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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/01.23.00.37-TDI

IMPACTOS DOS DÉFICITS HÍDRICOS NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIÕES PRODUTORAS DE SÃO PAULO, MINAS GERAIS E PARANÁ

José Augusto de Souza Júnior

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Clovis Angeli Sansigolo, aprovada em 22 de fevereiro de 2017.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3N8HMB8>

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
Fax: (012) 3208-6919
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 Ducca 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/2017/01.23.00.37-TDI

IMPACTOS DOS DÉFICITS HÍDRICOS NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIÕES PRODUTORAS DE SÃO PAULO, MINAS GERAIS E PARANÁ

José Augusto de Souza Júnior

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Clovis Angeli Sansigolo, aprovada em 22 de fevereiro de 2017.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3N8HMB8>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Souza Júnior, José Augusto de.

So89i Impactos dos déficits hídricos na cultura de cana-de-açúcar em regiões produtoras de São Paulo, Minas Gerais e Paraná / José Augusto de Souza Júnior. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxvi + 119 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/01.23.00.37-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientador : Dr. Clovis Angeli Sansigolo.

1. Agrometeorologia. 2. Agroclimatologia. 3. Agricultura. I.Título.

CDU 551.5:631

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): ***José Augusto de Souza Junior***

Título: **"IMPACTOS DOS DÉFICITS HÍDRICOS NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REGIÕES PRODUTORAS DE SÃO PAULO, MINAS GERAIS E PARANÁ".**

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

Meteorologia

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá

Presidente / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Dr. Clovis Angeli Sansigolo

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

Dr. Nelson Jesuz Ferreira

Membro da Banca / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Hernani José Brazão Rodrigues

Convidado(a) / UFPA / Belém - PA

Dra. Danielle Barros Ferreira

Convidado(a) / INMET / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 22 de Fevereiro de 2017

“Assim como os tesouros são descobertos a partir da terra, a virtude aparece nas boas ações e a sabedoria aparece a partir de uma mente pura e pacífica. Para caminhar com segurança através do labirinto da vida humana, é preciso a luz da sabedoria e a orientação da virtude”.

Autor desconhecido

A minha Mãe, Maria do Carmo Felipe de Oliveira,

por estar sempre comigo e por toda a força e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao longo de todo o trabalho realizado, muitas pessoas foram importantes com apoio e ajuda, desta forma, meus agradecimentos:

Minha Mãe, Maria do Carmo Felipe de Oliveira, por todo o apoio, força, incentivo e amor ao longo de todo esse tempo, sendo meu pilar de sustentação.

Ao Professor Clóvis Sansigolo, pela orientação, ensinamentos, compreensão, paciência e consideração durante o período de realização deste trabalho, trabalhar sob sua orientação foi uma honra e um privilégio, meu sincero muito obrigado por tudo.

Aos grandes Amigos-Irmãos Dayana Castilho, Rômulo Oliveira, Silvia Garcêz e Rose Freitas, por toda a amizade, companheirismo, e apoio, que foram muito importantes, e um muito obrigado à Patrícia Cruz e Isabel Saraiva pela enorme ajuda no curso.

Minha família, irmãos Pauline e Marcus, tios Antônio, Antônio Rosa Júnior, Cristina e Tereza,e primos André, Paula, Patrícia e Alexandre.

Aos professores da Universidade Federal do Pará, em especial Dimitrie Nechet e Aurora Santos, meus eternos mestres.

Coordenação e secretaria do curso de Pós Graduação em Meteorologia do INPE pelo apoio ao longo do curso.

CAPES e ao CNPQ pelo auxílio financeiro durante a realização do doutorado.

Muito Obrigado!

RESUMO

O clima está relacionado com todas as atividades econômicas, especialmente à agricultura, que é a mais dependente dos fatores climáticos, e as alterações destes fatores afetam a produtividade das culturas com impacto direto sobre o agronegócio. Para o Brasil, a cultura de cana-de-açúcar tem grande importância econômica, tendo em vista que o país é o pioneiro e líder em pesquisa e produção de etanol da cana-de-açúcar. Considerando a importância da cultura e a influência que os elementos do clima, principalmente os déficits hídricos no solo, podem exercer no seu desenvolvimento, esse trabalho teve por objetivo avaliar essa influência, em três estados com maior produção de cana-de-açúcar: São Paulo, Minas Gerais e Paraná, além de estimar a produtividade agrícola através de um modelo simples e avaliar o desempenho do mesmo em relação às referências do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e assim fornecer subsídios para novas estratégicas em face à variabilidade climática. Foram utilizados dados meteorológicos de precipitação e de temperatura, para obtenção das normais climatológicas de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, no período de 1980 a 2010, bem como, para servir de parâmetros de entrada do modelo agrometeorológico, para estimar a produtividade da cana-de-açúcar. As simulações agrometeorológicas permitiram estimar adequadamente os valores da produtividade potencial e da produtividade estimada por déficit hídrico, variando de 140 Ton/ha em Minas Gerais a 107 Ton/ha em São Paulo, as maiores perdas ocorrem na fase 3, de crescimento dos colmos e variam de 40% em São Paulo a 53% em Minas Gerais. Os valores de produtividades mostraram que o Estado de Minas Gerais foi o que, apresentou os menores valores com 39 Ton/ha e o estado do Paraná os maiores, em torno de 70 Ton/ha. Os rendimento percentuais das produtividades variaram de 53% a 61% em São Paulo, 27% a 37% em Minas Gerais e 54% a 63% no Paraná. As maiores penalizações ocorrem em Minas Gerais com 53% e as menores perdas no Paraná e em São Paulo, em torno de 36% a 38%, mostrando que a cultura está adequada ao clima nessas regiões. Na avaliação de desempenho do modelo, os erros variaram de 6% a 11% em São Paulo, 11% a 22% em Minas Gerais e de 11% a 20% no Estado do Paraná, permitindo considerar, o modelo uma importante ferramenta para monitoramento e estimativa da redução de produtividade na cultura de cana-de-açúcar através de penalização hídrica.

Palavras-chave: Agrometeorologia.Agroclimatologia.Agricultura.

IMPACTS OF WATER DEFICITS IN SUGARCANE CROP IN PRODUCTION REGIONS OF SÃO PAULO, MINAS GERAIS AND PARANÁ.

ABSTRACT

The climate is related with all economic activities, especially to agriculture, which is the most dependent on climatic factors, and changes in these factors affect the productivity of crops with a direct impact on agribusiness. For Brazil, sugarcane crop has a great economic importance, considering that the country is the pioneer and leader in research and production of ethanol from sugarcane. Considering the importance of the culture and the influence that the elements of the climate, mainly the soil water deficits, can exert on its development, this work had the objective to evaluate this influence, in three states with greater production of sugarcane: Paulo, Minas Gerais and Paraná, besides estimating the agricultural productivity through a simple model and evaluating the performance of the same in relation to the references of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and thus to provide subsidies for new strategies in the face of climatic variability. Rainfall and temperature meteorological data were used forobtaining the climatic standards of São Paulo, Minas Gerais and Paraná, from 1980 to 2010, as well as, to serve as input parameters of the agrometeorological model, to estimate sugarcane productivity. Agrometeorological simulations allowed to adequately estimates the potential productivity and estimated productivity through water deficit, varying from 140 Ton/ha in Minas Gerais to 107 Ton/ha in São Paulo, the highest losses occur in phase 3, growth of stems and vary from 40% in São Paulo to 53% in Minas Gerais. The values of productivities showed that the State of Minas Gerais was the one that presented the lowest values with 39 Ton/ha and the state of Paraná the largest, around 70 Ton/ha. Productivity percentages ranged from 53% to 61% in São Paulo, 27% to 37% in Minas Gerais and 54% to 63% in Paraná. The highest penalties occur in Minas Gerais with 53% and the lowest losses in the State of Paraná and São Paulo, around 36% to 38%, showing that the crop is suitable for the climate in these regions. In the performance evaluation of the model, errors ranged from 6% to 11% in São Paulo, 11% to 22% in Minas Gerais and 11% to 20% in the State of Paraná, allowing the model to be considered an important tool for monitoring and estimation of the reduction of productivity in the sugarcane crop through water penalty.

