégia de irrigação contribuiu expressivamente para o incremento da produtividade da mandioca, chegando a +501% de aumento nos meses de abril e junho, e a +653% no mês de maio, todas com a lâmina de irrigação de 6 mm, no RCP4.5 (Tabela 4.11). No cenário RCP8.5, o incremento máximo na PA foi menor, variando de +258% em junho a +463% em maio, também para a lâmina de 6 mm (Tabela 4.12).

Tabela 4.11. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações ($\#Aplic$) e quantidade total de água aplicada ($Itotal$), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob emissão intermediária (RCP4.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para Brotas de Macaúbas (BA).

RCP4.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	1095,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1172,0	1876,9	1977,3	2020,9	1966,6	1927,5
		$\#Aplic$	-	70	48	32	22	16
		$Itotal$ (mm)	-	140	194	194	174	162
Fevereiro	750,7	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	772,1	1718,5	1911,2	1955,0	1838,3	1749,0
		$\#Aplic$	-	92	66	44	29	20
		$Itotal$ (mm)	-	184	266	264	229	204
Março	394,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	387,2	1341,1	1596,5	1621,4	1443,6	1327,5
		$\#Aplic$	-	104	80	52	33	23
		$Itotal$ (mm)	-	208	319	310	264	228
Abril	172,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	157,4	790,0	1027,0	1039,5	876,6	793,7
		$\#Aplic$	-	102	80	51	32	22
		$Itotal$ (mm)	-	203	319	304	258	221
Maio	118,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	107,4	495,4	660,2	664,5	588,2	513,0
		$\#Aplic$	-	99	69	44	30	20
		$Itotal$ (mm)	-	198	275	262	241	202
Junho	146,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	122,9	412,4	506,2	524,9	497,6	443,3
		$\#Aplic$	-	75	47	30	23	15
		$Itotal$ (mm)	-	150	188	183	182	155
Julho	2474,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2082,4	4470,4	4838,0	4873,1	4691,0	4463,3
		$\#Aplic$	-	213	135	85	58	41
		$Itotal$ (mm)	-	425	539	511	467	413
Agosto	2819,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2372,4	4470,2	4890,0	4930,6	4752,2	4499,4
		$\#Aplic$	-	188	126	81	54	38
		$Itotal$ (mm)	-	376	504	487	434	381
Setembro	3236,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2745,0	4851,9	5321,5	5336,1	5158,8	4921,5
		$\#Aplic$	-	182	127	83	54	38
		$Itotal$ (mm)	-	363	510	495	435	380
Outubro	3563,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3086,9	5419,8	5943,3	5983,6	5788,5	5551,3
		$\#Aplic$	-	186	134	88	58	40
		$Itotal$ (mm)	-	371	536	527	462	401
Novembro	3508,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3082,2	5679,5	6239,9	6292,0	6105,8	5847,0
		$\#Aplic$	-	189	138	91	60	42
		$Itotal$ (mm)	-	378	553	547	483	417
Dezembro	3325,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2869,9	5608,0	6193,9	6257,7	6031,1	5756,8
		$\#Aplic$	-	191	139	93	60	42
		$Itotal$ (mm)	-	381	557	555	483	417

Tabela 4.12. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações ($\#Aplic$) e quantidade total de água aplicada ($Itotal$), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob alta emissão (RCP8.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para Brotas de Macaúbas (BA).

RCP8.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	1095,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1120,3	1763,9	1851,1	1892,0	1834,3	1802,0
		$\#Aplic$	-	69	47	31	21	16
		$Itotal$ (mm)	-	138	189	189	166	155
Fevereiro	750,7	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	735,1	1626,9	1806,1	1844,4	1721,4	1628,7
		$\#Aplic$	-	91	65	43	27	20
		$Itotal$ (mm)	-	182	260	256	220	196
Março	394,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	366,7	1269,8	1512,2	1529,1	1354,9	1244,9
		$\#Aplic$	-	102	77	50	32	22
		$Itotal$ (mm)	-	203	309	298	252	219
Abril	172,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	158,5	786,9	1016,6	1025,0	868,0	782,3
		$\#Aplic$	-	102	79	50	32	22
		$Itotal$ (mm)	-	205	315	297	254	216
Maio	118,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	107,4	493,1	650,3	653,7	579,5	504,3
		$\#Aplic$	-	99	68	43	30	20
		$Itotal$ (mm)	-	198	274	257	237	198
Junho	146,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	115,4	384,5	478,7	500,9	472,9	417,9
		$\#Aplic$	-	75	47	31	23	16
		$Itotal$ (mm)	-	151	189	185	184	156
Julho	2474,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1836,7	4076,6	4369,9	4391,9	4234,7	4021,9
		$\#Aplic$	-	210	128	79	55	39
		$Itotal$ (mm)	-	420	510	475	442	389
Agosto	2819,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2093,9	4038,3	4380,1	4397,1	4233,3	4003,0
		$\#Aplic$	-	185	120	75	51	36
		$Itotal$ (mm)	-	370	478	452	407	357
Setembro	3236,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2429,4	4362,1	4773,2	4773,5	4582,2	4363,0
		$\#Aplic$	-	178	122	77	51	36
		$Itotal$ (mm)	-	357	488	465	406	357
Outubro	3563,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2748,7	4886,0	5356,2	5362,3	5169,3	4926,8
		$\#Aplic$	-	182	130	83	54	38
		$Itotal$ (mm)	-	365	519	500	436	377
Novembro	3508,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2751,9	5130,1	5631,9	5655,2	5470,9	5222,4
		$\#Aplic$	-	186	134	87	57	39
		$Itotal$ (mm)	-	372	536	524	458	393
Dezembro	3325,6	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2521,2	5048,0	5575,4	5593,9	5387,2	5099,6
		$\#Aplic$	-	187	135	88	57	39
		$Itotal$ (mm)	-	374	540	527	458	391

4.3.1.4. Vulnerabilidade alta a muito alta

Os resultados referentes às estratégias de mitigação das perdas de produtividade da mandioca em Januária, MG, representando as regiões de vulnerabilidade alta a muito alta aos impactos das mudanças climáticas, para médio

prazo (2040-2070), considerando-se os cenários intermediário (RCP4.5) e de alta (RCP8.5) emissão de gases de efeito estufa, são apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14.

Na localidade de Januária, as maiores PAs ocorreram no cenário atual (sequeiro) nos meses de outubro (4685,5 kg ha⁻¹), novembro (4427,2 kg ha⁻¹) e setembro (4390,3 kg ha⁻¹) (Tabelas 4.13 e 4.14), sendo o segundo o mês de novembro, selecionado como referência pela janela de plantio recomendada pelo ZARC (outubro a dezembro). Considerando que o período chuvoso se inicia em setembro (18 mm) e se estende até abril (62 mm), com pico em dezembro (233 mm), esses resultados eram previstos (APÊNDICE C, Figura C.1).

Embora tenha apresentado a segunda maior PA no cenário atual, a data de plantio de novembro manteve-se como a de maiores produtividades em ambos os cenários futuros, para as lâminas de irrigação de 2 a 10 mm, seguida pelo plantio em outubro. Para esses meses, no cenário RCP4.5, as PAs variaram de -20 a +28% em novembro e de -21 a +19% em outubro, respectivamente para a condição de sequeiro e para a lâmina de irrigação de 6 mm (Tabela 4.13). No cenário mais pessimista (RCP8.5), houve aumento nas perdas para a condição de sequeiro e redução dos ganhos na condição irrigada, ou seja, -25 a +19% em novembro e -26 a +10% em outubro, para as mesmas condições mencionadas anteriormente (Tabela 4.14). Apesar desses resultados, observou-se baixa variação da produtividade entre as estratégias de irrigação com lâminas de 4, 6 e 8 mm, em ambos os cenários para os meses de plantio de maiores produtividades. Isso se deu pelo fato da lâmina total de irrigação não ter variado tanto entre as diferentes estratégias, ou seja, ficando 378 e 447 mm em novembro e entre 368 e 439 mm em outubro para o RCP4.5 (Tabela 4.13), e entre 360 a 432 mm em novembro e entre 352 e 425 mm em outubro, para o RCP8.5 (Tabela 4.14).

