



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.09.13.39-TDI

**ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO
MILHO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, COM BASE NO
MODELO AQUACROP E PREVISÃO CLIMÁTICA
SAZONAL**

Minella Alves Martins

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Javier Tomasella, aprovada em 17 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NFUK32>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.09.13.39-TDI

**ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO
MILHO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, COM BASE NO
MODELO AQUACROP E PREVISÃO CLIMÁTICA
SAZONAL**

Minella Alves Martins

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Javier Tomasella, aprovada em 17 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NFUK32>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Martins, Minella Alves.

M366e Estimativa da produtividade da cultura do milho no semiárido brasileiro, com base no modelo aquacrop e previsão climática sazonal / Minella Alves Martins. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xviii + 115 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.09.13.39-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Javier Tomasella.

1. Milho. 2. Previsão de safra. 3. AquaCrop. 4. Eta. I.Título.

CDU 633.15:551.509.313(81)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Minella Alves Martins**

**"ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE D CULTURA DO MILHO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, COM
BASE NO MODELO AQUACROP E PREVISÃO CLIMÁTICA SAZONAL"**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em

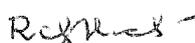
Ciência do Sistema Terrestre

Dr. Daniel Andrés Rodriguez



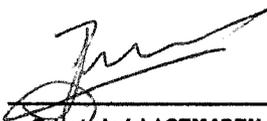
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá



Orientador(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Dr. Javier Tomasella



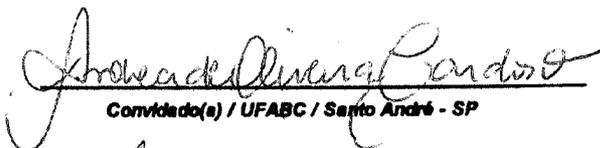
Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Angélica Giarolla



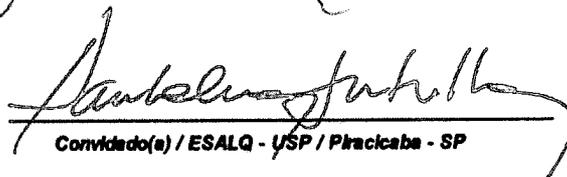
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Andréa de Oliveira Cardoso



Convidado(a) / UFABC / Santo André - SP

Dr. Paulo Cesar Sentelhas



Convidado(a) / ESALQ - USP / Piracicaba - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 17 de março de 2017

"If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants."

Isaac Newton, 1676.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar a convivência com pessoas maravilhosas que fizeram possível a realização deste trabalho.

A minha família, cujo apoio incondicional possibilitou alcançar mais essa conquista. Em especial, a minha Mãe, responsável por sempre me devolver a paz quando nos meus momentos de angústia e ansiedade; ao meu Pai (*in memoriam*), que sempre me incentivou na busca pelo saber; ao meu Padrasto, grande motivador dessa difícil, porém gratificante etapa; ao meu Irmão, a quem quero deixar bons exemplos de caminho a seguir; aos meus Avós, meu alicerce, os quais sempre apoiam meus objetivos, mesmo sem entender a real necessidade deles; ao meu Namorado, companheiro de boa parte desta jornada, amigo, conselheiro e braço forte em grande parte do desenvolvimento deste trabalho; aos amigos da “Turmis 2012” da PGCST pela ajuda e troca de experiências; e a todos os Amigos que sempre apoiaram essa caminhada.

Ao meu orientador, Dr. Javier Tomasella, meu carinho e admiração pelo profissional e pessoa que é. Sua confiança, paciência em ajudar e boa vontade em compartilhar seus conhecimentos tornaram possível a realização deste trabalho.

A minha orientadora, Dr^a Regina Alvalá, por acreditar neste trabalho, pelo incentivo e colaboração mesmo à distância.

À Dr^a Angélica Giarolla, Dr. Daniel Andrés e toda a equipe de Hidrologia do CCST, pelo acolhimento, amizade e valiosa ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

À Dr^a Chou Sin Chan e sua equipe pelo auxílio no entendimento do modelo Eta, em especial ao Luís Felipe Alves de Carvalho, pela paciência na aquisição dos dados do modelo.

Aos Drs. Camilo Andrade e Alexandre Barros, por compartilharem valiosos dados experimentais.

Aos membros da Banca Examinadora, profissionais respeitados que, muito contribuíram para enriquecer este trabalho.

Ao INPE, em especial à PGCST, aos pesquisadores e colaboradores pelo apoio e infraestrutura cedida.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Mudanças Climáticas (INCT-MC, Processo 573797/2008), projeto ao qual esta tese se vincula e à CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, COM BASE NO MODELO AQUACROP E PREVISÃO CLIMÁTICA SAZONAL.

RESUMO

A agricultura brasileira é conhecida por sua importante contribuição para a economia do país e também por sua participação no mercado mundial. Embora a maioria das regiões do país apresente altas produtividades agrícolas, isso não ocorre em grande parte da região semiárida do Brasil – SAB. Nesta região, agricultores de baixa renda normalmente cultivam em condições de sequeiro e têm baixos recursos tecnológicos e quase nenhum acesso ao capital. Uma vez que a agricultura praticada nessa região é utilizada para subsistência e alimentação animal, há uma estreita relação entre produtividade agrícola e segurança alimentar. Dessa forma, a capacidade de prever e monitorar a produção agrícola é crucial para subsidiar medidas de preparação e ações de mitigação quando necessárias. Nesse contexto, o presente estudo teve por objetivo demonstrar a viabilidade da utilização de previsões climáticas sazonais oriundas do modelo climático regional Eta, bem como do modelo de simulação de culturas agrícolas AquaCrop da FAO para prever a produtividade da cultura do milho na região SAB. O milho apresenta-se como um dos cereais mais importantes na alimentação humana e animal da região. Para calibrar o modelo AquaCrop e posteriormente validar as simulações foram utilizados dados de experimentos de campo de 13 municípios da região, contabilizando 37 safras no período de 1995-2010. Previsões climáticas do modelo Eta com resolução horizontal de 15 km foram disponibilizadas no período de 2001-2010. As variáveis do modelo Eta, como precipitação, temperaturas máxima e mínima e evapotranspiração foram corrigidas antes de serem incorporadas ao modelo AquaCrop. As propriedades físico-hídricas do solo foram obtidas por meio de funções de pedotransferência. Para simular um sistema operacional de previsão de safras foram utilizados dados meteorológicos observados em combinação com previsão climática sazonal para antecipar a previsão da safra. A calibração do modelo AquaCrop mostrou-se eficiente na remoção de erros sistemáticos, o que proporcionou boa precisão das estimativas de produtividade da cultura do milho para a região SAB. O modelo AquaCrop, alimentado com previsões climáticas sazonais, apresentou ótimo desempenho em prever a produtividade da cultura do milho na região SAB com, pelo menos, 30 dias antes da colheita. Em muitos dos municípios analisados, uma previsão com boa acurácia pode ser notado com até 60 dias de antecedência. As melhores previsões de produtividade da cultura do milho foram obtidas para a região LSAB, o que pode estar relacionado à frequência de ocorrência de eventos de precipitação daquela região. O sistema de previsão de safras apresentado no presente trabalho é uma ferramenta importante para subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas relacionadas à região SAB.

Palavras-Chave: Milho, Previsão de safra, AquaCrop, Eta.

MAIZE YIELD ESTIMATES IN THE BRAZILIAN SEMIARID THROUGH AQUACROP MODEL AND SEASONAL CLIMATE FORECAST

ABSTRACT

Brazilian agriculture is well-known for its significant role in the country's economy and because of its importance in global markets. Although most regions of the country have high crop yields, this is not the case in large areas of the semiarid of Brazil-BSA. Low-income farmers of the region usually grow crops under rainfed conditions have low technological resources and almost no access to capital. Since most of the production of poor farmers is used for self-consumption and animal feed, typically maize, there is a close link between crop yield and food security. In this way, the ability to predict and monitor crop yields throughout the growing season is crucial to decision makers for the preparation of mitigation actions when needed. In this regard, the aim of this study was to demonstrate the feasibility of using regional climate model Eta operational seasonal forecasts as input to the FAO' crop simulation model (AquaCrop) to predict maize crop yield in the BSA. To achieve this goal, field data from 37 controlled experiments in 13 municipalities were used to calibrate and validate the AquaCrop model, for the period from 1995 - 2010. Seasonal climate forecasts of precipitation, maximum and minimum temperature and evapotranspiration from 2001 through 2010 were bias corrected before use them in AquaCrop simulations. Soil hydraulic properties were derived from pedotransfer functions (PTFs). To simulate an operation crop forecast system, tat anticipate crop forecast, it was used seasonal climate forecast in combination with observed meteorological data. The calibration of the AquaCrop model proved to be efficient to remove systematic errors, which provided good precision of the maize yield estimates for BSA. The AquaCrop model estimates, using seasonal climate forecasts provided by Eta model, showed an excellent performance in predicting maize yield in the BSA with at least 30 days before harvest. In many of the municipalities analyzed, prediction with good accuracy can be achieved 60 days in advance. The best maize forecasts occurred in the EBSA region, related to the frequency of precipitation events in that region. The crop forecasting system presented in this study is a valuable tool to support the development of public policies related to the BSA region.

Keywords: Maize, Crop forecast, AquaCrop, Eta RCM.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Divisão política municipal da região Semiárida do Brasil. _____	6
Figura 2.2 - Divisão climática da região Nordeste do Brasil. _____	8
Figura 2.3 - Fases do ciclo fenológico da cultura do milho _____	13
Figura 2.4 - Produtividade média da cultura de milho no período de 2000 a 2015 no Brasil, nas regiões geográficas e no semiárido brasileiro – SAB. _____	14
Figura 2.5 - Esquema da discretização em pontos de grade do modelo atmosférico Eta _____	21
Figura 2.6 - Esquema de simulação do AquaCrop com indicação das 4 principais etapas e processos contabilizados. _____	23
Figura 3.1 - Área de estudo _____	29
Figura 3.2 - Postos meteorológico e pluviométrico disponíveis para aquisição de dados _____	31
Figura 3.3 - Localização dos perfis de solo. _____	34
Figura 3.4 - Relações funcionais utilizados no balanço hídrico. _____	37
Figura 3.5 - Representação de correção de bias da modelo Eta para a variável precipitação. _____	41
Figura 3.6 - Esquema de desenvolvimento do sistema de previsão de safras. _____	44
Figura 4.1 - Propriedades associadas às texturas dos solos, utilizadas no presente estudo. _____	49
Figura 4.2 - Caracterização Climática e do Balanço de Água no Solo para o Período de 2001-2009. _____	56
Figura 4.3 - Representação do clima de cada município estudado através do Diagrama de Budyko. _____	59
Figura 4.4 - Erro sistemático representado pela diferença entre as curvas de frequência observadas e previstas pelo modelo climático Eta, sendo precipitação (coluna da direita) e evapotranspiração de referência (coluna da esquerda). _____	61
Figura 4.5 - Relação entre produtividades de milho observada e simulada. _____	64
Figura 4.6 - Previsões quinzenais de produtividade de milho e previsões mensais de precipitação para o município de Ipanguaçu - RN no ano de 2007. _____	69
Figura 4.7 - Previsões quinzenais de produtividade de milho e previsões mensais de precipitação para o município de Simão Dias - SE no ano de 2004. _____	70
Figura 4.8 - Previsões quinzenais de produtividade de milho e previsões mensais de precipitação para o município de Presidente Dutra - BA no ano de 2006. _____	71
Figura 4.9 - Previsões quinzenais de produtividade de milho dada por cada um dos 5 membros do modelo climático Eta. _____	74
Figura 4.10 - Média dos erros de previsão de produtividade e desvio padrão dos membros em função dos dias antes da colheita (antecedência). _____	79
Figura 4.11 - Precipitação e lâmina de água no solo para os anos de (a) 2003 e (b)2007. _____	84
Figura 4.12 - Produtividades de milho previstas no decorrer dos ciclos de crescimento para os municípios de Caruaru - PE em um ano seco (2003) e de Frei Paulo - SE, considerando um ano úmido (2007). _____	85
Figura 4.13 - Comparativo entre as produtividades de milho para cada experimento/município por ano, observadas em experimentos de campo (dados EMBRAPA), estimadas pelo modelo AquaCrop e estimativas médias divulgadas na PAM-IBGE. _____	87

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Caracterização dos municípios avaliados no presente estudo.	30
Tabela 3.2 - Conjunto de dados experimentais com indicativos de localização, ano, data do plantio e produtividade observado.....	32
Tabela 3.3 - Critérios de interpretação do índice de confiança.	46
Tabela 4.1 - Classificação e parâmetros hídricos dos solos para cada município avaliado.	51
Tabela 4.2 - Conjunto de dados experimentais apresentando as datas de plantio estimadas para os municípios que não dispunham desta informação.	57
Tabela 4.3 - Parâmetros calibrados para a cultura do milho no modelo AquaCrop.....	63
Tabela 4.4 - Descritores estatísticos do conjunto de dados utilizados na calibração e validação do desempenho do AquaCrop.....	64
Tabela 4.5 - Índices estatísticos de desempenho da calibração e validação do modelo AquaCrop.	65
Tabela 4.6 - Resumo da média dos erros de previsão e desvio padrão -DP para as 4 principais datas de previsão para cada uma das três regiões climáticas.	81
Tabela 4.7 - Frequência relativa média de episódios chuvosos durante a estação chuvosa 2001-2009.	83

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipótese	4
1.2 Objetivo Geral.....	4
1.2.1 Objetivos Específicos	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 A Região Semiárida Brasileira - SAB.....	5
2.2 Efeitos Agrícolas e Sociais da Seca no SAB.	9
2.3 O Cultivo de Milho no SAB	12
2.4 Monitoramento de Produção Agrícola.....	15
2.5 Previsão Sazonal de Produtividade Agrícola.....	19
2.6 O Modelo Climático Regional Eta.....	20
2.7 O Modelo de Simulação Agrícola AquaCrop	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Área de Estudo.....	29
3.2 Dados Meteorológicos	30
3.3 Dados da Cultura do Milho.....	31
3.4 Métodos	33
3.4.1 Obtenção dos Parâmetros dos Solos por Meio de Funções de Pedotransferência.....	33
3.4.2 Determinação do Período Chuvoso Através do Balanço Hídrico.....	35
3.4.3 Simulações do modelo Eta	38
3.4.4 Estimativa de Evapotranspiração de Referência.....	41
3.4.5 Calibração do Modelo AquaCrop.....	42
3.4.6 Sistema de Previsão de Produtividade Agrícola.....	43
3.4.7 Avaliação das Simulações de Produtividade de milho	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1 Caracterização e Parâmetros dos Solos.....	49
1.2 Identificação das Datas de Plantio	54
4.3 Avaliação dos Erros Sistemáticos das Variáveis Prognósticas do Modelo Eta	60
4.4 Calibração e Validação das Previsões do Modelo AquaCrop.....	62
4.5 Avaliação do Sistema de Previsão Sazonal de Produtividade de Milho.....	67
4.5.1 Avaliação das Previsões de Produtividade Milho por Experimento.....	67
4.5.2 Avaliação das Previsões de Produtividade de Milho Agrupadas por Região Climática. 78	
4.6 Sistema de Previsão Sazonal de Produtividade de Milho no SAB: Um Estudo de Caso Avaliando um Ano Seco (2003) e um Ano Úmido (2007).	84
4.7 Desafios Científicos e Tecnológicos para a Implantação de um Sistema de Previsão de Safras do Semiárido.	86
5. CONCLUSÕES.....	91
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A: Dados complementares	111
APÊNDICE B: Resultados complementares	113

1. INTRODUÇÃO

Modelos de produtividade agrícola têm sido bastante utilizados como ferramentas para auxiliar pesquisadores, tomadores de decisão e agricultores a melhorar o gerenciamento das atividades agrícolas, em particular para otimizar datas de plantio e colheita, estimar a produtividade esperada, bem como para entender os efeitos das mudanças climáticas sobre os cultivos agrícolas (BOOTE et al., 1996; VAN ITTERSUM et al., 2003; SUGUITANI, 2006).

Como o clima é o fator que mais influencia a produtividade das culturas, nas últimas décadas muitos estudos, utilizando experimentos de campo e modelagem numérica, focaram no entendimento das interações entre o clima e a agricultura (GREATREX, 2012). A informação climática é crucial para prever não somente a produtividade das culturas, mas para definir datas de plantio ótimas, para definir a viabilidade econômica de diferentes práticas de manejo da cultura e para subsidiar decisões a fim de maximizar a produção.

A agricultura brasileira é reconhecida por sua importante contribuição para a economia do país, representando, de forma direta, aproximadamente 15% do Produto Interno Bruto - PIB (CEPEA, 2015), e também por sua presença notória no mercado global. Apesar de muitas regiões do país apresentar altas produtividades agrícolas, tal padrão não é observado em todo o território brasileiro, em especial na extensa área conhecida como região Semiárida localizada na parte Nordeste do Brasil.

Agricultores de baixa renda da região semiárida geralmente cultivam sob regime de sequeiro, com uso de baixa tecnologia e praticamente sem acesso a vultosos recursos financeiros. Sob estas condições, a produtividade das culturas é impactada pela alta variabilidade intrasazonal e interanual das chuvas que caracterizam o Semiárido Brasileiro.

Uma vez que os cultivos são utilizados para a subsistência das famílias de pequenos agricultores e para a alimentação animal, há uma forte relação entre produtividade agrícola e insegurança alimentar em áreas rurais. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), a região Nordeste apresenta a situação mais crítica do país em termos de segurança alimentar, sendo que 38% da população apresentam sinais de restrição alimentar na dieta básica.

Embora a produção agrícola no Semiárido Brasileiro (SAB) tenha pouca relevância para o cenário econômico nacional, as recorrentes secas que afetam a região desencadeiam impactos sociais que inclusive extrapolam os limites da região semiárida, uma vez que a região é densamente povoada, 23 hab.km⁻², e com uma população de mais de 22 milhões de habitantes (IBGE, 2010).

As consequências decorrentes da ocorrência de secas prolongadas no Semiárido são as mais variadas, desde a desestruturação da já frágil economia da região, por se basear principalmente na exploração agropecuária; rompimento das relações familiares e sociais, em parte pela migração forçada para outras áreas (dentro ou fora do Semiárido) na busca por oportunidades de trabalho remunerado; escassez de alimentos; e até pelos impactos ambientais produzidos, que vão desde a perda da biodiversidade até o processo de desertificação (MEDEIROS et al., 2013).

Estatisticamente, no Nordeste do Brasil ocorrem de 18 a 20 secas severas a cada 100 anos, tendo sido registradas, no século XX, 27 secas severas na região (MARENGO, 2001). Para minimizar os efeitos das secas, o governo brasileiro tem implementado ações emergenciais e políticas de mitigação contra os efeitos da seca, tais como linhas de crédito para pequenos agricultores, bolsa estiagem¹, garantia safra², venda de milho para alimentação animal a preços subsidiados, distribuição de água através de caminhões pipa para abastecimento doméstico e ações de infraestrutura, como a construção de cisternas para armazenar água ou capturar a água da chuva e perfuração de poços. Somente durante a seca ocorrida nos anos de 2012-2013, o total de gastos do governo com tais ações chegou a US\$ 5 bilhões (BRASIL, 2013).

Todas essas ações requerem uma preparação prévia para cumprir requisitos legais, como declaração de estado de emergência, dotação orçamentária governamental e aprovação dos

¹Bolsa Estiagem: auxílio emergencial, é um benefício federal instituído com o objetivo de assistir famílias de agricultores familiares com renda mensal média de até 2 (dois) salários mínimos, atingidas por desastres no Distrito Federal e nos municípios em estado de calamidade pública ou em situação de emergência reconhecidos pelo Governo Federal, mediante portaria do Ministro de Estado da Integração Nacional. Lei 10.954, de 29 de setembro de 2004 (BRASIL, 2004).

² Garantia Safra: é uma ação do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar - PRONAF voltada para os agricultores familiares localizados na área de atuação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE, majoritariamente semiárida, que sofrem perdas de, pelos menos, 50% da produção agrícola por motivo de seca ou excesso de chuvas. Lei nº 10.420, de 10 de abril de 2002 (BRASIL, 2002).

contratos privados. Mesmo havendo uma longa experiência no Brasil envolvendo ações emergenciais contra os efeitos da seca, ainda se faz necessário um planejamento antecipado, uma vez que os padrões espaciais e temporais das secas na região variam de um caso para outro e, conseqüentemente, ações de mitigação precisam ser adaptadas às circunstâncias.

Neste contexto, quanto maior a antecedência de previsão de uma seca, mais eficiente e eficaz será o uso de recursos públicos em ações emergenciais. Considerando que a segurança alimentar no Semiárido é fortemente dependente da agricultura de sequeiro, a habilidade em prever e monitorar a produtividade de culturas agrícolas durante seu ciclo fenológico é crucial para subsidiar os tomadores de decisão na implementação de ações de mitigação, quando necessárias.

O monitoramento de secas na região Nordeste do Brasil, atualmente, é baseado em uma combinação de dados em tempo real de uma rede de postos pluviométricos e previsões sazonais com até três meses de antecedência (SOUZA et al., 2001), além de índices de estado da vegetação, como o desenvolvido por Cunha et al. (2015). Baseado em mapas de anomalias de chuvas observadas, as áreas com déficit de precipitação são identificadas, e utilizando índices de vegetação e uma avaliação qualitativa da previsão climática sazonal, relatórios de secas são produzidos. No entanto, o monitoramento atual apresenta limitações no que tange à falta de avaliação quantitativa dos impactos de uma seca, em particular, como por exemplo, qual a queda de produtividade agrícola esperada se um determinado cenário de seca ocorrer.

Posto isto, no presente trabalho visa-se demonstrar a viabilidade do uso operacional de previsões climáticas sazonais e do modelo de simulação de culturas AquaCrop para prever a produtividade da cultura do milho na região Semiárida do Brasil. O milho é um importante componente da alimentação humana e animal na região Semiárida e a previsão antecipada de sua produtividade pode contribuir para melhorar o planejamento das ações de mitigação.

1.1 Hipótese

O uso de previsão climática sazonal para alimentar modelos de produtividade agrícola é viável para antecipar a previsão de safras de milho no Semiárido Brasileiro.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade operacional de um sistema para previsão de produtividade de milho na região semiárida do Brasil usando o modelo AquaCrop alimentado por previsões sazonais do modelo atmosférico Eta, com até quatro meses de antecedência, visando seu uso em sistema de alerta de colapso de produção de milho.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Calibrar o modelo de produtividade agrícola AquaCrop para estimar a produtividade da cultura de milho na região semiárida do Brasil e avaliar seu desempenho.
- Avaliar as previsões provenientes do modelo atmosférico Eta com resolução horizontal de 15 km.
- Examinar a capacidade preditiva do modelo AquaCrop quando alimentado pelas previsões sazonais do modelo atmosférico Eta para antecedências de até 4 meses da colheita.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Região Semiárida Brasileira - SAB

A região Semiárida do Brasil localiza-se em sua maior parte na região Nordeste -NEB englobando ainda a parte norte do Estado de Minas Gerais. Esta região conta com uma área de cerca de 980.000 km², representando 12% do território brasileiro, e abriga, 46% da população do Nordeste e 13% da população brasileira (IBGE, 2010).

Trata-se da região Semiárida mais populosa e povoada do planeta (22 milhões de habitantes e 23 hab.km⁻²), no entanto, com condições sociais bastante peculiares. Caracteriza-se como a região mais pobre do Brasil, apresentando em média 40% da população ainda vivendo na linha da pobreza³ (PNUD, 2010) e também por apresentar os piores índices sociais e econômicos do Brasil. Por exemplo, o Índice de Desenvolvimento Humano – IDH é de 0,59; enquanto aproximadamente 50% de sua população total não tem renda ou depende de benefícios do governo, outros 30% recebem menos que R\$ 800,00 por mês (PNUD, 2013).

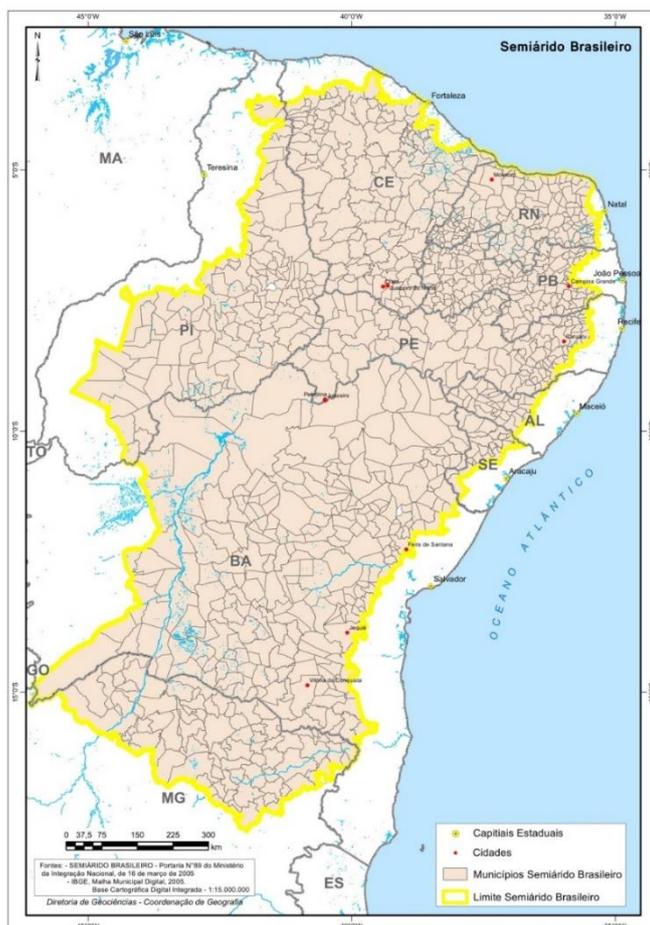
Devido às diferentes características climáticas do seu território e com o objetivo de subsidiar políticas públicas, o Ministério da Integração Nacional delimitou, em 2005, a área geográfica de abrangência do semiárido brasileiro. Esta delimitação se deu devido à constatação de que somente o índice pluviométrico dos municípios seria insuficiente para excluir um ou mais deles da região.

Dessa forma, a área hoje pertencente ao semiárido brasileiro abrange os municípios que se adequam a um dos três critérios (BRASIL, 2005): i) Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros, ii) Índice de aridez de até 0,5, calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990 e, iii) Risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

³ Linha da Pobreza: Porcentagem da população vivendo com menos que U\$1.90 por dia per capita (Banco Mundial, 2016).

Portanto, em decorrência dessa nova delimitação, a região semiárida contabiliza 1133 municípios, conforme apresentado na Figura 2.1:

Figura 2.1 - Divisão política municipal da região Semiárida do Brasil.



Fonte: IBGE (2005).

O clima dos municípios da região é predominantemente dos tipos As, Aw e Bsh, descritos, respectivamente, como tropical com verão seco, tropical com inverno seco e semiárido de acordo com a classificação climática de Köppen para o Brasil realizada por Alvares et al. (2013). De modo geral, a média anual de precipitação é abaixo de 800 mm, insolação de 2800 h.ano⁻¹, temperatura média entre 23°C e 27° C, evaporação de 2000 mm.ano⁻¹ e umidade relativa do ar de 50% (MOURA et al. 2007).

Dentre os sistemas meteorológicos que influenciam a variabilidade sazonal da precipitação no Nordeste citam-se a Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, caracterizada por uma

banda de nebulosidade no sentido Leste-Oeste sobre a região tropical (MOLION; BERNARDO, 2002). Este mecanismo é formado por um conjunto de variáveis meteorológicas que atuam na região equatorial: zona de confluência dos alísios (alísios de Nordeste e alísios de Sudeste), região do cavado equatorial, áreas de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM), áreas de máxima convergência de massa e a banda de máxima cobertura de nuvens convectivas (MELO; CAVALCANTI; SOUZA, 2009). Quando esse sistema se desloca no sentido Norte-Sul, de cerca de 10°N-14°N em agosto-setembro para cerca de 4°S, durante março e abril, é responsável pelas chuvas na faixa Norte do Nordeste (MOLION; BERNADO, 2002).

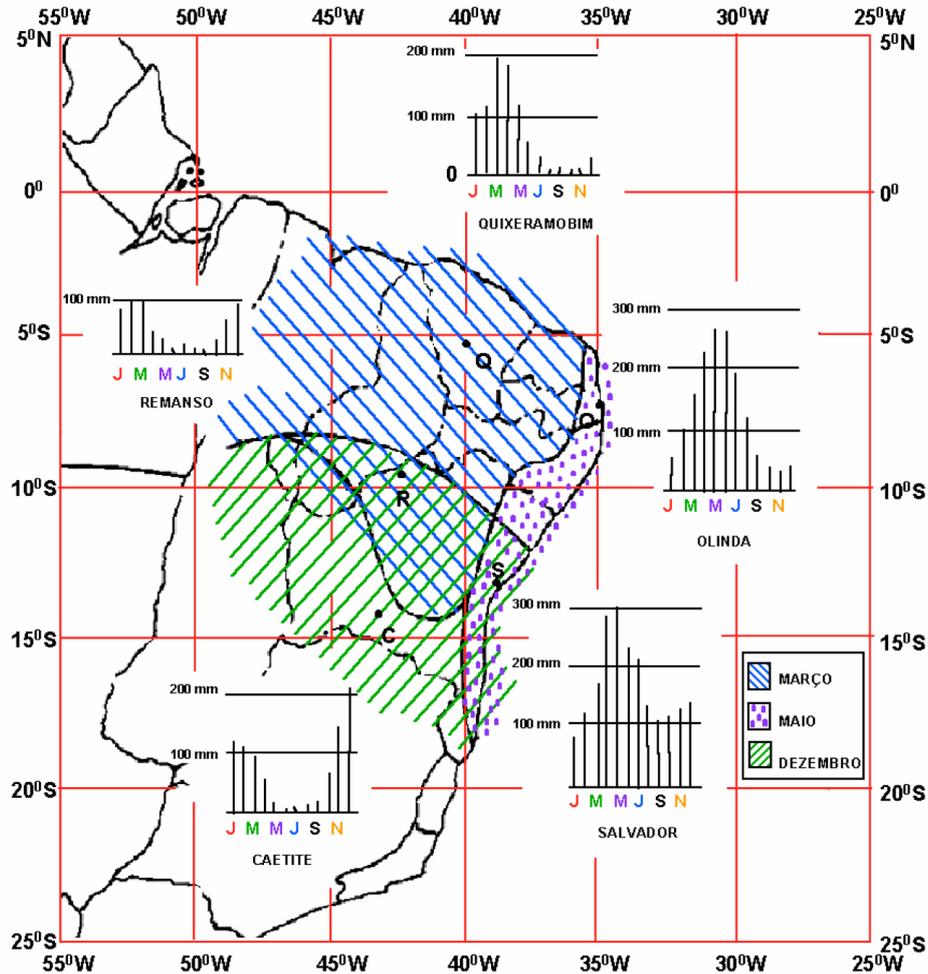
Os Sistemas Frontais - SF são também responsáveis pela precipitação na região, principalmente, em sua faixa Sul (KOUSKY, 1979). Este mecanismo tem origem em latitudes altas e médias e podem atingir a região Equatorial. Segundo Virji e Kousky (1983), os SF são frequentes no verão e se caracterizam pela grande variabilidade interanual.

Como principal mecanismo gerador de chuvas na faixa leste do Nordeste, citam-se os Distúrbios Ondulatórios de Leste. Estes se caracterizam por ondas que se propagam desde o Oeste da África até o Atlântico tropical (MACHADO et al. 2009) e atingem o NEB no período de março a agosto, quando as ondas apresentam amplitudes maiores e propagação de fase de forma mais organizada (CHOU, 1990).

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) são sistemas de baixa pressão e altos níveis que também exercem influência sobre a precipitação na região (GAN, 1982). Apresentam maior frequência em Janeiro (KOUSKY; GAN, 1981). As chuvas formadas por este sistema são decorrentes dos movimentos ascendentes na borda do vórtice; portanto, o local de precipitação depende da posição do centro do vórtice (GAN, 1982).

Devido ao fato destes sistemas meteorológicos atuarem sobre a região em épocas distintas do ano, Kousky (1979) propôs uma divisão climática para esta região considerando a época do ano que cada sistema atuava em uma determinada região, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Divisão climática da região Nordeste do Brasil.



Fonte: Adaptado de Kousky (1979) e Climanálise (1986).

Dessa forma, na faixa Sul do Nordeste, a precipitação é causada em sua maior parte por sistemas frontais vindos da região Sul do Brasil e seguindo em direção à região Equatorial; na faixa Norte do Nordeste as chuvas são produzidas por uma combinação entre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a circulação de brisas marítimas, enquanto na faixa Leste os sistemas meteorológicos mais comuns associados à precipitação são as ondas de leste (HASTENRATH; HELLER, 1977; KOUSKY; CHU, 1978; KOUSKY, 1979;1980).

Como principais determinantes da variabilidade interanual de precipitação no NEB citam-se o El Niño – Oscilação Sul – ENOS e o Dipolo do Atlântico Tropical. Ambos os fenômenos são causados pela oscilação da temperatura da superfície do mar - TSM no Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical, respectivamente. A fase quente do ENOS e a fase positiva

do Dipolo são propensas à ocorrência de anos secos na região semiárida, devido a mudanças no padrão de circulação atmosférico, enquanto uma configuração inversa destes sistemas favorece a ocorrência de anos chuvosos (MOURA; SHUKLA, 1981; ROPELEWSKI; HALPERT 1989; SERRA, 1941).

A região semiárida caracteriza-se ainda pela predominância do bioma caatinga e solos com baixa capacidade de armazenamento de água, associado aos perfis naturalmente rasos, oriundos da formação geológica que lhes deu origem, conhecida como cristalino (SOUZA et al., 2001).