Keywords: Agrometeorology. Agroclimatology. Agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo anual de precipitação nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, no período de 1952-1992. 16
Figura 3.1 – Área de estudo com os três maiores produtores de cana-de-açúcar e suas respectivas produções caracterizadas por classes. 19
Figura 3.2 – Municípios produtores e Sub - Áreas de estudo da produção de cana-de-açúcar em São Paulo. 20
Figura 3.3 – Municípios produtores e Sub - Áreas de estudo da produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais. 21
Figura 3.4 – Municípios produtores e Sub - Áreas de estudo da produção de cana-de-açúcar no Paraná. 22
Figura 3.5 – Fluxograma do Modelo Agrometeorológico. 34
Figura 4.1 – Temperatura do ar mensal (°C) para Áreas 1 (a) e 2 e 3 (b), de 1980 – 2010. 38
Figura 4.2 – Temperatura do ar mensal (°C) para Áreas 3 (a) e 4 (b), de 1980 – 2010. 40
Figura 4.3 – Temperatura do ar mensal (°C) para Áreas 5 (a) e 6 (b), de 1980 – 2010. 42
Figura 4.4 – Precipitação acumulada mensal (mm) para Áreas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), de 1980-2010. 45
Figura 4.5 – Precipitação acumulada mensal (mm) para Áreas 4 (a), e 5 (b), de 1980-2010. 46
Figura 4.6 – Precipitação acumulada mensal (mm) para Áreas 6 (a), e 7 (b), de 1980-2010. 47
Figura 4.7 – Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) acumuladas mensais (mm), para Áreas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), de 1980 - 2010. 50
Figura 4.8 – Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) acumuladas mensais (mm), para Áreas 4 (a) e 5 (b), de 1980 - 2010. 51
Figura 4.9 – Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) acumuladas mensais (mm), para Áreas 6 (a) e 7 (b), de 1980 - 2010. 52

Figura 4.10 – Déficit (DEF) e excedente (EXC) acumulados mensais (mm), para Áreas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), de 1980 -2010. 55
Figura 4.11 – Déficit (DEF) e excedente (EXC) acumulados mensais (mm), para Áreas 4 (a) e 5 (b), de 1980 -2010. 56
Figura 4.12 – Déficit (DEF) e excedente (EXC) acumulados mensais (mm), para Áreas 6 (a) e 7 (b), de 1980 -2010. 57
Figura 4.13 – Desvios padrões e temperaturas médias anuais para Áreas 1, 2 e 3, para o período de 1980 - 2010. 59
Figura 4.14 - Desvios padrões e temperaturas médias anuais para Áreas 4 e 5, para o período de 1980 - 2010. 59
Figura 4.15 - Desvios padrões e temperaturas médias anuais para Áreas 6 e 7, para o período de 1980 - 2010. 60
Figura 4.16 – Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 1. 61
Figura 4.17 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 2. 62
Figura 4.18 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 3. 62
Figura 4.19 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 4. 63
Figura 4.20 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 5. 63
Figura 4.21 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 6. 64

Figura 4.22 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 7..... 64
Figura 4.23 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 1 (1981-2010). 66
Figura 4.24 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 2 (1981-2010). 66
Figura 4.25 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 3 (1981-2010). 67
Figura 4.26 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 4 (1981-2010). 68
Figura 4.27 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 5 (1981-2010). 68
Figura 4.28 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 6 (1981-2010). 70
Figura 4.29 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 7 (1981-2010). 70
Figura 4.30 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 1 (1981-2010). 71
Figura 4.31 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 2 (1981-2010). 72
Figura 4.32 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 3 (1981-2010). 72
Figura 4.33 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 4 (1981-2010). 73
Figura 4.34 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 5 (1981-2010). 73
Figura 4.35 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 6 (1981-2010). 74
Figura 4.36 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 7 (1981-2010). 75

Figura 4.37 – Rendimento total por área de estudo para diferentes coeficientes de penalização. 78
Figura 4.38 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 1. 79
Figura 4.39 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 2. 79
Figura 4.40 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 3. 80
Figura 4.41 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 4. 81
Figura 4.42 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 5. 81
Figura 4.43 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 6. 82
Figura 4.44 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 7. 82
Figura 4.45 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 1. 83
Figura 4.46 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 2. 84
Figura 4.47 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 3. 84
Figura 4.48 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 4. 85
Figura 4.49 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através da melhor cominação de fator de resposta de produtividade (Ky1) com a faixas de dias de cultivo proposto (212) para Área 5. 86

Figura 4.50 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 6. 87
Figura 4.51 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 7. 87
Figura 4.52 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 1 (1981 - 2010). 89
Figura 4.53 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 2 (1981 - 2010). 89
Figura 4.54 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 3 (1981 - 2010). 90
Figura 4.55 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 4 (1981 - 2010). 91
Figura 4.56 – Produtividades Potenciais (212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 5 (1981 - 2010). 91
Figura 4.57 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 6 (1981 - 2010). 93
Figura 4.58 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 7 (1981 - 2010). 93
Figura 4.59 – Box Plots de variação de dados de Produtividade Potencial, em kg/ha, para 243 dias de cultivo da cultura, para as 7 áreas de estudo. 95
Figura 4.60 – Box Plots de variação de dados de Produtividade Potencial, em kg/ha, para 212 dias de cultivo da cultura, para as 7 áreas de estudo. 96

Figura 4.61 – Box Plots de variação de dados de Produtividade Estimada (com coeficientes Ky1 e Ky2), em kg/ha, para as 13 estimativas de Produtividade, para as 7 áreas de estudo. 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Anos de ocorrência de fenômeno ENOS, de 1980 à 2010, divididos por intensidade e Fase quente (El Niño) e Fase fria (La Niña)..... 24
Tabela 3.2 – Fatores de reposta da produtividade para as fases da cana-de-açúcar. 28
Tabela 4.1 - Valores de rendimento médio (em %), para o período de safras agrícola de 1981 - 2010, para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as áreas de estudo..... 77
Tabela 4.2 – Cálculo da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REMQ) para as 13 situações propostas, em Kg/ha. 98
Tabela 4.3 - Cálculo do Erro Médio Absoluto (EMA) para as 13 situações propostas, em Kg/ha. 99
Tabela A.1 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 1. 113
Tabela A.2 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 2. 114
Tabela A.3 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 3. 115
Tabela A.4 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 4. 116
Tabela A.5 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 5. 117
Tabela A.6 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 6. 118
Tabela A.7 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 7. 119

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARM	Umidade armazenada nas zonas de raízes.
BH	Balanço hídrico.
CAD	Capacidade de água disponível no solo.
CDO	Climate Data Operators.
Ciaf	Coeficiente de correção para índice de área foliar.
Col	Coeficiente de correção para colheita.
Cres	Coeficiente de correção para respiração.
CRU	Climate Research Unit.
Cum	Coeficiente de correção para umidade.
DEF	Deficiência de água no solo.
DHR	Déficit Hídrico Relativo.
EMA	Erro médio absoluto.
ENOS	El Niño Oscilação Sul.
ETP	Evapotranspiração potencial.
ETR	Evapotranpiração real.
EXC	Excedente de água no solo.
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IOS	Índice de Oscilação Sul.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
Ky	Fator de reposta da produtividade.
MZA	Método de zona agroecológica.
ND	Dias de duração do ciclo da cultura.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
PAR	Photosynthetically Active Radiation.
Pp	Produtividade Potencial
PPBc	Produtividade potencial de matéria seca para céu claro.
PPBn	Produtividade potencial de matéria seca para céu nublado.

PPBp	Produtividade potencial bruta de matéria seca.
Pr	Produtividade real.
PROALCOL	Programa Nacional do álcool.
PRP	Precipitação
REMQ	Raiz do erro médio quadrático.
SDI	Supervisão de Documentação e Disseminação de Informação
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação de Dados Automáticos
T	Temperatura do ar.
TSM	Temperatura da superfície do mar.
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO 1
1.1 - Hipótese 3
1.2 - Objetivos 3
1.2.1 - Geral 3
1.2.2 - Específicos 3
2–FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 – Características da cultura de cana-de-açúcar no Brasil. 5
2.2 - Cultivo de cana-de-açúcar. 6
2.3 - Exigências climáticas do cultivo de cana-de-açúcar. 8
2.3.1 - Temperatura do ar 8
2.3.2 - Precipitação pluviométrica. 9
2.4 - Balanço Hídrico. 10
2.5 - Variabilidade Climática e Influência na Agricultura. 11
2.5.1 - Fenômeno ENOS. 12
2.6 - Climatologia das Precipitações no Sudeste e Sul do Brasil. 14
2.7 – Modelagem Agrometeorológica. 16
3 – MATERIAL E MÉTODOS. 19
3.1 - Área de Estudo. 19
3.2 - Dados. 22
3.2.1 - Produtividade. 22
3.2.2 - Temperatura. 23
3.2.3 - Precipitação. 23
3.2.4 - Extração de dados através de CDO. 23
3.2.5 - Índice de Oscilação Sul (IOS). 24
3.2.6 - Remoção da tendência de produtividade. 25
3.3 - Balanço hídrico. 25
3.4 - Modelo Agrometeorológico. 26
3.4.1 - Método de Zona Agroclimática (MZA) 29
3.4.1.1 - Coeficiente de correção do índice de área foliar (Ciaf). 30