Por outro lado, os meses com menores PAs foram abril (155,9 kg ha⁻¹), maio (121,0 kg ha⁻¹) e junho (245,1 kg ha⁻¹) para o cenário atual. Assim como em Brotas de Macaúbas, esses meses precedem o inverno seco do local, com chuvas acumuladas que começam a decrescer em abril (62 mm) e maio (17 mm), chegando a níveis baixíssimos entre junho e agosto (1 a 5 mm) (APÊNDICE C, Figura C1). Apesar de não terem atingido PAs elevadas em nenhum dos cenários, nesses meses especificamente, a estratégia de irrigação contribuiu substancialmente para o incremento da produtividade, chegando a +467% de aumento em abril, +307% em maio e +341% em junho, empregando-se a lâmina de 6 mm, no RCP4.5 (Tabela 4.13). No cenário RCP8.5, o incremento máximo na PA foi menor, variando de +153% em maio a +311% em junho, para a mesma lâmina de 6 mm (Tabela 4.14).

Tabela 4.13. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações ($\#Aplic$) e quantidade total de água aplicada ($Itotal$), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob emissão intermediária (RCP4.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para Januária (MG).

RCP4.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	1165,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1148,9	1574,9	1637,5	1675,6	1635,4	1621,0
		$\#Aplic$	-	59	41	28	19	14
		$Itotal$ (mm)	-	117	164	166	148	142
Fevereiro	715,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	684,4	1232,1	1330,6	1372,0	1300,1	1248,2
		$\#Aplic$	-	79	57	37	24	18
		$Itotal$ (mm)	-	158	226	225	193	177
Março	343,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	309,2	759,5	856,3	882,1	788,7	737,6
		$\#Aplic$	-	85	63	40	25	18
		$Itotal$ (mm)	-	170	250	237	200	178
Abril	155,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	135,0	379,5	452,0	456,4	398,0	375,2
		$\#Aplic$	-	86	60	37	24	17
		$Itotal$ (mm)	-	171	240	220	189	170
Maio	121,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	102,5	249,3	301,4	307,1	283,2	254,5
		$\#Aplic$	-	75	46	29	21	14
		$Itotal$ (mm)	-	151	185	172	168	144
Junho	245,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	158,7	297,2	328,2	341,0	337,3	317,8
		$\#Aplic$	-	53	30	19	15	10
		$Itotal$ (mm)	-	105	119	116	120	102
Julho	3208,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2365,0	3770,4	3983,4	4028,4	3924,4	3808,1
		$\#Aplic$	-	168	103	65	44	31
		$Itotal$ (mm)	-	336	411	388	352	314
Agosto	3753,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2781,7	4029,1	4256,4	4282,0	4165,9	4053,0
		$\#Aplic$	-	155	100	63	41	30
		$Itotal$ (mm)	-	309	398	377	332	297
Setembro	4390,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3329,9	4689,4	4932,2	4949,7	4809,8	4698,0
		$\#Aplic$	-	156	104	66	43	31
		$Itotal$ (mm)	-	312	415	399	343	305
Outubro	4685,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3679,2	5283,5	5563,1	5582,2	5448,1	5333,2
		$\#Aplic$	-	161	110	70	46	33
		$Itotal$ (mm)	-	322	439	423	368	326
Novembro	4427,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3521,8	5359,7	5672,9	5696,2	5563,5	5440,5
		$\#Aplic$	-	162	112	72	47	34
		$Itotal$ (mm)	-	325	447	434	378	337
Dezembro	4041,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3132,4	5095,1	5432,5	5458,6	5292,4	5147,2
		$\#Aplic$	-	160	110	72	46	33
		$Itotal$ (mm)	-	320	442	430	371	330

Tabela 4.14. Produtividades atingíveis atual (PA_{atual}) e futuras (PA_{futura}), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da mandioca cultivar BRS Formosa conduzida sob condições de sequeiro e com irrigação com lâminas entre 2 e 10 mm quando atingida 50% da água disponível do solo, número de aplicações (#Aplic) e quantidade total de água aplicada (Itotal), para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) prazo, sob alta emissão (RCP8.5), obtida com simulações do modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para Januária (MG).

RCP8.5 (2040-2070)								
Mês	PA_{atual} (kg MS ha ⁻¹)	Variável	Lâminas de irrigação (mm)					
			0	2	4	6	8	10
Janeiro	1165,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	1175,9	1585,9	1648,1	1680,8	1645,2	1633,4
		#Aplic	-	56	39	26	18	14
		Itotal (mm)	-	112	156	158	141	137
Fevereiro	715,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	710,0	1246,4	1340,6	1382,6	1311,8	1265,8
		#Aplic	-	77	54	36	23	17
		Itotal (mm)	-	153	217	215	188	172
Março	343,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	326,1	780,2	880,5	907,1	816,1	759,4
		#Aplic	-	83	61	39	25	18
		Itotal (mm)	-	167	246	233	197	175
Abril	155,9	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	142,8	387,8	463,7	467,8	410,9	386,1
		#Aplic	-	87	61	37	24	17
		Itotal (mm)	-	174	243	221	188	171
Maio	121,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	102,6	243,0	297,2	303,6	278,3	252,1
		#Aplic	-	76	48	30	21	15
		Itotal (mm)	-	153	192	178	169	146
Junho	245,1	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	137,4	264,8	295,9	311,8	306,2	288,9
		#Aplic	-	55	31	20	16	11
		Itotal (mm)	-	109	124	121	124	106
Julho	3208,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2190,0	3533,1	3720,5	3758,6	3671,3	3574,2
		#Aplic	-	165	98	61	42	30
		Itotal (mm)	-	330	393	367	337	304
Agosto	3753,4	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2560,2	3713,5	3911,1	3937,7	3835,7	3731,1
		#Aplic	-	151	95	59	40	28
		Itotal (mm)	-	301	379	356	317	285
Setembro	4390,3	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3061,0	4299,9	4520,2	4523,4	4390,0	4287,9
		#Aplic	-	152	100	63	41	29
		Itotal (mm)	-	303	400	377	326	291
Outubro	4685,5	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3425,4	4892,8	5146,4	5152,0	5024,6	4915,3
		#Aplic	-	157	106	67	44	31
		Itotal (mm)	-	314	425	404	352	312
Novembro	4427,2	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	3304,0	4998,9	5285,5	5298,3	5163,1	5045,9
		#Aplic	-	158	108	69	45	32
		Itotal (mm)	-	316	432	415	360	320
Dezembro	4041,0	PA_{futura} (kg MS ha ⁻¹)	2903,3	4738,0	5038,3	5039,6	4893,3	4765,5
		#Aplic	-	155	106	67	44	31
		Itotal (mm)	-	310	424	405	352	312

De um modo geral, os resultados deste estudo indicam que há a possibilidade da adoção de ações de manejo para se minimizar os impactos negativos das mudanças climáticas na cultura da mandioca, assim como obtido por Waha et al. (2013), para esta e outras culturas, e por Bird et al. (2016), para as culturas do trigo e do tomate. O ajuste da data de plantio para se permitir que os períodos críticos do desenvolvimento das culturas

coincidam com as melhores condições climáticas, especialmente de disponibilidade de água no solo, nos cenários futuros é uma estratégia viável, como destacado por Do Rio et al. (2016) para soja no Sul do Brasil, Nouri et al. (2017) para trigo no Irã, Hu et al. (2017) para batata e Zhang et al. (2019) para aveia, estas para a região semiárida da China. No caso do presente estudo, independentemente da vulnerabilidade da região analisada, as alterações das épocas de plantio não demonstraram grandes diferenças na produtividade. Assim, as janelas ótimas de plantio se mantiveram nos cenários futuros de clima iguais às recomendadas pelo ZARC para o cenário atual. Apesar disso, observou-se que o atraso do plantio em um mês em Almenara, MG, Brotas de Macaúbas, BA, e Januária, MG, resultou em produtividades ligeiramente mais elevadas, o que já não aconteceu em Propriá, SE. A irrigação, por outro lado, mostrou ser a principal técnica a ser empregada no SAB para reverter os impactos negativos das mudanças climáticas na produtividade da mandioca, desde que essa prática esteja acessível ao produtor e seja viável economicamente. No entanto, essa é uma questão crítica, já que o acesso à água no SAB deverá ser restringido nos cenários futuros de clima, de acordo com os estudos de Marengo (2008). Nesse sentido, o sistema de irrigação por gotejamento, conhecido por otimizar os recursos hídricos em locais de escassez, pode ser uma opção, incrementando a produtividade com racionalização do uso da água (IAEA, 2018). No entanto, a associação de diferentes estratégias de manejo que busquem mitigar os impactos das mudanças climáticas nas culturas agrícolas, como o ajuste da data de plantio e o uso da irrigação, tende a ser mais promissor à mitigação das perdas, o que concorda com os resultados obtidos por Bender (2017), Muluneh et al. (2017) e Yang et al. (2017).