A economia da região concentra-se na atividade agropecuária, principalmente associada aos 40% da população que ainda residem na zona rural (MEDEIROS et al., 2012). Dentre as atividades agropecuárias citam-se a criação de bovinos, caprinos e ovinos e cultivos de milho, feijão e mandioca (IBGE, 2006).

Portanto, devido à grande dependência da agropecuária como uma das principais atividades econômicas da região e pelo fato desta estar estreitamente relacionada às condições climáticas, o SAB é considerado como uma das regiões mais vulneráveis do país (SIMÕES et al, 2010).

2.2 Efeitos Agrícolas e Sociais da Seca no SAB.

Dentre os impactos da seca que contribuem para uma maior fragilidade da população que habita áreas semiáridas, citam-se os de ordem ambiental, econômica, política e social (CARVALHO, 2012; WILHITE et al., 2014).

Embora as secas que afetam a região Semiárida do Brasil sejam sentidas apenas marginalmente na economia do país, elas afetam de maneira drástica a população daquela região, conforme destacado por Marengo et al. (2016). Estes autores relataram o histórico das secas ocorridas desde meados do Século XVIII até os dias atuais e destacam que, embora algumas medidas tenham sido tomadas pelos governos para mitigar os impactos, ainda existe uma percepção de que a população da região ainda não está adaptada.

Os impactos da seca resultam em complicações notórias e potencialmente devastadoras para as comunidades que vivem em regiões impactadas pelas estiagens, com tais efeitos sendo sentidos de forma desproporcional pelos setores mais vulneráveis da população, sobretudo os pequenos produtores e agricultores familiares (MORRISON, 2010).

Segundo Martins e Magalhães (2015), a natureza das respostas durante período de secas caracteriza-se não só pela fragilidade na infraestrutura, mas, sobretudo, na gestão de curto, médio e longo prazo, bem como na necessidade de se repensar o desenvolvimento econômico de regiões já ambientalmente vulneráveis.

No que tange à produção agrícola no Nordeste Brasileiro, Sietz et al. (2006) fizeram uma análise dos efeitos da seca, abordando dois pontos principais: i) redução direta da produtividade e ii) redução da máxima produtividade sustentável. Enquanto para estes autores a redução da produtividade torna o trabalho em atividades agrícolas menos atraente, por outro lado, a redução do limite de máxima produtividade acarreta risco de sobre uso da terra, levando à degradação dos recursos e, conseqüentemente, à redução dos lucros das atividades agrícolas. Ambos os pontos citados levam os agricultores à procura por atividades não agrícolas e, assim, aumenta-se o êxodo rural destas áreas.

Conforme também salientado por Martins e Magalhães (2015), a migração para outros municípios ainda é uma prática recorrente e, conseqüentemente, sobrecarrega os sistemas de saúde, segurança e assistência social dos municípios que recebem os migrantes.

No caso do SAB, somente no ano de 2012, quando se iniciou o ciclo de seca que perdura até os dias atuais, houve aproximadamente 80% de perda na produção agrícola da região (CONAB, 2012). Além da perda na produção agrícola, foram relatadas também mortes de animais e desabastecimento da população.

Campos (2015), que fizeram uma análise da evolução das políticas públicas no Nordeste Brasileiro ao analisar os efeitos da seca de 2012-2013 concluíram que a população que depende da agricultura de sequeiro na região continua tão vulnerável à seca quanto era no início do século XX. No entanto, os efeitos da seca na população têm se atenuado, em partes, devido aos programas de transferência de renda implementados pelo governo.

Estes mesmos autores concluíram que não houve mudanças abruptas nas políticas públicas ao longo do tempo, mas, na maneira como o governo, técnicos, cientistas e sociedade implementam soluções contra os efeitos da seca.

Por outro lado, nas análises reportadas por Martins e Magalhães (2015), relacionadas à seca de 2012-2015, destacam-se a não efetividade dessas mudanças. Casos de dificuldades de acesso à crédito; o alto grau de endividamento individual, bem como problemas no cadastramento, na implementação e no atraso no pagamento do Seguro Safra, representaram grande impacto nas economias locais.

Além das políticas do governo, organizações civis também reúnem esforços no sentido de contribuir com ações de adaptação para o SAB. Por exemplo, a Articulação do Semiárido Brasileiro – ASA implementou em 1999 o Programa 1 Milhão de Cisternas, cujo objetivo foi construir um milhão de cisternas para armazenamento de água da chuva coletada através de calhas, fixadas no telhado das casas (FONSECA et al. 2014). Outros programas de organizações não governamentais visam contribuir para uma melhor adaptação dos efeitos da seca na população do semiárido.

Apesar das ações governamentais e não governamentais de enfrentamento da seca contribuírem para amenizar os efeitos sentidos pela população rural, muitas famílias ainda sofrem com a perda da produção agrícola e pecuária, levando à redução das provisões alimentares e interrupção da atividade pela falta de recursos financeiros e, conseqüentemente, levando a um ciclo de manutenção da pobreza.

Embora diversas ações de adaptação estejam sendo implementadas no SAB, elas não são suficientes para evitar perdas na agricultura, indicando que um melhor e mais específico planejamento poderia ser a “chave” para melhorar a capacidade adaptativa e, conseqüentemente, reduzir a vulnerabilidade.

Sietz (2014) sugeriu que ações provenientes de políticas públicas, instituições e o uso de tecnologias são importantes para estimular o desenvolvimento sustentável em áreas secas. Dessa forma, o acompanhamento e operacionalização de medidas para amenizar os efeitos das secas são imprescindíveis para garantir o acesso contínuo aos recursos no Semiárido Brasileiro, propiciando segurança alimentar mesmo frente às adversidades climáticas.

2.3 O Cultivo de Milho no SAB

O semiárido brasileiro se caracteriza pelos baixos índices de produção e de produtividade das lavouras, influenciados principalmente pelos baixos índices pluviométricos, e ainda pela irregularidade espacial e temporal das chuvas, além de altos níveis de evapotranspiração. No entanto, a região é caracterizada por altas temperaturas e radiação solar durante a maior parte do ano, condições favoráveis ao cultivo de determinadas culturas.

O milho (*Zea mays L.*) é um exemplo de cultura que responde positivamente à radiação solar por pertencer ao grupo de culturas com metabolismo fotossintético C4. A radiação solar é de extrema importância para essas culturas, sem a qual o processo fotossintético é inibido e a planta é impedida de expressar seu máximo potencial produtivo, sendo que cerca de 90% da matéria seca dessas culturas provém da fixação de CO₂ no processo de fotossíntese (MAGALHÃES; SOUZA, 2011), os outros 10% são provenientes da absorção de nutrientes.

A temperatura ótima para a cultura do milho varia de acordo com os diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento da planta, sendo a temperatura média ideal compreendida entre 24°C e 30°C (LANDAU et al., 2009). No entanto, temperaturas noturnas acima de 24°C proporcionam um aumento da respiração e conseqüente redução da taxa de fotoassimilados e redução da produção (LANDAU et al., 2009).

O milho pode ser cultivado em regiões cuja precipitação média anual varia de 300 a 5000 mm, sendo que para completar seu ciclo fenológico a cultura tem uma necessidade hídrica de aproximadamente 600 mm (ALDRICH et al., 1982). Segundo Landau et al. (2009), a demanda hídrica da cultura do milho nas fases iniciais de crescimento, num clima quente e seco, raramente excede 2,5 mm/dia. Na fase compreendida entre o espigamento e a maturação, o consumo pode se elevar para 5 a 7,5 mm/dia. No entanto, se a temperatura estiver muito elevada e a umidade do ar muito baixa, o consumo poderá chegar até 10 mm/dia.

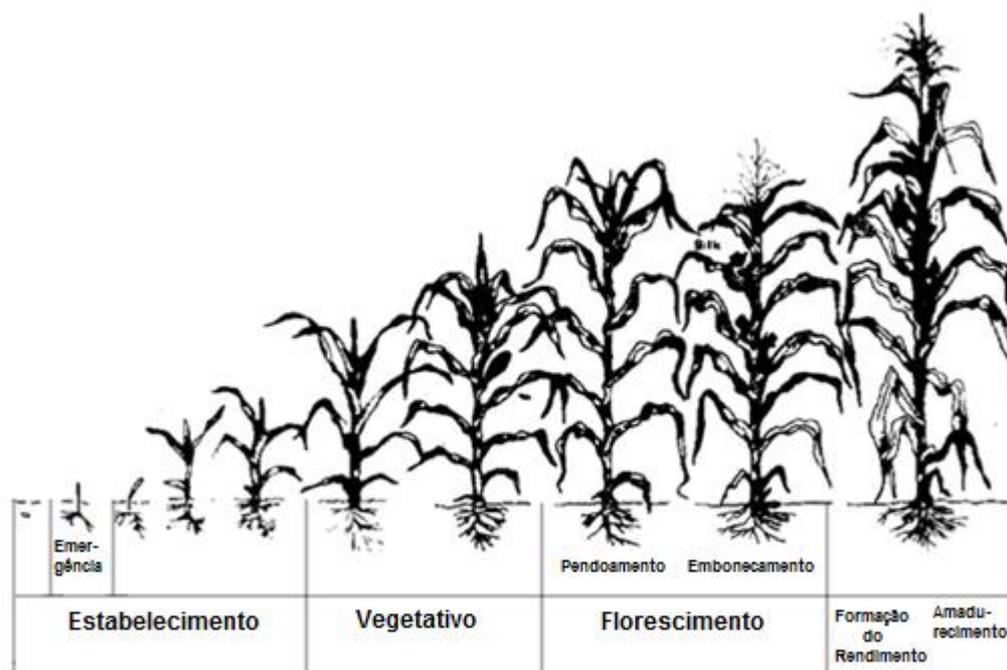
No período que vai do florescimento à maturação, a cultura apresenta grande sensibilidade, sendo que uma estiagem nessa fase causa a redução do número de grãos por espiga, e, conseqüentemente, redução da produtividade final (BERGAMASCHI, et al., 2004;2006).

Magalhães et al. (2002) destacam, ainda, que um déficit hídrico da ordem de 2 dias durante a fase de florescimento ocasiona queda de produtividade em mais de 20% e que, de quatro a oito dias sem o devido suprimento hídrico pode comprometer a produtividade em mais de 50%.

O milho apresenta grande diversidade de usos, destacando-se pela relevante importância do ponto de vista econômico e social. No semiárido brasileiro é o principal cereal utilizado para alimentação humana e animal, contribuindo ainda com a geração de empregos no setor primário, além do milho ser uma matéria-prima indispensável para impulsionar diversos complexos agroindustriais locais (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

No tocante à fenologia da cultura do milho, esta é dividida em fases, as quais caracterizam o crescimento e desenvolvimento da cultura e são importantes por determinar períodos de maior vulnerabilidade da cultura às condições edafoclimáticas. Na figura 2.3 ilustram-se as principais fases do ciclo fenológico do milho.

Figura 2.3 - Fases do ciclo fenológico da cultura do milho

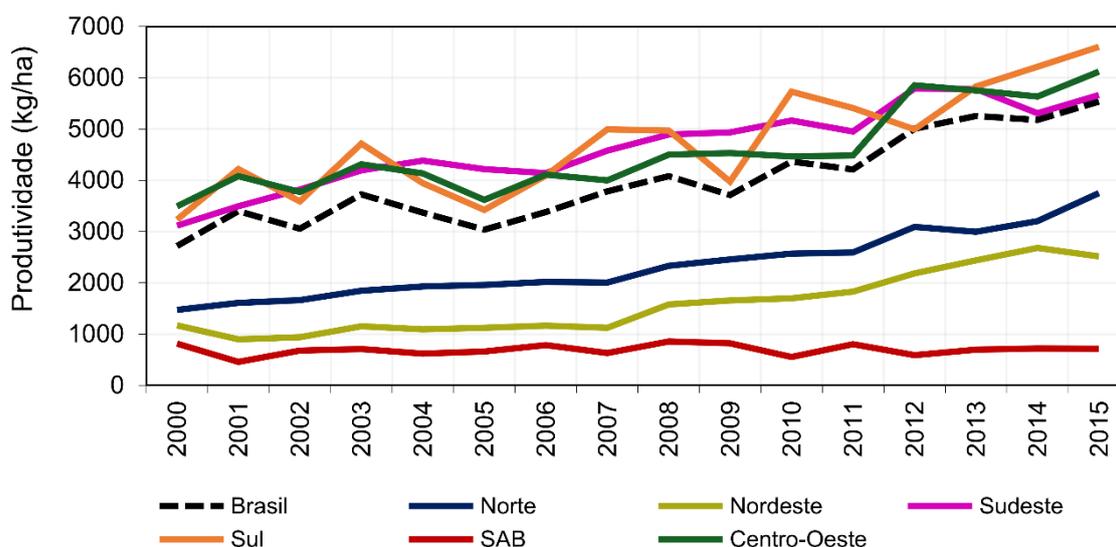


Fonte: Adaptado de Raes et al. (2011)

Entre as culturas de cereais, o milho tem o mais alto potencial produtivo, podendo ser explorado nos trópicos e nos subtropicais, inclusive em regiões semiáridas em condições adequadas de água e fertilidade do solo (FIGUEREDO JR., 2004).

No entanto, mesmo com a disseminação de cultivares de milho cada vez mais adaptadas à região, a produtividade na região semiárida brasileira é muito aquém daquela obtida em outras regiões do país, conforme pode ser verificado na Figura 2.4, em que se apresenta a série de produtividade de milho proveniente da base de dados de Produção Agrícola Municipal, no período de 2000 a 2015, para a região semiárida e um comparativo com as demais regiões brasileiras.

Figura 2.4 - Produtividade média da cultura de milho no período de 2000 a 2015 no Brasil, nas regiões geográficas e no semiárido brasileiro – SAB.



Fonte: Produção da autora com base em dados da Pesquisa Agrícola Municipal – PAM (IBGE, 2016).

O fato de a produtividade de milho no SAB apresentar uma tendência praticamente nula no decorrer do tempo se deve, principalmente, à vulnerabilidade dos cultivos frente ao regime de precipitação, solos pobres e baixo nível tecnológico utilizado para manejo. O cenário de vulnerabilidade e riscos de produção de milho no SAB apresenta-se como um dos principais desafios do país, uma vez que as baixas produtividades refletem na segurança alimentar da população que lá reside, conduzindo também a outros impactos, conforme citados no tópico 2.2.

2.4 Monitoramento de Produção Agrícola.

O conhecimento da produção agrícola e da sua distribuição no espaço geográfico são informações imprescindíveis para o planejamento estratégico do país, além de subsidiar formulação de políticas públicas, abastecimento e a segurança alimentar da população e a formação de preços nos mercados interno e externo (MARIN, 2003; SANTOS; CAMARGO, 2006).

Em diversos países o monitoramento agrícola das culturas baseia-se tanto em métodos subjetivos como é o caso do *National Agricultural Statistics Service -NASS* do *United States Departure of Agricultural – USDA*, que realiza estimativa mensal de safras para os Estados Unidos e vários países do mundo (VOGEL; BANGE, 2012), quanto em métodos objetivos, como o *China Crop Watch System -CCWS*⁴, na China, *National Drought Policy - NDP*⁵, na Austrália e *Monitoring of Agriculture with Remote Sensing -MARS*⁶ na União Europeia, os quais utilizam modelos de produtividade juntamente com o monitoramento via sensoriamento remoto, avaliando o potencial da produção de acordo com as condições meteorológicas e ainda com foco na situação de segurança alimentar.

No Brasil, a produção agrícola é avaliada por várias instituições. Por exemplo, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE que divulga mensalmente o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA e anualmente a Produção Agrícola Municipal - PAM, enquanto a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB publica mensalmente o Acompanhamento da Safra Brasileira.

O LSPA contempla uma pesquisa de previsão e acompanhamento das safras agrícolas, fornecendo estimativas de área, produção e produtividade média, desde a fase de intenção de plantio até o final da colheita. Durante a fase de intenção de plantio são levantadas informações sobre a demanda de insumos agrícolas (sementes, fertilizantes, corretivos, etc.) e outras, junto aos produtores, associações de classe e cooperativas. Com base nas informações obtidas, é realizada a primeira estimativa da área a ser plantada e, utilizando-se

⁴ <http://www.cropwatch.com.cn/en/>

⁵ <http://www.daff.gov.au/agriculture-food/drought>

⁶ <http://mars.jrc.ec.europa.eu/>

a média das produtividades normais alcançadas nas últimas safras, é estimada a produção esperada. Nas fases subsequentes, é feita a verificação da área realmente plantada, e efetuada a estimativa da produção esperada com base nas produtividades normais obtidas nas últimas safras. São ainda levadas em consideração as condições climáticas, levantamentos e observações de campo a cada mês, sobre o comportamento da cultura em face de ocorrências climáticas e/ou fitossanitárias (IBGE, 2002).

Conforme mencionado, o IBGE divulga ainda a Produção Agrícola Municipal - PAM uma estimativa anual da produtividade média de cada cultura por município. A pesquisa utiliza-se de questionários aplicados por agentes da instituição aos técnicos do setor agrícola, produtores, e, ainda, agrega informações do próprio conhecimento que o agente possui sobre as atividades agrícolas dos municípios ou região onde atua. O PAM leva também em consideração as previsões mensais feitas no LSPA, visando balizar e definir os dados a serem registrados no questionário da PAM (IBGE, 2002).

A PAM é a publicação mais detalhada em relação à produção agrícola no Brasil, uma vez que as informações são disponibilizadas para todo o Território Nacional em nível municipal.

Por outro lado, o Acompanhamento da Safra Brasileira realizado pela CONAB utiliza também, além de uma abordagem subjetiva similar àquela adotada no LSPA e PAM, metodologias que envolvem trabalhos de campo, sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e modelos estatísticos, agrometeorológicos e espectrais, que são aplicados para a obtenção das estimativas de áreas e produtividades (CONAB, 2015).

Ambas as instituições acima citadas divulgam seus prognósticos para as grandes regiões brasileiras assim como para cada um dos Estados, não permitindo uma análise por municípios. Enquanto, por um lado, há facilidade na coleta de dados, quando se trabalha com metodologias subjetivas (ADAMI, 2004), por outro, a obtenção de previsões confiáveis é difícil, onerosa e lenta conforme alertado por Fontana (2001).

Como metodologias indiretas de monitoramento da produção agrícola mais focada na região Nordeste do Brasil e com atenção especial às peculiaridades do Semiárido, pode-se citar o Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste – PROCLIMA (SOUZA et al. 2001). Trata-se de uma iniciativa do Governo Federal para monitorar a

estação úmida no Nordeste Brasileiro. O PROCLIMA é executado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE e pelos Estados da Região Nordeste, Minas Gerais e Espírito Santo, através dos núcleos e laboratórios estaduais participantes do antigo Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH) do Ministério da Ciência e Tecnologia. Um dos produtos gerados pelo PROCLIMA é o número de dias com déficit hídrico durante o período chuvoso, que é uma boa referência do comportamento da precipitação pluviométrica, em quantidade e regularidade, como também do possível impacto sobre as atividades agrícolas podendo assim ser considerado, como um indicador da vulnerabilidade da agricultura (MARENGO, 2008).

Mais recentemente, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais-CEMADEN, do Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, também têm reunido esforços com o intuito de monitorar os efeitos da seca sobre a produção agrícola, em especial para auxiliar a Secretaria de Agricultura Familiar (SAF) do Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA), como subsídio ao Programa Garantia Safra no âmbito do Decreto Presidencial Nº 8.472, de 22 de junho de 2015. Um dos índices especialmente utilizados é o Índice de Suprimento de água para vegetação – VSWI (CUNHA et al., 2015). Este índice é derivado de dados de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e temperatura do dossel, oriundos do sensor MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA, com resolução de 1km. Uma das adaptações efetuadas para a aplicação do índice VSWI como indicador de impacto da seca consistiu em calcular o índice apenas para áreas de atividades agropecuárias (pastagens e cultivos agrícolas), excluindo assim áreas urbanas, corpos d'água e vegetação natural (caatinga, cerrado, etc). Tal índice compõe o monitoramento de secas em tempo real para o Semiárido do Brasil e indica condição de seca baseando-se na variação do NDVI. Um baixo valor de NDVI indica baixa atividade fotossintética, enquanto a temperatura do dossel alta indica condição de estresse hídrico (Cunha et al, 2015).

Outro esforço em desenvolvimento é o Monitor de Secas (MARTINS et al. 2015), resultado da articulação entre diversas instituições federais e estaduais (Agência Nacional de Águas - ANA, Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos- INEMA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, CPTEC/INPE, dentre outras. O Monitor

de Secas apresenta, em mapas, a categorização da situação atual da seca para os Estados da região Nordeste do Brasil. Tais mapas são derivados de um trabalho colaborativo entre as instituições, por meio da análise e validação de indicadores meteorológicos, hidrológicos e agrícolas.

No entanto, os produtos gerados atualmente pelo PROCLIMA/CPTEC/INPE, pelo CEMADEN e pelo Monitor de Secas são indicadores indiretos da possível frustração de safras, necessitando, para aplicação direta, de uma ferramenta que indique de forma mais precisa a quantificação deste valor.

Especificamente para a região SAB, a importância de métodos objetivos para estimar e monitorar safras agrícolas se justifica em razão das características pluviométricas da região, visto que a precipitação apresenta uma grande variabilidade temporal e espacial e, a ocorrência de chuvas, por si só, não garante que as culturas de subsistência sejam bem-sucedidas. Conforme destacado em Marengo (2008), uma seca intensa durante a estação chuvosa, ou uma precipitação intensa ou excessiva na mesma época, podem ter impactos bastante negativos na economia regional e nacional, uma vez que é preciso que o governo federal interfira a fim de implantar ações para mitigar os danos e reduzir o prejuízo.

Tanto as metodologias via sensoriamento remoto, quanto os modelos de produtividade agrícola podem ser considerados métodos objetivos para estimativas de safras. No entanto, para o Semiárido, o monitoramento via sensoriamento remoto pode ser comprometido pelo efeito da seca verde. Morrison (2010) explica que, o fenômeno de Seca Verde é a combinação da precipitação adequada para a caatinga florescer, porém falta a regularidade necessária para sustentar as safras alimentares. Ou seja, as informações provenientes do sensoriamento remoto podem indicar uma vegetação em estado vigoroso enquanto isso se aplica somente à vegetação nativa (no caso, a caatinga).

Para a região SAB não há métodos operacionais que estimem diretamente a produtividade das culturas, em sua maioria voltadas à subsistência da população e sob regime de sequeiro.

Vale ressaltar que o Zoneamento Agrícola de Risco Climático, divulgado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2008; 2017), mesmo não sendo uma ferramenta de monitoramento da produção agrícola, é um dos principais instrumentos para

gestão de risco para agricultura no Brasil. Através deste, é possível indicar, para cada município, a melhor época de plantio para cada cultura, evitando perdas decorrentes de fatores climáticos, como, por exemplo, déficit de precipitação.

2.5 Previsão Sazonal de Produtividade Agrícola

Ao tratar de métodos diretos de previsão de safra agrícola, Cardoso et al. (2010) sugeriram que o uso de previsões meteorológicas gera estimativas de produtividade agrícola mais confiáveis durante o período de crescimento da cultura, se comparadas com aquelas geradas somente com dados climatológicos.

No entanto, a eficiência de um sistema de previsão de produtividade agrícola está relacionada com a habilidade do modelo atmosférico em prever a precipitação, a temperatura e outras variáveis meteorológicas utilizadas como dados de entrada em modelos de produtividade agrícola. Muitos estudos avaliaram o uso de modelos atmosféricos sazonais em modelos de produtividade, visando maior antecipação e previsibilidade das safras, como por exemplo, Hansen e Indeje (2006); Vieira Júnior et al (2009); Cardoso et al. (2010); Oettli et al. (2013); Dumont et al. (2015); Chipanshi et al. (2015).

Para Hasen (2005) e Littell et al. (2011), quanto mais precisa e antecipada for a previsão de produtividade, maior o potencial de auxílio aos tomadores de decisão na identificação de potenciais riscos e benefícios para aumentar a produção agrícola e para avaliar as incertezas, principalmente durante épocas em que a produção é incerta ou em regiões onde a produção é altamente variável, como é o caso de regiões semiáridas.

Os benefícios do uso de previsões climáticas sazonais foram observados para diversas culturas, incluindo-se o milho, bem como diferentes métodos utilizados para fornecer a previsão climática. Por exemplo, Zinyengere et al. (2011) utilizaram previsões climáticas acopladas ao modelo AquaCrop para desenvolver uma plataforma operacional de suporte à tomada de decisão para o cultivo do milho no Zimbábue, baseando-se nas fases do El Niño Oscilação Sul -ENOS. Dessa forma, os agricultores podem conhecer a produtividade atingível dependendo da fase do ENOS, do ciclo da cultivar utilizada e da data de plantio.

Para a previsão de safras no SAB, agregar informações sobre a fase do ENOS pode contribuir para melhorar a previsão, uma vez que este fenômeno meteorológico influencia de forma significativa a precipitação na região.

Com o propósito de verificar a viabilidade da construção de um sistema de previsão para auxiliar na redução do risco na produção agrícola, Malherbe et al. (2014) utilizaram saídas de um modelo acoplado oceano-atmosfera para prever a produtividade de milho no Nordeste da África do Sul. Apesar do modelo apresentar uma tendência em superestimar a produtividade de milho na região, os autores destacaram seu potencial para uso em um ambiente operacional.

Darani et al (2015) e Bussay et al. (2015) também realizaram estudos similares, tendo destacado a boa previsão de produtividade para a cevada no Irã, com 90 dias de antecedência, e para o milho na Hungria, com 35 a 60 dias de antecedência, respectivamente.

Capa-Morocho et al. (2016) também avaliaram o uso de modelos de simulação e previsão climática sazonal para melhorar a previsibilidade de milho e trigo na Península Ibérica. Estes autores demonstraram a viabilidade do uso de tal metodologia e seu potencial uso para tomada de decisão, especialmente sob a situação de previsão de secas ou de baixos índices pluviométricos.

Apesar da importância e eficiência demonstrada em diversos estudos sobre a previsão de produtividade agrícola, nenhum estudo foi ainda desenvolvido para analisar o potencial de operacionalização de um sistema de previsão agrícola sazonal em benefício de pequenos agricultores e preparação de políticas públicas no Brasil.

Dessa forma, nos dois tópicos subsequentes são apresentados os modelos atmosférico Eta e o modelo de simulação de culturas agrícolas AquaCrop utilizados no presente trabalho, a fim de avaliar seus usos em um sistema para previsão de produtividade de milho para o SAB.

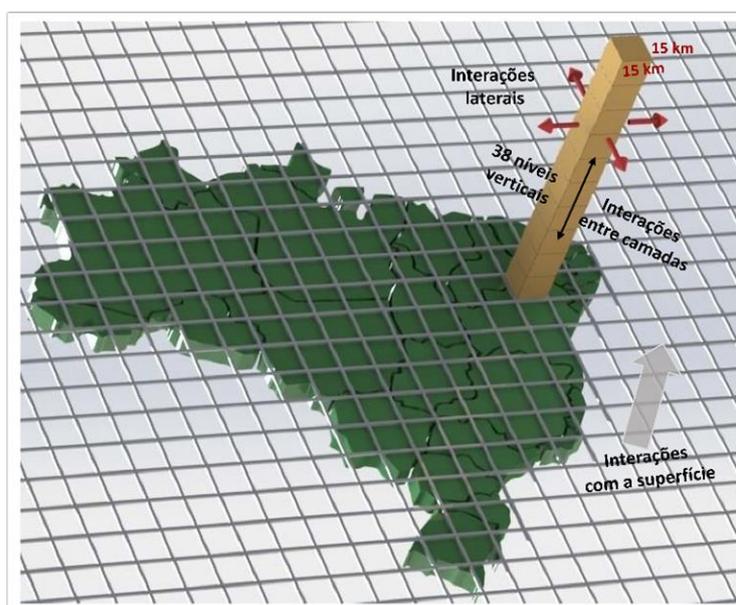
2.6 O Modelo Climático Regional Eta

O Modelo atmosférico Eta (BLACK, 1994; MESINGER et al., 1988) foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado e o Instituto Hidrometeorológico da antiga Iugoslávia e,

posteriormente, foi operacionalizado pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). No Brasil, o Modelo Eta é utilizado operacionalmente no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos para previsões de curto prazo desde 1996 (MESINGER et al., 2012), para previsões sazonais desde 2002 (CHOU et al., 2014a) e para subsidiar estudos de mudanças climáticas (Chou et al. 2014b), apresentando como domínio a América do Sul e os oceanos adjacentes.

O modelo Eta representa o estado atmosférico através da discretização em pontos de grade, conforme ilustrado na Figura 2.5. Uma das principais vantagens do modelo é a coordenada vertical Eta, caracterizando a estabilidade numérica (MESINGER et al., 1990). As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, umidade, pressão à superfície, vento horizontal, energia cinética turbulenta, precipitação, dentre outras, previstas em intervalos de seis horas.

Figura 2.5 - Esquema da discretização em pontos de grade do modelo atmosférico Eta



Fonte: Produção da autora.

As previsões do modelo Eta sazonal foram avaliadas em diversos estudos, como no de Bustamante et al. (1999); de Chou et al. (2005); de Fennessy e Shukla (2000); de Seluchi e Chou (2001), destacando-se, mesmo com algumas limitações, as constantes melhorias.

Aplicações das previsões meteorológicas sazonais são importantes em diversos setores, no entanto, para o setor agrícola estas previsões ainda são pouco utilizadas.

A aplicação do modelo atmosférico Eta para o setor agrícola se justifica, uma vez que estudos têm demonstrado boas simulações das variáveis meteorológicas em escalas sazonais e intrasazonais (CHOU et al., 2000; BUSTAMANTE et. al., 2002; TANAJURA, 1996), sugerindo seu uso e bom desempenho em modelos de culturas. Alguns autores avaliaram o uso do modelo Eta, tanto a previsão de tempo quanto a de clima, para uso em modelos de culturas. Dentre eles cita-se o trabalho de Vieira Jr. et al. (2009) que analisaram as previsões meteorológicas do modelo Eta, na resolução de 40 Km, para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil, comparando as séries históricas de chuvas e temperaturas de 1997 a 2002, com as previsões de 30, 60 e 120 dias de antecedência do modelo. Os resultados indicaram que o modelo Eta subestimou as temperaturas máximas do ar e superestimou as temperaturas mínimas e que as precipitações pluviárias médias diárias foram subestimadas. Estes autores sugerem que, apesar do modelo apresentar erros sistemáticos, estes erros podem ser removidos para que os valores corrigidos possam ser introduzidos nos modelos de culturas.

Cardoso et al. (2010) alertaram a importância de se estimar os erros das previsões de variáveis climáticas antes da aplicação em modelos de culturas, visto que as interações destas previsões com modelos de culturas podem ser não lineares e os erros dos resultados se tornam de difícil identificação. Estes mesmos autores avaliaram a possibilidade do uso de previsões meteorológicas de curto prazo para uso em modelo de cultura com a finalidade de prever a produtividade de soja na região Sul do Brasil, confirmando a importância do uso das previsões de até 15 dias para uma estimativa de produção mais confiável que comparada às estimativas usando somente informações climatológicas. Estes autores destacam ainda que, com o decorrer do ciclo da cultura, o uso de previsões de precipitação combinada com dados climatológicos apresenta melhoria significativa na previsão final de produtividade, permitindo identificar fases críticas para a cultura durante o ciclo fenológico.

Ressalta-se que, para o proposto no presente trabalho, o uso de previsões de longo prazo se mostra mais adequado que previsões de curto prazo, pois ações de mitigação contra colapsos de safra exigem preparação, principalmente por parte do governo e, portanto, quanto mais tempo hábil para planejamento e execução mais efetivas serão as ações.

2.7 O Modelo de Simulação Agrícola AquaCrop

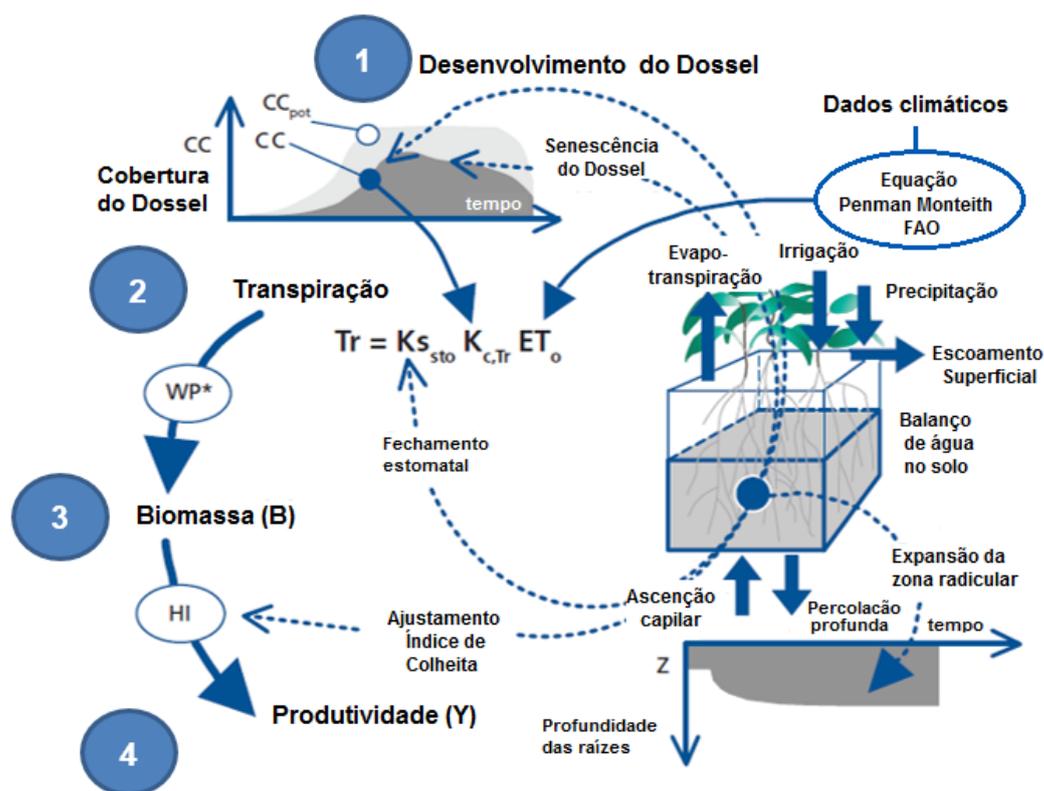
O AquaCrop é um modelo de simulação de produtividade de culturas, desenvolvido pela *Food and Agricultural Organization - FAO*, o qual é uma revisão do *FAO-Irrigation and Drainage Paper 33 - Yield Response to water* (DOORENBOS et al., 1979). Raes et al. (2009) e Stetuto et al. (2009) introduziram o AquaCrop para simular a produtividade potencial em função de várias condições hídricas.