3.4.1.2 - Coeficiente de correção de respiração da cultura (Cres). 30
3.4.1.3 - Índice de colheita (Ccol). 30
3.4.1.4 - Coeficiente de umidade (Cum). 30
3.4.1.5– Dias de duração do ciclo da cultura (ND). 31
3.4.1.6 - Taxa de produção bruta de matéria seca (PPBp). 31
3.5 - Avaliação de desempenho do modelo. 35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 37
4.1 – Climatologia das temperaturas, precipitação, taxas de evapotranspiração real e potencial e déficits hídricos nas diferentes áreas consideradas nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná. 37
4.1.1 – Temperatura do ar. 37
4.1.2 – Precipitações mensais e anuais. 43
4.1.3 – Taxas mensais e anuais de evapotranspiração potencial e real. 48
4.1.4 – Déficits e excedentes mensais e anuais de água no solo. 53
4.1.5. Comportamento em relação à média 58
4.2 – Evapotranspiração Potencial e Real por fase de desenvolvimento da cultura. 65
4.3 – Aplicação do Modelo Agrometeorológico. 71
4.3.1 – Produtividade Potencial 71
4.3.2 – Rendimento por fases de cultivo. 75
4.3.3 – Rendimento por safra agrícola. 78
4.3.4 – Produtividade Estimada pelo modelo. 83
4.3.5 – Comparação com dados de referência do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 88
4.3.6 - Variação dos dados de Produtividades. 94
4.3.7 – Variação de dados estimados. 94
4.3.8 – Avaliação de desempenho do modelo. 97
5 – CONCLUSÕES 101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105
APÊNDICE A 113

1 – INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades mais antigas e primárias, desenvolvidas pela humanidade e que apresenta maior dependência das condições do tempo e do clima. Essa atividade está interligada com a meteorologia, pois, para o desenvolvimento de culturas agrícolas, são necessárias determinadas condições meteorológicas, como, energia radiativa, temperatura adequada e quantidade hídrica disponibilizada pelas precipitações, fatores estes responsáveis pelas variações nas safras agrícolas.

A cultura de cana-de-açúcar apresenta um destaque especial, na produção agrícola e na economia nacional, pois fatores como o desenvolvimento de políticas ambientais, que buscam combustíveis que possam agredir menos o meio ambiente e o aumento de pressões econômicas, devido aos preços de combustíveis fósseis, fizeram com que o Brasil, alcançasse um papel de destaque internacional, por ser um dos pioneiros em pesquisa e produção de biocombustível, derivado do etanol, extraído da cana-de-açúcar, que é uma importante fonte de energia alternativa de baixo impacto ambiental.

De acordo com dados do IBGE (IBGE, 2012), a produção de cana de açúcar é a maior do País, com 748.636.167 toneladas em 2015, e área colhida de 10.161.622 hectares, representando um valor de 43 bilhões de reais para a economia nacional, e possui a maior produtividade dentre todas as culturas, com 74Ton/ha. O Estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do País, sendo responsável por mais de 50% da produção, junto com dois outros grandes produtores que merecem destaque como, Minas Gerais, onde a maior concentração do cultivo ocorre no triângulo mineiro, e Paraná, que concentra a plantação no norte do Estado.

Uma excelente ferramenta para estudar e melhorar, a compreensão do impacto dos fatores climáticos, especialmente as precipitações e

temperaturas nas atividades agrícolas é a utilização de modelagem agrometeorológica.Modelos matemáticos, conceituais e empíricos, possibilitam uma economia de tempo, trabalho e recursos, para tomada de decisões sobre o manejo agrícola. Um modelo representa uma simulação matemática, ou um conjunto de fórmulas, que objetivam sintetizar um determinado comportamento. No caso do modelo agrometeorológico, são simplificações dos processos de crescimento vegetal e de suas interações com o meio ambiente, ou seja, o modelo é desenvolvido para analisar como o meio ambiente influencia o sistema de produção, visando quantificar através dos dados meteorológicos disponíveis, como as variáveis ambientais afetam a produtividade e o rendimento da cultura (SILVA, 2009).

Segundo Picoli et al. (2009), a estimativa de produtividade agrícola, é realizada, através de visitas de técnicos em fazendas de cana de açúcar, no inicio do plantio, para observar o desenvolvimento da cultura, e baseado na experiênciae informações de anos anteriores, estimam suas produtividades, que pode resultar em valores tendenciosos e imprecisos, pois impossibilita a análise de erros. Estimativas de produtividades têm um papel fundamental no planejamento de uma serie de atividades no agronegócio do setor sucroalcooleiro e no planejamento de operações em usinas, dessa forma, Gouvêa (2008) defende a hipótese de que a utilização de modelos de estimativa de produtividade exerce papel de destaque na economia, sendo uma ferramenta eficaz para analisar o comportamento da cultura em diferentes condições climáticas, com maiores níveis de confiabilidade nos resultados.

Levando em consideração a importância do setor agrícola na economia nacional,especialmente da cultura de cana-de-açúcar, para o Brasil, este trabalho visa analisar o comportamento das variáveis meteorológicas em três grandes regiões produtoras de cana-de-açúcar, São Paulo, Minas Gerais e Paraná, durante três décadas de cultivo, através da aplicação de modelagem agrometeorológica, a partir do qual, podem-se obter previsões da safra usando dados meteorológicos e da cultura, nestes três estados produtores.

1.1 - Hipótese

É possível prever a redução da produtividade regional por deficiência hídrica na cultura de cana-de-açúcar usando um modelo agrometeorológico simples de penalização, considerando as fases fenológicas da cultura?

1.2 - Objetivos

1.2.1 - Geral

Implementação, calibração e verificação de um modelo agrometeorológico simples de penalização por déficit hídrico, para avaliar os impactos causados de variabilidade das precipitações decendiais na cultura de cana-de-açúcar em 7 sub-regiões de São Paulo, Minas Gerais e Paraná.

1.2.2 - Específicos

a) Determinação da climatologia das precipitações, temperaturas, taxas de evapotranspiração real e potencial e déficits hídricos nas diferentes áreas consideradas e seus impactos nas estimativas de produtividade de cana-de-açúcar usando modelagem agrometeorológica empírica para os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, para safras agrícolas de 1980/1981 a 2010/2011.

b) Avaliar a redução de produtividade por deficiência hídrica, em sete diferentes áreas, nos três estados, considerando as4 fases fenológicas da cultura, no período de 1981-2010.

c) Quantificar as perdas médias de produtividade para avaliar o ajuste do ciclo fisiológico da cultura ao das precipitações e viabilidade econômica de irrigação suplementar em diferentes regiões.

2–FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Características da cultura de cana-de-açúcar no Brasil.

Segundo Monzambani et al. (2006), a cana de açúcar é uma espécie de gramínea com origem na Nova Guiné, trazida pelos portugueses, que iniciaram seu plantio na época da colonização, iniciando assim a agroindústria canavieira, que representa a atividade econômica mais antiga do Brasil. De acordo com Gouvêa (2008), o histórico da cana de açúcar no Brasil inicia-se pela colonização, com a construção dos primeiros engenhos em São Paulo, porém as plantações ficaram restringidas as áreas litorâneas, contudo, sua maior expansão ocorreu na região Nordeste do Brasil, tornando-se a principal atividade econômica da região, abrangendo quase todos os seus estados, e com o tempo se difundiu pela região Sudeste do Brasil, e mais recentemente, alcançou grande importância econômica na região Centro Oeste do Brasil e no estado do Paraná. Apesar de ter iniciado no estado de São Paulo, o cultivo da cana de açúcar, só obteve destaque nesta região a partir do final do século XVIII, quando ocorreu grande expansão e desde então, o estado vem se consolidando como o maior produtor de cana de açúcar, sendo responsável por aproximadamente 60% da produção nacional, ao longo dos últimos anos.

Em decorrência da crise do petróleo de 1963, a consequência direta foi a busca de diversos países por novas fontes alternativas de energias, e neste contexto, a estratégia brasileira foi à criação do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL) em 1975, com o objetivo de encontrar um combustível viável, para a substituição da gasolina automotiva, e aliviar, a pressão econômica na balança comercial, devido aos elevados preços de importação do petróleo (MONTEIRO, 2012). Com o desenvolvimento do programa PROALCOL, o Brasil tornou-se pioneiro em pesquisa e desenvolvimento de biocombustível, derivado da biomassa de cana de açúcar. Com o desenvolvimento de políticas ambientais e a assinatura do protocolo de Kyoto pelos países pertencentes à Organização das Nações

Unidas, em que os mesmos, se comprometeram a buscar alternativas de combustíveis menos poluentes, fez com que o álcool alcançasse papel de destaque no cenário mundial, sendo assim, De Paula (2008), considera a produção agrícola de cana de açúcar, de grande relevância, pelo seu grande retorno econômico, tanto na produção de açúcar, cuja demanda vem crescendo, principalmente no continente Asiático, quanto pela produção de etanol, o que possibilita ao Brasil, importante destaque internacional, por ser o país com maior potencial para produção e exportação de etanol. Um aumento significativo na produção de etanol seria possível, através de um melhor conhecimento e aperfeiçoamento de metodologias que favoreçam o aumento de produtividade, sendo que, segundo previsões, a produção de bioetanol poderia triplicar até 2020, passando da atual de 27,5 bilhões de litros anuais para 70 bilhões para o sistema brasileiro de agroenergia derivado da cana-de-açúcar, que é considerado o mais eficiente do mundo, (GOLDEMBERG, 2007).