Embora os resultados apresentados neste estudo sejam favoráveis à adaptação e mitigação de perdas na produtividade de mandioca no SAB nos cenários futuros, deve-se considerar dois aspectos relevantes: i) as incertezas inerentes à utilização dos cenários climáticos (média de sete MCGs) e ao modelo de simulação da cultura mandioca empregado. Essas incertezas são comuns nos estudos dessa natureza, já que as há grande variação dos cenários simulados de clima futuro tanto na escala espacial como na escala temporal (DESSAI et al., 2009). Apesar disso, há estudos que mostram que as incertezas devido ao uso de diferentes modelos de simulação de culturas pode ser maior do que as incertezas associadas ao ensemble de GCMs (GUAN et al., 2017; TAO et al., 2018); ii) os aspectos socioeconômicos referentes à utilização dos métodos de manejo, cuja avaliação não está no escopo deste estudo. A adaptação ao clima futuro está estreitamente ligada a outros fatores socioeconômicos, como a globalização, as prioridades políticas e econômicas e a demografia, sendo, então, dependente do contexto local (CORBEELS et al., 2018). Assim, os resultados desse estudo devem ser considerados como exploratórios para direcionar pesquisas futuras sobre estratégias de manejo que visem a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na produtividade da cultura da mandioca no SAB. Além disso, há ainda a possibilidade de que esses resultados sejam precursores de políticas públicas para o SAB, de modo a garantir a segurança alimentar nessa região, quer seja pela adoção das práticas aqui avaliadas (época de plantio e irrigação) ou pela adoção/desenvolvimento de genótipos mais tolerantes à seca.

4.4. Conclusões

As estratégias de ajuste da data de plantio e uso da irrigação foram capazes de minimizar as perdas de produtividade da cultura da mandioca em diferentes condições de vulnerabilidade às mudanças climáticas. As melhores datas de plantio quanto à obtenção das maiores produtividades no cenário atual foram julho para Propriá, SE, outubro para Almenara, MG, Brotas de Macaúbas, BA, e Januária, MG. Nos cenários futuros, em tratamento irrigado, essa data se manteve somente para Propriá, enquanto para os demais locais, passou a ser o mês de

novembro. Quanto à irrigação, a aplicação de lâminas de 6 mm ao longo do ciclo, sempre que água disponível do solo atingia 50% da capacidade de campo, resultou em incrementos percentuais expressivos em relação à produtividade atingível do cenário atual, em todos os locais. Assim, pode-se concluir que medidas de mitigação por meio de estratégias de manejo da cultura da mandioca são essenciais para sua adaptação às mudanças climáticas.

Referências

- ABBERTON, M.; BATLEY, J.; BENTLEY, A.; BRYANT, J.; CAI, H.; COCKRAM, J.; DE OLIVEIRA, A. C.; CSEKE, L. J.; DEMPEWOLF, H.; DE PACE, C.; EDWARDS, D.; GEPTS, P.; GREENLAND, A.; HALL, A. E.; HENRY, R.; HORI, K.; HOWE, G. T.; HUGHES, S.; HUMPHREYS, M.; LIGHTFOOT, D.; MARSHALL, A./MAYES, S.; NGUYEN, H. T.; OGBONNAYA, F. C.; ORTIZ, R.; PATERSON, A. H.; TUBEROSA, R.; VALLIYODAN, B.; VARSHNEY, R. K.; YANO, M. Global agricultural intensification during climate change: a role for genomics. **Plant Biotechnology Journal**, v. 14, n. 4, p. 1095-1098, 2015.
- ALLEN, M. R.; INGRAM, W. J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. **Nature**, v. 419, p. 228-232, 2002.
- 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.
- 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, p. 73, 2007.
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.
- BARTON, C. V. M.; DUURSMA, R. A.; MEDLYN, B. E.; ELLSWORTH, D. S.; EAMUS, D.; TISSUE, D. T.; ADAMS, M. A.; CONROY, J.; CROUS, K. Y.; LIBERLOO, M.; LÖW, M.; LINDER, S.; McMURTRIE, R. E. Effects of elevated atmospheric [CO₂] on instantaneous transpiration efficiency at leaf and canopy scales in *Eucalyptus saligna*. **Global Change Biology**, v. 18, p. 585-595, 2011.
- BATISANI, N.; YARNAL, B. Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: implications for climate change adaptation policy. **Applied Geography**, v. 30, p. 483-489, 2010.
- BATTIPAGLIA, G.; SAURER, M.; CHERUBUNI, P.; CALFAPIETRA, C.; MCCARTHY, H. R.; NORBY, R. J.; COTRUFO, M. F. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. **New Phytologist**, v. 197, p. 544-554, 2013.
- BATTISTI, D. S.; NAYLOR, R. L. Historical warnings of future food security with unprecedented seasonal heat. **Science**, v. 323, p. 240-244, 2009.

- BENDER, F. D. 2017. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- BIRD, D. N.; BENABDALLAH, S.; GOUDA, N.; HUMMEL, F.; KOEBERL, J.; LA JEUNESSE, I.; MEYER, S.; PRETTENTHALER, F.; SODDU, A.; WOESS-GALLASCH, S. Modelling climate change impacts on and adaptation strategies for agriculture in Sardinia and Tunisia using AquaCrop and value-at-risk. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 1019-1027, 2016.
- BOUMAN, B. A. M.; LAMPAYAN, R. M.; TUONG, T.P. Water management in rice: coping with water scarcity. **International Rice Research Institute**, p. 54, 2007.
- BURNS, A.; GLEADOW, R.; CLIFF, J.; ZACARIAS, A.; CAVAGNARO, T. Cassava: The drought, war and famine crop in a changing world. **Sustainability**, v. 2, n. 11, p. 3572-3607, 2010.
- CEBALLOS, H.; RAMIREZ, J.; BELLOTTI, C.; JARVIS, A.; ALVAREZ, E. Adaptation of cassava to changing climates. In: YADAV, S. S. et al. ed. **Crop Adaptation to Climate Change**. 1. ed. John Wiley & Sons, Ltd., p. 411-425, 2011.
- CHALLINOR, A. J.; WHEELER, T. R. Crop yield reduction in the tropics under climate change: processes and uncertainties. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 3, p. 343-356, 2008.
- CORBEELS, M.; BERRE, D.; RUSINAMHODZI, L.; LOPEZ-RIDAURA, S. Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256-257, p. 46-52, 2018.
- CRUZ, J. L.; ALVES, A. A. C.; LeCAIN, D. R.; ELLIS, D. D.; MORGAN, J. A. Elevated CO₂ concentrations alleviate the inhibitory effect of drought on physiology and growth of cassava plants. **Scientia Horticulturae**, v. 210, p. 122-129, 2016.
- DA SILVA, F. H. B. B.; DA SILVA, M. S. L.; CAVALCANTI, A. C.; CUNHA, T. J. F. **Principais solos do Semi-árido do Nordeste do Brasil: "Dia de Campo"**. Embrapa, 2005.
- DESSAI, S.; HULME, M.; LEMPERT, R.; PIELKE, R. Do we need better predictions to adapt to a changing? **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 13, p. 111-112, 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**, v. 36, p. 3664-3672, 2016.
- EL-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H. Response of cassava to water stress. **Plant and Soil**, v. 100, n. 1-3, p. 345-360, 1987.
- EL-SHARKAWY, M. A. Global warming: Causes and impacts on agroecosystems productivity and food security with emphasis on cassava comparative advantage in the tropics/subtropics. **Photosynthetica**, v. 52, n. 2, p. 161-178, 2014.