Este modelo foi calibrado para diferentes culturas, como milho (HSIAO et al., 2009), algodão (GARCÍA-VILA; FERERES, 2012), cevada (ABRHA et al., 2012) e outras treze culturas herbáceas e frutíferas (STETUTO et al., 2012). Foi amplamente avaliado para diferentes ambientes e condições climáticas, inclusive para culturas sob o regime de sequeiro.

O esquema de funcionamento do AquaCrop está representado na Figura 2.6, indicando os principais processos e variáveis contabilizadas do sistema solo-planta-atmosfera para estimar as produtividades das culturas.

Seguindo o esquema apresentado na Figura 2.6, o modelo AquaCrop estima a produtividade final das culturas em basicamente 4 etapas, conforme descrito em FAO (2016): desenvolvimento do dossel, transpiração da cultura, acúmulo de biomassa, produtividade final.

Figura 2.6 - Esquema de simulação do AquaCrop com indicação das 4 principais etapas e processos contabilizados.



Fonte: Adaptado de Raes et al. (2011).

O AquaCrop tem como processo condutor o balanço de água no solo. No decorrer do ciclo a quantidade de água armazenada no solo é simulada por balanço hídrico. A redução de água na zona radicular determina a magnitude do estresse hídrico afetando a expansão da cobertura do dossel – CC, condutância estomatal e transpiração - T_R , senescência do dossel e índice de colheita – HI. **O desenvolvimento do dossel (1)** é obtido através da cobertura verde do dossel -CC e não por meio do Índice de Área Foliar (IAF). A cobertura do dossel é a fração da superfície do solo coberta pelo dossel. Esta varia de zero na semeadura até um valor máximo, geralmente na metade do ciclo. Ao ajustar o teor de água no perfil do solo, o AquaCrop registra o estresse possível de ocorrer na zona radicular e reflete este sinal na expansão do dossel. Caso o estresse hídrico seja severo este pode induzir uma senescência precoce; assim, a cobertura do dossel simulada será menor que a cobertura do dossel potencial – CC_{pot}.

Para condições de suprimento ideal de água no solo, a **transpiração** -Tr (2) é calculada ao multiplicar a evapotranspiração de referência – Eto pelo coeficiente de transpiração da cultura -K_{CTR}. O K_{CTR} é proporcional ao CC e, portanto, é ajustado continuamente no decorrer do ciclo. O estresse hídrico além de afetar o desenvolvimento do dossel, pode também induzir o fechamento dos estômatos (através do K_{ssto}, que é o coeficiente de estresse por fechamento estomatal) e, conseqüentemente, afetar a transpiração da cultura.

A **biomassa acumulada** -B (3) é proporcional ao acúmulo de transpiração. O fator de proporcionalidade é conhecido como produtividade de água normalizada (WP). A produtividade de água é a razão entre produção de biomassa (Kg) e a quantidade de água consumida pela cultura (m³) (PEREIRA et al., 2002). A WP é normalizada para o efeito das condições climáticas, fazendo com que a produtividade de água normalizada (WP*) seja válida em diversas localidades, estações e concentrações de CO₂

No final do ciclo da cultura, a **produtividade final** -Y (4) é calculada como o produto da biomassa simulada e do índice de colheita ajustado -HI_{adj}. A biomassa simulada integra todos os produtos fotossintéticos assimilados pela cultura durante o ciclo, enquanto o HI_{adj} é ajustado durante a simulação ao contabilizar os efeitos de estresses.

As variáveis de entrada do modelo AquaCrop são relacionadas ao clima, cultura, solo e práticas de manejo (RAES et al., 2009). Dessa forma, o modelo gera arquivos contendo informações sobre: crescimento e produtividade da cultura, balanço de água no solo, conteúdo de água no solo e irrigação requerida, se for o caso. A descrição completa das bases e princípios conceituais do modelo AquaCrop são encontrados em Stetuto et al. (2012).

No tocante ao desempenho do AquaCrop, Andarzian (2011) simulou a produtividade do trigo (*Triticum aestivum* L.) em condições de pleno suprimento de água e déficit hídrico em um ambiente quente e seco no sul do Irã, tendo concluído que o modelo AquaCrop foi capaz de simular satisfatoriamente o conteúdo de água na zona radicular, biomassa e produtividade dos grãos, com um erro menor que 10% (RMSE<10%), bem como o modelo foi capaz de determinar a mínima quantidade de água necessária para suprir a demanda evaporativa da atmosfera e obter alta eficiência no uso de água para anos úmidos, normais e secos.

Estudos como o de Andarzian (2011) são de extrema importância para ambientes com restrição hídrica, pois permitem encontrar um valor mínimo necessário ao desenvolvimento ótimo da cultura. De forma análoga, a região Semiárida brasileira também é caracterizada por alta variabilidade entre anos secos, normais e úmidos. Assim, a quantificação da necessidade hídrica é importante no planejamento agrícola em qualquer região e, principalmente, em regiões semiáridas.

Para regiões Semiáridas, podem-se citar ainda os estudos desenvolvidos por Mkhabela e Bullock (2012), para o Oeste do Canadá; por Ngetich et al (2012), para o Quênia; por Mebane et al. (2013), para a Pensilvânia, USA; e por Shamsnia e Pirmoradian (2013), para o Sul do Irã.

O bom desempenho do modelo em regiões com restrição hídrica pode ser atribuído ao fato dele relacionar diretamente a produtividade da cultura ao consumo de água, e estimar a produção de biomassa a partir da transpiração da cultura obtida pelo parâmetro de produtividade hídrica normalizado, que é o núcleo motor do modelo (STETUTO et al., 2012).

De acordo com Ngetich et al. (2012), mesmo em regiões Semiáridas, sob restrição hídrica, o AquaCrop tem apresentado alta confiabilidade para simular a produtividade de grãos e biomassa, o que implica que, quando devidamente calibrado, ele pode ser utilizado para o desenvolvimento de estratégias para melhoria de decisões de gestão em campo por pequenos agricultores, auxiliando na redução dos riscos da produção agrícola.

Também avaliando o desempenho do modelo AquaCrop em ambientes com restrições hídricas, muitos outros estudos encontraram boa acurácia na simulação. Citam-se, entre eles, os de Mkhabela e Bullock (2012), que avaliaram a produtividade de trigo em regime de sequeiro em localidades do Prairie Canadense, região em sua maior parte caracterizada pelo clima semiárido; de Mebane (2013), que avaliaram a produtividade de grãos de milho em regime de sequeiro na Pensilvânia, EUA; e o de Shamsnia (2013), que simularam a produtividade de trigo de sequeiro em Shiraz, no Irã, região com média anual pluviométrica inferior a 330 mm.

Outros estudos mais recentes também avaliaram o modelo AquaCrop, os quais apresentaram bons resultados de simulação como pode ser constatado em Mhizha et al. (2014), para o Zimbábwe, e em Akumaga et al., (2017), para a Nigéria.

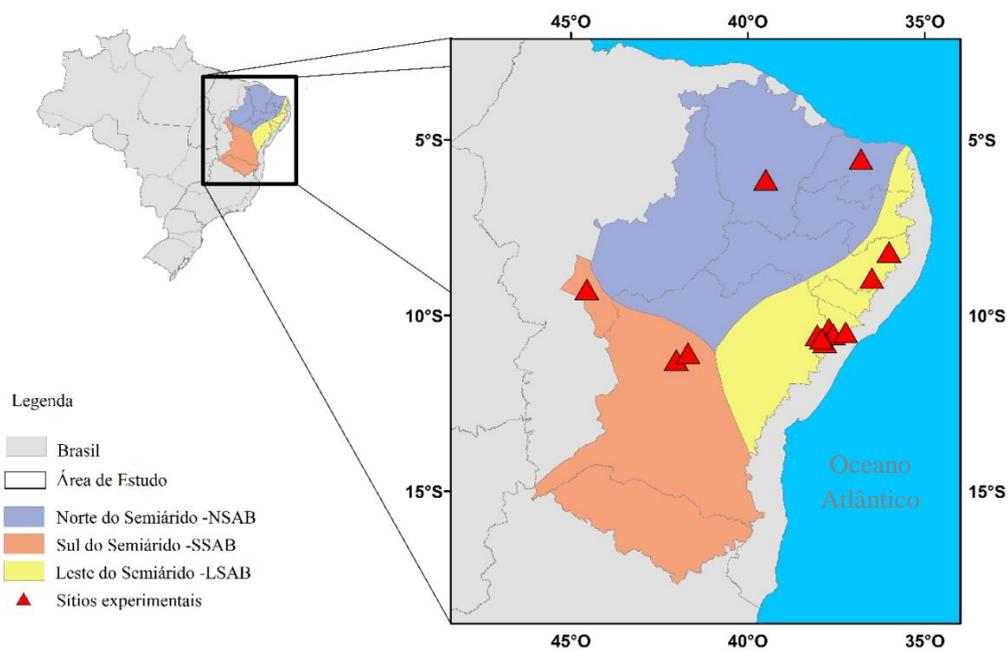
No Brasil, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos avaliando-se o modelo AquaCrop. Para a cultura do milho, cita-se o trabalho de Anjos (2011), que demonstrou que o AquaCrop é eficiente para a previsão de milho, com 18 dias de antecedência à colheita, em Arapiraca, Estado de Alagoas, além do trabalho de Minuzzi e Lopes (2015), que avaliaram o desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Os municípios analisados no presente estudo fazem parte da região caracterizada por clima Semiárido no Brasil, conforme mencionado no Tópico 2.1. Trata-se de 13 municípios, distribuídos nas três regiões climáticas, conforme localização apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Área de estudo



Fonte: Produção da autora.

Na tabela 3.1 são apresentadas as coordenadas geográficas e respectivas altitudes de cada município avaliado, assim como a região climática em que cada um se insere (S = Sul do SAB; N = Norte do SAB; L = Leste do SAB) e o número de experimentos avaliados.

Tabela 3.1 - Caracterização dos municípios avaliados no presente estudo.

Municípios	Latitude	Longitude	Altitude	Exp.¹	Região Climática
Adustina - BA	-10.50	-38.12	308.10	1	SSAB
Araripina - PE	-7.55	-40.56	647.80	3	NSAB
Arapiraca - AL	-9.81	36.67	236.00	5	LSAB
Bom Jesus - PI	-9.07	-44.36	306.60	3	SSAB
Carira - SE	-10.50	-37.54	254.30	1	LSAB
Caruaru - PE	-8.29	-35.97	522.50	6	LSAB
Frei Paulo - SE	-10.50	-37.54	254.30	3	LSAB
Ipanguaçu - RN	-5.50	-36.85	18.20	3	NSAB
Nossa Senhora - SE	-10.50	-37.19	180.10	1	LSAB
Paripiranga - BA	-10.20	-37.85	298.10	3	LSAB
Presidente Dutra - BA	-15.60	-39.88	170.50	1	SSAB
São Gabriel - BA	-13.40	-44.20	440.20	1	SSAB
Simão Dias - SE	-10.70	-37.81	261.90	6	LSAB

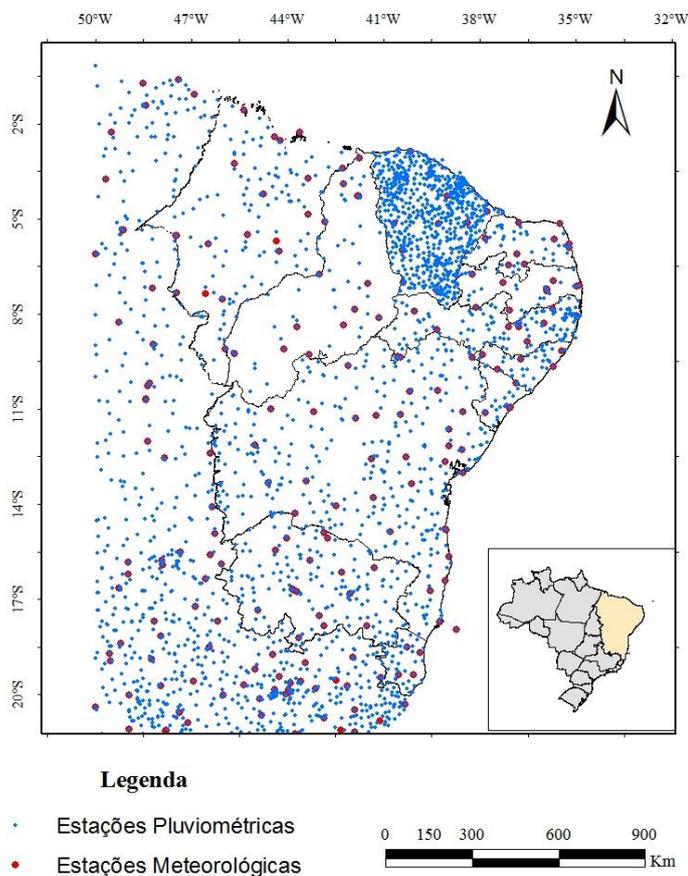
¹Quantidade de experimentos de campo analisados para cada município.

Fonte: Produção da autora.

3.2 Dados Meteorológicos

Para calibrar o modelo AquaCrop foram utilizados dados diários de temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho, radiação solar, velocidade do vento e precipitação, provenientes de postos meteorológicos e pluviométricos do Instituto Nacional de Meteorologia- INMET e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. A distribuição dos postos meteorológicos é apresentada na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Postos meteorológicos e pluviométricos disponíveis para aquisição de dados



Fonte: Produção da autora.

Para cada um dos municípios, foi feita uma interpolação dos dados meteorológicos, considerando-se o inverso do quadrado da distância e ponderado pela distância da estação ao município (LEFÈVRE et al., 2002). A série de dados observados abrange o período de 1989 a 2009.

3.3 Dados da Cultura do Milho

Os dados de produtividade das culturas de milho utilizados no presente estudo foram provenientes de experimentos de campo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA e, também, do estudo de Anjos (2011); portanto, trata-se de experimentos controlados com relação à incidência de pragas e doenças e, ainda, considerando condições

adequadas de fertilidade do solo. Na tabela 3.2 são apresentados os dados de cada um dos experimentos considerados.

Tabela 3.2 - Conjunto de dados experimentais com indicativos de localização, ano, data do plantio e produtividade observado.

Municípios	Sigla	Ano	Data de Plantio	Produtividade (Kg/ha)	Calibração (C) / Validação (V)
Adustina-BA	ADU-06	2006	-	7427	V
Arapiraca-AL	ARP-04	2004	12-Mai	6687	V
Arapiraca-AL	ARP-06	2006	17-Mai	5919	V
Arapiraca-AL	ARP-08	2008	24-Mai	3591	V
Araripina-PE	ARR-95	1995	20-Fev	3530	C
Araripina-PE	ARR-03*	2003	-	5354	C
Araripina-PE	ARR-03	2003	30-Jan	5302	V
Araripina-PE	ARR-04	2004	22-Jan	2611	V
Araripina-PE	ARR-06	2006	19-Jan	5919	V
Bom Jesus-PI	BOM-00	2000	-	6524	C
Bom Jesus-PI	BOM-03	2003	12-Dez	6037	V
Bom Jesus-PI	BOM-09	2009	-	8752	V
Carira-SE	CAR-07	2007	-	4630	V
Caruaru-PE	CAU-01*	2001	05-Jun	3820	C
Caruaru-PE	CAU-01	2001	06-Jun	3928	V
Caruaru-PE	CAU-03*	2003	25-Mai	805	C/V
Caruaru-PE	CAU-07	2007	04-Mai	6488	V
Caruaru-PE	CAU-08	2008	14-Mai	7387	V
Caruaru-PE	CAU-08*	2008	09-Mai	6667	C
Frei Paulo-SE	FRE-06	2006	-	7571	V
Frei Paulo-SE	FRE-07	2007	-	7914	V
Frei Paulo-SE	FRE-09	2009	-	7740	V
Ipanguaçu-RN	IPA-03	2003	17-Fev	5323	V
Ipanguaçu-RN	IPA-03*	2003	-	5988	C
Ipanguaçu-RN	IPA-07	2007	-	5649	V
Nossa Sr ^a das Dores-SE	NOS-03	2003	-	6080	V

(continua...)

Tabela 3.2 - Conclusão

Municípios	Sigla	Ano	Data de Plantio	Produtividade (Kg/ha)	Calibração (C) / Validação (V)
Paripiranga-BA	PAR-05	2005	-	6069	V
Paripiranga-BA	PAR-07	2007	-	7947	V
Paripiranga-BA	PAR-09	2009	-	6523	V
Presidente Dutra-BA	PRE-06	2006	-	4073	V
São Gabriel-BA	SÃO-06	2006	-	7621	V
Simão Dias-SE	SIM-01	2001	-	9627	V
Simão Dias-SE	SIM-03*	2003	-	7286	C
Simão Dias-SE	SIM-03	2003	-	7850	V
Simão Dias-SE	SIM-04	2004	-	8526	V
Simão Dias-SE	SIM-07	2007	-	6279	V
Simão Dias-SE	SIM-08	2008	14-Mai	8277	V

Fonte: Produção da autora.

Para os 13 municípios apresentados na Figura 3.1, foram considerados 37 experimentos de campo. Destes 37 experimentos, 8 foram considerados na calibração do modelo AquaCrop, enquanto 30 experimentos foram separados para validação do sistema de previsão.

Vale ressaltar que o experimento realizado no município de Caruaru-PE no ano de 2003 (CAU-03*) foi considerado tanto para a etapa de calibração quanto para a etapa de validação do sistema. Esta dupla consideração foi necessária, em razão de se tratar do único experimento que apresentou baixa produtividade e, portanto, considerou-se imprescindível ser avaliado em ambas as etapas.

3.4 Métodos

3.4.1 Obtenção dos Parâmetros dos Solos por Meio de Funções de Pedotransferência

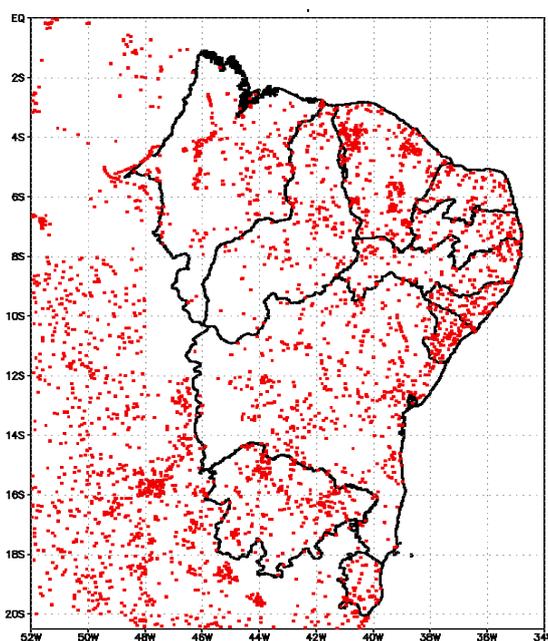
Funções de pedotransferência -FPT's foram utilizadas para estimar os parâmetros do solo tais como umidades de saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e condutividade hidráulica saturada requeridos para simulação pelo modelo AquaCrop. Tais parâmetros descrevem a curva de retenção de água no solo e, portanto, determinam a

capacidade que cada solo possui para armazenar água e também como se dá a condução da água na matriz de um determinado tipo de solo.

As FTP's são basicamente equações que relacionam propriedades físicas do solo como a densidade e os conteúdos de areia, silte, argila e de matéria orgânica com os parâmetros da curva de retenção de água no solo proposta por Van Genuchten (1980). Estas equações foram ajustadas para solos de clima tropical por TOMASELLA et al. (2003).

Utilizando a metodologia proposta por Tomasella et al (2003), foram derivados os parâmetros para os solos da região do presente estudo. Para tal, foram utilizadas informações disponíveis de aproximadamente 1200 perfis de solo com base nos levantamentos de solo do Projeto RADAMBRASIL (RADAM-BRASIL, 1981) e na versão mais atualizada pela EMBRAPA, elaborada com base no novo sistema brasileiro de classificação de solos (IBGE; EMBRAPA, 2001). A localização dos perfis de solo é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Localização dos perfis de solo.



Fonte: Brasil (2005)

Cada perfil contém informações sobre o tipo de solo, textura (quantidades de areia, silte, argila), conteúdo de matéria orgânica, densidade, dentre outras. Dessa forma, partindo das informações disponíveis para cada perfil e, através das FPT's, foram obtidos os dados requeridos pelo modelo, tais como: tipo de solo, condutividade hidráulica saturada,

densidade do solo, e umidades nas condições de ponto de murcha permanente, capacidade de campo e saturação.

Para definir o perfil que seria utilizado para cada município, utilizou-se aquele mais próximo da localização de cada área experimental. Os perfis de solo selecionados, assim como a classificação e propriedades físicas de cada um podem ser consultados na Tabela A.1 do Apêndice A.

3.4.2 Determinação do Período Chuvoso Através do Balanço Hídrico

Muitos dos experimentos utilizados no presente trabalho dispunham apenas de dados da produtividade final observada. Assim, tanto para a calibração quanto para a validação foi necessário determinar a data de plantio, ou seja, aquela em que se iniciou o ciclo da cultura. Para contornar o problema de ausência desse dado, efetuou-se um balanço hídrico para cada município, para a determinação do início da estação chuvosa em cada local. O balanço hídrico foi determinado conforme o método descrito em Rossato (2001) e Rossato, Alvalá e Tomasella (2002).

Este método descreve um modelo que através da contabilização do suprimento natural de água no solo, representado pelas chuvas, e da demanda atmosférica, simbolizada pela evapotranspiração potencial, e com uma capacidade de água disponível, fornece estimativas da evapotranspiração real, do déficit, do excedente e do armazenamento de água no solo. Esse método considera que a taxa de perda de água por evapotranspiração varia linearmente com o armazenamento de água no solo (TOMASELLA; ROSSATO, 2005).

O modelo é baseado em um balanço simples de água no solo que é calculado através da Equação 3.1:

$$S_{t+1} = S_t + (P_t - ETR_t - DD_t)\Delta t \quad (3.1)$$

Sendo S o armazenamento de água no solo disponível para as plantas nos tempos t e t+1(mm), P a precipitação (mm/dia), Etr a evapotranspiração real (mm/dia), DD a drenagem profunda em (mm/dia) e t o tempo.

A evapotranspiração real, ETR , é calculada linearmente a partir da evapotranspiração potencial, ETP , utilizando o armazenamento de água no solo, S , e o armazenamento crítico, S_{crit} , de acordo com a Equação 3.2.

$$ETR = \begin{cases} \frac{S}{S_{crit}} ETP, & \text{se } S < S_{crit} \\ ETP, & \text{se } S \geq S_{crit} \end{cases} \quad (3.2)$$

O modelo de balanço hídrico aqui utilizado assume que a evapotranspiração real é igual à evapotranspiração potencial sempre que o armazenamento de água está entre a umidade crítica – S_{crit} e a umidade de capacidade de campo - $S_{máx}$, como mostrado na Figura 3.4a. A capacidade de campo ou o limite superior de água disponível caracteriza a quantidade máxima de água que um solo pode reter em condições normais de campo sem que haja drenagem. A capacidade de campo é específica de cada solo e é identificado na curva de retenção de água no solo. Sempre que a ETR for menor que a ETP , a razão ETR/ETP diminui linearmente com o armazenamento, até se fazer nula na umidade de Ponto de Murcha Permanente – S_{PMP} . O modelo supõe que quando o armazenamento de água no solo diminui abaixo do valor de umidade crítica, a situação de déficit hídrico (DEF) fica caracterizada, (SOUZA et al., 2001), conforme Equação 3.3.

$$DEF_{t+1} = \begin{cases} ETP_t - ETR_t & ETR_t < ETP_t \\ 0 & ETR_t = ETP_t \end{cases} \quad (3.3)$$

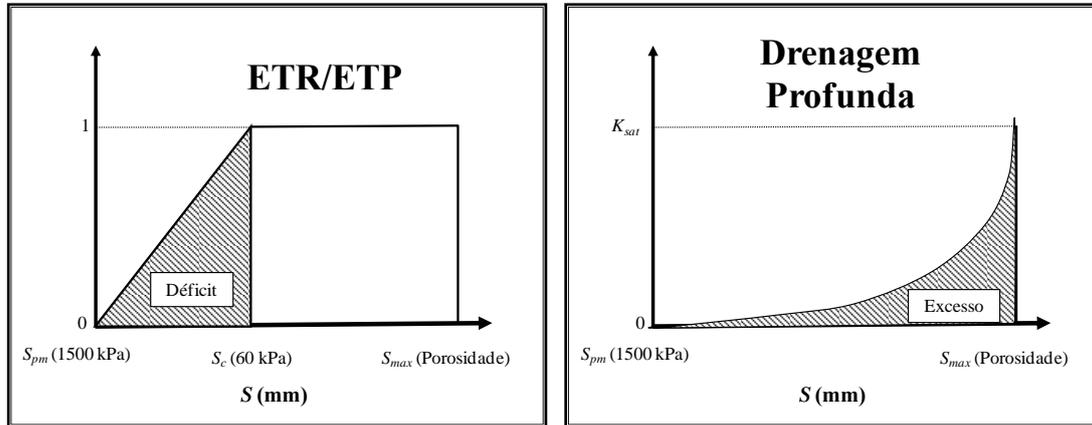
A drenagem profunda - DD_t é calculada a partir da equação de fluxo não saturado assumindo gradiente unitário. Neste caso, a drenagem profunda é igual à condutividade hidráulica, a qual pode ser aproximada usando a equação de Brooks-Corey (BROOKS; COREY, 1964).

$$DD_t = K_{sat} \left(\frac{S_t}{S_{max}} \right)^\eta \quad (3.4)$$

Sendo K_{sat} a condutividade hidráulica saturada (mm.dia^{-1}); S_{max} a capacidade de armazenamento máximo do perfil do solo (mm) e η o parâmetro de Brooks-Corey obtido a partir da curva de retenção de água no solo. Vale lembrar que a condutividade hidráulica saturada é função da umidade do solo e diminui exponencialmente com ela. Assim, o K_{sat} é

máximo quando a umidade é máxima e é mínimo quando a umidade está próxima da umidade de ponto de murcha permanente (vide Figura 3.4b).

Figura 3.4 - Relações funcionais utilizados no balanço hídrico.



(a)

(b)

Fonte: Tomasella et al. (2010)

O volume de água que sai do perfil do solo na forma de drenagem profunda é considerado excedente hídrico, *EXC*. Quando o armazenamento calculado na equação do balanço excede a capacidade máxima de armazenamento do solo S_{max} , o excedente hídrico é acrescido no volume de água que excede a capacidade de armazenamento máximo:

$$EXC_{t+1} = \begin{cases} DD_t + S_{t+1} - S_{max} & S_{t+1} > S_{max} \\ DD_t & S_{t+1} \leq S_{max} \end{cases} \quad (3.5)$$

Os valores de armazenamento calculados no modelo correspondem à lâmina de água útil, ou seja, o armazenamento acima do ponto de murcha permanente S_{pm} .

Obtidos os parâmetros que contabilizam a entrada e a saída de água no solo, considerados pelo modelo, é possível estimar a variação, no tempo, do armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, determinar o período chuvoso para cada localidade.

Para determinar o mês de início do período chuvoso adotou-se o primeiro mês que apresentou reposição de água no solo. Este mês foi considerado para iniciar a geração da data de plantio pelo modelo AquaCrop. Quando a data de plantio não é conhecida, o

AquaCrop fornece dois critérios para estimá-la, baseando-se na temperatura do ar ou na precipitação. Como a precipitação, para a região foco do estudo, é a variável climática limitante, o método baseado em precipitação foi selecionado. Dessa forma, a data de plantio foi determinada como aquela em que a soma da precipitação em um período de 5 dias acumulou pelo menos 35 mm.

Para verificar se este critério determinava as datas de forma coerente, foi realizado um teste com os experimentos que dispunham de datas de plantio, confirmando, assim, a coerência do critério escolhido para determinar as datas de plantio para os demais experimentos com ausência deste dado.

3.4.3 Simulações do modelo Eta

As previsões climáticas sazonais utilizadas no presente trabalho foram produzidas a partir do Modelo de Circulação Atmosférica Regional Eta. Para previsão climática sazonal o modelo Eta apresenta resolução espacial de 15 km (Eta15), 38 níveis na vertical e cobre a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes. Os processos convectivos são representados pelo esquema de Betts-Miller (JANJIC, 1994) enquanto o processo de precipitação é resolvido pelo esquema de Zhao (ZHAO; CARR, 1997). O modelo inclui também simulações de radiação de onda curta (LACIS; HANSEN, 1974) e radiação de onda longa (FELS; SCHWARZKOPF, 1975).

As condições de contorno lateral são extraídas do Modelo de Circulação Global do CPTEC (BONATTI, 1996; CAVALCANTI et al., 2002) e os processos de superfície são representados pelo modelo Noah (EK et al., 2003).

Foram consideradas ainda previsões de 5 membros do Eta15. Cada membro difere do outro pela condição inicial. Esta é determinada pelo dia de inicialização das rodadas. Por exemplo, o Membro 13 foi inicializado todo dia 13 de cada mês, o Membro 14 foi inicializado todo dia 14 de cada mês e, assim por diante, para os Membros 15, 16 e 17. Essa diferença associada a cada condição inicial refere-se a uma perturbação inicial diferente para cada membro, com o objetivo de que se tenha uma amostragem do estado da atmosfera.

Dessa forma, a cada mês são realizadas as previsões climáticas sazonais para um período subsequente de 4,5 meses. Os primeiros 15 dias de cada rodada são considerados como *spin up*, ou seja, é o tempo que o modelo leva para entrar em equilíbrio e, portanto, foram retirados das rodadas. Dessa forma, o período de previsão disponível para uso abrange 4 meses, ou seja, 120 dias, disponíveis de 2001 a 2010.

As variáveis prognósticas do modelo Eta utilizadas no presente trabalho são temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho, radiação solar, velocidade do vento, pressão atmosférica e precipitação, diárias.

3.4.3.1 Correção das Previsões do Modelo Eta

As saídas dos modelos climáticos são afetadas por erros sistemáticos, conhecidos como bias, devido à imperfeita conceituação e discretização dos processos atmosféricos. Dentre os principais erros sistemáticos dos modelos atmosféricos regionais incluem, por exemplo, muitos dias com precipitação de baixa magnitude além de previsões incorretas da precipitação máxima. Dessa forma, o uso das saídas dos modelos regionais como entradas em modelos de simulação agrícola, sem a devida correção, conduzirá a uma avaliação não realista dos impactos. Para contornar essa limitação das saídas dos modelos regionais, é recomendado o uso de técnicas de correção de bias (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012).

Ressalta-se que há várias técnicas de correção de bias para eliminar os erros sistemáticos. No presente estudo, utilizou-se a abordagem percentil por percentil, proposta por Bárdossy e Pegram (2011), para corrigir erros sistemáticos na precipitação, temperaturas máxima e mínima e evapotranspiração.

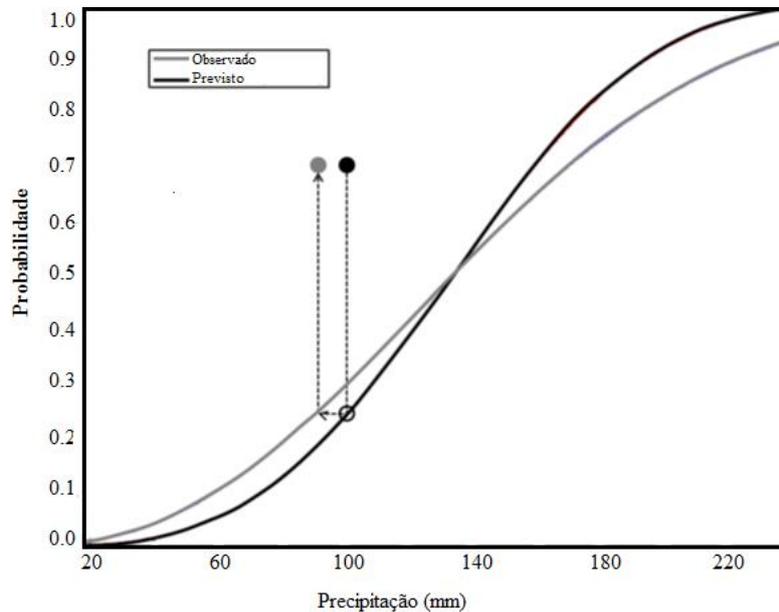
Nesta técnica são geradas funções de distribuição de probabilidade cumulativas - FDP's, para a variável a ser corrigida em cada ponto de grade e para todo o período de observação. O método assume que os erros sistemáticos são determinados pelo deslocamento das funções de distribuição de probabilidade para o mesmo nível de frequência experimental.

Para efetuar as correções, foram utilizadas as saídas do modelo Eta em ponto de grade, e os dados observados interpolados das estações de cada um dos 13 locais experimentais no período de 1989 a 2009.