2.2 - Cultivo de cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar pertence a família das gramíneas, que são plantas herbáceas, com sistema reprodutivo, constituído por folhas fotossinteticamente ativas, sistemas de escoamento e distribuição de produto fotossintetisado, sítios de consumo e sítios de acúmulo e armazenamento de sacarose (GOUVÊA, 2008). De acordo com Machado (1987), a produtividade da cultura é determinada por fatores biológicos e pela interação com os fatores ambientais.

Segundo Segato et al. (2006), a cana-de-açúcar é uma planta C4, classificação atribuída por formar compostos orgânicos com 4 carbonos durante a fotossíntese e possuir alta taxa fotossintética e eficiência na utilização e resgate de gás carbônico da atmosfera. É uma cultura semi-perene, onde seu ciclo fenológico se inicia com o plantio da muda que brota, perfilha, matura e recebe o primeiro corte. O 1º ciclo chama-se de cana-planta e o próximo ciclo, inicia com a brotação da soqueira. O 2º ciclo chama-se de cana-soca e a máxima produtividade está relacionada

com a interação entre planta, o ambiente e o manejo, e este ciclo dura em torno de 4 a 5 cortes, ou seja, o ciclo da cana-soca dura em torno de 12 meses, e a cada ciclo, existe perda de produtividade agrícola. Os ciclos acontecem em intervalos anuais, até a lavoura não ser mais rentável economicamente, e nesse ponto é feita a reforma da lavoura, com o plantio de uma nova muda e assim inicia-se um novo ciclo. A cana-planta de ano, dura 12 meses, e a cana-planta de ano e meio, pode durar de 14 a 21 meses. Quando ocorre o primeiro corte na cana-planta, permanece no solo, as socas da cana-de-açúcar, e devido ao corte da parte aérea da planta, ocorre perda de boa parte do sistema radicular da planta antiga, possibilitando assim, a renovação da cultura, não só da parte aérea, mas também do sistema radicular (OLIVEIRA, 2010).

Com relação ao ciclo de plantio da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil, no 1º ciclo da cana, o plantio vai de setembro a novembro, coincidindo com o início do período chuvoso, originando a cana-planta de ano, que se desenvolve até abril (aproximadamente 8 meses), quando começa a fase de amadurecimento (por volta de 4 meses). No 2º ciclo da cana, o plantio é de janeiro a abril, durante o período chuvoso, onde o crescimento é favorecido nos primeiros meses, por coincidir com a maior disponibilidade de precipitação, porém de abril a agosto o desenvolvimento diminui, por coincidir com as estações outono-inverno. De setembro a abril, o desenvolvimento volta a se intensificar, para amadurecer e ser colhida no inverno seguinte. Este ciclo é denominado de cana-planta de ano e meio. Existe ainda um terceiro ciclo, chamado de plantio de inverno, porém é necessário irrigação e fertirrigação em junho, julho e agosto, quando o desenvolvimento da cultura é menor, devido à diminuição da precipitação. A colheita da cana-de-açúcar ocorre de forma manual, com ou sem queima da palha, para colheita de mudas, ou mecanizada, com ou sem queima de palha. A queima da palha facilita a colheita, porém, causa prejuízo ao meio ambiente, destruindo a microfauna do solo e impactando na qualidade do mesmo (SEGATO et al. 2006). Segundo Rudorff (1985), a indústria canavieira necessita de uma estimativa do rendimento de cana-de-açúcar, disponível para moagem

antes do início da safra, para que, a produção de açúcar e álcool seja suficientemente suprida de matéria prima, e essa informação é utilizada para atividades de corte e transporte da cana.

2.3 - Exigências climáticas do cultivo de cana-de-açúcar.

Segundo Braido (2010), eventos extremos do clima, como secas prolongadas ou precipitações excessivas, geram consequências negativas na economia e na vida dos habitantes das regiões atingidas, sendo que os países em desenvolvimento acabam por ser os mais afetados, devido ao alto grau de dependência da agricultura para a economia, onde o clima assume papel regulador do processo agrícola e o estudo do comportamento climático é extremamente importante, para melhorar o entendimento dos tipos de culturas que serão bem sucedidas.

2.3.1 - Temperatura do ar.

Segundo Pereira et al. (1997), as condições térmicas do ambiente são de extrema importância no desenvolvimento e na produtividade vegetal, para que, os processos fisiológicos, transcorram dentro da normalidade. Mesmo estando nas condições de luz e umidade favoráveis a esses processos, os vegetais sofrem alterações. Existem dois limites de temperatura, um inferior e outro superior, e entre eles um ótimo, que é a temperatura ideal, se a temperatura estiver fora dos limites considerados ideais para cada espécie, haverá variações no seu desenvolvimento. A temperatura do ar geralmente determina a taxa de desenvolvimento da cultura e, consequentemente, a influência na duração do período total de crescimento necessário à formação da colheita.

As exigências climáticas para o melhor desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar ocorre em 3 fases distintas: Na fase 1, ocorre a brotação das mudas com altas temperaturas, em torno de 30ºC, e com boa umidade no solo; na fase 2, ocorre o perfilhamento e necessita de alta

radiação solar, temperatura entre 25ºC e 30ºC, e boa umidade no solo e na fase 3, ocorre a maturação da planta e necessita de temperaturas mais baixas, abaixo de 21ºC e menor umidade no solo, para estimular o acúmulo de sacarose (SEGATO et al. 2006).

2.3.2 - Precipitação pluviométrica.

A quantidade e a distribuição de chuvas que ocorrem anualmente em uma região, determinam o tipo de vegetação natural e o tipo de produção e desenvolvimento agrícola possível. A parcela da água da chuva, que é interceptada pela vegetação é componente importante no balanço hídrico de uma área. No caso das culturas anuais, a interceptação da chuva, depende da espécie e do estágio de desenvolvimento, quando a quantidade de água não é suficiente para as necessidades da cultura, ocorre estresse hídrico, afetando o crescimento e o rendimento da cultura, pois ocorre o fechamento dos estômatos e a diminuição da fotossíntese (PEREIRA et al. 1997).

Segundo Doorembos e Kassan (1979), a cana-de-açúcar é uma cultura de clima tropical, que necessita de 1500 a 2500 mm de água ao longo da fase de crescimento. A deficiência hídrica, temperaturas extremas e baixa radiação solar disponível, são os principais fatores limitantes para o seu desenvolvimento, sendo que segundo Wiedenfeld (2000), no cultivo da cana-de-açúcar, a deficiência hídrica provoca a redução da área foliar e o acúmulo da biomassa, reduzindo principalmente na produtividade dos colmos e da sacarose, dessa forma, comprometendo no rendimento final da cultura. Umidade em excesso pode diminuir a produtividade e ausência de precipitação, podendo provocar a morte da planta. A umidade relativa deve estar entre 80 e 85% durante a fase de crescimento e durante o amadurecimento, a umidade deve estar entre 45 e 65%, para favorecer o acúmulo de açúcar.

Para conhecermos a disponibilidade hídrica no solo, necessário à agricultura, não basta conhecer somente os dados de precipitação, que é

o processo de suprimento de água no solo para uso das plantas, é importante também conhecer as perdas de água no solo para a atmosfera, devido à evapotranspiração. A evapotranspiração representa os processos conjuntos de evaporação do solo e de transpiração das plantas, que ocorrem naturalmente em uma superfície vegetada e é um elemento importante do balanço hídrico.

2.4 - Balanço Hídrico.

O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água do solo, entre entrada e saída de água no solo, que se verifica em um terreno com vegetação, de modo a estabelecer a quantidade de água disponível às plantas em dado momento. O balanço hídrico consiste em se efetuar a contabilidade hídrica do solo, partindo-se do suprimento natural de água ao solo, pela precipitação (PRP), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP), bem como, a capacidade de água disponível ao tipo de planta cultivada. O balanço hídrico da cultura fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), excedente de água no solo (EXC), tanto em escala diária, decendial, quinzenal ou mensal, levando-se em consideração tanto o tipo de vegetação, como sua fase de crescimento e desenvolvimento. O balanço hídrico é uma excelente ferramenta para se estudar também a viabilidade de implantação e monitoramento de sistemas de irrigação e drenagem numa região e permite ainda, a quantificação de danos provocados às culturas, devido à alta correlação entre a evapotranspiração relativa (ETR/ETP) e a produtividade das culturas (PEREIRA ET AL. 2007)

Segundo Pereira et al. (2007) os componentes do balanço hídrico são: Evapotranspiração potencial (ETP), que é a máxima quantidade de água utilizada por uma extensa superfície vegetada, em crescimento, cobrindo totalmente o terreno, com adequado suprimento de umidade no solo. A ETP é, portanto, um elemento climatológico fundamental, que corresponde ao processo oposto da chuva. A diferença entre a PRP e a

ETP é o balanço hídrico, que indica excesso e deficiência de umidade ao longo do tempo ou da estação de crescimento das culturas. A evapotranspiração real (ETR) é a quantidade efetiva de água evaporada através de evaporação e transpiração que ocorre numa superfície vegetada, independente de sua área, do seu porte e das condições de umidade do solo, podendo ser limitada tanto pela disponibilidade de radiação solar, como pelo suprimento de umidade do solo. Deficiência hídrica (DEF) representa a falta de água no solo, sendo obtida pela diferença entre a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR). O déficit de água no solo ocasiona também, grande impacto na produtividade dos colmos e de sacarose. O excedente de água no solo (EXC) é a quantidade de água que sobra no período e se perde por percolação (drenagem profunda) e/ou escorrimento superficial. O cultivo da cana-de-açúcar exige uma grande quantidade de água durante o período de crescimento (CARVALHO, 2009) e a capacidade de água disponível (CAD), que é a máxima capacidade de armazenamento de água no solo, depende da profundidade do solo explorado pelas raízes da cultura e varia com o tipo de cultura.