EWERT, F.; RÖTTER, R. P.; BINDI, M.; WEBBER, H.; TRNKA, M.; KERSEBAUM, K. C.; OLESEN, J. E.; VAN ITTERSUM, M. K.; JANSSEN, S.; RIVINGTON, M.; SEMENOV, M. A.; WALLACH, D.; PORTER, J. R.; STEWART, D.; VERHAGEN, J.; GAISER, T.; PALOSUO, T.; TAO, F.; NENDEL, C.; ROGGERO, P. P.; BARTOSOVÁ, L.; ASSENG, S. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 287-303, 2015.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Save and Grow: Cassava - A Guide to Sustainable Production Intensification**, p. 142, 2013.

FINGER, R.; SCHMID, S. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change. **Agricultural Finance Review**, v. 68, n. 1, p. 25-41, 2008.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULTZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. **Change**, v. 30, n. 22, p. 129-234, 2007.

GARCÍA, V.; PUCHE, M.; SILVA, O.; WARNOCK, R.; FIGUEROA, R. Evaluation of planting-date strategies for cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) with a crop simulation model. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 2, p. 53-60, 2001.

GUAN, K.; SULTAN, B.; BIASUTTI, M.; BARON, C.; LOBELL, D. Assessing climate adaptation options and uncertainties for cereal systems in West Africa. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 232, p. 291-305, 2017.

HAO, X.; GAO, J.; HAN, X.; MA, Z.; MERCHANT, A.; JU, H.; LI, P.; YANG, W.; GAO, Z.; LIN, E. Effects of open-air elevated atmospheric CO₂ concentration on yield quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 80-84, 2014.

HU, Q.; YANG, N.; PAN, F.; PAN, X.; WANG, X.; YANG, P. Adjusting sowing dates improved potato adaptation to climate change in Semiarid Region, China. **Sustainability**, v. 9, p. 615, 2017.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Cassava production guidelines for food security and adaptation to climate change in Asia and Africa**. IAEA-TECDOC-1840, IAEA, Vienna, 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas interativos: solos**, 2019. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 jan. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. ed. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

JARVIS, A.; LANE, A.; HIJMANS, R. J. The effect of climate change on crop wild relatives. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 126, p. 13-23, 2008.

JARVIS, A.; RAMÍREZ-VILLEGAS, J.; ANDERSON, B.; LEIBING, C.; AGGARWAL, P. K. Scenarios of climate change within the context of agriculture. In: REYNOLDS, M. P. **Climate change and crop production**. Wallingford UK, CAB International, p. 9-37, 2010.

KARL, T. R.; MEEHL, G. A.; MILLER, C. D.; HASSOL, S. J.; WAPLE, A. M.; MURRAY, W. L. Weather and climate extremes in a changing climate. **Synthesis and Assessment Product 3.3**. Report by the US Climate Change Science Program (CCSP) and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Commerce, NOAA National Climate Data Center, Washington, DC, 2008.

KAYE, J. P.; QUEMADA, M. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, p. 4, 2017.

KROL, M. S.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; KRYWKOW, J. The semi-arid integrated model (SIM), a regional integrated model assessing water availability, vulnerability of ecosystems and society in NE-Brazil. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 26, n. 7-8, p. 529-533, 2001.

KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 2, p. 259-268, 2007.

LEBOT, V. Tropical root and tuber crops: Cassava, sweet potato, yams and aroids. **Crop Production Science in Horticulture**, n. 17, CABI Publishing, Oxfordshire, UK, 2009.

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**, v. 117, p. 55-65, 2013.

LOBELL, D.B.; FIELD, C.B. Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961. **Global Change Biology**, v. 14, p. 39-45, 2008.

LOBELL, D. B.; GOURDJI, S. The influence of climate change on global crop productivity. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1686-1697, 2012.

LOPES-ASSAD, M. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.

MACHADO FILHO, H.; MORAES, C.; BENNATI, P.; RODRIGUES, R. A.; GUILLES, M.; ROCHA, P.; LIMA, A.; VASCONCELOS, I. **Mudança do clima e os impactos na agricultura familiar no Norte e Nordeste do Brasil**. Working Paper, Centro Internacional de Políticas para o Crescimento Inclusivo (IPC-IG), n. 141, 2016.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola de risco climático**, 2019. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/zoneamento-agricola>. Acesso em: 05 fev. 2019.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no Semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF, n. 27, 2008.

MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 17, p. 232-239, 2013.

MATTHEWS, R. B.; RIVINGTON, M.; MUHAMMED, S.; NEWTON, A. C.; HALLETT, P. D. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. **Global Food Security**, v. 2, n. 1, p. 24-28, 2013.

MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z.-C. Global climate projections. In: SOLOMON, S. et al. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, p. 686-688, 2007.

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

MORGAN, J. A.; PATAKI, D. E.; KÖRNER, C.; CLARK, H.; DEL GROSSO, S. J.; GRÜNZWEIG, J. M.; KNAPP, A. K.; MOSIER, A. R.; NEWTON, P. C. D.; NIKLAUS, P. A.; NIPPERT, J. B.; NOWAK, R. S.; PARTON, W. J.; POLLEY, H. W.; SHAW, M. R. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. **Oecologia**, v. 140, p. 11-25, 2004.

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.; 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**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010.

MUCHOW, R. C.; BELLAMY, J. A. **Climatic risk in crop production: models and management for the semi-arid tropics and subtropics**. Wallingford, UK, CAB International, 1991.

MULUNEH, A.; STROOSNIJDER, L.; KEESSTRA, S.; BIAZIN, B. Adapting to climate change for food security in the Rift Valley lands of Ethiopia: Supplemental irrigation, plant density and sowing date. **Journal of Agricultural Science**, v. 155, p. 703-724, 2017.

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**, v. 52, p. 47-56, 2014.

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

NOURI, M.; HOMAEI, M.; BANNAYAN, M.; HOOGENBOOM, G. Towards shifting planting date as an adaptation practice for rainfed wheat response to climate change. **Agricultural Water Management**, v. 186, p. 108-119, 2017.

PARMAR, A.; STURM, B.; HENSEL, O. Crops that feed the world: Production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. **Food Security**, v. 9, p. 907-927, 2017.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas. In: MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. ed. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, p. 184, 2016.

PEARCE, F. Cassava comeback. **New Scientist**, v. 194, p. 38-39, 2007.

- PINGALE, S. M.; KHARE, D.; JAT, M. K.; ADAMOWSKI, J. Spatial and temporal trends of mean and extreme rainfall and temperature for the 33 urban centers of the arid and semi-arid state of Rajasthan, India. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 73-90, 2014.
- 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. 7, p. 891-904, 2014.
- ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; ANTLE, J. M.; RUANE, A. C.; MUTTER, C. Z. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: Phase I activities by a global community of science. In: **Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1**. ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. ed. ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation. Imperial College Press, v. 3, p. 3-24, 2015.
- SELVARAJU, R.; GOMMES, R.; BERNARDI, M. Climate science in support of sustainable agriculture and food security. **Climate Research**, v. 47, p. 95-110, 2011.
- SELVARAJU, R. Climate risk assessment and management in agriculture. In MEYBECK, A.; LANKOSKI, J.; REDFERN, S.; AZZU, N.; GITZ, V. ed. **Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector**, Rome: Food and Agriculture Organization, p. 71-90, 2012.
- SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. de. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Embrapa Meio Ambiente, p. 33-63, 2001.
- 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.
- STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.
- STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Numerical study of the impact of climate change on the yield of wheat, soybean and maize. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 1351-1359, 2016.
- TAO, F.; RÖTTER, R.; PALOSUO, T.; GREGORIO HERNÁNDEZ DÍAZ-AMBRONA, C.; MÍNGUEZ, M.; SEMENOV, M.; KERSEBAUM, K. C.; NENDEL, C.; SPECKA, X.; HOFFMAN, H.; EWERT, F.; DAMBREVILLE, A.; MARTRE, P.; RODRÍGUEZ, L.; RUÍZ-RAMOS, M.; GAISER, T.; HÖHN, J. G.; SALO, T.; FERRISE, R.; BINDI, M.; CAMMARANO, D.; SCHULMAN, A. H.. Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertainty in climate change impact assessments. **Global Change Biology**, v. 24, n. 3, p. 1291-1307, 2018.
- 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.