Vale ressaltar ainda que a correção foi aplicada mensalmente e que, para simular as condições nas quais as previsões climáticas são normalmente conduzidas, o ano considerado para correção (período de avaliação) foi extraído da série de controle. Por exemplo, ao corrigir o ano de 2003 (período de avaliação) foi considerado a série controle de 1989 a 2002 e 2004 a 2009.

Na Figura 3.5 apresenta-se um exemplo do procedimento de correção de erros sistemáticos. Neste exemplo, a linha preta representa as probabilidades de não excedência das precipitações previstas pelo modelo Eta para o ano de 2009, enquanto a linha cinza representa as probabilidades de não excedência associadas às precipitações do período controle, neste exemplo, 2001 a 2008. Para cada mês, tem-se, por exemplo, uma precipitação prevista para o período de avaliação (ano de 2009) de 100 mm, com probabilidade de excedência de 0,7 (círculo sólido preto). Em seguida, obtém-se a probabilidade associada à mesma precipitação na função ajustada aos dados observados no período de controle (2001-2008), caracterizada pelo círculo sólido cinza. Para esta última probabilidade, obtém-se o valor de precipitação correspondente na função ajustada aos dados observados no mesmo período (2001-2008). Por fim, adota-se este valor de precipitação para a série corrigida do modelo, período de avaliação, como ilustrado pelo círculo sólido cinza. Assim como pontuado anteriormente é possível constatar que o ano de avaliação (2009) foi retirado da série controle (2001-2008), e assim se repete para os demais anos a serem avaliados ou corrigidos.

Figura 3.5 - Representação de correção de bias da modelo Eta para a variável precipitação.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2015).

3.4.4 Estimativa de Evapotranspiração de Referência

A evapotranspiração de referência - ETo ou evapotranspiração potencial - ETP foi estimada considerando-se os dados meteorológicos observados e interpolados para cada município assim como considerando as variáveis previstas pelo modelo Eta.

O método recomendado para uso no modelo AquaCrop é derivado da equação FAO-Penman-Monteith, conforme parametrizado por Allen et al. (1998).

Assim, o processo de cálculo e parametrizações envolvidas na estimativa da evapotranspiração de referência adotado pelo método FAO-Penman-Monteith segue previsto em Allen et al. (1998). A equação 3.4 representa a estimativa de evapotranspiração de referência.

$$ETo = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (3.6)$$

em que, ET_o é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}), R_n é o saldo de radiação na superfície da cultura ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), G é a densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), T é a temperatura média diária do ar a uma altura de 2 m ($^{\circ}\text{C}$), U_2 é a velocidade média do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}), γ é a constante psicrométrica ($\text{KPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), e_a é a pressão de vapor atual (KPa), e_s é a pressão de vapor de saturação (KPa), Δ é a variação da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{KPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Mais detalhes sobre a estimativa de Eto podem ser obtidos no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

3.4.5 Calibração do Modelo AquaCrop

Os parâmetros do modelo AquaCrop são divididos em dois grupos. Aqueles que apresentam pouca modificação em decorrência do clima e condições locais, tais como produtividade hídrica – WP, índice de colheita – HI e transpiração (parâmetros conservativos), e aqueles que mudam de acordo com o ambiente e as características da cultivar (parâmetros específicos da cultura). Uma vez que os parâmetros menos conservativos são afetados pelo manejo da cultura, condições do solo e clima, eles requerem um ajuste para as variedades e condições do ambiente local (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009).

Logo, para o presente trabalho foram selecionados 8 experimentos de campo de 5 diferentes municípios (vide Tabela 3.2). Estes experimentos foram utilizados para ajustar os parâmetros da cultura do milho, segundo as condições locais do presente estudo.

O processo de calibração partiu dos parâmetros calibrados por Hsiao et al. (2009) e considerados no arquivo *default* do modelo, bem como baseando-se naqueles descritos como mais sensíveis nos trabalhos de Salemi et al. (2011) e Vanuytrecht et al. (2014). Estes autores recomendaram uma lista de parâmetros classificados como mais ou menos sensíveis em relação à produtividade final e, também, forneceram um intervalo de valores para cada parâmetro. Dessa forma, através de uma abordagem iterativa, de tentativa e erro, foi possível verificar o intervalo de valores viáveis para cada parâmetro e finalmente selecionar o conjunto de parâmetros que produziu o melhor ajuste para as produtividades observadas de milho para os oito experimentos.

A duração do ciclo fenológico foi considerada como sendo de 120 dias, período este que coincide com a maioria das cultivares recomendadas pela Embrapa para a região e também com o tempo de previsão do modelo Eta.

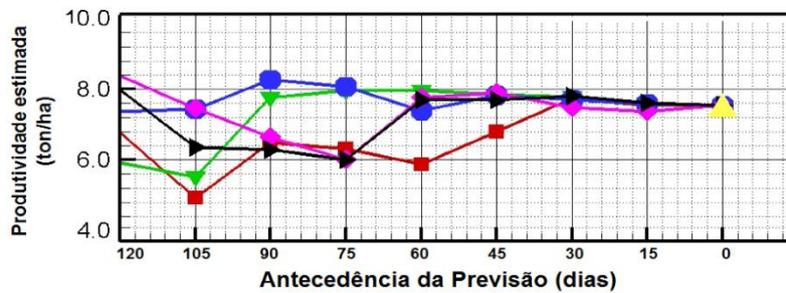
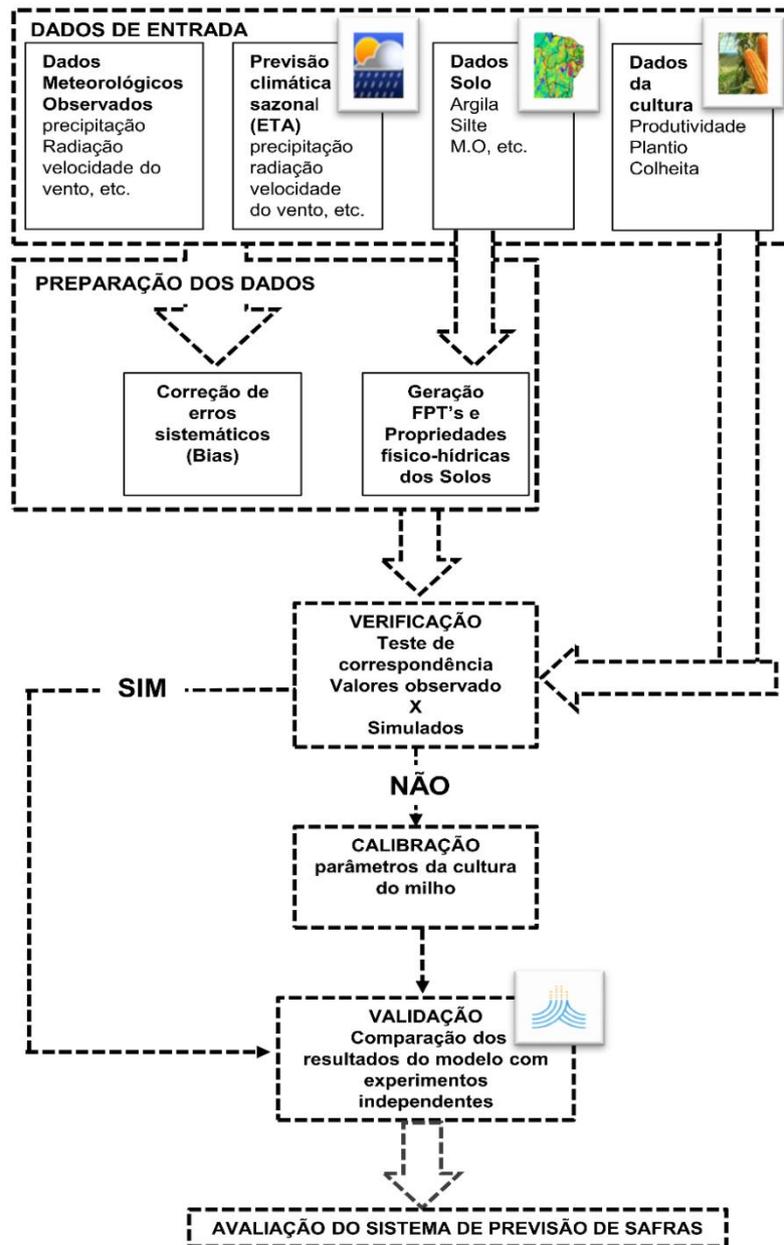
3.4.6 Sistema de Previsão de Produtividade Agrícola

Dados meteorológicos observados, bem como saídas do modelo Eta15 corrigidas, foram utilizados como entrada para o modelo AquaCrop para prever a produtividade de milho de 30 experimentos de campo distribuídos em treze municípios, estes por sua vez distribuídos nas 3 regiões climáticas do SAB. Previsões da produtividade de milho foram produzidas a cada 15 dias, iniciando na data de plantio de cada experimento até completar o ciclo de crescimento da cultura, o que resultou em 9 datas de previsão: 120, 105, 90, 75, 60, 45, 30, 15 dias antes da colheita e uma previsão na data de colheita. Cada uma das previsões foi feita considerando-se os 5 membros do modelo Eta15. Em outras palavras, 41 previsões de produtividade de milho foram produzidas para cada experimento, em que as 5 primeiras previsões foram feitas considerando 120 dias de previsões do Eta15, as 5 previsões seguintes foram feitas considerando 15 dias de dados meteorológicos observados e 105 dias de previsão sazonal dos 5 membros do modelo Eta, e assim por diante. Uma vez que a última previsão foi feita considerando apenas dados meteorológicos observados, ela reflete o erro de estimativa do modelo AquaCrop e da interpolação dos dados meteorológicos, enquanto as previsões anteriores agregam também erros de previsão do modelo climático.

Esta abordagem reproduz um sistema operacional, em que os dados meteorológicos em tempo real são utilizados para configurar as condições iniciais da simulação, e o restante do ciclo de crescimento é baseado em previsões climáticas.

Na Figura 3.6 apresenta-se um esquema das etapas do desenvolvimento do sistema de previsão de safras.

Figura 3.6 - Esquema de desenvolvimento do sistema de previsão de safras.



Fonte: Produção da autora.

Para cada uma das datas de previsão foram determinadas a média e o desvio padrão para a produtividade prevista.

As produtividades previstas dos 30 experimentos foram agrupadas de acordo com a região climática, uma vez que em cada uma delas a variabilidade da precipitação não se correlaciona com a outra região (RAO et al., 1993). Apesar do fato das secas extremas geralmente afetarem toda a região, os impactos da variabilidade interanual da precipitação diferem em cada região. Assim, além das diferenças nos sistemas meteorológicos que causam chuvas em cada região, a quantidade e a variabilidade intrasazonal em cada região varia, e, conseqüentemente, há impactos sobre a produtividade agrícola.

3.4.7 Avaliação das Simulações de Produtividade de milho

A análise dos dados simulados pelo modelo foi feita considerando-se os índices estatísticos mais utilizados na literatura para avaliação de estimativas de produtividade agrícola, conforme descritos abaixo:

1. Coeficiente de Correlação de Pearson (r) - é um indicador estatístico de precisão que indica o grau de dispersão dos dados estimados em relação à média, representado pela Equação 3.5:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M)(P_i - M_E)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - M)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - M_E)^2}} \quad (3.7)$$

em que n é o número de observações, P_i é o valor previsto, O_i é o valor observado, M é a média dos valores observados e M_E é a média dos valores previstos.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o valor de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o score da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis.

2. Índice de Concordância, proposto por Willmott et al. (1985) e modificado por Legates e McCabe Jr. (1999) (Equação 3.8). Este mede a dispersão dos dados em relação a uma reta 1:1, ou seja, a exatidão dos valores estimados em relação aos observados.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (3.8)$$

em que $P'_i = P_i - M$ e $O'_i = O_i - M$. Quanto mais próximo este índice estiver da unidade, melhor será a concordância entre os valores observados e aqueles estimados pelo modelo.

3. Índice de confiança, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que avalia conjuntamente a exatidão (d) e a precisão (r) das estimativas segundo a Equação 3.9.

$$IC = r * d \quad (3.9)$$

O desempenho deste índice pode ser avaliado conforme detalhado na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Critérios de interpretação do índice de confiança.

IC	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,5	Mau
< 0,40	Péssimo

Fonte: (CAMARGO; SENTELHAS,1997)

4. Raiz do Erro quadrático médio normalizada – $RMSE^n$, calculado, de acordo com Loague e Green (1991) e conforme apresentado na Equação 3.10:

$$RMSE^n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} * \frac{100}{M} \quad (3.10)$$

O $RMSE^n$ dá uma medida em porcentagem da diferença relativa entre os valores simulados e os observados. A simulação é considerada excelente para um $RMSE^n$ menor que 10%, boa

quando $10\% < \text{RMSE}^n < 20\%$, razoável se $20\% < \text{RMSE}^n < 30\%$ e ruim para $\text{RMSE}^n > 30\%$ (JAMIESON et al., 1991).

Partindo do RMSE^n é possível derivar o RMSE que trará da raiz do erro quadrático médio, no entanto este coeficiente é medido na mesma unidade da variável analisada, no caso, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Além disso, o erro quadrático médio (MSE) foi também calculado e dividido em dois componentes: sistemático (MSE_S) e não sistemático (MSE_U), de acordo com a abordagem descrita em Willmott (1981). Também foi calculado o Erro Absoluto Médio - MAE e o Bias - MBE que representam a tendência do modelo em superestimar ($\text{MBE} > 0$) e subestimar ($\text{MBE} < 0$) as produtividades.

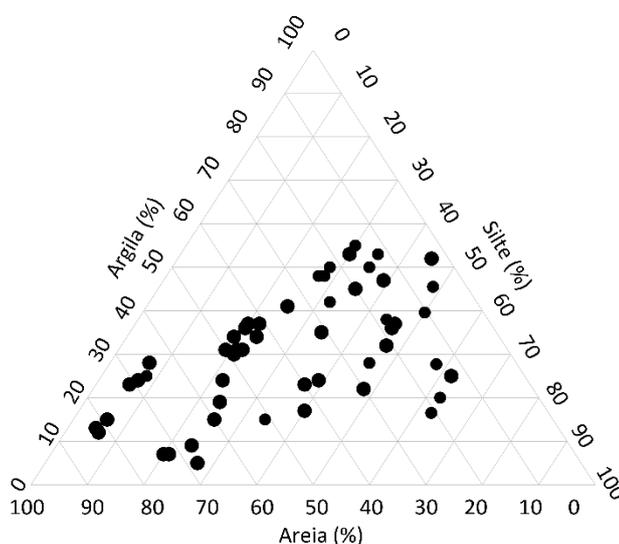
Com o objetivo de calcular o erro médio em cada região climática, foi também utilizado o erro médio percentual e o desvio padrão do erro percentual.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização e Parâmetros dos Solos.

As características associadas às texturas dos solos, utilizadas no presente estudo, foram agrupadas no triângulo apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Propriedades associadas às texturas dos solos, utilizadas no presente estudo.



Fonte: Produção da autora.

As classes de texturas com maior ocorrência são franco argilo arenosa, argilosa, franco arenosa e franco argilosa. No entanto, pode-se também notar a ocorrência de solos com texturas franca, argilo siltosa, franco argilo siltosa e franco siltosa.

Barros et al. (2013), estimando os parâmetros da curva de retenção de água no solo através de FTP's para a região Nordeste do Brasil, apresentaram um padrão de caracterização de texturas para os solos similar ao obtido no presente estudo. No entanto, os autores ressaltaram a característica mais arenosa dos solos utilizados por eles e comum aos solos da região Nordeste.

De forma simplificada, pode se dizer que a maioria dos solos apresenta textura média. A textura do solo é um dos indicativos de qualidade e de produtividade (COX; LINS, 1984),

tendo elevada correlação com a capacidade de retenção e transporte de água no solo REICHERT et al., 2003).

Solos ditos argilosos eram anteriormente considerados como os mais produtivos; no entanto, Novais (1996) alertaram para o fato que solos arenosos, ou mesmo de textura média, podem ser mais produtivos que os argilosos, com a ressalva que atividades agrícolas nestes solos estão associadas a um maior risco devido à maior cautela necessária no manejo e à baixa capacidade de retenção de água (SANTOS et al., 2008).

Assim como a distribuição de partículas no solo, o tipo de solo, ou seja, as características pedogenéticas, também contribuem para uma boa produtividade. Cada tipo de solo está relacionado com uma gênese diferente e, portanto, trazem consigo diferentes características mineralógicas que contribuem para uma adequada atividade química e para a pronta disponibilidade de nutrientes para a cultura.

Na tabela 4.1 são descritas a classificação dos solos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006) e suas respectivas propriedades hídricas derivadas a partir das FTP's para cada município.

Tabela 4.1 - Classificação e parâmetros hídricos dos solos para cada município avaliado.

Sigla/ Local	Classificação do solo*	Nº curva	Horizonte	Camada (m)	K _{sat} (mm,dia ⁻¹)	θ _{PMP} (Vol %)	θ _{CC} (Vol %)	θ _{sat} (Vol %)
ADU	Cambissolo	61	A1	0-0,06	665,70	23,7	36,5	51,1
			(B1)	0,06-0,20	1093,40	23,9	39,4	53,1
			(B2)	0,20-0,47	1067,0	24,1	38,4	51,9
			(B3)	0,47-0,64	2774,70	12,9	23,3	42,5
			C	0,64-1,22	8,40	5,7	12,7	16,6
ARP	Cambissolo		A1	0-0,10	1472,6	15,8	27,9	44,3
		46	(B1)	0,10-0,35	1850,6	16,2	27,2	45,1
			(B21)	0,35-1,00	2116,9	15,6	27,2	45,8
			(B22)	1,00-1,60	2474,6	13,3	24,6	44,3
			(B3)	1,60-2,10	1194,1	15,0	25,7	41,4
ARR	Argissolo Vermelho- Amarelo	46	Ap	0-0,09	2630,7	9,8	17,2	40,6
			A2	0,09-0,22	2984,3	8,1	16,6	39,5
			B22t	0,22-0,60	2127,4	11,4	20,6	41,2
			B23t	0,60-1,40	2109,4	11,7	21,2	41,4
			B3t	1,40-2,40	1923,8	13,1	22,5	42,3
BOM	Latossolo amarelo	46	A1	0-0,20	3041,6	7,2	14,9	38,8
			B	0,80-1,2	2230,9	11,1	19,5	40,9
CAR	Neossolo	72	A	0-0,23	161,1	8,0	15,8	23,9
CAU	Planossolo	46	A11	0-0,30	2335,6	6,6	19,1	39,3
			A12	0,30-0,55	2378,1	7,2	19,4	40,2
			A2	0,55-0,85	1735,2	5,2	17,2	37,0
			IIAB	0,85-1,0	1513,1	9,5	21,1	38,6
			IIBt	1,00-1,10	652,4	22,5	36,9	51,8
FRE	Planossolo	61	A	0-0,10	368,1	12,9	26,6	36,4
			IIBt	0,10-0,28	925,0	25,9	40,5	54,7
			IIC	0,28-0,35	226,6	27,5	43,7	57,6

*Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006). K_{sat}=Condutividade hidráulica saturada, θ_{PMP} = Umidade no ponto de murcha permanente (a 1500 kPa), θ_{CC} = Umidade de capacidade de campo (a 10KPa), θ_{sat} = Umidade de saturação (a 0,01 kPa).

(Continua...)

Tabela 4.1 - Conclusão.

Sigla/ Local	Classificação do solo*	Nº curva	Horizonte	Camada (m)	K _{sat} (mm,dia ⁻¹)	θ _{PMP} (vol %)	θ _{CC} (vol %)	θ _{sat} (vol %)
IPA	Neossolo	46	A1	0-0,20	1552,0	15,8	38,3	49,9
			A3	0,20-0,45	1689,8	13,0	34,7	47,8
			IIC	0,45-0,60	4499,9	6,3	20,9	43,1
NOS	Latossolo Vermelho Amarelo	46	Ap	0-0,20	2421,1	14,0	26,5	45,9
			AB	0,20-0,32	855,4	18,4	30,1	44,3
			BA	0,32-0,50	1093,7	19,1	31,3	46,5
			Bw1	0,50-0,92	804,1	20,5	32,4	46,1
			Bw2	0,92-1,25	708,8	21,0	33,5	46,4
PAR	Luvissolo	46	A1	0-0,07	1450,7	20,6	34,6	50,4
			B2t	0,07-0,35	1435,4	22,1	39,0	54,5
			B3t	0,35-0,60	1026,8	17,6	36,2	47,9
			C1	0,60-0,85	1909,3	12,3	23,3	42,6
			C2	0,85-1,10	706,0	16,4	37,8	48,5
PRES	Argissolo Vermelho- Amarelo	61	A1	0-0,05	784,4	18,0	42,0	53,8
			A2	0,05-0,18	1468,7	15,0	38,6	50,2
			B11	0,18-0,31	1161,7	18,1	39,3	51,2
			B12	0,31-0,52	629,4	22,9	41,5	54,2
			B21	0,52-0,78	636,7	25,0	42,7	56,0
SAO	Cambissolo	46	A1	0-0,05	1052,7	22,32	35,18	51,9
			A3	0,05-0,13	1024,06	23,45	35,68	52,5
			(B1)	0,13-0,37	1182,25	21,29	35,02	51,1
			(B2)	0,37-0,62	1118,15	20,98	34,71	50,1
			C	0,62-0,8	1052,74	22,32	35,18	51,9
SIM	Cambissolo	46	A	0-0,16	1005,5	50,9	37,6	50,9
			(B)	0,16-0,45	733,0	51,8	37,7	51,8

Fonte: Produção do autor.

Dentre os solos analisados no presente trabalho, o Cambissolo, representativo dos experimentos localizados nos municípios de Simão Dias - SE, Arapiraca - AL, São Gabriel - BA e Adustina - BA, é um tipo de solo pouco desenvolvido e pouco profundo. Segundo Cardoso et al. (2002), a reserva de nutrientes neste tipo de solo é adequada devido ao fato dos cambissolos serem formados a partir de rochas calcárias e possuírem elevado

teor de matéria orgânica no horizonte A. No entanto, dentre suas principais limitações citam-se a baixa capacidade de armazenamento de água e a suscetibilidade à erosão (CARDOSO et al. 2002).

Os Argissolos são caracterizados por conter argilas de baixa atividade e baixa saturação por bases. Os experimentos localizados nos municípios de Araripina - PE e Presidente Dutra - BA se inserem em localidades com Argissolos Vermelho Amarelo. Estes solos apresentam diversidade nas propriedades de interesse e uso agrícola como, por exemplo, teor variável de nutrientes, textura e profundidade (SOUSA; LOBATO, 2007). Estes autores complementam que, quando a fertilidade natural é elevada e não há pedregosidade, sua aptidão para a agricultura é boa, principalmente em situações em que não é possível grandes aplicações financeiras para o melhoramento e conservação do solo e lavouras, comum em áreas de agricultura familiar.

Nos experimentos realizados nos municípios de Nossa Senhora das Dores - SE e Carira - SE foram encontrados Latossolo vermelho amarelo; enquanto Bom Jesus - PI é caracterizado pelo Latossolo Amarelo. Estes tipos de solos são profundos e bem drenados. Apresentam boas condições físicas para o desenvolvimento radicular das culturas, baixa susceptibilidade à erosão, tendo como principais restrições ao uso agrícola o baixo nível de fertilidade natural, a baixa capacidade de água disponível, além da elevada taxa de infiltração (LUMBRERAS et al. 2015).

Os Neossolos, como o próprio nome designa, são solos novos, pouco desenvolvidos, com ocorrência frequente de fragmentos de rocha. Devido à sua pouca profundidade, são susceptíveis à erosão, principalmente em áreas de relevo acidentado. Segundo Sousa e Lobato (2007), são solos com baixa aptidão agrícola e necessitam de práticas de manejo que aumentem os teores de matéria orgânica. Estes autores ainda alertam para a susceptibilidade destes solos à erosão e limitação quanto à capacidade de armazenamento de água disponível, devido à grande quantidade de areia presente. No presente estudo, este tipo de solo é característico das áreas experimentais dos municípios de Ipanguaçu - RN e Araripina - PE.

Nos municípios de Frei Paulo - SE e Caruaru - PE, os solos característicos são classificados como planossolos. É um solo imperfeitamente drenado, típico de áreas baixas, com permeabilidade muito lenta. A susceptibilidade à erosão é significativa, devido ao acentuado

gradiente de textura e ao fato de a textura do horizonte superficial ser mais leve, o que leva a uma menor retenção de água e nutrientes, uma menor agregação e, portanto, uma resistência mais baixa aos processos erosivos (LUMBRERAS et al. 2015). Santos et al. (2016) destacaram ainda a fertilidade variável deste tipo de solo, apresentando normalmente baixos teores de matéria orgânica e deficiência em fósforo.

E, por último, os Luvisolos são solos que variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos (60 a 120 cm). São moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos. São característicos de ambientes de clima seco e possuem alto potencial para uso agrícola, devido à sua alta fertilidade (ZARONI; SANTOS, 2013).

Tais características intrínsecas a cada tipo de solo determinam a necessidade de uma maior ou menor intervenção externa, seja no quesito fertilidade ou mesmo no manejo adequado, com vistas a reduzir o risco à degradação. Esses cuidados refletem o nível tecnológico utilizado e determinam a produtividade potencial de um determinado cultivo.

Interessante ressaltar que, em áreas de agricultura familiar no SAB práticas que demandam um alto investimento financeiro são em geral inviáveis, devido às condições econômicas de pequenos agricultores e à dificuldade de acesso ao crédito, aliado ainda ao alto risco de produzir devido ao clima. Dessa forma, a ocorrência de solos naturalmente aptos aos cultivos, com boa fertilidade e boa capacidade de retenção de água, são aspectos que contribuem de forma significativa para determinar a produtividade de cultivos agrícolas.

4.2 Identificação das Datas de Plantio

Devido à ausência de dados de data de plantio para alguns dos experimentos, adotou-se uma metodologia para determinar a data mais provável que ocorreu o plantio de cada experimento. Dessa forma, optou-se por elaborar o balanço hídrico utilizando dados observados no período de 1989-2009 para que fosse possível determinar o início do período chuvoso e a partir da determinação do período chuvoso, estimar a data provável de plantio.

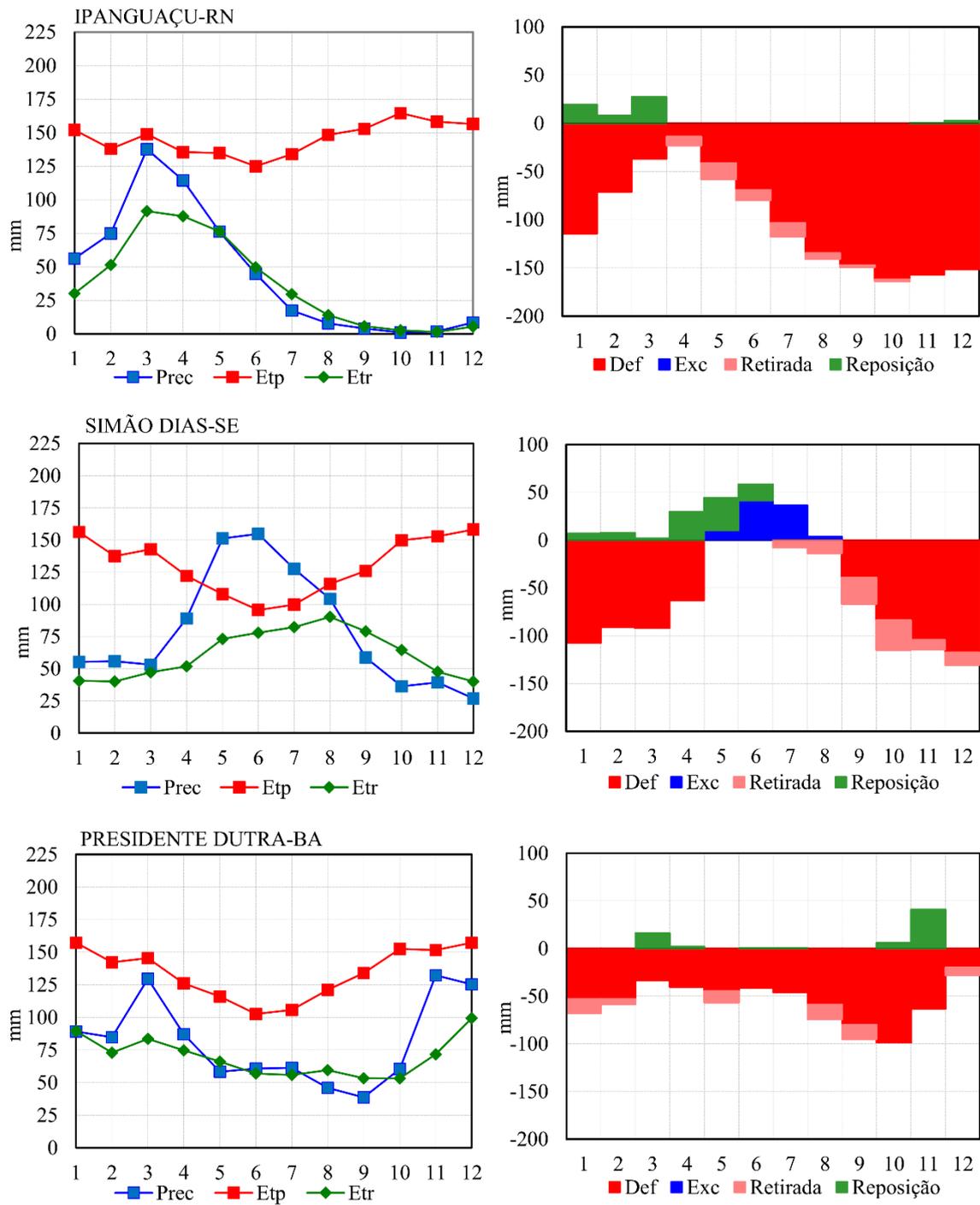
Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas de precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real (coluna da esquerda), assim como a representação esquemática do balanço de água no solo apresentando os meses com deficiência (vermelho), reposição

(verde), retirada (vermelho claro) e excedente (azul) de água no solo (coluna da direita). Para fins de exemplificação, foram considerados um município de cada região climática, isto é, Ipanguaçu - RN representa a região Norte do Semiárido, Simão Dias - SE representa a região Leste do Semiárido e o município de Presidente Dutra - BA representa a região Sul do Semiárido.

As curvas de precipitação, de evapotranspiração real e potencial assim como a representação do balanço de água no solo para os demais municípios são apresentadas na Figura B.1 do Apêndice B.

Por exemplo, para o município de Ipanguaçu - RN, o primeiro mês que apresentou reposição de água no solo foi janeiro (indicado em verde na Figura 4.2), dessa forma este mês foi utilizado para inicializar a determinação da data de plantio pelo modelo AquaCrop. Ao fornecer ao modelo o mês de início do período chuvoso de um determinado ano, este provê a data de plantio pelo critério de acúmulo de pelo menos 35 mm de chuva em um período de 5 dias consecutivos, ou seja, para o exemplo de Ipanguaçu - RN no ano de 2007, o modelo AquaCrop retornou a data de 19 de fevereiro. Dessa forma, ao determinar o período chuvoso para cada município, foi possível estimar a data de plantio para os quais não se dispunham de tal informação. As datas de plantios determinadas para cada experimento são apresentadas na Tabela 4.2.

Figura 4.2 - Caracterização Climática e do Balanço de Água no Solo para o Período de 2001-2009.



Fonte: Produção da autora.

Tabela 4.2 - Conjunto de dados experimentais apresentando as datas de plantio estimadas para os municípios que não dispunham desta informação.

Municípios	Sigla	Ano	Data de Plantio ¹	Produtividade (Kg/ha)	Calibração (C) / Validação (V)
Adustina-BA	ADU-06	2006	26-Mar	7427	V
Arapiraca-AL	ARP-04	2004	12-Mai	6687	V
Arapiraca-AL	ARP-06	2006	17-Mai	5919	V
Arapiraca-AL	ARP-08	2008	24-Mai	3591	V
Araripina-PE	ARR-95	1995	20-Fev	3530	C
Araripina-PE	ARR-03*	2003	25-Jan	5354	C
Araripina-PE	ARR-03	2003	30-Jan	5302	V
Araripina-PE	ARR-04	2004	22-Jan	2611	V
Araripina-PE	ARR-06	2006	19-Jan	5919	V
Bom Jesus-PI	BOM-00	2000	05-Jan	6524	C
Bom Jesus-PI	BOM-03	2003	12-Dez	6037	V
Bom Jesus-PI	BOM-09	2009	08-Jan	8752	V
Carira-SE	CAR-07	2007	11-Mar	4630	V
Caruaru-PE	CAU-01*	2001	05-Jun	3820	C
Caruaru-PE	CAU-01	2001	06-Jun	3928	V
Caruaru-PE	CAU-03*	2003	25-Mai	805	C/V
Caruaru-PE	CAU-07	2007	04-Mai	6488	V
Caruaru-PE	CAU-08	2008	14-Mai	7387	V
Caruaru-PE	CAU-08*	2008	09-Mai	6667	C
Frei Paulo-SE	FRE-06	2006	27-Abr	7571	V
Frei Paulo-SE	FRE-07	2007	05-Mar	7914	V
Frei Paulo-SE	FRE-09	2009	23-Abr	7740	V
Ipanguaçu-RN	IPA-03	2003	17-Fev	5323	V
Ipanguaçu-RN	IPA-03*	2003	03-Fev	5988	C
Ipanguaçu-RN	IPA-07	2007	19-Fev	5649	V
Nossa Sr ^a das Dores-SE	NOS-03	2003	20-Mar	6080	V

¹Valores em negrito indicam as datas de plantio estimadas.