2.5 - Variabilidade Climática e Influência na Agricultura.

Segundo Ferreira (2005), resultados de interações entre o clima e a produtividade agrícola, podem ser definidos, pela adaptação de uma determinada cultura agrícola a um ecossistema específico e o desenvolvimento de suas diversas fases fenológicas, que podem influenciar na produtividade total,mesmo em condições, onde a cultura está plenamente adaptada ao ambiente. A variabilidade do desenvolvimento de cada estágio está principalmente relacionada com as oscilações de elementos meteorológicos, que podem afetar qualquer região, inclusive as mais preparadas com maior disponibilidade de recursos tecnológicos, e podem levar a grandes danos econômicos.

Assad (2007) afirma que com aumento de temperatura, pode levar a uma mudança significativa na configuração da produção agrícola brasileira, e caso não seja tomada alguma medida, para se adaptar aos efeitos de mudanças climáticas, grandes regiões agrícolas não estarão mais aptas para o desenvolvimento da atividade de plantio até o final do século.

A presença ou ausência de precipitação, esta relacionada à fenômenos meteorológicos de várias escalas de tempo e espaço, que podem ir desde a escala global (El Niño e La Niña) aos casos de chuvas localizadas. Dessa forma, a variabilidade de precipitação, determina as estações secas e chuvosas em várias regiões do país, assim, o conhecimento dessas características possibilita que muitas atividades agrícolas como irrigação e preparo do solo possam ser planejadas e praticadas de forma mais eficiente, diminuindo também os custos de produção e permitindo que agricultores tomem melhores decisões sobre as épocas de plantio.

2.5.1 - Fenômeno ENOS.

A principal fonte de variabilidade climática interanual global é o fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS). Este fenômeno é representado por uma oscilação, acoplada do sistema oceano-atmosfera que produz mudanças na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), na pressão, no vento e na convecção tropical, principalmente no Oceano Pacífico, mas com reflexos em muitos lugares do planeta, principalmente nas precipitações sobre diversas regiões do Brasil.

Pesquisas de Walker (1923, 1924, 1927) e Walker e Bliss (1929, 1932, 1937) definiram um regime oscilatório de grande escala, ao estudar relações em fase e fora de fase, da pressão ao nível do mar, que se caracteriza, por um balanço leste-oeste de anomalia de pressão ao nível do mar, entre o oceano Índico leste/Indonésia e Pacifico sudeste. A denominação Oscilação Sul (OS) foi atribuída a esse balanço. O Índice de Oscilação Sul (IOS) está relacionado com as mudanças na circulação atmosférica nos baixos níveis da atmosfera, devido ao aquecimento ou

resfriamento das águas superficiais, na região. Valores negativos (positivos) do IOS são indicadores da fase negativa (positiva) do ENOS, com a ocorrência de El Niño (La Niña) (Philander, 1990).

O El Niño é a componente oceânica do ENOS, caracterizada pelo aquecimento anormal das águas superficiais na porção central e leste do oceano Pacífico, próximo da América do Sul. A corrente de águas quentes que ali circula na direção sul no início do verão, recebe o nome de El Niño, e provoca uma alteração da dinâmica normal da Célula de Walker. O anti El Niño, chamado de La Niña, é representado pelo resfriamento atípico das águas do Pacífico e também desempenha considerável impacto nas atividades humanas. As La Niñas acontecem quando a porção leste do Pacífico (Taiti) fica sujeita a um aumento anômalo de suas pressões, geralmente elevadas, ou seja, quando a situação barométrica padrão da Célula de Walker se acentua.

No sul do Brasil, a fase quente (El Niño), em geral está associada com excesso de precipitação, durante a primavera do primeiro ano e posteriormente o fim do outono e início do inverno do segundo ano, e na fase fria (La Niña) a precipitação, apresenta-se abaixo da normal climatológica na primavera e começo do verão. Enquanto que, a Região Sudeste não apresenta evidente mudança, no padrão característico de chuvas da região (Ferreira, 2005). Estudos mostram que, o ENOS influencia na produção e colheita, através de alterações nos padrões de clima, em algumas regiões. Os impactos sobre a agricultura dependem da cultura e época do calendário agrícola, em que a precipitação apresenta-se acima ou abaixo da normal.

Rao et al. (1997) encontraram alta correlação da produção de milho em 7 estados do nordeste brasileiro com o ENOS durante o fenômeno El Niño de 1984/1985, sugerindo que o IOS pode ser utilizado para prever a produção anual de milho no nordeste. Para a região Sul Brasileira, Berlato e Fontana (2003), encontraram benefícios, associados ao fenômeno, onde culturas como milho e soja, que não são irrigadas no verão, apresentaram maior disponibilidade hídrica pelo aumento de precipitação,

e Cunha et al. (1999), analisaram o comportamento da cultura de trigo e concluíram que, o fenômeno causou impactos positivos em anos de La Niña e negativos em anos de El Niño, na Região Sul do país. Franchito et al. (2010) investigaram a relação entre precipitação e produtividade de milho, no estado de São Paulo em casos de El Niño e La Niña e constataram um prolongamento da estação chuvosa e aumento no volume de precipitação, associados à presença de El Niño, bem como diminuição de precipitação em casos de La Niña, no estado de São Paulo, durante o período de 1970 a 2003, influenciando no aumento de produtividade, em função do aumento de precipitação devido ao El Niño e redução de quantidade produzida em eventos de La Niña.

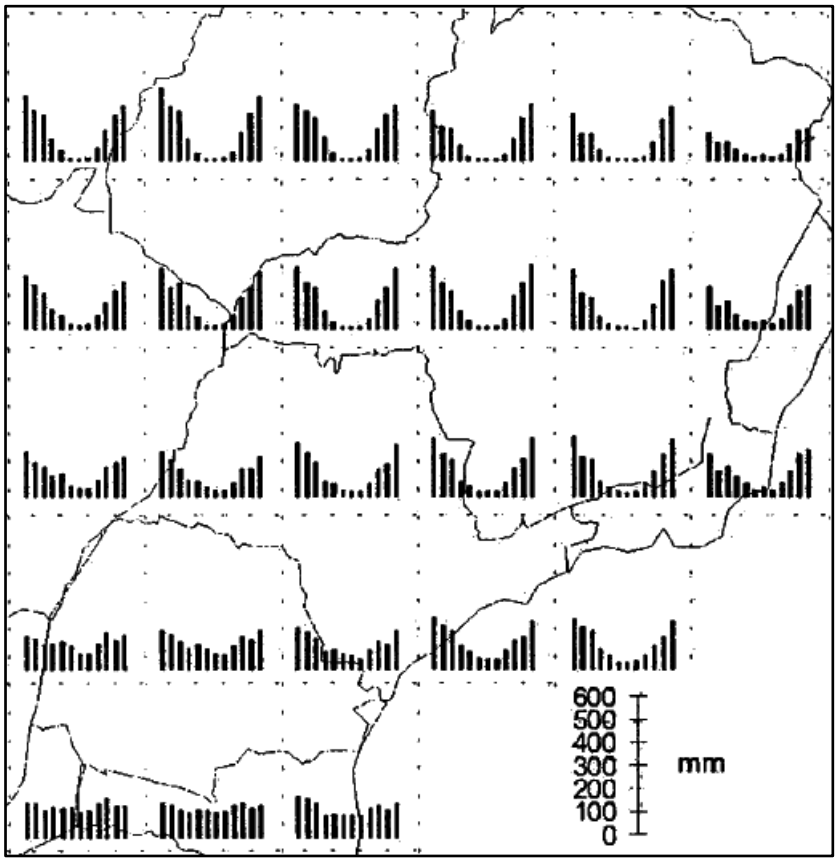
2.6 - Climatologia das Precipitações no Sudeste e Sul do Brasil.