TEIXEIRA, E. I.; DE RUITER, J.; AUSSEIL, A.-G.; DAIGNEAULT A.; JOHNSTONE, P.; HOLMES, A.; TAIT, A.; EWERT, F. Adapting crop rotations to climate change in regional impact modelling assessments. **Science of The Total Environment**, v. 616-617, p. 785-795, 2018.

TIRONI, L.; STRECK, N. A.; SANTOS, A. T. L.; FREITAS, C. P. O.; UHLMANN, L. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, W. C.; FERRAZ, S. E. T. Estimating cassava yield in future IPCC climate scenarios for the Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. 10, 2017.

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

WAHA, K.; MÜLLER, C.; BONDEAU, A.; DIETRICH, J. P.; KURUKULASURIYA, P.; HEINKE, J.; LOTZE-CAMPEN, H. Adaptation to climate change through the choice of cropping system and sowing date in sub-Saharan Africa. **Global Environmental Change**, v. 23, p. 130-143, 2013.

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**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

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

ZHANG, Y.; ZHANG, L.; YANG, N.; HUTH, N.; WANG, E.; VAN DER WERF, W.; EVERS, J. B.; WANG, Q.; ZHANG, D.; WANG, R.; GAO, H.; ANTEN, N. P. R. Optimized sowing time windows mitigate climate risks for oats production under cool semi-arid growing conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 266-267, p. 184-197, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A.

Fluxogramas dos materiais e métodos

Figura A.1. Fluxograma das etapas de calibração, avaliação e análise de sensibilidade realizadas no Capítulo 2.

Figura A.2. Fluxograma das etapas de simulação e análise de estratégias de manejo realizadas no Capítulo 4.

Figura A.3. Fluxograma das etapas de simulação e confecção dos mapas de Produtividade Atingível (PA) e de vulnerabilidade (IV) para o Semiárido Brasileiro, realizadas no Capítulo 3.

APÊNDICE B.

Perfis dos solos utilizados nas simulações

Tabela B.1. Perfil do Latossolo Amarelo Distrófico, em Cruz das Almas, BA, utilizado para as etapas de calibração e avaliação dos modelos DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava e CSM-MANIHOT-Cassava.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
5	0,098	0,176	0,383	1,0	12,38	1,55	0,864	18,1	8,7	73,2	0,04	6,2	5,2
21	0,098	0,176	0,383	0,001	12,38	1,55	0,864	30,3	6,8	62,9	0,04	6,2	5,2
30	0,151	0,194	0,341	0,67	2,04	1,70	0,864	30,3	6,8	62,9	0,04	6,2	5,2
41	0,151	0,194	0,341	0,67	2,04	1,70	0,864	32,3	7,7	60,0	0,04	6,2	5,2
50	0,132	0,184	0,378	0,37	0,41	1,58	0,864	32,3	7,7	60,0	0,03	6,2	5,2
60	0,132	0,184	0,378	0,37	0,41	1,58	0,864	32,3	7,7	60,0	0,04	6,2	5,2
71	0,132	0,184	0,434	0,17	14,55	1,38	0,864	38,4	8,1	53,3	0,02	6,2	5,2
100	0,144	0,204	0,434	0,17	14,55	1,38	0,864	38,4	8,1	53,3	0,02	6,2	5,2
160	0,144	0,204	0,394	0,06	7,23	1,49	0,864	38,4	8,1	53,3	0,02	6,2	5,2

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

Tabela B.2. Perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, em Petrolina, PE, utilizado para as etapas de calibração e avaliação dos modelos DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava e CSM-MANIHOT-Cassava.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
5	0,141	0,25	0,387	1,0	2,59	1,55	0,27	16	29	55	0,04	6,1	3,0
15	0,141	0,25	0,387	1,0	2,59	1,55	0,27	16	29	55	0,04	6,1	3,0
30	0,141	0,25	0,387	0,45	2,59	1,55	0,27	16	29	55	0,04	6,1	3,0
40	0,141	0,25	0,343	0,4	2,59	1,69	0,10	16	29	55	0,04	6,1	3,0
50	0,141	0,25	0,343	0,3	2,59	1,69	0,10	16	29	55	0,04	6,1	3,0
60	0,141	0,25	0,343	0,32	2,59	1,69	0,10	16	29	55	0,04	6,1	3,0
70	0,141	0,25	0,343	0,3	2,59	1,69	0,10	16	29	55	0,04	6,1	3,0
80	0,141	0,25	0,343	0,15	2,59	1,69	0,10	16	29	55	0,04	6,1	3,0
100	0,141	0,25	0,343	0,05	2,59	1,69	0,10	16	29	55	0,04	6,1	3,0

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

Tabela B.3. Perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo utilizado para as simulações com os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava e CSM-MANIHOT-Cassava.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
0	0,07	0,149	0,38	1,0	6,11	1,38	0,7	10	10	80	0,08	5,1	5,3
5	0,07	0,149	0,38	1,0	6,11	1,38	0,7	10	10	80	0,08	5,1	5,3
10	0,07	0,149	0,38	1,0	6,11	1,38	0,7	10	10	80	0,08	5,1	5,3
18	0,079	0,169	0,38	1,0	2,59	1,56	0,34	14	9	77	0,07	5,1	3,9
28	0,113	0,212	0,32	0,631	0,43	1,66	0,34	24	11	65	0,07	5,2	5,4
45	0,125	0,228	0,42	0,482	0,43	1,79	0,3	28	11	61	0,07	5,6	6,1
65	0,146	0,258	0,4	0,333	0,43	1,72	0,22	31	16	53	0,07	6,3	8,2
105	0,157	0,272	0,43	0,183	0,12	1,57	0,2	39	12	49	0,07	6,2	9,7
120	0,183	0,306	0,39	0,105	0,06	1,51	0,14	44	17	39	0,06	7,2	14,9
150	0,188	0,312	0,39	0,067	0,06	1,48	0,13	47	16	37	0,06	7,8	22,3
170	0,188	0,312	0,39	0,041	0,06	1,48	0,13	47	16	37	0,06	7,8	22,3

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

Tabela B.4. Perfil do Neossolo Quartzarênico utilizado para as simulações com os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
0	0,029	0,086	0,23	1,0	21	1,45	0,62	2	4	94	0,04	5,9	1,8
5	0,029	0,086	0,23	1,0	21	1,45	0,62	2	4	94	0,04	5,9	1,8
10	0,029	0,086	0,23	1,0	21	1,45	0,62	2	4	94	0,04	5,9	1,8
15	0,026	0,081	0,23	1,0	21	1,49	0,34	2	3	95	0,03	5,3	0,9
60	0,026	0,081	0,23	0,472	21	1,49	0,34	2	3	95	0,03	5,3	0,9
100	0,026	0,081	0,23	0,202	21	1,49	0,34	2	3	95	0,03	5,3	0,9

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

Tabela B.5. Perfil do Planossolo Crômico utilizado para as simulações com os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
0	0,065	0,14	0,38	1,0	6,11	1,71	0,17	8	10	82	0,04	5,1	3,0
5	0,065	0,14	0,38	1,0	6,11	1,71	0,17	8	10	82	0,04	5,1	3,0
15	0,065	0,14	0,38	1,0	6,11	1,71	0,17	8	10	82	0,04	5,1	3,0
28	0,046	0,113	0,39	0,651	21,0	1,7	0,09	6	6	88	0,02	6,4	2,2
38	0,105	0,2	0,32	0,517	0,43	2,14	0,12	22	10	68	0,05	7,8	9,5
50	0,105	0,2	0,32	0,415	0,43	2,16	0,12	23	10	68	0,05	7,8	9,5
70	0,122	0,224	0,36	0,301	0,43	2,16	0,09	23	15	62	0,05	8,3	16,2
85	0,102	0,196	0,32	0,212	2,59	1,59	0,07	14	17	69	0,03	8,5	16,4
115	0,102	0,196	0,32	0,135	2,59	1,59	0,07	14	17	69	0,03	8,5	16,4