Tabela 3.2 - Conclusão

Municípios	Sigla	Ano	Data de Plantio	Produtividade de (Kg/ha)	Calibração (C) / Validação (V)
Paripiranga-BA	PAR-05	2005	16-Abr	6069	V
Paripiranga-BA	PAR-07	2007	17-Mai	7947	V
Paripiranga-BA	PAR-09	2009	10-Mai	6523	V
Presidente Dutra-BA	PRE-06	2006	17-Out	4073	V
São Gabriel-BA	SÃO-06	2006	11-Out	7621	V
Simão Dias-SE	SIM-01	2001	05-Abr	9627	V
Simão Dias-SE	SIM-03*	2003	11-Mar	7286	C
Simão Dias-SE	SIM-03	2003	21-Abr	7850	V
Simão Dias-SE	SIM-04	2004	11-Mai	8526	V
Simão Dias-SE	SIM-07	2007	15-Mar	6279	V
Simão Dias-SE	SIM-08	2008	14-Mai	8277	V

Fonte: Produção da autora.

Ao analisar o balanço hídrico (coluna à direita na Figura 4.2) e a caracterização climática (coluna à esquerda na Figura 4.2) para cada um dos municípios é possível ainda observar a similaridade entre eles quando se compara municípios dentro da mesma região climática. Estas características refletem o regime pluviométrico de cada região e ainda as características físico-hídricas do solo, como por exemplo, capacidade de armazenamento de água, saturação do solo e a condutividade hidráulica.

Vale notar que muitos dos municípios avaliados apresentaram uma lâmina de reposição de água no solo muito baixa, e a maioria deles não apresentou excedente hídrico mesmo no período chuvoso. Isso se justifica pelo fato que as evapotranspirações potencial e real são derivadas da evapotranspiração de referência e, portanto, refletem as condições de uma vegetação hipotética, com altura (0,12m), albedo (0,23) e resistência superficial (70 s/m) padronizadas e, ainda, considerando um sombreamento homogêneo do solo (Allen et al. 1998). No entanto, ao considerar a vegetação nativa ou mesmo cultivos agrícolas são esperados valores menores de evapotranspiração, uma vez que as condições como índice de área foliar ou cobertura do dossel e sombreamento do solo são diferentes daquelas consideradas para a vegetação hipotética e contribuem para uma evapotranspiração reduzida.

Dessa forma, ao considerar a evapotranspiração da cultura, espera-se uma lâmina de água no solo maior e, portanto, capaz de suprir a vegetação em condições normais de precipitação.

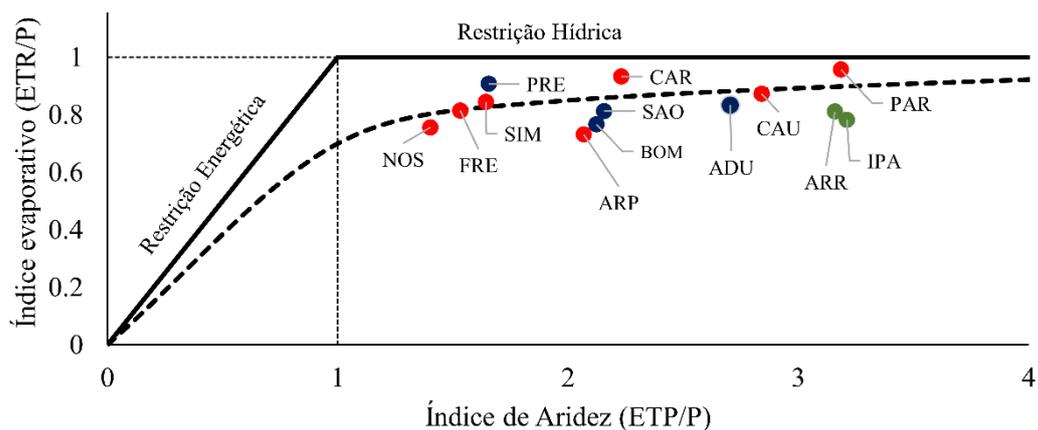
Vale salientar que o objetivo dessa análise não foi determinar a demanda hídrica da cultura e, sim, a estação chuvosa independente da vegetação instalada. A demanda hídrica será considerada no processo de simulação de produtividade pelo modelo AquaCrop.

Vale ainda complementar que o balanço hídrico apresentado nas Figuras 4.2 e B.1 são representações típicas de regiões semiáridas.

Dentre as diversas metodologias existentes para caracterizar o clima, aquela proposta por Budyko (1974) tem especial interesse pela abordagem dada ao balanço de energia, através de um índice de aridez para a vegetação, que pode ser relacionado com as zonas de vegetação e o Balanço hidrológico.

Desta forma, a fim de caracterizar os municípios estudados quanto ao clima, apresenta-se na Figura 4.3 o Diagrama de Budyko.

Figura 4.3 - Representação do clima de cada município estudado através do Diagrama de Budyko. Cada círculo representa um município avaliado. As cores representam as regiões climáticas às quais cada município pertence: verde representa a região Norte do Semiárido, vermelho representa a região Leste do Semiárido enquanto o azul representa a região Sul do Semiárido. O rótulo em cada círculo denomina a sigla de cada município conforme apresentado na Tabela 3.2.



Fonte: Produção do autor.

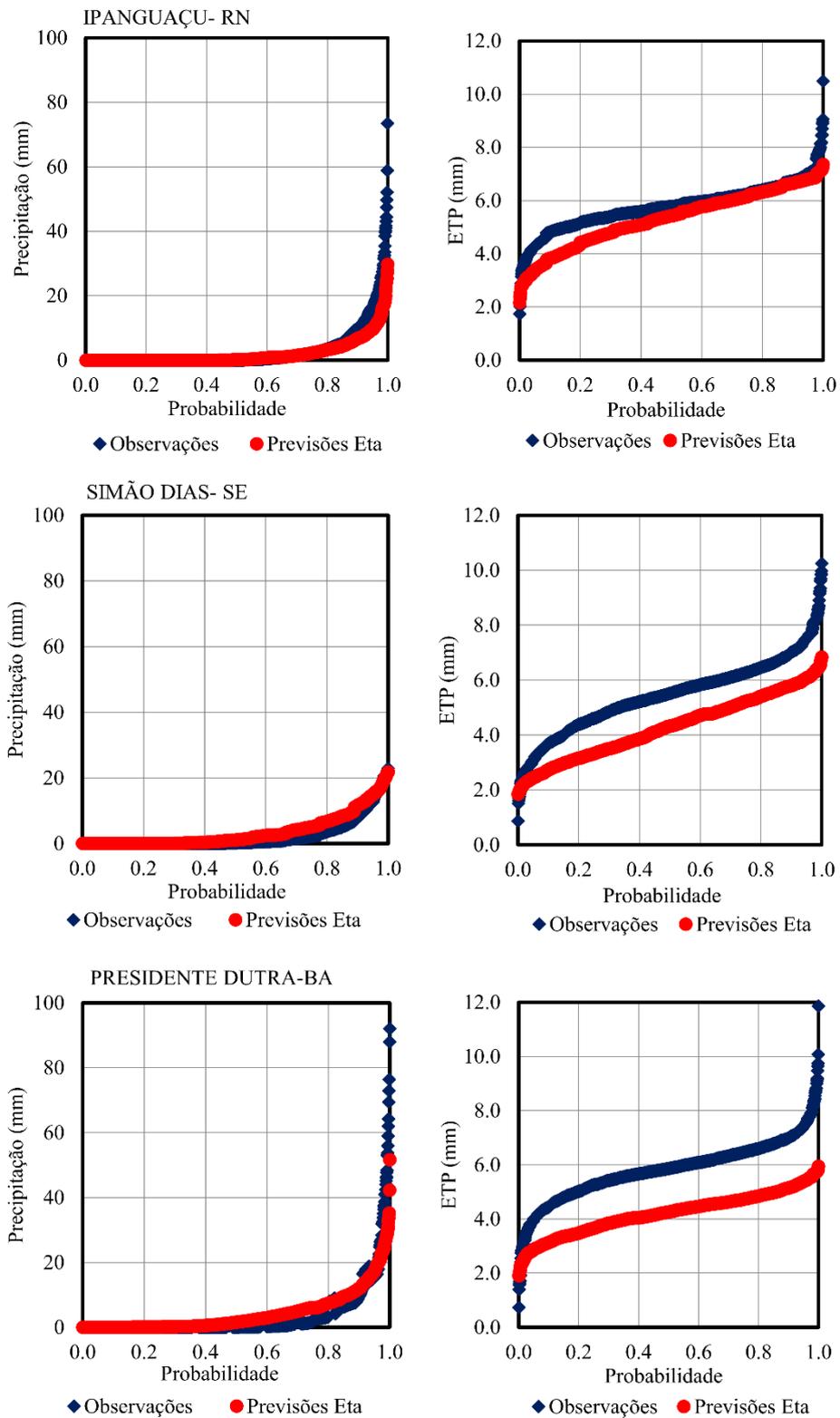
Os pontos descritos na Figura 4.3 descrevem a relação entre o potencial de evapotranspiração e a evapotranspiração real, ambas normalizadas pela precipitação (CREED et al., 2014).

Budyko (1974) propôs duas situações, a primeira na qual a evapotranspiração está sendo limitada pela energia e a segunda pela disponibilidade hídrica. Dessa forma, um valor do índice de aridez < 1 indica uma região úmida, porém com restrição energética (saldo de radiação e déficit de pressão de vapor); enquanto uma região com índice de aridez > 1 indica uma região seca, com restrição hídrica, condição esta apresentada por todos os municípios analisados no presente estudo.

4.3 Avaliação dos Erros Sistemáticos das Variáveis Prognósticas do Modelo Eta

As correções foram feitas para cada um dos meses de previsão, considerando-se os períodos chuvosos para cada município conforme determinado no [tópico 4.2](#). Como discutido no [tópico 3.4.3.1](#), os erros sistemáticos ou bias das previsões do modelo Eta são corrigidos a partir de comparação entre as curvas de distribuição de frequência da série de dados observados e a série de dados previstos. Assim, na Figura 4.4, são apresentados os erros referentes às variáveis precipitação (coluna esquerda) e evapotranspiração de referência (coluna direita), tomando como exemplos um município de cada região climática, isto é, Ipanguaçu - RN representando a região Norte do Semiárido, Simão Dias - SE representando a região Leste do Semiárido e o município de Presidente Dutra - BA representando a região Sul do Semiárido.

Figura 4.4 - Erro sistemático representado pela diferença entre as curvas de frequência observadas e previstas pelo modelo climático Eta, sendo precipitação (coluna da direita) e evapotranspiração de referência (coluna da esquerda).



Fonte: Produção da autora.

A partir da Figura 4.4, é possível notar a diferença nas frequências de ocorrência entre as curvas observadas e previstas pelo modelo Eta. A correção de bias visa corrigir essa frequência e, por conseguinte, aproximar a curva prevista daquela observada, a fim de eliminar os erros e evitar que estes se propaguem no modelo de previsão de safras agrícolas.

Com isso, podem-se avaliar separadamente os erros de cada etapa: previsão climática e previsão de safras.

Na Figura 4.4, foram apresentadas somente as observações e as previsões do modelo Eta provenientes do membro 13 com 1 mês de antecedência, a fim de destacar os erros inerentes à previsão do modelo Eta. As previsões para os demais membros e períodos de antecedência de 4, 3 e 2 meses apresentam diferenças pouco significativas e, portanto, não foram apresentadas na Figura 4.4, apesar de terem sido corrigidas.

Alves et al. (2004) também notaram que há pouca mudança nos erros gerados pelas previsões com 1 mês de antecedência e previsões com 2 meses de antecedência; contudo, é significativamente visível as melhores previsões com 1 mês de antecedência.

4.4 Calibração e Validação das Previsões do Modelo AquaCrop

Dentre os parâmetros indicados por Vanuytrecht et al. (2014) para análise de sensibilidade, os mais sensíveis à produtividade do milho neste estudo foram: máxima profundidade efetiva do sistema radicular, produtividade hídrica, coeficiente de crescimento do dossel, máxima cobertura do dossel e coeficiente de redução do dossel. Os demais parâmetros foram considerados de acordo com o arquivo *default* da cultura de milho, disponível no modelo AquaCrop Versão 5.0.

Quanto à máxima profundidade efetiva do sistema radicular, estudos anteriores mostraram que este valor é próximo a 0,30 m em solos tropicais (LANDAU et al., 2009). No entanto, testes desenvolvidos para profundidades do sistema radicular variando de 0,20 m a 0,70 m indicaram um valor ótimo de máxima profundidade efetiva do sistema radicular a 0,60 m. A lista de parâmetros ajustados pode ser consultada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros calibrados para a cultura do milho no modelo AquaCrop

Parâmetros da cultura	Valores Referência*	Valores Ajustados	Unidade
Temperatura base inferior	8	10	(°C)
Tempo da semeadura até a máxima profundidade do sistema radicular	108	99	dias
Tempo da semeadura até a senescência	107	99	dias
Tempo da semeadura até a maturidade fisiológica	132	120	dias
Tempo da semeadura até o florescimento	66	56	dias
Máxima profundidade efetiva do sistema radicular	2,30	0,60	m
Produtividade hídrica (WP*)	33.7	34	(g/m ³)
Coeficiente de crescimento do dossel (CGC)	0,16312	0,10089	Fração por dia
Máxima cobertura do dossel (CCx)	96	85	(%)
Coeficiente de redução do dossel (CDC)	0,11691	0,08000	Fração por dia
Densidade de plantio	75000	65.000	plantas.ha ⁻¹

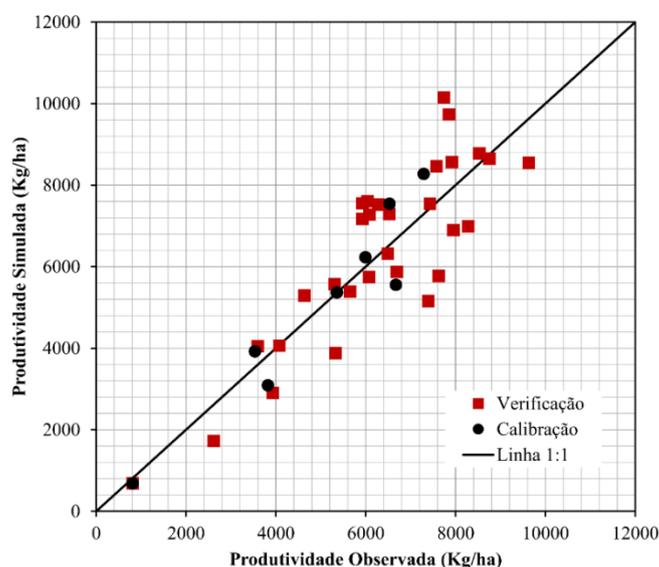
*Valores disponíveis no arquivo *default* do AquaCrop

Fonte: Produção do autor.

Para aqueles parâmetros do AquaCrop que não apresentam um significado físico claro (VANUYTRECHT et al., 2014), como, por exemplo, fator forma que descreve a expansão da zona radicular, foram testados os intervalos de valores passíveis de serem adotados, de acordo com a delimitação do modelo.

Na Figura 4.5 apresenta-se a relação entre as produtividades de milho simulada e observadas, utilizando os parâmetros ajustados apresentados na Tabela 4.3.

Figura 4.5 - Relação entre produtividades de milho observada e simulada. Experimentos utilizados para calibrar o AquaCrop estão representado por círculos pretos e experimentos utilizados para a validação do sistema de previsão estão representados por quadrados vermelhos.



Fonte: Produção do autor.

Comparando as produtividades observadas e simuladas com aquelas oriundas dos experimentos utilizados na calibração, assim como aqueles utilizados para validação, é possível concluir que o desempenho do modelo pode ser considerado como satisfatório para prever a produtividade de milho na região de estudo. Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados os descritores estatísticos e os índices de desempenho das simulações do modelo, respectivamente.

Tabela 4.4 - Descritores estatísticos do conjunto de dados utilizados na calibração e validação do desempenho do AquaCrop.

	MO ¹	MS ²	DPO ³	DPS ⁴	a ⁵	b ⁶
Calibração (n=8)	4996,75	5087,00	2157,38	2465,38	1,09	-370,47
Validação (n=30)	6285,07	6374,80	1939,89	2252,728	0,99	103,32

¹ Produtividade Média Observada, ²Produtividade Média Simulada, ³Desvio Padrão dos dados observados, ⁴Desvio padrão dos dados simulados, ⁵Inclinação e ⁶Intercepto da equação de regressão entre os valores observado e simulados.

Fonte: Produção do autor.

A produtividade média observada para o grupo de validação foi de 6285,07 Kg.ha⁻¹, portanto, o modelo superestimou a produtividade média simulada por 1,4% (89,73 kg.ha⁻¹).

Para o conjunto de dados da calibração, os melhores índices relacionados à precisão (r), acurácia (d) e confiança (IC) foram 0,96, 0,84 e 0,81, respectivamente (Tabela 4.5), indicando um desempenho muito bom após a calibração dos parâmetros da cultura. O erro absoluto médio, associado com as estimativas, foi de 578,50 kg ha⁻¹, o qual corresponde a um erro de 14%. O erro quadrático médio - MSE pode ser dividido em dois componentes, ou seja, erro sistemático e erro não sistemático. O erro sistemático, o qual inclui erros, como por exemplo, devido à calibração do sensor de medida, foi de 9% do MSE. Como o MSE é em sua maior parte composto por erro não sistemático (91% do MSE), isto indica que a calibração do modelo foi muito boa, sem necessidade de outros ajustes, conforme destacado por Willmott (1981).

Tabela 4.5 - Índices estatísticos de desempenho da calibração e validação do modelo AquaCrop.

	r	d	IC	RMSE ^a %	RMSE (Kg/ha)	MSE _s /MSE	MSE _n /MSE	MBE	MAE
Calibração (n=8)	0,96	0,84	0,81	14,19	709,23	0,09	0,91	90,25	578,50
Validação (n=30)	0,86	0,72	0,62	18,08	1136,51	0,01	0,99	89,73	929,86

^aRaiz do erro quadrático médio normalizada.

Fonte: Produção do autor.

Para o conjunto de dados da validação (Tabela 4.5), a precisão (r), acurácia (d) e confiança (IC) foram iguais a 0,86; 0,72 e 0,62, respectivamente. Estes índices confirmaram o bom desempenho do modelo para simular a produtividade de milho. O erro absoluto médio entre a produtividade observada e simulada foi de 929,86 kg ha⁻¹, o qual corresponde a um erro de 18%. A parte sistemática do erro, representada por 1% do MSE, confirma que o AquaCrop simula adequadamente a produtividade de milho para a região de estudo. Por outro lado, o erro não sistemático foi responsável por quase o total do MSE (99%).

Outros esforços têm sido feitos para estimar a produtividade de milho no SAB. Por exemplo, Barros (2010) simulou a produtividade de milho utilizando o modelo SWAP e funções de pedotransferência, encontrando coeficientes de precisão variando de 0,13 a 0,76 e coeficientes de acurácia variando de 0,49 a 0,87 e, ainda, índices de confiança entre 0,06 e 0,66, sendo este último coeficiente estatístico próximo dos encontrados no presente estudo.

O desempenho do modelo AquaCrop encontrado no presente trabalho também corrobora com os resultados de Anjos (2011), que usou o mesmo modelo para prever a produtividade de milho utilizando dados experimentais para o município de Arapiraca - AL, tendo encontrado uma estimativa adequada de produtividade de milho com uma antecedência de 18 dias da data de colheita, com uma acurácia entre 0,96 e 0,98 para as quatro datas de plantio analisadas.

Resultados comparáveis também foram relatados por Mebane et al. (2013), simulando milho sob condições de sequeiro na Pensilvânia, EUA. Estes autores consideraram dois anos para análise e encontraram um erro absoluto médio – MAE de 520 e 840 kg ha⁻¹ e coeficiente de acurácia de 0,97 e 0,96, respectivamente para cada ano avaliado. No entanto, estes mesmos autores relataram um MBE maior que o encontrado no presente estudo, -100 e -320 kg ha⁻¹ e um RMSE de 670 e 1030 kg ha⁻¹, para cada um dos dois anos analisados.

Outros estudos utilizando o modelo AquaCrop para simular produtividade de milho apresentaram resultados similares, como, por exemplo, Mhizha et al. (2014), para o Zimbábue, que encontraram um RMSE de 700 kg. ha⁻¹ e um correspondente RMSEⁿ de 14% para a calibração e um RMSE de 800 kg.ha⁻¹ e RMSEⁿ de 15.2% para o processo de validação.

Ahmadi et al. (2015) também simularam a produtividade do milho em uma região semiárida do Irã e encontraram um desempenho do modelo, medido pelo RMSE e RMSEⁿ, próximo daqueles valores relatados no presente estudo. Estes autores encontraram um RMSE de 710 e 1770 kg ha⁻¹, os quais correspondem a um erro de 7 e 18 % (RMSEⁿ) na calibração e processo de validação, respectivamente.

Dessa forma, a calibração do modelo efetuada no presente trabalho assim como o desempenho no processo de validação, apresentaram bons resultados, condizentes com os resultados apresentados na literatura para diversas partes do mundo.

4.5 Avaliação do Sistema de Previsão Sazonal de Produtividade de Milho

Foram realizadas previsões com 5 membros utilizando-se os modelos Eta e AquaCrop. Para cada uma das 30 safras analisadas, foram geradas previsões quinzenais da produtividade de milho, com 5 membros de previsão utilizando-se as saídas do modelo Eta aplicadas ao modelo AquaCrop.

As avaliações foram divididas em duas etapas, a fim de avaliar individualmente as previsões de cada experimento e, também, de obter uma análise estatística relativa aos erros da previsão. Para tal, os sub tópicos a seguir apresentam as 2 etapas de avaliação do sistema de previsão sazonal de produtividade de milho.

4.5.1 Avaliação das Previsões de Produtividade Milho por Experimento

Para avaliar a habilidade do sistema de previsão em prever a produtividade de milho, considerou-se a produtividade simulada pelo modelo AquaCrop utilizando dados meteorológicos interpolados como o valor de referência ou observado. Essa suposição exclui a propagação de possíveis erros devidos, por exemplo, ao uso de dados meteorológicos interpolados ou mesmo devido à deficiência de simulação do modelo AquaCrop.

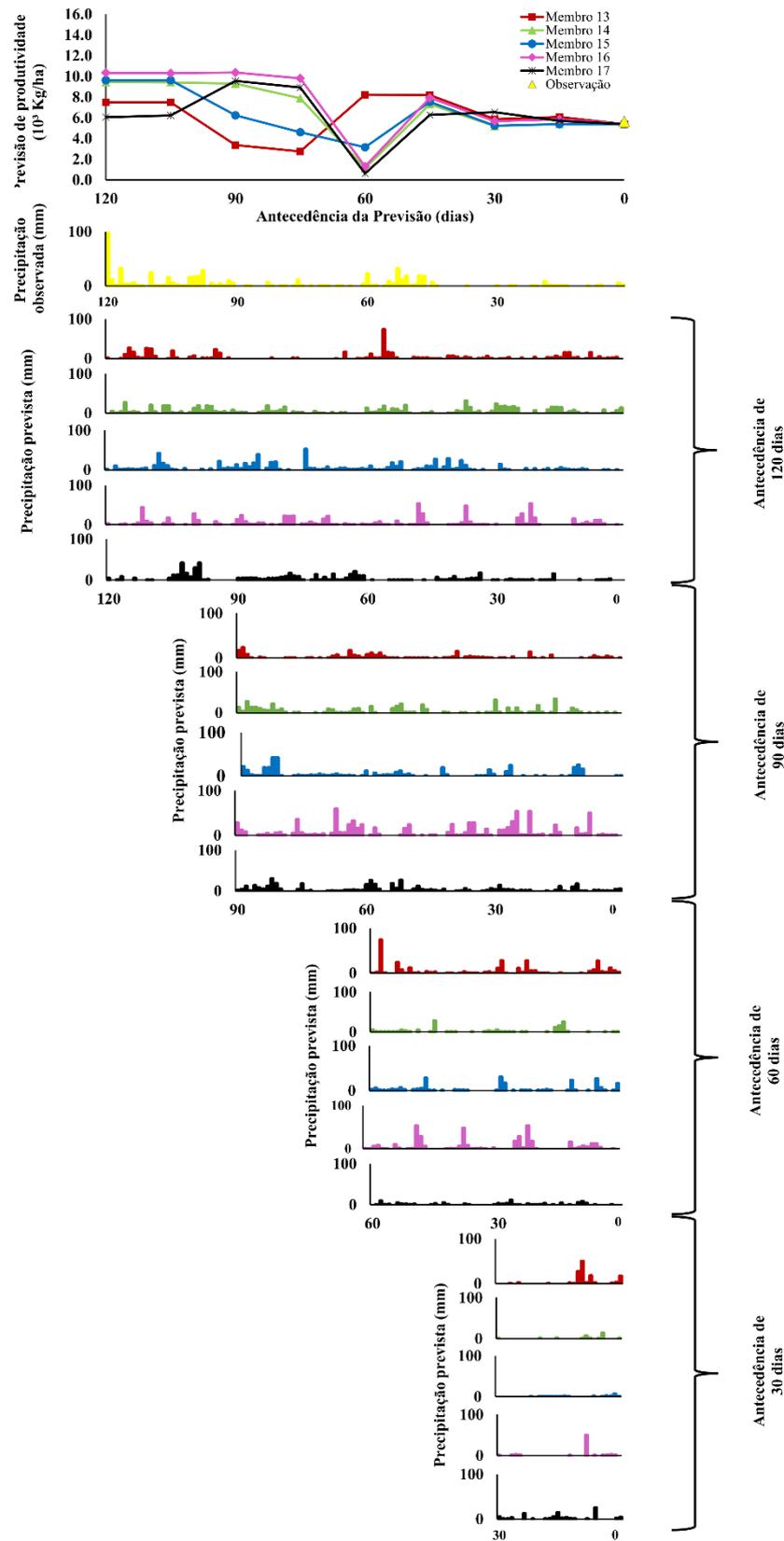
De forma análoga aos tópicos apresentados anteriormente, são considerados como exemplos um município de cada região climática, ou seja, Ipanguaçu - RN (NSAB), Simão Dias - SE (LSAB) e Presidente Dutra - BA (SSBA). Para cada um destes municípios são apresentadas as previsões quinzenais de produtividades de milho. Cada linha colorida representa a previsão utilizando cada um dos membros do modelo Eta. Dessa forma, quanto mais rapidamente a previsão dos membros convergir para o valor de referência, maiores a precisão e antecedência da previsão de produtividade de milho.

Como forma de analisar a variabilidade das previsões de milho entre os membros, são apresentadas conjuntamente as previsões de precipitação diária. Tais previsões são geradas a cada 30 dias; dessa forma, são apresentados 4 conjuntos de previsões, possibilitando um melhor entendimento da variabilidade da precipitação prevista e da sua interferência na previsão de produtividade de milho. Para cada um dos quatro conjuntos de previsões são apresentadas as séries temporais previstas para os membros 13 (vermelho), 14 (verde), 15

(verde), 16 (lilás) e 17 (preto). A série de precipitação observada para o período em questão também é apresentada como base comparativa.

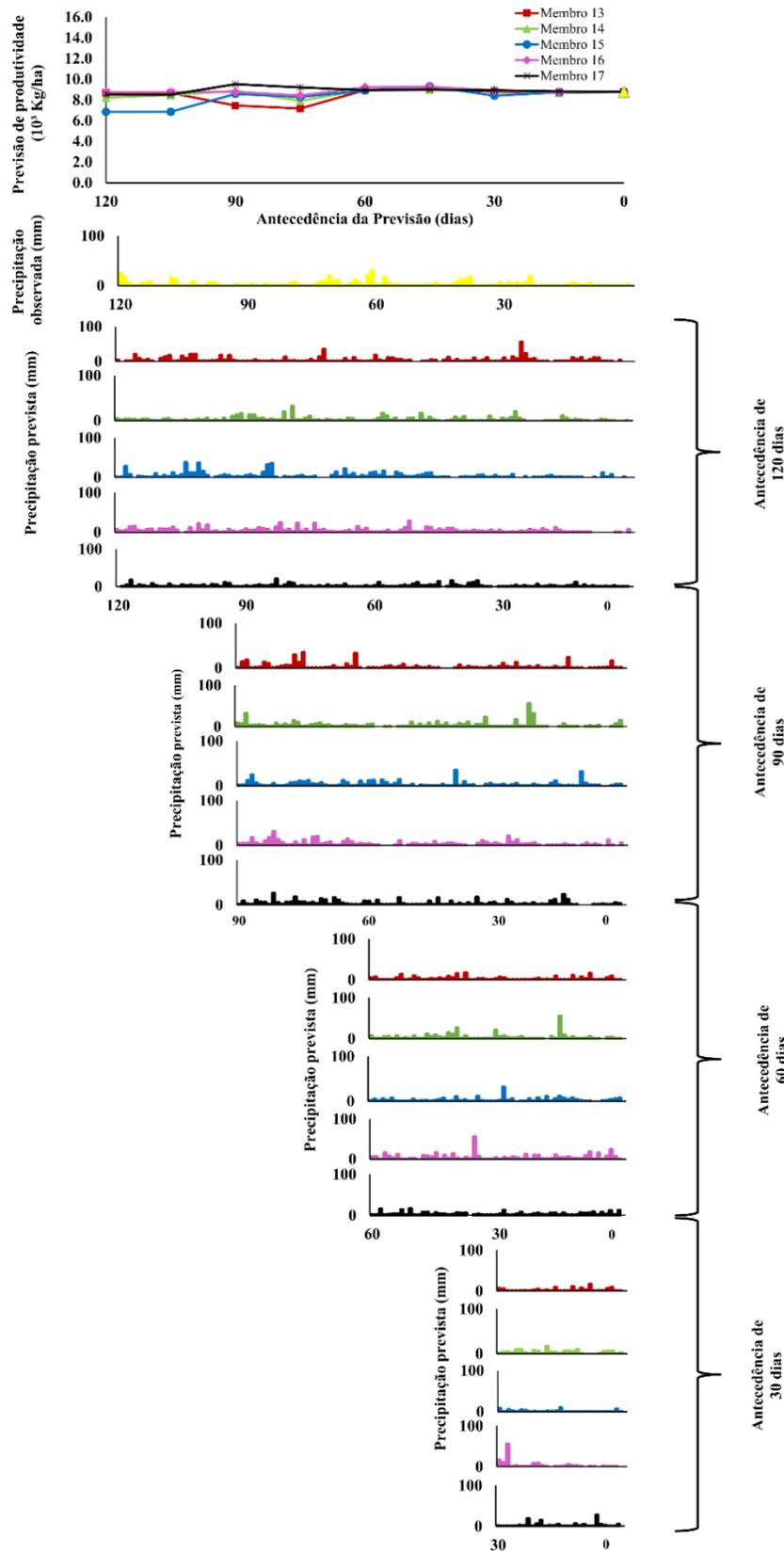
Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentadas as previsões relativas aos municípios de Ipanguaçu - RN (2007), Simão Dias - SE (2004) e Presidente Dutra - BA (2006), respectivamente.

Figura 4.6 - Previsões quinzenais de produtividade de milho e previsões mensais de precipitação para o município de Ipanguaçu - RN no ano de 2007.



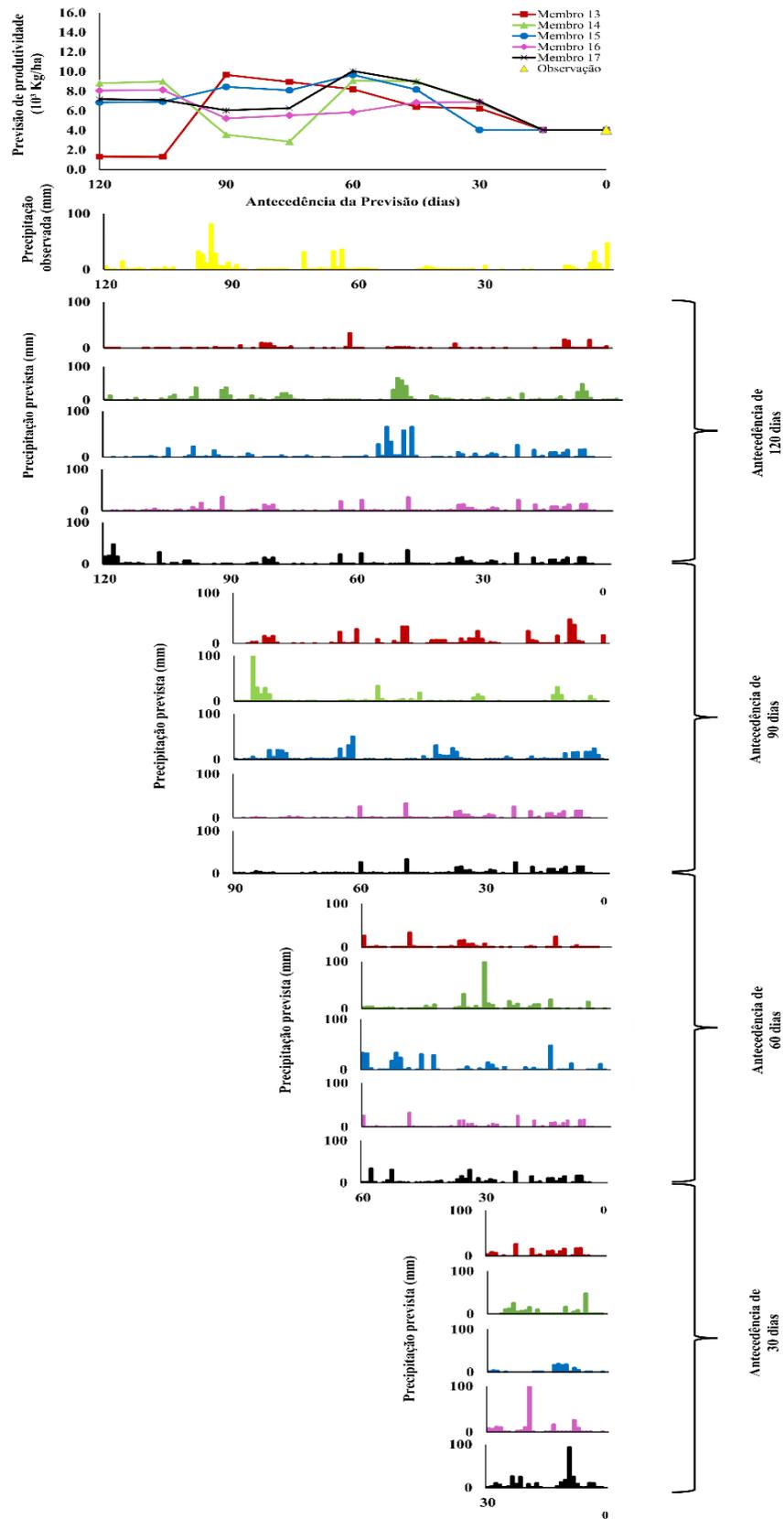
Fonte: Produção da autora.