Segundo Cavalcanti et al. (2009), a distribuição da precipitação na região Sudeste é fortemente controlada pela disposição do relevo, pela atuação das frentes polares e pela continentalidade. O ritmo sazonal é tipicamente tropical, com dois períodos bem caracterizados, um que concentra grande parte da precipitação e outro, com decréscimo acentuado da precipitação. A intensidade dos aguaceiros típicos de verão, provocados pela atuação da frente polar Atlântica, depende da permanência e das oscilações das frentes, cujas fortes chuvas, muitas vezes são provocadas por seu recuo como frente quente. As linhas de instabilidade de noroeste, também contribuem com os índices pluviométricos dessa época, principalmente quando a massa equatorial, com acentuada umidade específica, tem sua atuação facilitada pelo aprofundamento da massa tropical continental. O início da estação chuvosa, no Sudeste é associado a padrões de circulação de mesoescala e com atuação das frentes frias e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O período chuvoso inicia-se mais cedo no sul da região, devido à atuação das frentes frias. Ao norte da região, é observado, um atraso da estação chuvosa de 2 a 3 meses em relação ao sul da região, coincidindo, com a atuação das ZCAS em dezembro. Em anos de maior aquecimento do oceano, as chuvas

começam mais cedo, ou ocorre um atraso, quando as temperaturas da superfície do mar são mais frias, (ALVES ET AL. 2005).No inverno (período seco), a influência dos sistemas de grande e mesoescala, como latitude e maritimidade é maior, refletindo-se em uma distribuição espacial em sentido mais latitudinal, com diminuição dos volumes na direção SE-NW, no sentido do interior.

O ciclo anual de precipitação no Norte da região sul é uma transição entre dois regimes, monções de verão ao norte e máximos de inverno, que são, os responsáveis pelos máximos de precipitação em janeiro e julho, respectivamente, Figura 2.1. O regime de chuvas de verão, associados ao sistema de monção sul-americano é visível ao norte da região, enquanto que, mais ao sul, há máximos de precipitação em diferentes épocas do ano, indicando que, além da monção, há outros sistemas atuantes, que produzem chuvas, mais bem distribuída durante todo o ano. Durante o verão e nas estações de transição, no semestre quente, de outubro a abril, os Complexos Convectivos de Mesoescala são frequêntes e responsáveis por grande parte da precipitação total. Durante o inverno, assim como nas estações de transição, no semestre frio, de maio a setembro, a maior convergência de umidade está deslocada para o sul em relação ao verão, e no inverno, está sobre o Rio Grande do Sul (CAVALCANTI ET AL. 2009).

Figura 2.1. Ciclo anual de precipitação nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, no período de 1952-1992.



(Fonte: Grimm, 2003)

2.7 – Modelagem Agrometeorológica.

Para Bowen et al. (1993) um modelo pode ser definido, como uma equação ou um conjunto de equações, que representam um processo, e o desenvolvimento de modelos tem favorecido a simulação precisa de muitos processos sobre o solo e culturas, fornecendo informações para a análise da sustentabilidade dos recursos naturais, com o aumento da produtividade, sendo que, modelos de produtividade procuram explicar, baseados em processos físicos e fisiológicos, o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas sobre a resposta das plantas (BAYER, 1979). Segundo Thornely (1976), várias vantagens podem ser obtidas, com a utilização de modelos de produtividade, mas estes devem associar informações suficientes, que representem os processos da planta e interações da planta com o ambiente. Características do solo e informações sobre as práticas de manejo de culturas, durante o período

de dados climatológicos ou meteorológicos, disponíveis para determinado local, são informações relevantes para uso em modelos para previsão de produtividade agrícola.

Neste contexto, um modelo agrometeorológico pode ser definido como um modelo que consiste na representação da relação entre a produtividade (ou estado de desenvolvimento) de culturas agrícolas e das variáveis meteorológicas. Estas variáveis meteorológicas podem ser: temperatura, radiação fotossinteticamente ativa (PAR), disponibilidade de água, graus-dia acumulados e evapotranspiração. Essa relação é bastante complexa, pois os fatores ambientais podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas de inúmeras maneiras, nas diversas fases do ciclo da cultura (MORAES et al., 1998). Outra ressalva importante feita pelos autores é que os modelos agrometeorológicos relacionados com crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, fornecem dados que permitem ao setor agrícola, tomar importantes decisões. Isso significa melhor planejamento do uso do solo, adaptação de culturas, monitoramento e previsão de safras, controle de pragas e doenças, estratégia de pesquisa e planejamento.

Para Coral et al. (2005) um bom modelo agrometeorológico, além de considerar o clima como fator limitante de produção agrícola, analisa a sua relação com a fase fenologia em que a cultura se encontra, levando em conta, portanto, a sua susceptibilidade a determinados eventos climáticos e sua capacidade de onerar a produtividade naquele instante. Portanto, levando-se em consideração as exigências de uma determinada cultura durante seu desenvolvimento, de modo que, se elas não são atendidas por completo, a produtividade potencial é penalizada e a produtividade final é estimada.

Em pesquisas de modelagem agrometeológica, Assad et al. (2007), estudaram o desempenho do modelo Doorembos e Kassam (1994), para regiões que cultivam a cultura de soja, desde a safra de 2000/2001 até a safra 2004/2005 e concluíram que, o modelo apresentou desempenho satisfatório na previsão de safra, nos estados de Mato Grosso, Paraná,

Minas Gerais, Tocantins e Goiás e desempenho inferior para o Rio grande do Sul, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul, Maranhão.

Através de dados obtidos pelo balanço hídrico, Martins (2012), estimou a produtividade agrícola, através da modelagem de Doorembos e Kassam (1994), para as culturas de milho e sorgo no nordeste brasileiro, pois devido à agricultura de sequeiro da região ser frequêntemente castigada pela irregularidade do regime pluviométrico, o estudo concluiu que, a modelagem foi satisfatória na estimativa de produtividade, além de sugerir que, fatores de variabilidade climática, como o ENOS e Dipolo do Atlântico, podem ser implementados nas metodologias, para a análise de colapso de safras agrícolas.

Andrioli e Sentelhas (2009) avaliaram a sensibilidade da cultura do milho ao déficit hídrico, através de modelagem agrometeorológica de estimativa da produtividade, nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais e concluíram que, o desempenho do modelo foi aceitável, para a estimativa da produtividade real, associadas aos baixos erros de estimativa. Gouvêa (2008) utilizou modelagem agrometeorológica, para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, no município de Piracicaba-SP e concluiu que, o modelo Doorembos e Kassam (1994) pode ser calibrado, com dados observados, apresentando resultados satisfatórios para simulações em cenários futuros, propostos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climática (IPCC), onde devido ao aumento de temperatura, o modelo estimou elevação na taxa de evapotranspiração e maior deficiência hídrica, propondo maior exigência de irrigação artificial.

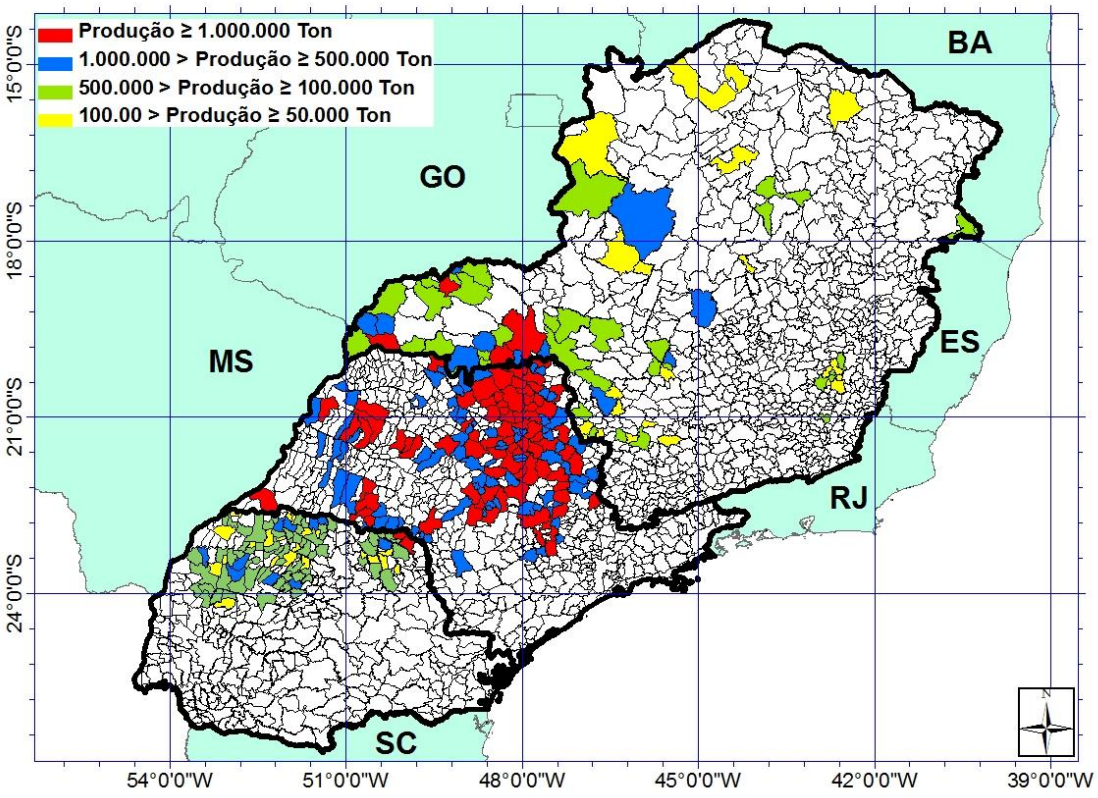
3 – MATERIAL E MÉTODOS.