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

Tabela B.6. Perfil do Latossolo utilizado para as simulações com os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
0	0,059	0,132	0,38	1,0	6,11	1,59	-	11,2	4,8	83,9	-	5,3	9,2
5	0,059	0,132	0,38	1,0	6,11	1,59	-	11,2	4,8	83,9	-	5,3	9,2
13	0,056	0,128	0,34	1,0	6,11	1,63	-	14,8	0,3	84,8	-	5,0	4,8
30	0,056	0,128	0,34	0,651	6,11	1,63	-	14,8	0,3	84,8	-	5,0	4,8
45	0,108	0,205	0,32	0,472	0,43	1,59	-	28,8	4,4	66,7	-	4,4	4,0
65	0,108	0,205	0,32	0,333	0,43	1,59	-	28,8	4,4	66,7	-	4,4	4,0
87	0,165	0,283	0,38	0,219	0,12	1,52	-	44,1	9,9	45,9	-	4,5	6,0
100	0,165	0,283	0,38	0,154	0,12	1,52	-	44,1	9,9	45,9	-	4,5	6,0
140	0,165	0,283	0,38	0,091	0,12	1,52	-	44,1	9,9	45,9	-	4,5	6,0

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

Tabela B.7. Perfil do Luvisolo utilizado para as simulações com os modelos DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava* e CSM-MANIHOT-*Cassava*.

Camada	LL	DUL	SAT	RGF	SKS	BDM	LOC	LCL	LSI	LCF	LNI	LHW	CEC
0	0,127	0,232	0,42	1,0	2,59	1,44	0,8	15,6	24,4	60,0	-	6,0	29,3
5	0,127	0,232	0,42	1,0	2,59	1,44	0,8	15,6	24,4	60,0	-	6,0	29,3
10	0,127	0,232	0,42	1,0	2,59	1,44	0,8	15,6	24,4	60,0	-	6,0	29,3
16	0,184	0,306	0,39	1,0	0,06	1,68	0,7	49,1	12,2	38,7	-	5,6	24,0
25	0,184	0,306	0,39	0,664	0,06	1,68	0,7	49,1	12,2	38,7	-	5,6	2,04
34	0,185	0,307	0,39	0,554	0,06	1,82	0,5	48,0	13,6	38,4	-	5,8	21,9
45	0,185	0,307	0,39	0,454	0,06	1,82	0,5	48,0	13,6	38,4	-	5,8	21,9
55	0,164	0,28	0,38	0,368	0,43	1,89	0,4	34,9	18,6	46,6	-	6,4	27,0
76	0,164	0,281	0,38	0,27	0,43	1,89	0,4	34,9	18,6	46,5	-	6,4	27,0

LL= ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); DUL= capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SAT= saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RGF=fator de crescimento radicular (%); SKS= condutividade hidráulica (cm hr^{-1}); BDM= densidade do solo (g cm^{-3}); LOC= carbono orgânico (%); LCL= argila (%); LSI= silte (%); LCF= areia (%); LNI= concentração de nitrogênio (%); LHW= pH em água e CEC= capacidade de troca de cátions (cmol kg^{-1}).

APÊNDICE C.

Climatologia média mensal no cenário atual

Figura C.1. Climatologia média mensal (1980-2010) 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) para as localidades analisadas.

APÊNDICE D. Produtividades potencial e atingível no cenário atual

Tabela D.1. Produtividades potencial (PP) e atingível (PA), em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para o período atual (1980-2010), obtidas por meio de simulações com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Produtividade (kg MS ha ⁻¹)	
	PP	PA
	1980-2010	
AMNA	14218,5	8957,5
ANDA	13872,4	7249,4
ARCA	5644,6	3636,6
BCRA	4946,0	2866,3
BQRA	7137,4	2902,1
BRMA	11108,2	3508,4
BRRA	3238,5	1703,2
BTZA	11478,0	6539,5
BVGA	4174,7	2592,4
CARA	8690,7	2858,3
CIPA	4528,2	1757,1
CRCA	2020,7	1612,9
CRRA	21147,4	3855,8
CTGA	7448,0	3931,5
CTPA	2990,4	1372,0
CURA	5345,0	884,8
DLGA	5246,9	1380,3
FLRA	5688,3	2251,1
FLTA	6168,7	1527,1
FRMA	7681,6	3650,1
IACA	14600,4	2910,3
IBPA	3515,5	3036,0
IEMA	8220,1	3958,2
INHA	15226,3	9024,2
ITCA	10758,9	2794,6
ITGA	8461,5	4222,6
JGBA	3491,2	1761,6
JNRA	10111,9	4427,2
JUZA	4157,1	785,9
MICA	4822,2	2289,9
PAOA	4804,4	2147,8
PLNA	17906,0	10123,6
PNMA	4728,9	1170,1
PPRA	16378,1	7535,1
PRBA	3234,6	1634,6
PRPA	2839,5	1381,6
PTGA	4371,0	1801,0
QIMA	11856,2	2893,6
SANA	8103,1	3548,8
SCRA	7145,4	2470,7
SFPA	1730,6	829,5
SJPA	7351,3	3784,6
SJRA	3861,7	2331,5
SMGA	3606,9	2785,3
SPMA	3444,7	2589,6
SRNA	2089,3	781,1
TANA	15134,9	5958,9
UPMA	3853,4	2215,0
URBA	6314,9	4371,1
VRZA	9819,9	4924,3
Média	7494,3	3310,5

APÊNDICE E.

Médias das temperaturas e chuva acumulada sob cenários atual e futuros

Tabela E.1. Temperatura máxima no ciclo da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, no cenário de clima atual (1980-2010) e nas projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), conforme simulado pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Atual	RCP4.5		RCP8.5	
	1980-2010	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
AMNA	30	31	32	32	33
ANDA	30	31	32	32	33
ARCA	28	29	29	29	31
BCRA	32	32	33	33	34
BQRA	28	29	29	29	30
BRMA	31	32	33	33	34
BRRA	33	34	34	34	36
BTZA	31	32	33	33	34
BVGA	32	32	33	33	34
CARA	32	33	34	33	35
CIPA	29	30	31	31	32
CRCA	33	34	34	34	36
CRRA	29	30	30	30	31
CTGA	32	33	34	34	36
CTPA	33	34	34	34	36
CURA	30	31	32	32	33
DLGA	28	29	29	29	30
FLRA	27	28	28	28	30
FLTA	28	29	29	30	31
FRMA	32	33	34	34	36
IACA	30	31	32	32	34
IBPA	32	34	34	34	35
IEMA	30	30	31	30	32
INHA	30	31	32	31	33
ITCA	31	32	33	33	35
ITGA	31	33	33	33	35
JGBA	32	33	34	34	35
JNRA	31	33	33	33	35
JUZA	30	31	32	32	34
MICA	30	31	31	31	33
PAOA	29	30	31	31	32
PLNA	28	29	30	30	31
PNMA	30	31	32	32	33
PPRA	30	31	31	31	33
PRBA	32	33	33	33	35
PRPA	33	34	34	34	36
PTGA	30	31	32	32	33
QIMA	31	32	32	32	34
SANA	32	33	34	34	36
SCRA	30	31	31	31	32
SFPA	33	34	35	35	36
SJPA	33	32	32	32	34
SJRA	32	33	33	33	35
SMGA	32	33	33	34	35
SPMA	32	33	33	34	35
SRNA	32	33	34	34	35
TANA	29	31	31	31	33
UPMA	32	33	33	33	35
URBA	30	31	31	31	33
VRZA	31	33	33	33	35
Média	31	32	32	32	34