Figura 4.7 - Previsões quinzenais de produtividade de milho e previsões mensais de precipitação para o município de Simão Dias - SE no ano de 2004.



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.8 - Previsões quinzenais de produtividade de milho e previsões mensais de precipitação para o município de Presidente Dutra - BA no ano de 2006.



Fonte: Produção da autora.

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 pode-se notar que a partir das sextas previsões, ou seja, 45 dias antes da colheita, a divergência entre os membros começa a diminuir, apresentando um bom indicativo da produtividade observada.

No entanto, em alguns experimentos houve uma divergência bastante discrepante entre as previsões dos membros, como pode ser notado em Ipanguaçu - RN (2007) (vide Figura 4.6) e em Presidente Dutra (2006) (vide Figura 4.8), principalmente no início do ciclo fenológico (anterior a 60 dias de antecedência).

Essa divergência entre as previsões de produtividade dos membros deve-se principalmente à variabilidade temporal de chuvas previstas por cada membro. A sequência de imagens de previsões com 120, 90, 60 e 30 dias de antecedência nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 comprova essa hipótese.

No caso do experimento de Ipanguaçu - RN para o ano de 2007 (vide Figura 4.6) o Membro 13 (vermelho) apresentou grandes oscilações para a previsão de milho no decorrer do ciclo, refletindo a previsão de precipitação irregular nos primeiros meses de análise. Por outro lado, o membro 15 (azul) apresentou oscilações menos bruscas no decorrer do ciclo, com previsões de produtividades próximas ao valor médio esperado, refletindo as previsões de precipitação mais regulares no decorrer do ciclo.

A partir da comparação entre as previsões de produtividade e de precipitação feitas por cada membro, fica bastante evidente quando se analisa as previsões feitas com 60 dias de antecedência. Nesse evento é possível observar com clareza a relação dos valores de produtividades previstos com a frequência de precipitação prevista. Enquanto o Membro 13 previu uma produtividade acima do valor esperado, devido aos picos de precipitação previstas nessa data (vide precipitação prevista com 60 dias de antecedência na Figura 4.6) os demais membros previram uma queda de produtividade bastante acentuada, devido, principalmente, à previsão de precipitação muito baixa ou nula.

Vale lembrar que as previsões do período de 60 dias de antecedência são cruciais para uma previsão de produtividade precisa, uma vez que é nesta época que se inicia a fase de florescimento (56 dias após o plantio), quando, segundo Bergamaschi et al. (2004), a oferta hídrica é determinante para a produtividade final.

O padrão de previsões de produtividade de milho e precipitação dado pelos diferentes membros relatado para o experimento de Ipanguaçu - RN (2007) é bastante similar àquele observado no experimento de Presidente Dutra - BA (2006) (Figura 4.8). A variabilidade da precipitação prevista por cada membro está diretamente relacionada com os valores de produtividade de milho previstas em todos os períodos de previsão.

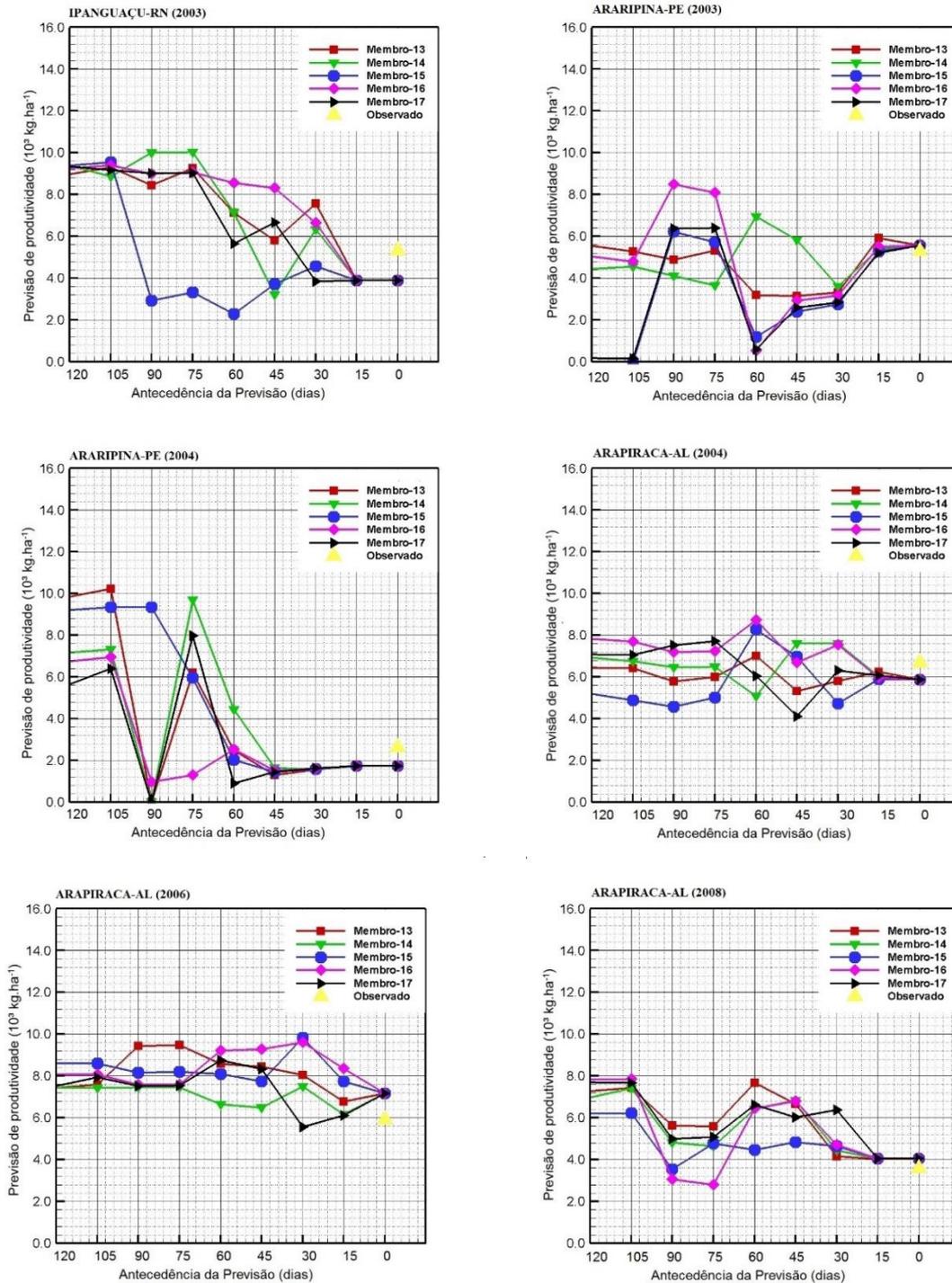
Para o experimento de Simão Dias - SE (2004) (Figura 4.7) nota-se um padrão mais regular das previsões de precipitação entre os diferentes membros, o que contribuiu para uma previsão de produtividade próxima àquela do valor esperado desde o início do ciclo.

O padrão de previsões com diferentes variabilidades temporais entre os membros pode ser observado em todas as previsões (120, 90, 60 e 30 dias de antecedência). No entanto, é importante notar que é a média entre os membros que fornece uma tendência mais precisa da produtividade e, portanto, não faz sentido analisá-los separadamente, a menos que se queira comprovar que a variabilidade das previsões de chuva afeta significativamente a previsão de produtividade de milho.

Com isso, pode-se concluir que, para uma previsão de produtividade de milho precisa, é fundamental que a previsão média dos membros seja capaz de indicar a variabilidade intrasazonal da precipitação, e não somente os valores acumulados.

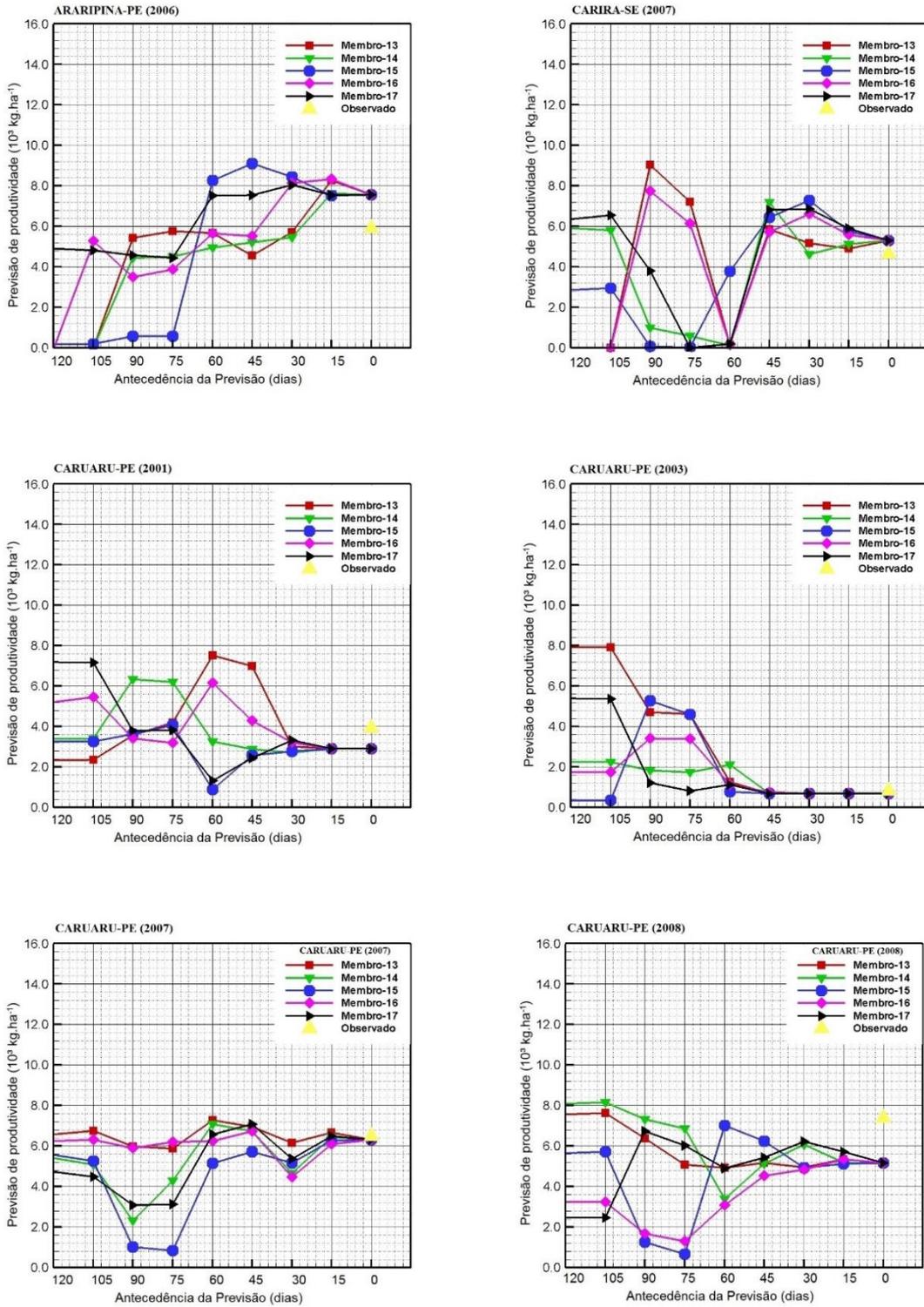
As previsões de produtividade de milho, para cada um dos demais experimentos analisados, são apresentadas na Figura 4.9

Figura 4.9 - Previsões quinzenais de produtividade de milho dada por cada um dos 5 membros do modelo climático Eta.



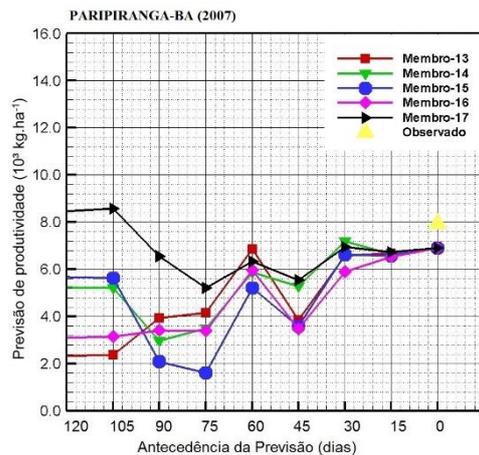
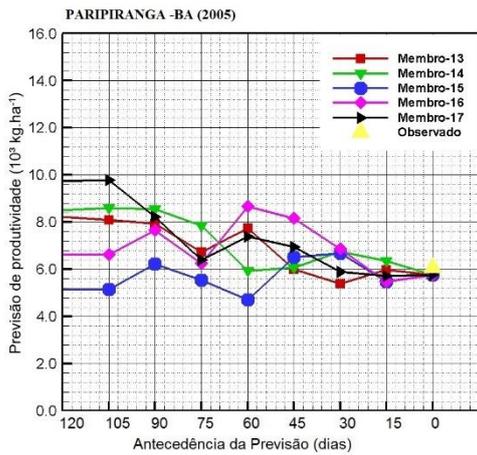
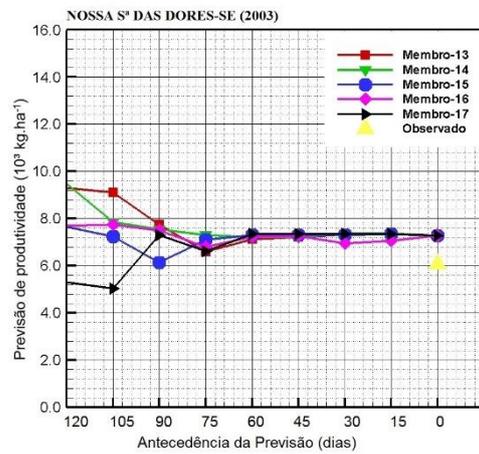
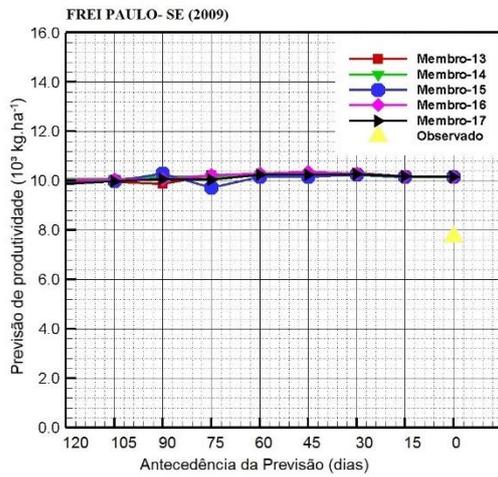
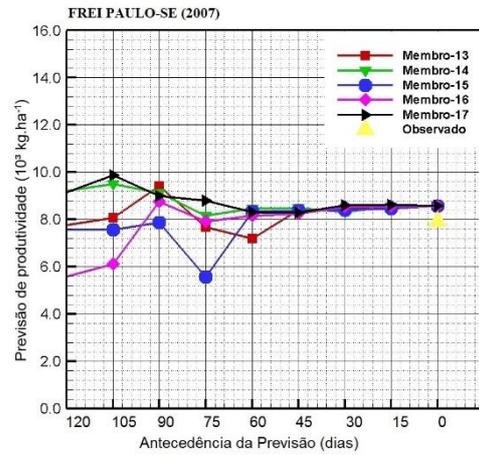
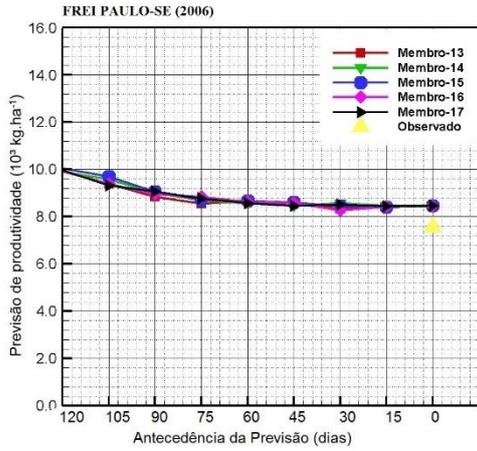
(continua...)

Figura 4.9 - Continuação



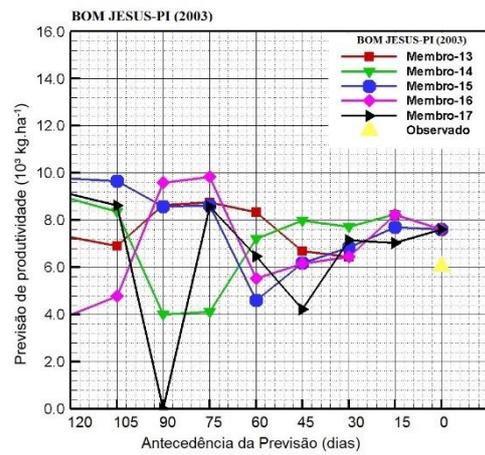
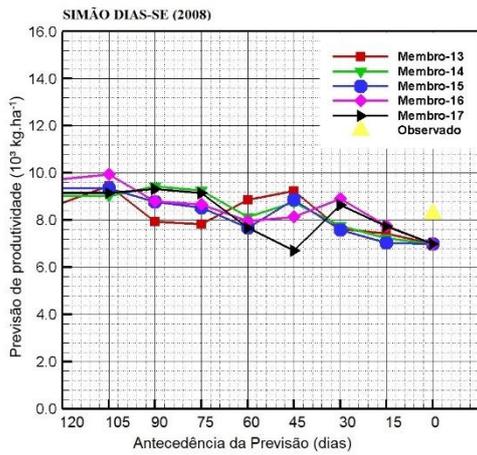
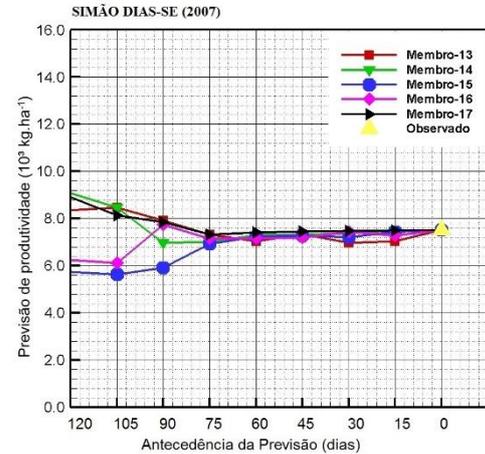
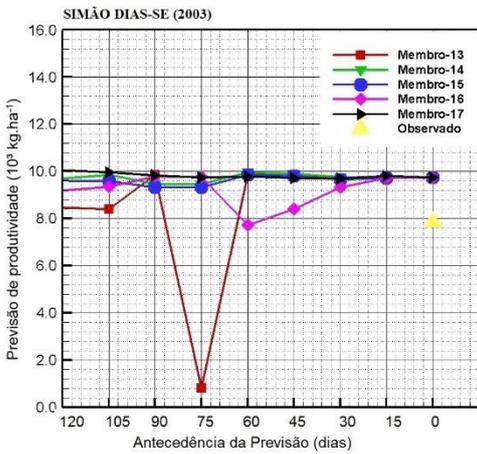
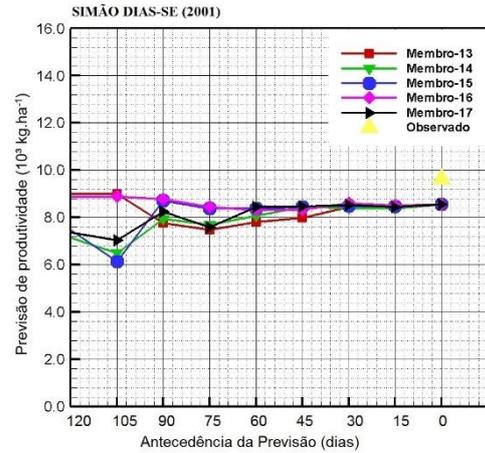
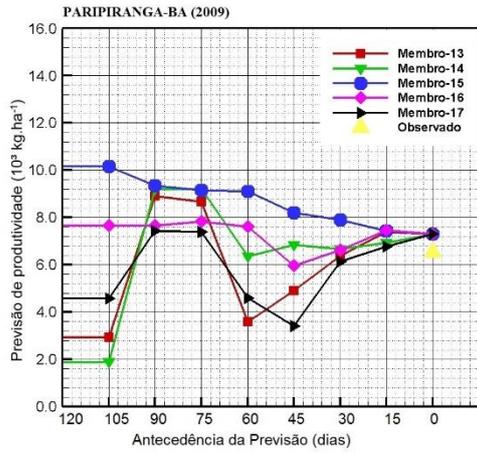
(continua...)

Figura 4.9 - Continuação



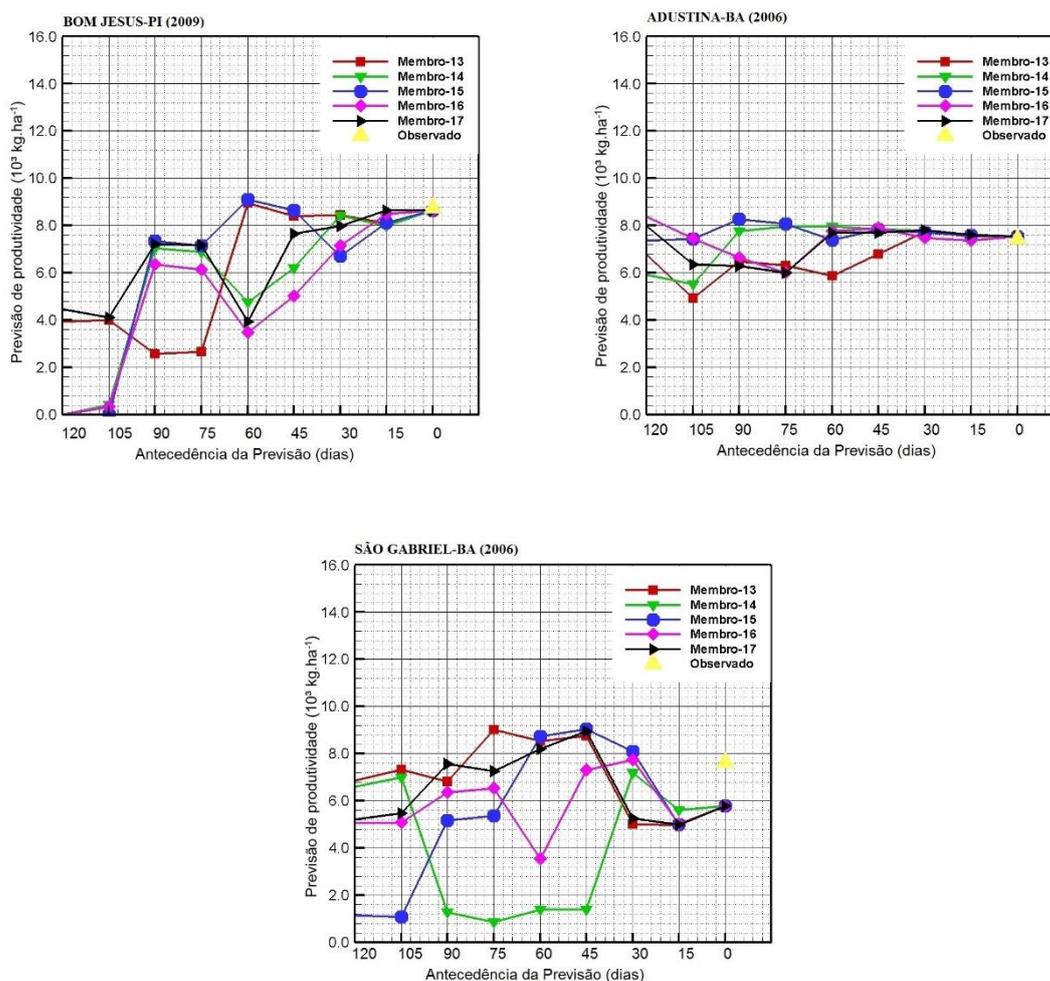
(continua...)

Figura 4.9 - Continuação



(continua...)

Figura 4.9 - Conclusão



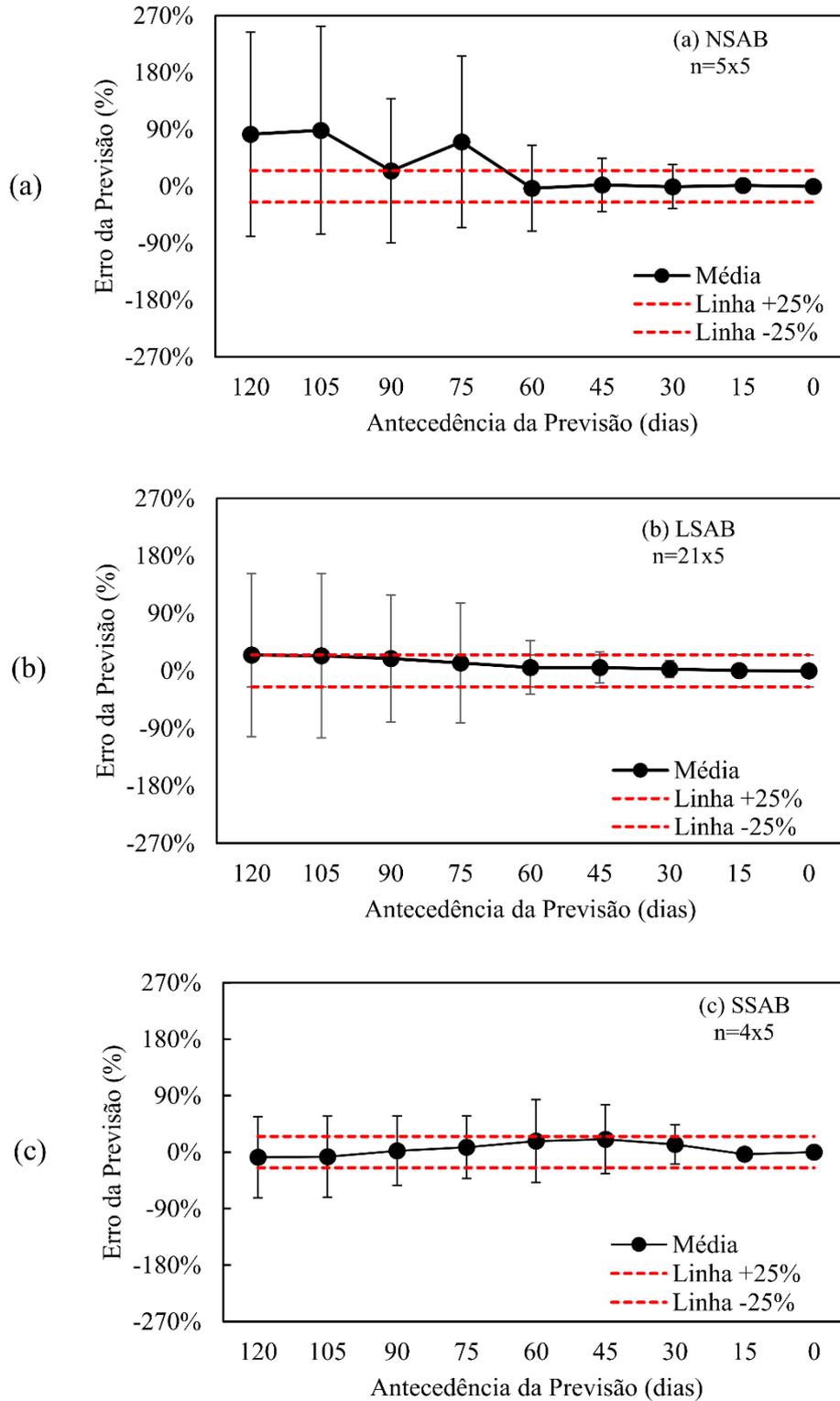
Fonte: Produção da autora.

4.5.2 Avaliação das Previsões de Produtividade de Milho Agrupadas por Região Climática.

Com o objetivo de analisar estatisticamente os erros associados às previsões das 30 safras analisadas, optou-se por unir os municípios pertencentes à mesma região climática. Dessa forma, analisou-se a média do erro relativo percentual - ERP para cada uma das previsões no decorrer da safra. Foi calculado também o desvio padrão do ERP, de forma a indicar a dispersão do erro para cada data de previsão.

Na Figura 4.10 apresentam-se a média e o desvio padrão do erro da previsão – ERP, como função da data de previsão, para as três regiões climáticas do Semiárido Brasileiro.

Figura 4.10 - Média dos erros de previsão de produtividade e desvio padrão dos membros em função dos dias antes da colheita (antecedência). O desvio padrão é indicado pelas barras verticais, enquanto a média do erro é indicada pelos círculos preenchidos e as linhas pontilhadas em vermelho indicam um limiar de erro dentro da faixa de 25%.



Fonte: Produção do autor.

Considerou-se que a melhor previsão de produtividade de milho é determinada pela média de produtividade do conjunto de membros, em vez da previsão de um único membro. Conseqüentemente, uma média da previsão próxima ao valor observado e um baixo desvio padrão indicam uma previsão de produtividade bem-sucedida, uma vez que as médias de previsões dos membros próximas ao valor observado e uma menor dispersão entre os membros é um indicativo de baixas incertezas.

Como indicado pelo desvio padrão na Figura 4.10, todas as três regiões apresentaram grande dispersão e maior espalhamento entre os membros no início da estação de crescimento, e uma redução acentuada à medida que se aproxima da data da colheita ou zero dia de antecedência.

A região NSAB (Figura 4.10a) apresentou o maior erro e desvio padrão dentre as três regiões. Isso pode ser observado, especialmente, nas primeiras previsões durante o ciclo; ou seja, aquelas mais distantes da data de colheita. No entanto, quando se compara as previsões para menos de 60 dias de antecedência, esta região apresenta os menores erros.

A região LSAB (Figura 4.10b) apresentou erros de previsão inferiores a 25% durante todo o ciclo de crescimento e um desvio padrão menor que aquele relatado para a região NSAB. Quando se compara as previsões realizadas para as datas próximas à colheita, observa-se que para o LSAB o erro é ligeiramente superior àquele para a região NSAB.

Finalmente, para a região SSAB (Figura 4.10c), a média do erro varia entre 25% e -25%, com maior dispersão no meio do ciclo de crescimento. No entanto, em 30 dias antes da colheita, o erro e o desvio padrão reduziram a valores aceitáveis.

De acordo com o apresentado na Tabela 4.6, para o NSAB o erro da previsão apresentou um desvio de 40% em torno do valor médio se comparado com a previsão realizada 45 dias antes da colheita. Entretanto, o erro médio já apresentava valores baixos (-3%) na previsão realizada 60 dias antes da colheita. Com 30 dias de antecedência à colheita, o desvio do erro ficou em torno de 35%, enquanto a média dos erros das previsões foi praticamente desprezível.

Tabela 4.6 - Resumo da média dos erros residuais de previsão e desvio padrão -DP para as 4 principais datas de previsão para cada uma das três regiões climáticas.

Antecedência da Previsão	NSAB		LSAB		SSAB	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
60 dias	-3,0	67,8	5,3	41,8	18,0	66,0
45 dias	2,2	42,0	5,2	24,2	20,0	55,0
30 dias	-0,4	34,9	2,7	13,3	12,0	31,0
15 dias	1,5	4,6	0,3	4,4	-3,0	7,0

Fonte: Produção da autora.

Para a região LSAB, a média dos erros apresentou-se, também, baixa já na previsão realizada com 60 dias de antecedência à colheita, contabilizando cerca de 5%, enquanto a dispersão deste erro foi de aproximadamente 40%. A dispersão dos erros das previsões diminuiu quase pela metade na previsão seguinte (45 dias de antecedência). Aos 30 dias antes da colheita, as previsões realizadas para a região LSAB apresentaram um erro médio menor que 3% e uma dispersão de aproximadamente 13%.

Com relação ao SBSA, a média dos erros das previsões foi de 20%, aos 45 dias de antecedência da colheita, e a dispersão dos erros foi igual a 50%. Somente após a penúltima previsão, ou seja, 30 dias de antecedência, a média dos erros apresentou-se inferior a 12% e o desvio padrão cerca de 30%.

De forma geral, para todas as três regiões consideradas, a média dos erros das previsões pode ser considerada baixa a partir da penúltima previsão (30 dias de antecedência), em particular para as regiões LSAB e NSAB, para as quais os erros apresentaram valores baixos desde 60 dias antes da colheita. A região LSAB foi a que apresentou menor incerteza nas previsões realizadas com antecedência menor que 60 dias.

As diferenças nas três regiões climáticas, em termos de antecedência no que concerne às previsões confiáveis de produtividade de milho, estão, provavelmente, relacionadas com as incertezas na previsão de sistemas meteorológicos que causam precipitação em cada região.