3.1 - Área de Estudo.

A área de estudo escolhida, para o desenvolvimento dessa pesquisa, compreende os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Os três Estados do território Brasileiro foram selecionados por serem grandes produtores de cana-de-açúcar (IBGE, 2012).

Com o objetivo de detalhar polos de produção canavieira nos estados, foram utilizados dados de produção, em toneladas (Ton), obtidos através de estatísticas de produção agrícola municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Foram realizados levantamentos sobre os maiores municípios produtores de cana-de-açúcar, através de médias aritméticas para um período de 31anos de dados, desde 1980 a 2010, estabelecendo um critério de separação por classes de produção, como pode ser observado na Figura 3.1.

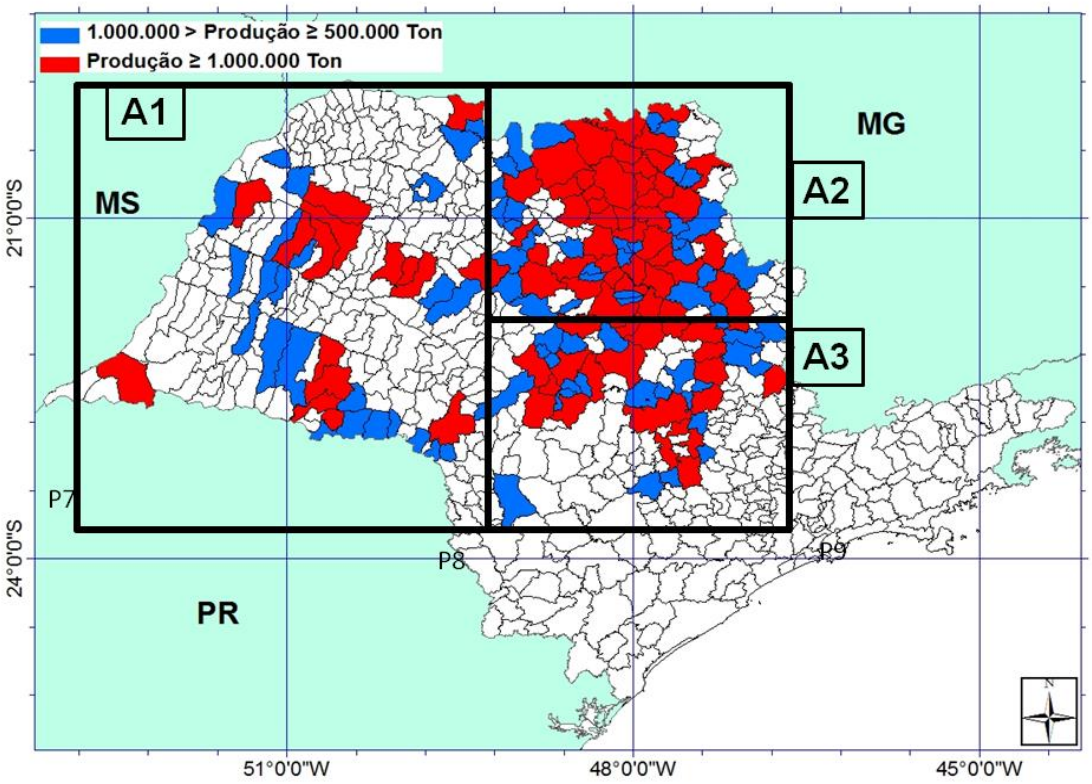
Figura 3.1 – Área de estudo com os três maiores produtores de cana-de-açúcar e suas respectivas produções caracterizadas por classes.



Através da separação por classes, foram considerados 314 municípios para o estudo, sendo que no Estado de São Paulo, o maior produtor brasileiro, foram adotadas somente as duas classes superiores, essa escolha se deve ao fato de o estado apresentar mais municípios com considerável produção dos que a quantidade somada dos municípios de Minas Gerais e Paraná, e os 158 municípios escolhidos no território Paulista poderiam representar satisfatoriamente a produção do Estado por áreas.

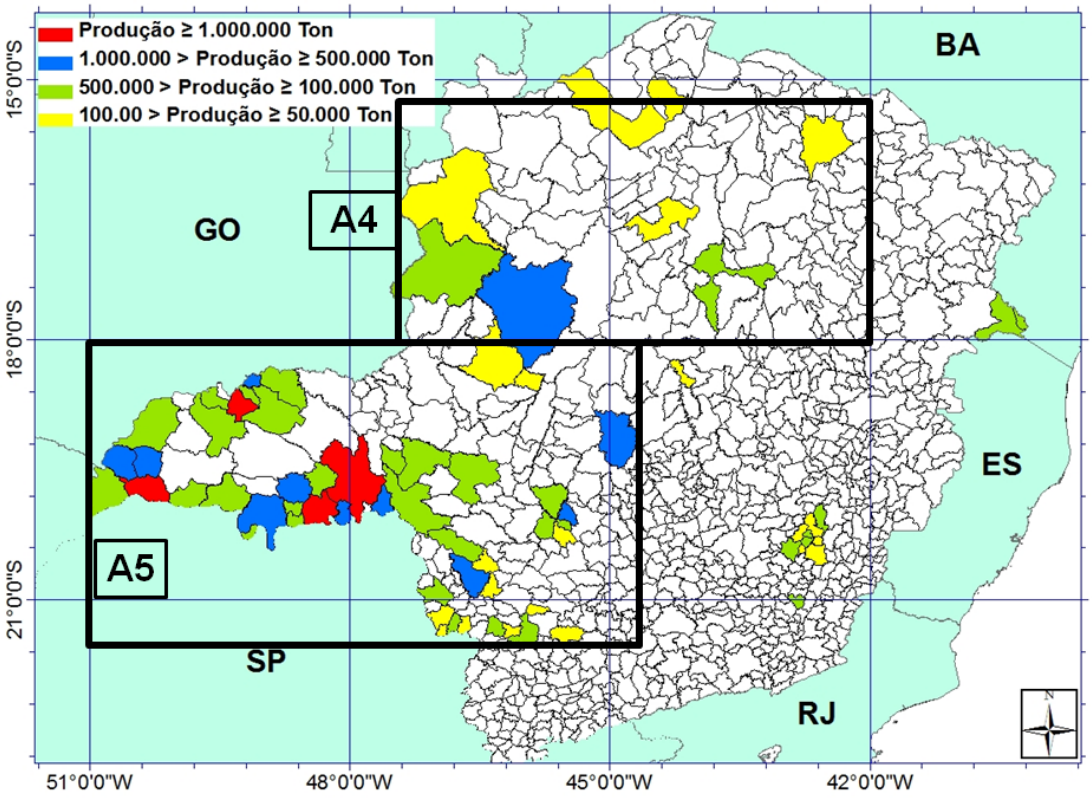
Após a distribuição por classes, foram delimitadas subáreas de produção para os 3 Estados. No Estado de São Paulo, Figura 3.2, foram selecionados 158 municípios produtores, divididos em 3 áreas: Área 1 (A1) com 40 municípios selecionados, abrangendo microrregiões de Araçatuba, Presidente Prudente, Marília, Bauru e São José do Rio Preto; Área 2 (A2), com 75 municípios, abrangendo microrregiões paulistas de Franca, Barretos, Ribeirão Preto e Central; e Área 3 (A3), com 43 municípios, abrangendo as microrregiões de Campinas e Sorocaba.

Figura 3.2 – Municípios produtores e Sub - Áreas de estudo da produção de cana-de-açúcar em São Paulo.