Tabela E.2. Temperatura mínima no ciclo da mandioca, cultivar BRS Formosa, no cenário de clima atual (1980-2010) e nas projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), conforme simulado pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Atual	RCP4.5		RCP8.5	
	1980-2010	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
AMNA	19	20	21	21	22
ANDA	20	21	21	21	23
ARCA	20	21	21	21	23
BCRA	22	23	24	24	25
BQRA	20	21	21	21	23
BRMA	19	21	21	21	23
BRRA	22	23	23	23	25
BTZA	19	20	20	20	22
BVGA	22	23	23	23	25
CARA	20	21	21	21	23
CIPA	19	20	20	21	22
CRCA	20	21	22	22	24
CRRA	19	20	21	21	22
CTGA	20	21	22	22	23
CTPA	22	23	23	23	25
CURA	20	21	22	22	23
DLGA	19	19	20	20	21
FLRA	18	19	19	19	21
FLTA	19	20	20	21	22
FRMA	20	21	22	22	23
IACA	20	21	21	21	23
IBPA	22	23	24	24	25
IEMA	21	22	23	23	24
INHA	20	21	21	21	22
ITCA	20	21	21	21	23
ITGA	20	21	21	21	23
JGBA	22	23	23	23	25
JNRA	19	20	21	21	23
JUZA	20	21	22	22	23
MICA	20	21	21	22	23
PAOA	20	21	21	21	22
PLNA	18	19	19	20	21
PNMA	20	21	22	22	23
PPRA	21	22	22	22	23
PRBA	21	22	23	23	24
PRPA	22	23	23	23	25
PTGA	20	21	21	21	23
QIMA	21	22	22	22	23
SANA	20	21	22	22	23
SCRA	22	22	23	23	24
SFPA	21	23	23	23	25
SJPA	22	20	21	21	22
SJRA	21	22	22	22	24
SMGA	22	23	23	23	24
SPMA	21	22	23	23	25
SRNA	21	22	22	22	24
TANA	19	20	20	21	22
UPMA	22	23	23	24	25
URBA	22	23	23	23	24
VRZA	19	20	21	21	22
Média	20	21	22	22	23

Tabela E.3. Chuva acumulada no ciclo da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, no cenário de clima atual (1980-2010) e nas projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), conforme simulado pelo modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Atual	RCP4.5		RCP8.5	
	1980-2010	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
AMNA	1670	1580	1537	1562	1497
ANDA	1794	1646	1594	1567	1506
ARCA	644	577	549	556	518
BCRA	523	467	467	466	434
BQRA	317	297	289	284	263
BRMA	1319	1271	1223	1220	1196
BRRRA	664	619	589	616	565
BTZA	1814	1796	1801	1771	1802
BVGA	426	381	362	365	337
CARA	1425	1374	1341	1331	1353
CIPA	242	190	185	176	143
CRCA	495	497	475	477	458
CRRA	606	561	560	536	512
CTGA	1497	1457	1422	1416	1385
CTPA	516	476	456	463	435
CURA	149	142	134	130	129
DLGA	182	152	153	142	123
FLRA	368	328	305	311	288
FLTA	229	209	195	196	196
FRMA	1788	1659	1623	1617	1560
IACA	903	822	824	808	758
IBPA	961	933	889	900	840
IEMA	415	430	420	362	317
INHA	1248	1038	1001	993	859
ITCA	1085	1038	1015	991	969
ITGA	1248	1186	1144	1162	1155
JGBA	468	423	413	409	387
JNRA	1971	1866	1862	1812	1805
JUZA	122	113	114	112	110
MICA	374	347	351	337	324
PAOA	283	231	238	218	197
PLNA	1531	1392	1340	1373	1259
PNMA	245	219	206	204	198
PPRA	972	856	864	828	808
PRBA	383	357	337	334	324
PRPA	546	510	477	476	461
PTGA	320	299	287	284	284
QIMA	857	782	780	769	736
SANA	1409	1381	1349	1337	1336
SCRA	366	340	334	329	293
SFPA	273	253	239	243	239
SJPA	1624	1198	1154	1173	1158
SJRA	489	446	411	402	388
SMGA	548	491	471	486	457
SPMA	508	505	485	488	477
SRNA	223	214	204	207	202
TANA	981	927	900	900	877
UPMA	457	407	404	413	402
URBA	662	587	584	584	562
VRZA	1660	1618	1615	1607	1643
Média	796	738	719	715	690

APÊNDICE F.

Variação das produtividades sob projeções de cenários futuros

Tabela F.1. Variação da produtividade potencial, em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2010), simuladas com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-*Cassava*, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Produtividade atual	Variação da produtividade potencial (%)			
	(kg MS ha ⁻¹)	RCP4.5		RCP8.5	
	1980-2010	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
AMNA	14218	-15	-23	-21	-34
ANDA	13872	-17	-26	-20	-37
ARCA	5645	7	12	13	26
BCRA	4946	-2	-5	-3	-13
BQRA	7137	9	12	17	28
BRMA	11108	-25	-37	-33	-57
BRRA	3238	-20	-25	-20	-39
BTZA	11478	-25	-36	-27	-54
BVGA	4175	-11	-15	-16	-33
CARA	8691	-29	-43	-35	-61
CIPA	4528	0	-2	5	0
CRCA	2021	-19	-33	-31	-59
CRRA	21147	0	-2	6	0
CTGA	7448	-31	-46	-44	-67
CTPA	2990	-20	-25	-22	-43
CURA	5345	-4	-10	-10	-28
DLGA	5247	12	14	22	31
FLRA	5688	14	18	24	40
FLTA	6169	9	10	12	17
FRMA	7682	-26	-40	-38	-64
IACA	14600	-19	-24	-14	-40
IBPA	3515	-15	-18	-16	-32
IEMA	8220	2	2	11	14
INHA	15226	-13	-16	-6	-28
ITCA	10759	-26	-40	-36	-62
ITGA	8461	-22	-32	-26	-48
JGBA	3491	-14	-18	-20	-37
JNRA	10112	-30	-42	-35	-63
JUZA	4157	-9	-15	-15	-37
MICA	4822	-12	-14	-7	-33
PAOA	4804	2	1	10	9
PLNA	17906	-2	-8	-6	-16
PNMA	4729	-10	-17	-14	-34
PPRA	16378	-4	-8	-4	-12
PRBA	3235	-22	-30	-26	-48
PRPA	2839	-21	-28	-19	-44
PTGA	4371	-8	-14	-11	-30
QIMA	11856	-16	-23	-20	-36
SANA	8103	-28	-41	-39	-63
SCRA	7145	2	1	8	8
SFPA	1731	-29	-43	-34	-63
SJPA	7351	67	45	58	14
SJRA	3862	-17	-23	-23	-43
SMGA	3607	-16	-23	-22	-39
SPMA	3445	-15	-26	-25	-51
SRNA	2089	-28	-43	-35	-68
TANA	15135	-11	-19	-13	-32
UPMA	3853	-12	-19	-7	-25
URBA	6315	1	0	2	-4
VRZA	9820	-26	-40	-30	-57
Média	7494	-11	-18	-13	-29