Conforme ressaltado em Kousky (1979), na região SSAB a precipitação é, em grande parte, causada por sistemas frontais oriundos das latitudes altas e médias do Hemisfério Sul; na região NSAB precipitações intensas são causadas por uma combinação entre a Zona de Convergência Intertropical e por brisas marítimas; enquanto na região LSAB, a precipitação é causada por distúrbios ondulatórios vindos da costa oeste da África até o litoral leste do Brasil.

Dessa forma, a melhor previsibilidade de produtividade de milho na região LSAB provavelmente está correlacionada às características de precipitação associadas aos distúrbios ondulatórios de leste, os quais são dominados por eventos de chuvas associadas a nuvens estratiformes (ARAÚJO, 2015). Apesar das precipitações associadas a nuvens estratiformes serem menos intensas, geralmente menor que 10 mm/h (TENÓRIO et al., 2010), elas apresentam uma frequência mais alta no decorrer da estação seca (ARAÚJO, 2015) se comparável com as precipitações de alta intensidade e curta duração que dominam as duas outras regiões (ARAÚJO, 2015).

Por outro lado, as regiões NSAB e SSAB são afetadas por eventos de precipitação de baixa frequência o que gera períodos secos mais longos, enquanto a região LSAB se beneficia por precipitações bem distribuídas no tempo e, portanto, mais regulares durante a estação seca. Este padrão de precipitação implica em um suprimento constante de água durante o ciclo de crescimento e de desenvolvimento da cultura. Na Tabela 4.7 apresenta-se a frequência relativa temporal de eventos de precipitação maiores que 5mm/dia para cada uma das três regiões climáticas, em que tanto as observações como os resultados do modelo Eta evidenciam as diferenças entre as regiões. O limiar de 5mm na Tabela 4.7 foi selecionado devido ao fato de ser este o valor médio de evapotranspiração de referência para as três regiões e, assim, eventos de chuvas desta magnitude são suficientes para suprir as necessidades hídricas diárias médias.

Tabela 4.7 - Frequência relativa média de episódios chuvosos durante a estação chuvosa 2001-2009.

	LIMIAR	NSAB	SSAB	LSAB
PREVISTO (%)	<= 5 mm	82,9	80,8	77,1
	> 5 mm	17,1	19,2	22,9
OBSERVADO (%)	<= 5 mm	82,2	81,9	77,0
	> 5 mm	17,8	18,1	22,7
ETo média estimada (mm/dia)		5,243	5,198	4,346

Fonte: Produção da autora.

A previsão climática sazonal reflete as tendências atmosféricas relacionadas aos padrões de temperatura da superfície do mar (CHOU et al., 2005); no entanto, elas são incapazes de produzir a sequência temporal exata dos eventos de precipitação devido aos limites teóricos da previsibilidade atmosférica. Conseqüentemente, eventos de precipitação previstos por cada um dos membros do conjunto (*ensemble*) variam em magnitude e sequência de tempo.

Uma vez que as regiões SSAB e NSAB são afetadas por menor frequência de eventos de chuvas, alguns membros podem prever a precipitação antes do período crítico da cultura (ver [Tópico 2.3](#)), enquanto outros membros preveem chuvas após o período crítico da cultura, quando os efeitos do déficit hídrico na produção já são irreversíveis.

Este fato explica o porquê existe uma dispersão maior entre os membros nestas duas regiões dominadas por baixa frequência de eventos de precipitação.

Baseando-se na análise por região, é possível concluir que o uso de dados meteorológicos observados juntamente com previsão climática sazonal proveniente do modelo Eta podem prever a produtividade da cultura do milho com uma precisão razoável com pelo menos 30 dias de antecedência à colheita. Este resultado é similar àquele apresentado por Bussay et al. (2015), que obtiveram uma previsão de produtividade de milho ótima, para a Hungria, com antecedências de 35-56 dias antes da data de colheita, também ao utilizar previsão climática sazonal.

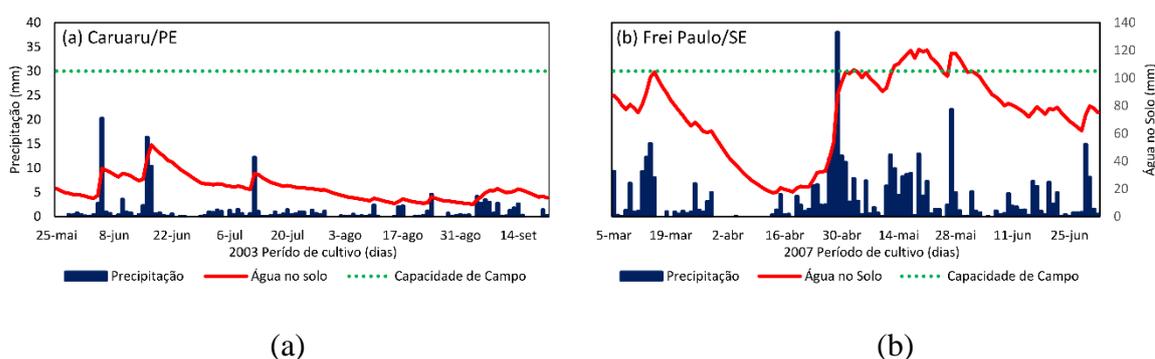
4.6 Sistema de Previsão Sazonal de Produtividade de Milho no SAB: Um Estudo de Caso Avaliando um Ano Seco (2003) e um Ano Úmido (2007).

Como um exemplo da potencial aplicação do sistema de previsão sazonal de produtividade de milho, selecionou-se, dentre os 13 municípios analisados, dois municípios em que ocorreram índices pluviométricos abaixo e acima da média histórica. A intenção primordial é avaliar a antecedência e confiabilidade da previsão em um ano com potencial para um colapso de safra (por ex. um ano com precipitação abaixo da média histórica) e em um ano com potencial para uma safra bem-sucedida.

Em Caruaru – PE, o ano de 2003 foi considerado muito seco, contabilizando um total anual de precipitação de 356 mm, enquanto a média climática é de 764 mm (INMET, 2009). Por outro lado, o ano de 2007 foi considerado chuvoso no município de Frei Paulo - SE, com a precipitação anual totalizando 813 mm, valor este acima dos 760 mm que representa a média climatológica.

Na Figura 4.11 apresentam-se a precipitação diária e o armazenamento de água no solo no decorrer das safras dos períodos analisados. O armazenamento de água no solo foi calculado de acordo com Souza et al. (2001) e Rossato et al. (2005).

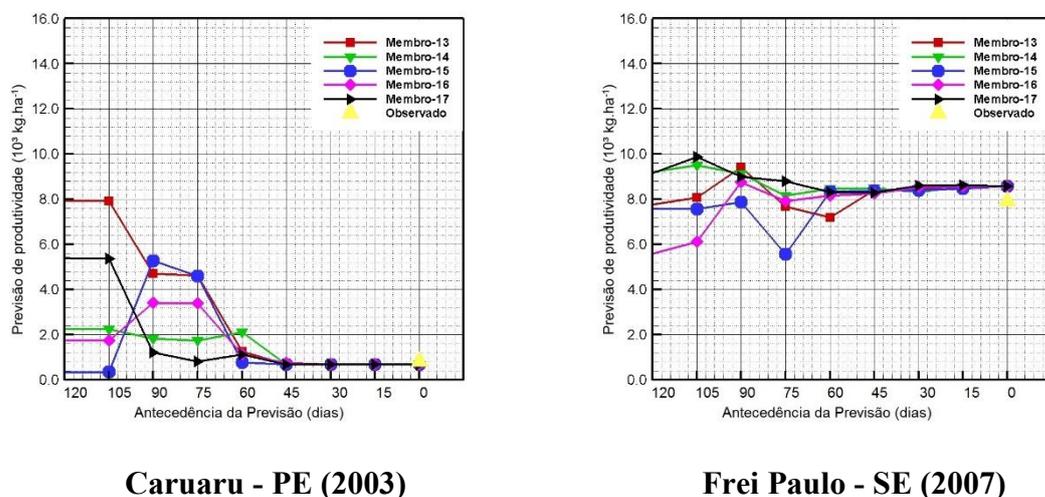
Figura 4.11 - Precipitação e lâmina de água no solo para os anos de (a) 2003 e (b) 2007.



Fonte: Produção da autora, com base em dados do Proclima (CPTEC/INPE, 2016).

No ano de 2003, um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o SAB e a Alta Subtropical do Atlântico Sul foram os sistemas meteorológicos que mais influenciaram a precipitação deficiente em Caruaru - PE, enquanto os distúrbios ondulatórios de leste contribuíram para aumentar a precipitação em Frei Paulo - SE durante o ano de 2007 (CLIMANÁLISE, 2003; 2007).

Figura 4.12 - Produtividades de milho previstas no decorrer dos ciclos de crescimento para os municípios de Caruaru - PE em um ano seco (2003) e de Frei Paulo - SE, considerando um ano úmido (2007).



Caruaru - PE (2003)

Frei Paulo - SE (2007)

Fonte: Produção da autora.

Na Figura 4.12 são apresentadas as previsões quinzenais de produtividades de milho obtidas por cada membro e para cada município no ano analisado. Para longos períodos de antecedência (previsões realizadas no início da safra), observa-se uma alta variabilidade entre os membros na previsão de produtividade. No entanto, à medida que a estação de crescimento progredia e mais observações se tornaram disponíveis, a produtividade prevista rapidamente convergiu para o valor observado. Além disso, a diferença entre os membros não culminou em quase nenhum impacto sobre a previsão da safra, uma vez que a produtividade é fortemente dependente de períodos críticos da cultura.

Em 2003, o conjunto de membros apresentou uma tendência a superestimar a produtividade no início da safra, enquanto em 2007 o conjunto dos membros apontou para uma previsão próxima ao valor observado, com uma antecedência de 90 dias da colheita.

Bussay et al (2015), ao utilizar previsão climática sazonal, relataram que a melhor previsão de produtividade de milho esteve associada às fases de floração e enchimento de grãos. No presente estudo, a fase de florescimento iniciou-se 56 dias após a semeadura e a previsibilidade melhorou a partir da previsão realizada 60 dias antes da colheita, ou seja, no início da fase de florescimento, indicando que a melhor previsão também está associada à fase de florescimento.

Para a região Sudeste do Brasil, Soler et al. (2007) demonstraram que o modelo CSM-Ceres Maize alimentado com dados climatológicos e dados meteorológicos observados foi capaz de prever a produtividade de milho com até 45 dias de antecedência à colheita.

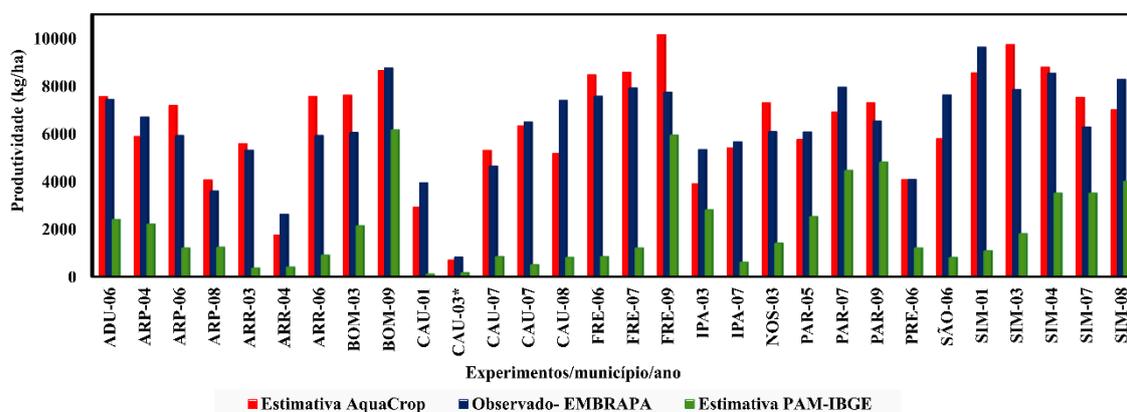
No entanto, para a região SAB, onde há variabilidade interanual da precipitação, o uso de previsões climáticas sazonais em vez de dados climatológicos pode contribuir para capturar os padrões de precipitação de anos atípicos, como, por exemplo, um ano muito seco ou um ano chuvoso, conforme apresentado na Figura 4.11.

4.7 Desafios Científicos e Tecnológicos para a Implantação de um Sistema de Previsão de Safras do Semiárido.

Neste tópico, visa-se apresentar uma análise comparativa entre as produtividades de milho estimadas no presente trabalho, com aquelas apresentadas pela Produção Agrícola Municipal – PAM-IBGE e com observações provenientes de experimentos de campo realizados pela EMBRAPA. Pretende-se, ainda, discutir sobre os desafios para obtenção de um sistema de previsão de safras mais preciso.

Na Figura 4.13 apresentam-se as produtividades de milho para 13 municípios do SAB entre os anos de 2001 e 2009, obtidas por estudo de modelagem, estimativas e observadas em experimentos de campo.

Figura 4.13 - Comparativo entre as produtividades de milho para cada experimento/município por ano, observadas em experimentos de campo (dados EMBRAPA), estimadas pelo modelo AquaCrop e estimativas médias divulgadas na PAM-IBGE.



Fonte: Produção da autora, com base em dados do presente trabalho, dados da Produção Agrícola Municipal – PAM (IBGE, 2016) e dados observados pela EMBRAPA.

Os dados observados nos experimentos da EMBRAPA (apresentados em azul na Figura 4.13) representam cultivos sob práticas adequadas, como, por exemplo, controle sobre a incidência de pragas e doenças e uma adequada nutrição do solo. No entanto, por se tratar de cultivos de sequeiro, esta produtividade representa a produtividade atingível (SENTELHAS et al., 2015) para a região ou produtividade limitada pela disponibilidade hídrica (LOBELL et al. 2009).

Por outro lado, as estimativas da PAM-IBGE (representadas em verde na Figura 4.13) refletem a produtividade média de cada município em um determinado ano, conforme discutido no [tópico 2.4](#). Representam a produtividade real média (SENTELHAS et al. 2015), a qual, é influenciada por fatores como pragas, doenças, plantas daninhas que contribuem para a redução da produtividade atingível da cultura.

A diferença entre a produtividade atingível e a produtividade real média é conhecida como quebra de produtividade (SENTELHAS et al. 2015), determinada por fatores limitantes e redutores do desenvolvimento da cultura.

Para a cultura do milho, Cruz et al. (2010) sugeriram que, além das condições climáticas, as práticas de manejo, como densidade de plantio, época e profundidade de semeadura, afetam o potencial de produção da cultura do milho. Além destas citadas, a cultivar utilizada, as

condições químicas e físicas dos solos, o manejo de pragas, doenças e plantas daninhas, também afetam a produtividade final do milho (FANCELLI e DOURADO NETO, 2004).

As estimativas de produtividade efetuadas no presente trabalho (em vermelho na Figura 4.13) se aproximam bastante daquelas observadas em experimentos da EMBRAPA (em azul na Figura 4.13); portanto, refletem a produtividade atingível de cada localidade. Apesar de capturar adequadamente a tendência das produtividades, o sistema de previsão apresentou dificuldades em capturar mais adequadamente a produtividade real média em termos absolutos.

Portanto, a implantação de um sistema operacional deverá agregar informações sobre as práticas adotadas em cada localidade, com vistas a alcançar uma previsão de safras próxima à média encontrada em cada município, ou seja, capturar a quebra de produtividade, considerando as escalas temporal e espacial.

Dentre os fatores que poderiam contribuir para uma melhor previsão de produtividade, citam-se a incorporação de dados com detalhamento necessário para uma melhor calibração do modelo AquaCrop. Soltani e Sinclair (2012) ressaltaram que a aplicação de modelos de culturas é limitada pela disponibilidade e qualidade dos dados de entrada.

Apesar da calibração do modelo ter alcançado uma precisão de 96% ($r = 0,96$), um melhor refinamento pode ser obtido caso dados mais detalhados estejam disponíveis. Por exemplo, Stetuto et al. (2012) sugeriram que sejam consideradas na calibração medidas periódicas de índice de área foliar ou cobertura do dossel, biomassa e profundidade do sistema radicular no decorrer do ciclo fenológico.

Outro fato não levado em consideração foi o nível de fertilidade e a salinidade do solo. Apesar do modelo AquaCrop não simular o ciclo de nutrientes no solo, permite que sejam adicionadas informações semiquantitativas que refletem o efeito da fertilidade do solo na biomassa e, conseqüentemente, na formação dos grãos. Segundo van Gaalen et al. (2014), tais informações podem ser obtidas por experimentos de campo relacionados à produção local e resultam em previsões com maior acurácia, não somente da produtividade final, mas também do balanço de água no solo e produção de biomassa para diferentes níveis de fertilidade.

Assim como a fertilidade do solo, a salinidade deste também afeta o desenvolvimento do dossel, transpiração e produção de biomassa (MONDAL et al. 2015). Um dos indicadores da salinidade do solo é a condutividade elétrica média do extrato saturado do solo na zona radicular, requerida para simulação (MONDAL et al. 2015) e, devido à ausência deste dado, a curva de resposta que descreve o efeito do estresse por salinidade do solo na cultura foi considerada como valor *default* no presente trabalho.

Vale lembrar que a região SAB apresenta predominância de solos salinos e sódicos (RIBEIRO et al. 2003), devido à natureza física e química dos solos, ao déficit hídrico e à elevada taxa de evaporação (SILVA et al., 2011) e, portanto, seria importante agregar tais informações na simulação de produtividades agrícolas obtidas nesta região.

Devido a todos estes fatores que afetam a produtividade de uma cultura agrícola, a obtenção de um sistema de previsão de safras condizente com a realidade de cada município depende, além da capacidade do modelo agrícola em simular o crescimento e desenvolvimento da cultura e da habilidade do modelo climático em prever o estado da atmosfera, da quantidade e qualidade das informações obtidas sobre as práticas de manejo adotadas em cada localidade.

Considerando que as estimativas do IBGE são realizadas por amostragem e, portanto, sujeitas a erros de tamanho, representatividade e metodologia de amostragem, faz-se necessário avaliar os erros dessas estimativas através de levantamentos detalhados em campo de alguns municípios, visando determinar o erro inerente aos levantamentos.

Quanto aos desafios tecnológicos, vale ressaltar que a operacionalização de um sistema de previsão de safras dinâmico requer uma capacidade de processamento computacional adequada, permitindo assim expandir a previsão de safra para toda região e, ainda, incluir mais detalhes sobre diferentes cultivares, maior número de previsões no decorrer do ciclo de crescimento da cultura, previsões climáticas subsazonais e com melhor resolução, além da inclusão de mais membros do modelo climático, permitindo uma melhor avaliação probabilística.

A versão do modelo AquaCrop utilizada neste estudo apresenta janelas interativas que facilitam o uso e a interpretação dos resultados do modelo, mas impedem sua execução em ambientes operacionais, visto que exigem a interação com o usuário. Além disso, a versão utilizada, que é *freeware*, disponibiliza apenas a versão executável do código, o que impede adaptações e modificações para situações específicas. Entretanto, a disponibilização recente da versão em código aberto do AquaCrop (FOSTER et al. 2017), irá facilitar a manipulação de dados, implantação do modelo de forma operacional, adaptação e permitirá um acoplamento *off-line* ao modelo Eta, reduzindo o tempo de processamento.

5. CONCLUSÕES

Dados provenientes de 37 experimentos de campo foram utilizados para calibrar e validar o modelo AquaCrop para a região Semiárida do Brasil. As estimativas do modelo AquaCrop explicaram pelo menos 74% da variabilidade da produtividade de milho ($r^2 = 0,74$). O modelo AquaCrop, utilizando previsões climáticas sazonais provenientes do modelo Eta, provou ser uma eficiente ferramenta para previsão de milho com, pelo menos, 30 dias de antecedência à colheita, em muitos dos municípios com até 60 dias de antecedência.

As diferenças nas três regiões climáticas, em termos de antecedência para obtenção de previsões confiáveis de produtividade de milho, estão provavelmente, relacionadas às incertezas na previsão de sistemas meteorológicos que causam precipitação em cada região. Dentre as três regiões climáticas do SAB, a região LSAB foi a que apresentou menores incertezas nas previsões realizadas com antecedência inferior a 60 dias

As melhores previsões de produtividade de milho foram obtidas para a região LSAB, as quais, provavelmente, estão correlacionadas às características de precipitação daquela região. Por serem mais frequentes no decorrer da estação chuvosa, os eventos de precipitação são mais facilmente capturados pelos membros do modelo Eta, favorecendo um suprimento constante de água durante o ciclo de simulação de crescimento e de desenvolvimento da cultura.

O uso de previsões sazonais climáticas sazonais para prever produtividade de milho na região SAB mostra-se mais adequado do que o uso de dados climatológicos por possibilitar a antecipação de padrões de precipitação de anos atípicos, como, por exemplo um ano muito seco ou um ano chuvoso.

As estimativas de produtividade efetuadas no presente trabalho foram condizentes com a produtividade atingível da região; no entanto, não representaram, em termos absolutos, a produtividade real média de cada localidade. Para tal, é indispensável a incorporação, no sistema de previsão, das informações sobre as práticas de manejo de cada localidade e informações mais detalhadas sobre os cultivos, a fim de se obter uma caracterização mais fidedigna dos cultivos da região em estudo.

Ademais, dados experimentais da cultura do milho foram disponibilizados para poucos municípios da região, limitando, assim, uma melhor representatividade espacial do presente estudo.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O gerenciamento de ações de mitigação e preparação em face dos efeitos da seca pode ser aprimorado se as previsões de produtividade agrícola se estender para toda a região.

Para melhorar a previsão de safras, outros fatores devem ser incluídos na avaliação como, por exemplo, a sanidade da cultura e a nutrição do solo. Devido a limitações no tempo de processamento computacional, as simulações no presente estudo se basearam apenas em 5 membros do modelo Eta, o que comprometeu a análise estatística dos erros associados à produtividade prevista. Além disso, o uso de previsões climáticas no horizonte subsazonal pode potencialmente melhorar a qualidade das previsões de safra ao melhorar a previsão de precipitação antes da fase de florescimento. As previsões climáticas subsazonais produzem estimativas de precipitação para um período de, aproximadamente, 50 dias (em vez de 120 dias) e permitem capturar a variabilidade intrasazonal da precipitação (CHOU et al. 2015).

Ressalta-se que é indispensável a atuação de uma equipe multidisciplinar atuando na implantação e operacionalização de sistema de previsão de safras. Principalmente porque informações como incidência de pragas, doenças, granizo e outros efeitos externos que afetam a produtividade da cultura não são simulados pelo modelo AquaCrop (RAES et al. 2016). No entanto, faz-se necessário uma avaliação criteriosa, por profissionais especializados, a fim de integrar conhecimentos de diferentes disciplinas como agronomia, fitopatologia, ciência do solo, meteorologia, economia e principalmente sobre a população, sendo ela o principal foco de todo o processo de planejamento que pode ser beneficiada através da implantação de um eficiente sistema de previsão de safras na região Semiárida do Brasil.

Para tal finalidade, faz-se necessário a realização de experimentos de campo em áreas/municípios pilotos que sejam representativas da região semiárida do Nordeste, combinando levantamentos de campo mais detalhados de previsão de safras, experimentos controlados como os utilizados neste estudo, e informações meteorológicas mais detalhadas que permitam ajustar e validar o sistema operacional. A confiabilidade e a credibilidade do sistema dependem de um planejamento racional do sistema operacional, de maneira a assegurar não apenas a precisão desejada no sistema, mas também reduzir o custo de sua manutenção.

Por fim, é necessário integrar os esforços de órgãos federais e estaduais no que concerne às redes de monitoramento agrometeorológico, bem como prover levantamentos e experimentos detalhados de campo. Isto vai eliminar redundâncias, permitir uma maior precisão das previsões e reduzir os custos de manutenção do sistema. Iniciativas voluntaristas, de caráter setorial, sem engajamento e participação efetiva dos atores geradores e usuários da informação, dificilmente terão sustentação no longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRHA, B.; DELBECQUE, N.; RAES, D.; TSEGAY, A.; TODOROVIC, M.; HENG, L.; VANUTRECHT, L.; GEERTS, S.; GARCIA-VILA, M.; DECKERS, S. Sowing strategies for barley (*hordeum vulgare* l.) based on modelled yield response to water with AquaCrop. **Experimental Agriculture**, v. 48, n. 2, p. 252-271, 2012.

ADAMI, M. **Estimativa de áreas agrícolas por meio de técnica de sensoriamento remoto, geoprocessamento e amostragem**. 2004. 183 p. (INPE-10235-TDI/900). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Jose dos Campos. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.05.10.38>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

AHMADI, S.H.; MOSALLAEPOUR, E.; KAMGAR-HAGHIGHI, A.A.; SEPASKHAH, A.R. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. **Water Resour Manage**. v. 29, p.2837–2853, 2015.

AKUMAGAA, U.; TARHULEA, A.; YUSUF, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, n. 2017, p. 225–234, 2017.

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

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, L. M.; CHOU, S. C.; MARENGO, J. A. Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo Eta climático sobre o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004. CD-ROM

ALVES, L. M.; MELO, A. B. C.; CHOU, S. C.; NOBRE, P. Estudo comparativo entre a precipitação sazonal simulada pelo modelo ETA e observada sobre o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2002, 16-20 out., Rio de Janeiro (RJ). **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. Artigos, p. 1029-1035. CD-ROM.

ANDARZIAN, B. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated. **Agricultural Water Management**. 2011.

ANJOS, F.A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeadura em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. 2011. 72f. Dissertação (Mestrado em Agronomia; Produção vegetal; Proteção de plantas) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011.

ARAÚJO, R.S. **Classificação climatológica das nuvens precipitantes no nordeste brasileiro utilizando dados do radar a bordo de um Satélite TRMM**. 2015. 126 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.07.18.04-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JQLD2S>>.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology, **Water Resources. Res.**, v. 47, W04505, 2011.

BARROS, A.L.C.; VAN LIER, Q.J., MAIA, A.H.N.; SCARPARE, F.V. Pedotransfer functions to estimate water Retention parameters of soils in northeastern Brazil. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 37, p. 379-391, 2013.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.

BLACK, T. L. The New NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 256-278, 1994.

BONATTI, J. Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC. **Climanálise especial**. Outubro 1996.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agron. J.** v. 88, p.704-716, 1996.

BRASIL. **Observatório das secas**. 2013. Disponível em:<<http://www.brasil.gov.br/observatoriodaseca/>> Acesso em: 11- Nov-2016.

_____. Ministério da Integração Nacional. **Relatório final do grupo de trabalho interministerial para redelimitação do semi-árido nordestino e do polígono das secas**. Brasília, 2005. 118 p.

_____. Decreto Lei nº 10.954 de 29 de setembro de 2004. **Diário Oficial da Presidência da República**. Poder Executivo. Brasília, DF, 2004.

_____. Decreto Lei nº 10.420 de 10 de abril de 2002. **Diário Oficial da Presidência da República**. Poder Executivo. Brasília, DF, 2002.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulics properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State University. Civil Engineering Department. 27p. (Hydrology Paper 3). 1964.

BUDYKO MI. **Climate and life**. New York: Academic Press, 1974.

BUSSAY, A.; VAN DER VELDE, M.; FUMAGALLI, D.; SEGUINI, L. Improving operational maize yield forecasting in Hungary. **Agricultural Systems**, v. 141, p. 94-106, 2015.

BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L.; CHOU, S. C. 2002. Influência da temperatura da superfície do mar sobre as previsões climáticas sazonais do modelo regional ETA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12.; SEMINÁRIO BRASILEIRO DE HIDROMETEOROLOGIA, 3.; ENCONTRO BRASILEIRO DE INTERAÇÃO OCEANO-ATMOSFERA, 3.; SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUÍMICA E POLUIÇÃO DO AR, 4-9 ago 2002, Foz do Iguaçu (PR). **Anais...**Rio de Janeiro: SBMet, 2002. p. 2145-2152.

BUSTAMANTE, J.; GOMES, J. L.; CHOU, S. C.; ROZANTE, J. R. Evaluation of April rainfall forecasts over South America using the Eta Model. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, (São José dos Campos), Cachoeira Paulista, SP, v. 14, n. 5, 1999.

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

CAMPOS, J.N.B. Paradigms and public policies on drought in Northeast Brazil: a historical perspective. **Environmental Management**. v. 55, p.1052–1063, 2015.

CAPA-MOROCHO, M.; INES, A.V.M.; BAETHGEN, W.E.; RODRÍGUEZ-FONSECA, B.; HAN, E.; RUIZ-RAMOS, M. Crop yield outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting seasonal climate forecasts with crop simulation models. **Agricultural Systems**, v.149, p. 75-87, 2016.

CARDOSO, A. O.; PINTO, H.S.; ÁVILA, A.M.H.; SILVA DIAS, P. L.; MARIN, F.R.; PILAU, F. Extended time weather forecasts contributes to agricultural productivity estimates. **Theor Appl Climatol**, v. 102, n. 3, p. 343–350.2010.

CARVALHO, O. As secas e seus impactos. In: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (Brasil) / Agência Nacional de Águas. **A questão da água no Nordeste**. Brasília: CGEE, 2012.

CAVALCANTI, I.F.A.; MARENGO, J.A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.A.; TROSNIKOV, I.; BONATTI, J.P.; MANZI, A.O.; TARASOVA, T.; PEZZI, L.P.; D'ALMEIDA, C.; SAMPAIO, G.; CASTRO, C.C.; SANCHES, M.B.; CAMARGO, H. Global climatological features in a simulation using CPTEC/COLA AGCM. **J Clim**, v.15, p.2965-2988. 2002.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **PIB do Agronegócio: 1995-2015**. Piracicaba, SP, 2015. Disponível em: < <http://cepea.esalq.usp.br/pib/>> Acesso em 11-Nov-2016.

CHIPANSHI, A.; ZHANG, Y.; KOUADIO, L.; NEWLANDS, N.; DAVIDSON, A.; HILL, H.; WARREN, R.; QIAN, B.; DANESHFAR, B.; BEDARD, F.; REICHERT, G. Evaluation of the Integrated Canadian Crop Yield Forecaster (ICCYF) model for in-season prediction of crop yield across the Canadian agricultural landscape. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 206, p. 137–150, 2015.

CHOU, S. C. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. 1990. 134 p. (INPE-5222-TDL/437). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1990. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/HcboD>>.

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**, v. 03, p. 512-527, 2014a.

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.; NOBRE, P. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 03, p. 438-454, 2014b.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005.

CHOU, S. C.; ROZANTE, J. R.; BUSTAMANTE, J. F. Influência da resolução horizontal nas condições iniciais e contorno nas previsões de chuvas tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, 16-20 out., Rio de Janeiro (RJ). **Proceedings...** Rio de Janeiro: SBMet, 2000. Artigos, p. 1592-1598. CD-ROM, Papel. Br.

CHOU, S.C. **Modelagem numérica**. In: WORKSHOP LATINO AMERICANO EM MODELAGEM REGIONAL DE TEMPO E CLIMA UTILIZANDO O MODELO ETA, 3., 2010 Cachoeira Paulista. **Anais...** Cachoeira Paulista: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Process Geophysics**, v.12, n. 4, p. 537-555, 2005.

CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; ALVES, L.F.; RODRIGUEZ, D.A.; GOMES, J.L.; ROZANTE, J.R.; NOBRE, P. Previsões de chuva no horizonte de 50 dias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 16., 2015, Rio de Janeiro. **Anais.....** Rio de Janeiro: ABCM, 2015.

CLIMANÁLISE BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA. Cachoeira Paulista (SP): Edição: INPE / CPTEC. Vol. 18. N°4. Disponível em:< <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0403/index.html>> Acesso em 4-Agos - 2016.

_____. Cachoeira Paulista (SP): Edição: INPE / CPTEC. Vol. 22. N°3. Disponível em:< <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0307.shtml>> Acesso em 4-Agos -2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo levantamento.** Brasília, Julho/2012.

_____. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, v. 2 - Safra 2014/15, n. 9 - Nono levantamento,** Brasília, p. 1-104, junho 2015.

COX, F.R.; LINS, D.G. A phosphorus soil test interpretation for corn grown on acid soils varying in crystalline clay content. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.15, p.1481-1491, 1984.

CREED, I.F. et al. Changing forest water yields in response to climate warming: results from long-term experimental watershed sites across North America. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3191–3208, 2014.

CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A.; ALVARENGA, R.C.; GONTIJO NETO, M.M.; VIANA, J.H.M.; OLIVEIRA, M.F.; MATRANGOLO, W.J.R.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. O cultivo do milho. **Sistema de Produção**, 1. ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 6^a edição. Set. /2010.

CUNHA, A.P.M.; ALVALÁ, R.C.; NOBRE, C.A.; CARVALHO, M.A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 214–215, p. 494-505, 2015.

DARANI, S.M.M.M.; DASTJERDI, J.K.; STONE, R.; BABAEIAN, I.; ABBASI, F. Linking a general circulation model with a crop model to forecast barley yields: a case study for Isfahan, Iran. **International Journal of AGRICULTURE**. v. 2, p. 451-469, 2015.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H.; BENTVELSEN, C. L.; BRANSCHEID, V.; PLUSJÉ, J.; SMITH, M. et al. **Yield response to water.** Rome: FAO, 1979. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DUMONT, B.; BASSO, B.; LEEEMANS, V.; BODSON, B.; DESTAIN, J.P.; DESTAIN, M.F. A comparison of within-season yield prediction algorithms based on crop model behaviour analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 204, p. 10-21, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.014>

EK, M.B.; MITCHELL, M. K.; LIU, Y.; ROGERS, E.; GRUNMAN, P.; KOREN, V.; GAYANO, G.; TARPLEY, J.D. Implementation of Noah Land Model advances in the NCEP operational Eta Model. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n. D22, p. 8851-8867, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 eds. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho.** 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360p.

FELS, S.B.; SCHWARZKOPF, M.D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 32, p. 1475–1488, 1975.