Tabela F.2. Variação da produtividade atingível, em quilos de matéria seca (MS) por hectare, da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5), em relação ao período atual (1980-2010), simuladas com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Produtividade atual	Variação da produtividade atingível (%)			
	(kg MS ha ⁻¹)	RCP4.5		RCP8.5	
	1980-2010	2040-2070	2070-2100	2040-2070	2070-2100
AMNA	8958	-12	-24	-20	-39
ANDA	7249	-9	-24	-18	-41
ARCA	3637	13	12	14	23
BCRA	2866	8	5	9	3
BQRA	2902	18	15	22	20
BRMA	3508	-13	-30	-23	-50
BRRA	1703	0	-3	3	-12
BTZA	6539	-18	-32	-22	-49
BVGA	2592	0	-5	-8	-20
CARA	2858	-9	-28	-18	-42
CIPA	1757	-10	-11	-15	-30
CRCR	1613	-10	-23	-22	-50
CRRA	3856	11	10	14	19
CTGA	3932	-15	-32	-29	-54
CTPA	1372	7	1	7	-9
CURA	885	3	-7	-10	-23
DLGA	1380	4	11	4	15
FLRA	2251	7	3	8	12
FLTA	1527	-1	-10	-9	-8
FRMA	3650	-9	-24	-20	-47
IACA	2910	-14	-23	-11	-43
IBPA	3036	-6	-12	-8	-22
IEMA	3958	74	52	54	43
INHA	9024	-11	-15	-6	-30
ITCA	2795	-9	-29	-24	-52
ITGA	4223	-22	-37	-27	-50
JGBA	1762	0	-6	-7	-20
JNRA	4427	-21	-35	-27	-54
JUZA	786	-4	-9	-10	-25
MICA	2290	-2	-4	2	-28
PAOA	2148	-6	-1	-8	-9
PLNA	10124	-1	-11	-6	-26
PNMA	1170	-1	-12	-12	-26
PPRA	7535	-5	-6	-4	-6
PRBA	1635	0	-8	-7	-21
PRPA	1382	7	-4	2	-14
PTGA	1801	4	-2	-1	-11
QIMA	2894	-13	-23	-20	-42
SANA	3549	-8	-25	-22	-47
SCRA	2471	6	-1	9	-7
SFPA	829	-1	-11	-7	-26
SJPA	3785	63	31	48	5
SJRA	2332	-4	-14	-15	-31
SMGA	2785	-11	-19	-14	-29
SPMA	2590	-4	-14	-14	-37
SRNA	781	-7	-20	-16	-40
TANA	5959	-4	-18	-11	-35
UPMA	2215	4	-4	9	-5
URBA	4371	5	2	5	2
VRZA	4924	-17	-32	-23	-46
Média	3310	-1	-10	-6	-22

APÊNDICE G.

Médias do fator de estresse hídrico sob cenários atual e futuros

Tabela G.1. Médias e desvios padrão (DP) do fator de estresse hídrico (WFGD) durante o ciclo da cultura da mandioca, cultivar BRS Formosa, para o clima atual (1980-2010) e para as projeções de clima futuro a partir de sete MCGs, a médio (2040-2070) e longo (2070-2100) prazos, sob emissão intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) simuladas com o modelo DSSAT CSM-CROPSIM-Cassava, para 50 localidades do Semiárido Brasileiro.

Local	Atual		RCP4.5				RCP8.5			
	1980-2010		2040-2070		2070-2100		2040-2070		2070-2100	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
AMNA	0,24	0,36	0,24	0,36	0,25	0,37	0,24	0,36	0,27	0,38
ANDA	0,31	0,40	0,28	0,39	0,29	0,40	0,29	0,40	0,32	0,41
ARCA	0,31	0,41	0,31	0,41	0,35	0,42	0,34	0,42	0,37	0,42
BCRA	0,40	0,40	0,39	0,39	0,40	0,39	0,39	0,39	0,41	0,39
BQRA	0,39	0,40	0,38	0,40	0,39	0,40	0,40	0,40	0,42	0,40
BRMA	0,43	0,42	0,40	0,42	0,41	0,42	0,40	0,42	0,42	0,42
BRRA	0,52	0,44	0,51	0,43	0,53	0,43	0,52	0,43	0,55	0,43
BTZA	0,32	0,41	0,29	0,40	0,30	0,40	0,29	0,40	0,31	0,41
BVGA	0,45	0,45	0,46	0,45	0,48	0,45	0,47	0,45	0,51	0,45
CARA	0,44	0,42	0,40	0,42	0,41	0,42	0,40	0,42	0,43	0,42
CIPA	0,46	0,44	0,51	0,44	0,52	0,44	0,53	0,44	0,58	0,43
CRCA	0,35	0,41	0,33	0,40	0,35	0,41	0,35	0,41	0,37	0,41
CRRA	0,58	0,44	0,58	0,44	0,58	0,44	0,59	0,44	0,59	0,44
CTGA	0,34	0,42	0,33	0,42	0,34	0,43	0,34	0,43	0,37	0,42
CTPA	0,55	0,43	0,54	0,43	0,55	0,43	0,55	0,43	0,57	0,43
CURA	0,65	0,41	0,66	0,41	0,66	0,41	0,67	0,40	0,67	0,40
DLGA	0,52	0,45	0,56	0,45	0,56	0,45	0,57	0,45	0,60	0,43
FLRA	0,45	0,45	0,49	0,45	0,51	0,45	0,51	0,46	0,54	0,45
FLTA	0,59	0,43	0,61	0,43	0,62	0,43	0,62	0,43	0,63	0,42
FRMA	0,37	0,42	0,33	0,42	0,35	0,42	0,34	0,42	0,38	0,42
IACA	0,53	0,44	0,51	0,45	0,51	0,45	0,52	0,45	0,53	0,45
IBPA	0,32	0,41	0,32	0,41	0,35	0,41	0,35	0,41	0,39	0,42
IEMA	0,38	0,41	0,33	0,40	0,35	0,40	0,37	0,40	0,38	0,40
INHA	0,25	0,38	0,26	0,38	0,27	0,39	0,27	0,39	0,30	0,40
ITCA	0,47	0,42	0,43	0,42	0,44	0,42	0,43	0,42	0,46	0,41
ITGA	0,34	0,39	0,33	0,40	0,34	0,40	0,33	0,40	0,36	0,40
JGBA	0,51	0,42	0,51	0,42	0,53	0,42	0,52	0,42	0,54	0,42
JNRA	0,37	0,42	0,35	0,42	0,35	0,41	0,35	0,41	0,37	0,41
JUZA	0,61	0,37	0,62	0,37	0,62	0,38	0,62	0,38	0,63	0,37
MICA	0,37	0,40	0,38	0,41	0,38	0,41	0,40	0,41	0,42	0,41
PAOA	0,45	0,46	0,49	0,46	0,49	0,46	0,51	0,46	0,53	0,45
PLNA	0,26	0,38	0,27	0,39	0,29	0,40	0,27	0,39	0,32	0,41
PNMA	0,56	0,43	0,58	0,43	0,59	0,43	0,59	0,43	0,61	0,43
PPRA	0,35	0,41	0,36	0,42	0,34	0,41	0,36	0,42	0,35	0,41
PRBA	0,50	0,42	0,49	0,42	0,51	0,42	0,51	0,42	0,53	0,42
PRPA	0,53	0,43	0,51	0,43	0,53	0,43	0,53	0,43	0,55	0,43
PTGA	0,48	0,39	0,48	0,39	0,49	0,39	0,48	0,39	0,49	0,39
QIMA	0,49	0,43	0,47	0,44	0,47	0,44	0,47	0,44	0,48	0,44
SANA	0,38	0,43	0,35	0,42	0,37	0,43	0,36	0,43	0,39	0,42
SCRA	0,44	0,44	0,43	0,45	0,46	0,45	0,46	0,45	0,49	0,45
SFPA	0,57	0,40	0,57	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41	0,60	0,41
SJPA	0,40	0,43	0,37	0,43	0,38	0,43	0,38	0,42	0,40	0,43
SJRA	0,42	0,40	0,41	0,40	0,44	0,40	0,44	0,40	0,46	0,40
SMGA	0,36	0,40	0,38	0,40	0,38	0,40	0,37	0,41	0,41	0,41
SPMA	0,34	0,39	0,33	0,39	0,34	0,40	0,34	0,40	0,37	0,40
SRNA	0,55	0,38	0,55	0,38	0,56	0,38	0,55	0,38	0,58	0,39
TANA	0,41	0,40	0,39	0,41	0,39	0,41	0,39	0,41	0,40	0,42
UPMA	0,45	0,43	0,47	0,43	0,47	0,43	0,46	0,43	0,48	0,43
URBA	0,30	0,38	0,30	0,38	0,32	0,38	0,31	0,38	0,33	0,37
VRZA	0,37	0,42	0,34	0,42	0,34	0,42	0,34	0,42	0,35	0,42
Média	0,43	0,41	0,42	0,41	0,43	0,42	0,43	0,42	0,46	0,42