FENNESSY M. J.; SHUKLA J. Seasonal prediction over North America with a Regional Model Nested in a Global Model. **Journal of Climate**. v. 13, p. 2605-2627, 2000.

FIGUEREDO JR., L.G.M. **Modelo para estimativa da produtividade de grãos de milho no estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

FONSECA, J.E.; CARNEIRO, M.; PENA, J.L.; COLOSIMO, E.A.; SILVA, N.B.D.; COSTA, A.G.F.C.; CAIRNCROSS, S.; HELLER, L. Reducing occurrence of giardia duodenalis in children living in semiarid regions: impact of a large-scale rainwater harvesting initiative. **PLoS Neglected Tropical Disease**, v. 8, n. 6, 2014.

FONTANA, D.C.; WEBER, E.; DUCATI, J.; FIGUEIREDO, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. **Monitoramento e previsão da safra de soja 1999/2000 no Brasil**. Porto Alegre: Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, CEPARM/UFRGS, 2001. 116p. (Série D: Relatório Técnico - n.005/01).

FOSTER, T. N.; BROZOVIĆ, N.; BUTLER, A.P.; NEALE, C.M.U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T.C. AquaCrop-OS: an open source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural Water Management**. v.181, p. 18-22, 2017.

GAN, M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil**. 1982. 80 p. (INPE-2685-TDL/126). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1982. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/GwAkj>>.

GARCÍA-VILA, R.; FERERES, E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. **European Journal of Agronomy**, v. 36, n. 1, p. 21– 31, Jan 2012.

GREATREX, H. **The application of seasonal rainfall forecasts and satellite rainfall estimates to seasonal crop yield forecasting for Africa**. (Doctoral thesis). University of Reading. 2012.

HANSEN, J. Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice. *Philos. Trans. R. Soc.* v. 360, p. 2037–2047. 2005.

HANSEN, J.W.; INDEJE, M. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.125, p. 143–157, 2004.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77–92.

HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVELT, S.; HOWEL, T.; STETUTO, P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, 488-498, 2009.

HSIAO, T.S.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and Testing for Maize. **Agronomy Journal**, 448-459, 2009.

HSIAO, T.S.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. **Pesquisa nacional de amostra de domicílios**: segurança alimentar. Rio de Janeiro. 2014.

Disponível em:

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/seguranca_alimentar_2013/>. Acesso em: 11-NOV-2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>. Acesso em 11-NOV-2016.

_____. Censo Agropecuário 2006. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/>. Acesso em 13-MAI-2016.

_____. Semiárido Brasileiro. Malha Municipal Digital. Base Cartográfica Digital Integrada -15.000.000. 2005. Disponível em: <

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/semiarido.shtm?c=4>> Acesso em 17-FEV-2017.

_____. SIDRA – Sistema IBGE de recuperação automática. Produção Agrícola Municipal. 2015. Disponível em:

<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=99&z=t&o=3>> Acesso em 14/10/2016.

_____. Mapa de solos do Brasil: escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2001.

RAMOS, A.M.M., SANTOS, L.A.R., FORSTES, L.T.G. **Normais climatológicas do Brasil (1961-1990)**. Brasília, DF: INMET, 2009.

JAMIESON, P.D.; PORTER, J.R, WILSON, D.R. A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crop Research*, v. 27, n. 4, p. 337-350, Nov. 1991.

JANJIC, Z.I. The step-mountain coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 927–945, 1994.

KOUSKY, V.E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140–1153, 1979.

- KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south atlantic. **Tellus**, v. 33, p. 538–551, 1981.
- KOUSKY, V.E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p. 488–498, 1980.
- KOUSKY, V.E.; CHU, P.S. Fluctuation in annual rainfall for Northeast Brazil. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 56, p. 457–465, 1978.
- LACIS, A.A.; HANSEN, J.E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Science**, v, 31, p.118-133, 1974.
- LANDAU, E.C.; SANS, L.M.A., SANTANA, D.P.: Cultivo do milho: clima e solo. **Sistemas de Produção**, 2. Embrapa Milho e Sorgo. ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 5ª edição. Disponível em :<
http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_5_ed/climaesolo.htm> Acesso em: 11-Agos-2016.
- LEFÈVRE, M.; REMUND, J.; ALBUISSON, M.; WALD, L. Study of effective distances for interpolation schemes in meteorology Annual Assembly, European Geophysical Society, Nice. **Geophysical Research Abstracts**, v. 4: EGS02-A-03429, 2002.
- LEGATES, D. R.; MC CABE JR., G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.
- LITTELL, J., MCKENZIE, D., KERNS, B. K., CUSHMAN, S., AND SHAW, C. G. Managing uncertainty in climate-driven ecological models to inform adaptation to climate change. **Ecosphere**. V. 360, p.1–19. 2011.
- 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.
- LUMBRERAS, J.F.; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P.E.F.; BARROS, A.H.C.; AGLIO, M.L.D.; DART, R.O. Potencialidades e limitações ao uso agrícola de solos do Matopiba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. **Anais...** Viçosa, MG: SBCS, 2015.
- Machado, L. A. T. et al. Distúrbios Ondulatórios de Leste. In: Cavalcanti, I. F. A. et al (org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto. 2009. p.61-73.
- MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; RODRIGUES, J. A. Cultivo do Milho. **Sistema de Produção**, 2. Ecofisiologia. Embrapa Milho e Sorgo. Disponível em : <
http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_8_ed/ecofisiologia.htm. > Acesso em 26 de 09 de 2016.
- MALHERBE, J.; LANDMAN, W.A.; OLIVIER, C.; SAKUMA, H.; LUO, J-J. Seasonal forecasts of the SINTEX-F coupled model applied to maize Yield and streamflow estimates over north-eastern South Africa. **Meteorol. Appl.** v 21, p. 733–742, 2014.

MARENGO, J. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.16, a.1, 01-18, 2001.

MARENGO, J. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v..., n. 27, 2008.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theor Appl Climatol**, v. 124, n. 3-4, 2016. doi 10.1007/s00704-016-1840-8.

MARIN, F. **Cultivo da cana-de-açúcar**: Previsão de Safras. EMBRAPA. Brasília, 2003. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_65_22122006154840.html> Acesso em 01-Agos-2016.

MARTINS, E.S.P.R.; De NYS, E.; MOLEJÓN, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R.F.V.; ENGLE, N. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. 1. ed. Brasília, 2015.

MARTINS, E.S.P.R.; MAGALHÃES, A.R. A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos. **Parc. Estrat.** Ed. Esp. Brasília-DF, v. 20, n. 41, p. 107-128, 2015.

MEBANE, V. Validating the FAO AquaCrop Model for Rainfed Maize in Pennsylvania. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 2, p. 419-427, 2013.

MEDEIROS, S.S.; MARIN, A.M.P.; REIS, C.F.; SORIANO, J.J.; SANTOS, D.B.; PEREIRA, D.D. Estiagem e seca no semiárido brasileiro. **Folheto Informativo n. 1**. INSA. 2013.

MEDEIROS, S.S.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIN, A.M. TINÔCO, L.B.M., SALCEDO, I.H., PINTO, T.F. **Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro**. Campina Grande – PB: Instituto Nacional do Semiárido-INSA, 2012.

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A., SOUZA, P. P. **Zona de convergência intertropical do Atlântico**. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 2, p. 25-41. ISBN 978-85-86238-92-5.

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J.F.; LAZIC, L.; LYRA, A.A.; MORELLI, S.; RISTIC, I., VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta Model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.

MESINGER, F.; BLACK, T.L.; PLUMMER, D.W.; WARD, J. H. Eta model precipitation forecasts for a period including Tropical Storm Allison. **Wea. Forecasting**, v.5, p. 483–493. 1990.

MESINGER, F.; JANJIC, Z.I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D.G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

MHIZHA, T.; GEERTS, S.; VANUYTRECHT, E.; MAKARAU, A.; RAES, D. Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. **Water SA**, v. 40, p. 233–244, 2014.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. Zoneamento Agrícola. 2017. Disponível em:< <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/zoneamento-agricola>> Acesso em 13-Mai-2017.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. Instrução Normativa nº 2, de 9 de outubro de 2008. Disponível em:<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/portarias/portarias>> Acesso em 13-Mai-2017.

MINUZZI, R.B.; LOPES, F.Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.8, p.734–740, 2015.

MKHABELA, M.; BULLOCK, P. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management**, p. 16-24, 2012.

MOLION, L.C.B.; BERNADO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Rev. Bras. Meteor.**, v.17, n.1, p.1-10, 2002.

MONDAL, M.S.; SALEH, A.F.; RAZZAQUE AKANDA, M.A.; BISWAS, S.K.; MD MOSLEHUDDIN, A.Z.; ZAMAN, S.; LAZAR, A.N.; CLARKE, D. Simulating yield response of rice to salinity stress with the AquaCrop model. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, v.17, p. 1118–1126. 2015.

MORRISON, C. E. F. A seca, o semiárido, e o pequeno agricultor em Canindé, Ceará. In: TADDEI, R.; GAMBOGGI, A.L. (eds.). **Depois que a chuva não veio** – respostas sociais às secas na Amazônia, no Nordeste, e no Sul do Brasil. Rio de Janeiro: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Instituto Comitas para Estudos Antropológicos, 2020. p.137-176.

MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal Atmospheric Science**, v 38, n. 12, p 2653-2673, 1981.

MOURA, M.S.B.; GALVINCIO, J.D.; BRITO, L.T.L.; SOUZA, L.S.B.; SÁ, I.I.S.; SILVA, T.G. F. Clima e água de chuva no semi-árido. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B.; GAMA, G.F.B. (eds.). **Potencialidades da água de chuva no Semi-árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-árido, 2007.

NGETICH, K.F.; RAES, D.; SHISANYA, C.A.; MUGWE, J.; MUCHERU-MUNA, M.; MUGENDI, D.N.; DIELS, J. Calibration and validation of AquaCrop model for maize in sub-humid and semiarid regions of central highlands of Kenya. In: RUFORUM BIENNIAL MEETING, 3., 2012, Entebbe. 24 - 28 Sept. **Proceedings...** Entebbe, Uganda, 2012.

NOVAIS, R.F. A pesquisa em fertilidade do solo (no país) – como a vejo (e a sinto). In: ALVAREZ V.; V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. (Eds). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 397-409.

OETTLI et al. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? **Environmental research letters**, v. 6, n. 014008, 2011.

OLIVEIRA, G.G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N.M.R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo Eta CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, 101 – 121, 2015.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**. Rio de Janeiro: IBGE. 1981.

RAES ET AL. 2011. **Reference manual: AquaCrop Version 3.1 plus**. Rome, Italy: FAO.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agron J**, v. 101, p. 438–447, 2009.

RAO, V.B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S.H. Seasonal and interannual variations of rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, n. 9, p. 1754-1763.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A. Solos halomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S; ALVAREZ, V. H. (eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.165-208.

ROPELEWSKI, C.F., HALPERT, M.S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. **Journal of Climate**, v 2, p. 268-284, 1989.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. 2001. 145 p. (INPE-8915-TDI/809. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/x6e6X3pFwXQZ3DUS8rS5/zdADD>>. Acesso em: 16 mar. 2017

ROSSATO, L.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R.C.S. Avaliação da Umidade do Solo no Brasil durante o episódio El Niño (1982/83). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria. v.13, n.1, p.143-153, 2005.

ROSSATO, L.; ALVALA, R.C.S.; TOMASELLA, J. Climatologia da umidade do solo no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., Foz de Iguaçu-PR. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2002.

SALEMI, H.; SOOM, M.A.M.; MOUSAVI, S-F.; GANJI, A.; LEE, T.S.; YUSOOF, M.K.; VERDINEJAD, V.R. Irrigated silage maize yield and water productivity response to deficit irrigation in an arid region. **Pol. J. Environ. Stud.**, v. 20. n. 5. p.1295-1303, 2011.

SANTOS, F.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; FOLONI, J.M.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; KER, J.C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 2015-2025, 2008.

SANTOS, H.G.; FIDALGO, E.CC.; ÁGLIO, M.L.D. 2016. **Cultivo do arroz: tipos de solo**. Brasília: Embrapa. Disponível em: <
<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fesi63xh02wx5eo0y53mhyx67oxh3.html>> Acesso em: 12-Jan-2017.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 65, p. 173-173, 2006.

SELUCHI M. E.; CHOU S. C. Evaluation of two Eta/CPTEC Model versions for weather forecast over South America. **Geofísica Internacional**, v. 40, p. 219–237, 2001.

SERRA, A.B. The general circulation over South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 22, p. 173-179, 1941.

SHAMSNIA, S. Simulation of rainfed wheat yield response to climatic fluctuations using model (case study: Shiraz Region in Southern of Iran). **International Journal of Engineering Science Invention**, v. 2, n. 5, p. 51-56, 2013.

SIETZ, D. Regionalisation of globais insights into dryland vulnerability: Better reflecting smallholders' vulnerability in Northeast Brazil. **Global Environmental Change** v. 25, p. 173–185, 2014.

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. **Journal of Agricultural Science (Online)**, v. 153, p. 1394-1411.2015.

SIETZ, D.; UNTIED, B.; WALKENHORST, O.; LUDEKE, M. K. B.; MERTINS, G.; PETSCHER-HELD, G.; SCHELLNHUBER, H.J. Smallholder agriculture in Northeast Brazil: assessing heterogeneous human-environmental dynamics. **Reg Environ Change**. v. 6, n. 3, p. 132–146, 2006.

SILVA, J. L. A.; ALVES, S. S. V.; NASCIMENTO, I. B.; SILVA, M. V. T.; MEDEIROS, J. F. Evolução da salinidade em solos representativos do Agropólo Mossoró-Assu cultivado com meloeiro com água de deferentes salinidades. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.7, n. 4, p. 26-31, 2011.

SIMÕES, A.F.; KLIGERMAN, D.C.; LA ROVERE, E.L.; MOROUN, M.R.; BARATA, M.; OBERMAIER, M. Enhancing adaptive capacity to climate change: The case of smallholder farmers in the Brazilian semi-arid region. **Environmental Science & Policy**, v.13, p.801-808, 2010.

SOLTANI, A.; SINCLAIR, T.R. **Modelling physiology of crop development, growth and yield**. CABI. UK. 336 p. 2012.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. **Bioma cerrado**: solos. Brasília: Embrapa. Disponível em: <
http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_2_10112005101955.html> Acesso em: 12-Fev-2017.

SOUZA, S. S.; TOMASELLA, J.; GRACIA, M. G.; AMORIM, M. C.; MENEZES, P. C. P.; PINTO, C. A. M. O. 2001. Programa de monitoramento climático em tempo real na área de atuação da SUDENE PROCLIMA. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 15-24. (INPE-11026-PRE/6482). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m15@80/2009/03.19.17.28>>. Acesso em: 11-Nov-2016.

STETUTO, P. et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**. v. 101, n. 3, 2009.

STETUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**: FAO irrigation and drainage paper 66. Rome, ITALY: FAO, 2012.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar**: avaliação do modelo Mosicas. 2006. 66p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura" Luiz de Queiroz), Piracicaba, 2006.

TANAJURA C. A. S. **Modeling and analysis of the South American summer climate**. (Doctoral Thesis) - University of Maryland, College Park Maryland, 1996.

TENÓRIO, R.S.; MORAES, M.C.S.; KWON, B.H. Raindrop distribution in the Eastern coast of Northeastern Brazil using disdrometer data. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.4, 415 - 426,

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.17, p. 5061–5077, 2013.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.A.; CRESTANA, S.; RAWLS, W.J. Comparison of two approximation techniques to develop pedotransfer functions for Brazilian soil. **Soil Science Society of American Journal**. Madson, v.67, p.1085-1092, 2003.

TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D.A.; CUARTAS, L.A.; FERREIRA, M.; FERREIRA, J.C.; MARENGO, J. **Estudo dos impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água no solo nos Estados de Pará e Maranhão**. 2010. Apresentação em Mudanças Ambientais Globais e seus Impactos nos Recursos Hídricos no Brasil.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. 2013. Atlas do desenvolvimento humano dos municípios. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/>. Acesso em 14-Fev-2017.

_____. Percentage of poor people in Brazilian Semi-arid. 2010. Disponível em <www.insa.gov.br/sigsab/basico> Acesso em 13-Set-2016.

VAN GAELLEN, H.; TSEGAY, A.; DELBECQUE, N.; SHRESTHA, N.; GARCIA, M.; FAJARDO, H.; MIRANDA, VANUYTRECHT, E.; ABRHA, B. DIELS, J.; RAES, D. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 7, 2014. Cambridge University Press.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci Soc. Am J.** v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN ITTERSUM, M. K.; LEFFELAAR, P. A.; VAN KEULEN, H.; KROPFF, M. J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAAN, J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European journal of agronomy**, v.18, n. 3, p. 201-234, 2003.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMS, P. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. **Environ Model Softw**, v.51, p. 232–332, 2014.

VIEIRA JUNIOR, P.A.; DOURADO NETO, D.; CHOU, S.C.; MARTIN, T.N. Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.2, p.412-420, 2009.

VIRJI, H.; KOUSKY, E. V. Regional and global aspects of a low latitude frontal penetration in amazonas and associated tropical activity. In: **American meteorology society**. Preprints First Internacional Conference on Southern Hemisphere Meteorology. Boston U.S.A.: American Meteorology Society, 1983. v. 1, n. 1, p. 215–220. 13

VOGEL, F.; BANGE, G. Understanding crop statistics. **National Agricultural Statistics Service -NASS do United States Departure of Agricultural -USDA**. 2012. Disponível em: <http://www.nass.usda.gov/Education_and_Outreach/Understanding_Statistics/index.asp> Acesso em 16 -Agos- 2013.

WILHITE, D.A.; SIVAKUMAR, M.V.K.; PULWARTY, R. 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and Climate Extremes**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2014.01.002i>

WILLMOTT, C. J. On the Validation of Models. **Physical Geography**, v.2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

BANCO MUNDIAL, 2016. Development Goals in an Era of Demographic Change. Washington, DC. Disponível em: < <http://www.worldbank.org/en/publication/global-monitoring-report> > Acesso em: 29-04-2017.

ZARONI, M.J.; SANTOS, H.G. **Solos tropicais**. 2013. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_19_2212_200611543.html> Acesso em: 12-Fev-2017.

ZHAO, Q.; CARR, F. H. A prognostic cloud scheme for operational NWP Models. **Monthly Weather Review**, v. 125, 1931-1953, 1997.

ZINYENGERE, N.; MHIZHA, T.; MASHONJOWA, E.; CHIPINDU, B.; GEERTS, S. RAES, D. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p.1792– 1799, 2011.

APÊNDICE A: Dados complementares

Dados necessários à obtenção dos parâmetros hídricos dos solos por meio de Funções de Pedotransferência

Tabela A. 1- Perfis de solo utilizados, classificação e propriedades físicas.

Sigla/ Local	Classificação do solo*	Horizonte	Camada (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	M.O (%)
ADU	Cambissolo	A1	0-0,06	15	35	50	2,72
		(B1)	0,06-0,20	12	35	53	1,10
		(B2)	0,20-0,47	15	30	55	0,67
		(B3)	0,47-0,64	18	44	38	0,71
		C	0,64-1,22	26	46	28	0,42
ARP	Cambissolo	A1	0-0,10	48	21	31	0,98
		(B1)	0,10-0,35	44	20	36	0,45
		(B21)	0,35-1,00	43	23	34	0,42
		(B22)	1,00-1,60	49	21	30	0,21
		(B3)	1,60-2,10	47	22	31	0,18
ARR	Argissolo Vermelho- Amarelo	Ap	0-0,09	82	6	12	1,30
		A2	0,09-0,22	82	5	13	0,51
		B22t	0,22-0,60	71	6	23	0,36
		B23t	0,60-1,40	69	7	24	0,23
		B3t	1,40-2,40	65	7	28	0,18
BOM	Latossolo amarelo	A1	0-0,20	79	6	15	0,72
		B	0,80-1,2	67	8	25	0,17
CAR	Neossolo	A	0-0,23	37	39	24	1,43
CAU	Planossolo	A11	0-0,30	72	21	7	0,70
		A12	0,30-0,55	67	24	9	0,35
		A2	0,55-0,85	68	27	5	0,18
		IIAB	0,85-1,0	60	25	15	0,21
		IIBt	1,00-1,10	34	25	41	0,36

(Continua..)

Tabela A. 1- Conclusão

Sigla/ Local	Classificação do solo*	Horizonte	Camada (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	M.O
FRE	Planossolo	A	0-0,10	40	37	23	1,87
		IIBt	0,10-0,28	17	30	53	0,89
		IIC	0,28-0,35	3	45	52	0,38
IPA	Neossolo	A1	0-0,20	30	48	22	0,94
		A3	0,20-0,45	43	40	17	0,55
		IIC	0,45-0,60	73	20	7	0,16
NOS	Latossolo Vermelho Amarelo	Ap	0-0,20	54	22	24	1,10
		AB	0,20-0,32	50	19	31	0,79
		BA	0,32-0,50	47	19	34	0,51
		Bw1	0,50-0,92	43	20	37	0,25
		Bw2	0,92-1,25	41	22	37	0,10
PAR	Luvissolo	A1	0-0,07	31	34	35	2,18
		B2t	0,07-0,35	20	35	45	0,98
		B3t	0,35-0,60	17	46	37	0,63
		C1	0,60-0,85	21	47	32	0,36
		C2	0,85-1,10	13	62	25	0,22
PRES	Argissolo Vermelho- Amarelo	A1	0-0,05	20,8	62,7	16,5	2,73
		A2	0,05-0,18	17,5	62,5	20	0,87
		B11	0,18-0,31	14,3	58	27,7	0,52
		B12	0,31-0,52	10,4	50	39,6	0,46
		B21	0,52-0,78	6	48,5	45,5	0,62
SAO	Cambissolo	A1	0-0,05	26	32	42	2,37
		A3	0,05-0,13	22	28	50	2,33
		(B1)	0,13-0,37	24	28	48	1,33
		(B2)	0,37-0,62	25	27	48	0,87
		C	0,62-0,8	51	34	15	0,32
SIM	Cambissolo	A	0-0,16	18	46	36	1,53
		(B)	0,16-0,45	14	39	47	0,69

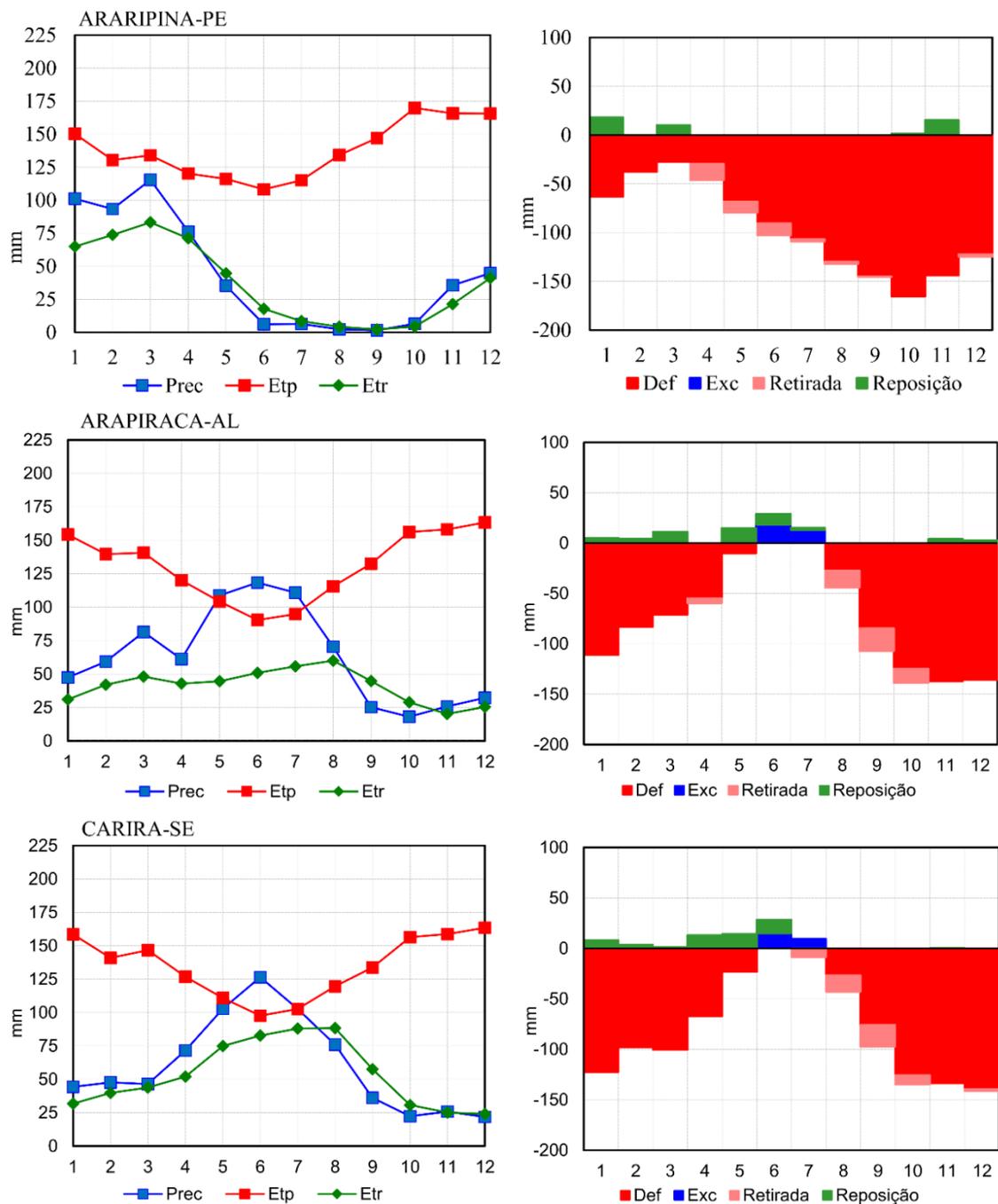
Fonte: Produção do autor, com base em dados extraídos dos levantamentos de solo Radam Brasil (1981).

*Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006). M.O = matéria orgânica

APÊNDICE B: Resultados complementares

B.1. Identificação das datas de plantio a partir do Balanço Hídrico.

Figura B. 1 - Caracterização do Balanço Hídrico para cada município analisado.



(continua...)

Figura B.1 - Continuação

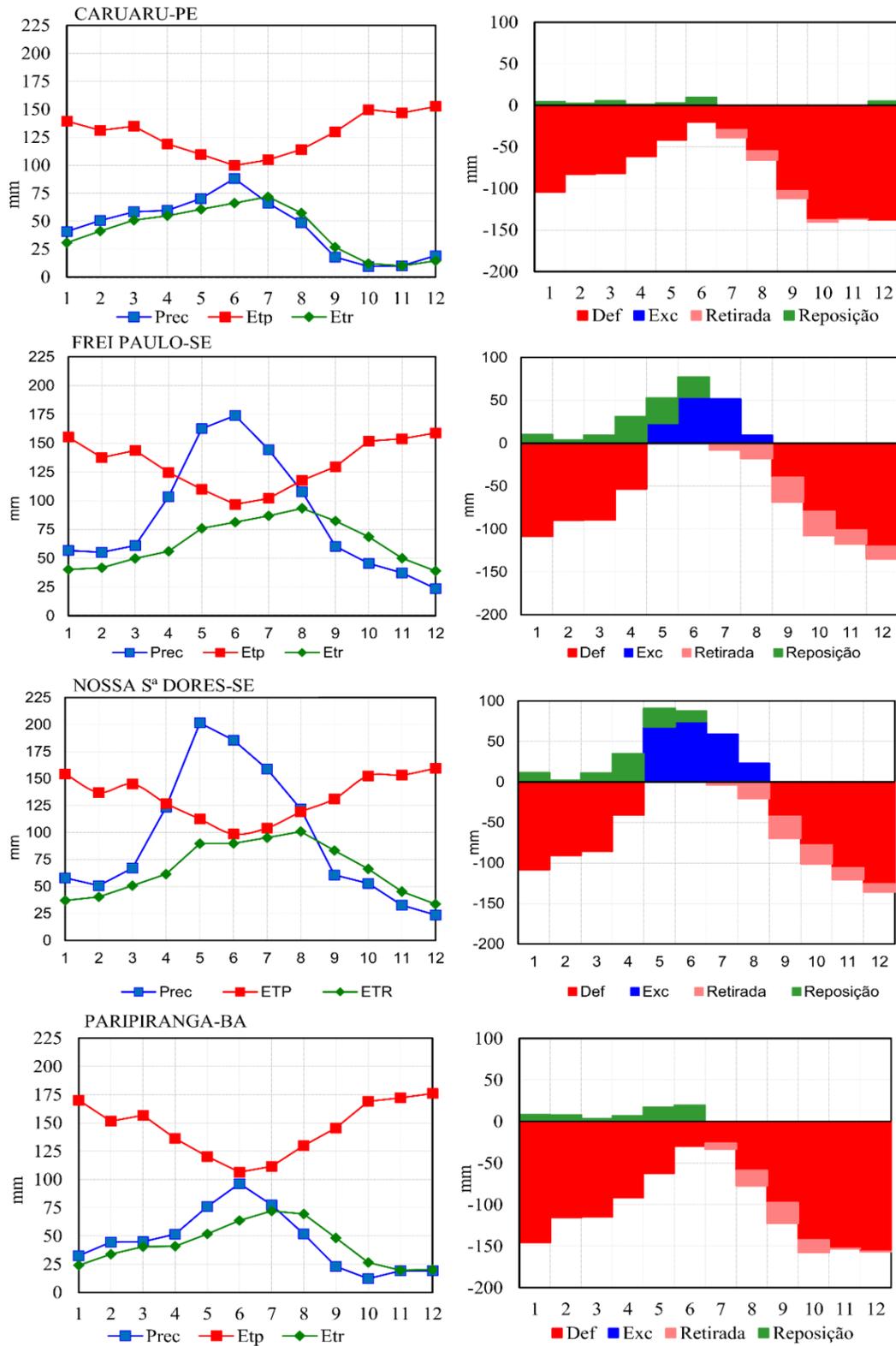
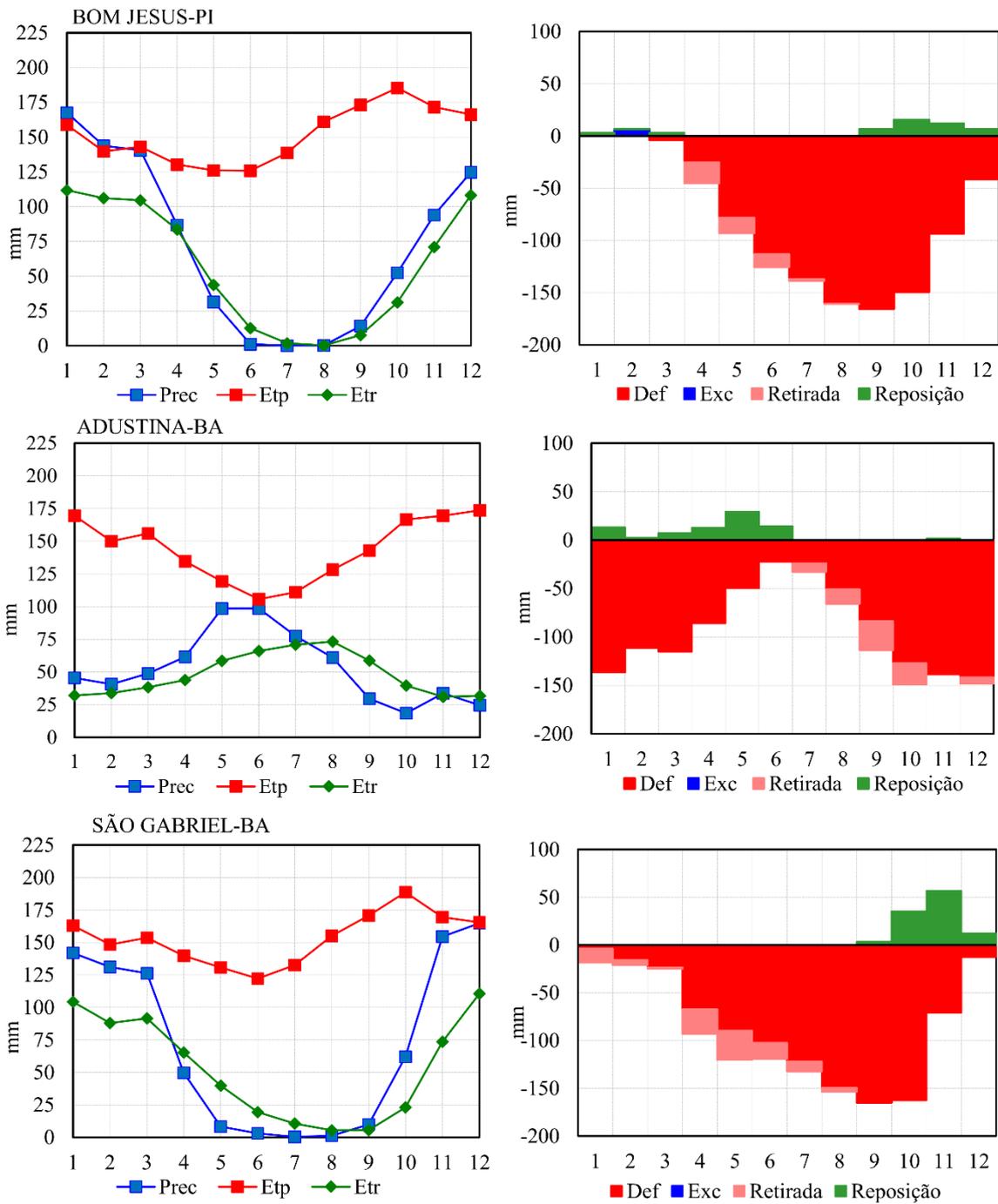


Figura B.1 - Conclusão



Fonte: Produção do autor.