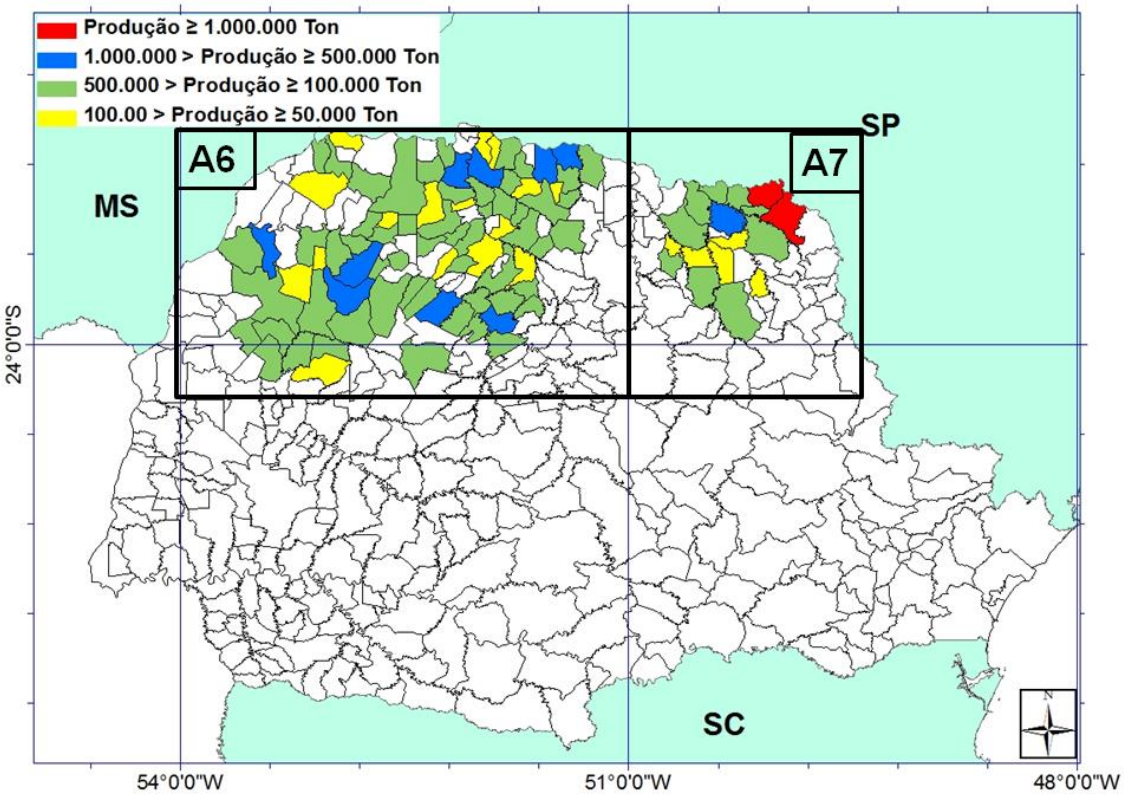
No Estado de Minas Gerais, Figura 3.3, foram selecionados 59 municípios, dentre a distribuição de classes de produção, e subdivididos em 2 áreas de produção: Área 4 (A4), com 7 municípios que fazem parte das microrregiões do norte e noroeste de Minas; e Área 5 (A5), com 52 municípios que abrangem as microrregiões do triângulo mineiro e central.

Figura 3.3 – Municípios produtores e Sub - Áreas de estudo da produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais.



No Estado do Paraná, pertencente à Região Sul do Brasil, 97 municípios produtores de cana-de-açúcar foram selecionados, sendo que o Estado foi divido em duas subáreas de produção: Área 6 (A6), região com 80 municípios produtores de cana-de-açúcar, pertencentes às regiões noroeste e norte central paranaense; e Área 7 (A7), com 17 municípios da região norte pioneira do Paraná.

Figura 3.4 – Municípios produtores e Sub - Áreas de estudo da produção de cana-de-açúcar no Paraná.



3.2 - Dados.

3.2.1 - Produtividade.

Os dados de produtividade de cana-de-açúcar (kg/ha) para o período de 1990 à 2010 foram obtidos através do Banco de Dados Agregados de Produção Agrícola Municipal pelo Sistema IBGE de Recuperação de Dados Automáticos (SIDRA/IBGE), disponibilizados na internet. Devido a ausência de digitalização de dados, os dados de produtividade para o período de 1980 a 1989 foram obtidos na Biblioteca da Supervisão de Documentação e Disseminação de Informação (SDI) em Unidade Estadual do IBGE, totalizando assim uma série histórica de 31 anos de produtividade média anual de cana-de-açúcar, de 1980 a 2010, para os 314 municípios de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, compreendendo 30 safras agrícolas, iniciando pela safra 1980/1981 até 2009/2010.

3.2.2 - Temperatura.

Os dados de temperatura média mensal foram obtidos do banco de dados climáticos do *Climate Research Unit* da *University of East Anglia* (CRU-UEA), localizada na Inglaterra, para o período de 1980 a 2010, com resolução espacial de 0,5° x 0,5°(latitude e longitude). Segundo Ferreira (2010), o banco de dados foi desenvolvido através de interpolação de dados de estações meteorológicas, que cobrem todo o globo, distribuídas em pontos de grade, além de informações embutidas advindas de estimativas por satélite.

3.2.3 - Precipitação.

Os dados diários de precipitação foram obtidos através do banco de dados do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), para o período de 1980 a 2010. O banco de dados, desenvolvido por Liebmann e Allured (2005), disponibiliza dados de precipitação para a América do Sul, distribuídos em pontos de grade e interpolados de aproximadamente 7900 estações que abrangem o continente sul-americano, com resolução espacial 1,0° x 1,0° (latitude e longitude).

3.2.4 - Extração de dados através de CDO.

A extração dos dados foi realizada através do sofware *Climate Data Operators* (CDO), que representa um conjunto de rotinas estatísticas e matemáticas para processar e extrair dados em pontos de grade. Através da utilização de script de comando, os dados de temperatura mensal e precipitação diária foram extraídos para as 314 localidades, da área de estudo, e posteriormente organizados nas 7 Subáreas propostas, para determinação de médias de temperatura (T) e precipitação (Prp) para cada área, para em seguida, serem submetidos à metodologia de balanço hídrico climatológico decendial (THORNTHWAITE; MATTER, 1955), para

obtenção das variáveis Evapotranspiração real (ETr) e Evapotranspiração potencial (ETp).

3.2.5 - Índice de Oscilação Sul (IOS).

O IOS é definido como a diferença entre as pressões normalizadas nas estações do Tahiti (Polinésia Francesa) e Ilha de Darwin (Austrália). A presença de El Niño (fase quente de ENOS) é caracterizada por valores menores ou iguais a -0,5 de IOS durante cinco ou mais meses consecutivos e o La Niña (fase fria) caracterizado por cinco ou mais meses seguidos de IOS maior ou igual a 0,5; o intervalo entre -0,5 e 0,5 por cinco ou mais meses consecutivos representa a fase neutra (Ropelewski e Jones, 1987). Foram utilizados dados de IOS do Centro de Previsão Climática da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) disponíveis na internet em índices mensais desde 1951 até o presente. Com base nesses dados foram identificados eventos de El Niño e La Niña, como pode ser observado na Tabela 3.1, para correlação de períodos com precipitação e produtividade de cana-de-açúcar.

Tabela 3.1 – Anos de ocorrência de fenômeno ENOS, de 1980 à 2010, divididos por intensidade e Fase quente (El Niño) e Fase fria (La Niña).

Anos	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
ENOS			O+++	A+	A+		O++	O++	A+++	
		O+++	A+	A+		O++	O++	A+++		O+++
Anos	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
ENOS	O+++	O+++	O+++		O++	A+		O+++	A++	A++
	O+++	O+++		O++	A+		O+++	A++	A++	A++
Anos	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
ENOS	A++		O++		O+		O+	A+++		O+
		O++		O+		O+	A+++		O+	

O+	El Niño Fraco		A+	La Niña Fraca
O++	El Niño Moderado		A++	La Niña Moderada
O+++	El Niño Forte		A+++	La Niña Forte

3.2.6 - Remoção da tendência de produtividade.

Com o objetivo de investigar a influência das condições meteorológicas na produtividade, os dados originais da série de produtividade do IBGE foram submetidos à uma análise de remoção de possíveis tendências significativas nas séries históricas, essa análise é necessária para remover tendências relacionadas à utilização de novas tecnologias na agroindústria (Rao, 1998). Inicialmente foi realizada uma análise de regressão para a série histórica de produtividade (1980-2011), considerando o ano como variável independente. Através de duas séries históricas, uma original e outra estimada, foi possível aplicar a equação (3.1), abaixo relacionada, para obtenção da série corrigida, que foi utilizada para comparação com os dados estimados pelo modelo agrometeorológico.

$$\mathrm{Y_{ci}} = \mathrm{Y_i} - \mathrm{Y(X_i)} + \mathrm{Y(X_o)} \tag{3.1}$$

Onde:

Y_{ci} = Produtividade corrigida da cana-de-açúcar;

Y_i = Produtividade original do ano i;

$Y(X_i)$ = Produtividade do ano i estimado por modelo de regressão;

$Y(X_o)$ = Produtividade do primeiro ano da série histórica estimada por regressão.

3.3 - Balanço hídrico.

Através dos dados de precipitação decendial e temperatura mensal, procedeu-se a um balanço hídrico (BH) como proposto por Thornthwaite e Matter (1955), que fornece o saldo de água disponível no solo para o desenvolvimento da cultura. Através das rotinas de cálculos embutidos no procedimento é possível obter informações de deficiência de umidade (DEF), umidade armazenada na zona das raízes (ARM), excedente de

água no solo (EXC), evapotranpiraçãode referencia (ET_0) e evapotranspiração real ou umidade verdadeiramente consumida pela vegetação (ETr). Para a aplicação, é necessário definir uma capacidade de campo (CAD) ou capacidade máxima de água armazenada no solo, sendo que de acordo com Doorembos e Kassam (1979), o CAD sugerido para a cultura de cana-de-açúcar é o de 100mm.

Foram elaborados 31 balanços hídricos decendiais, um para cada ano da série história e para cada uma das 7 áreas de estudo, através de planilhas eletrônicas desenvolvidas para o processo, totalizando 224 balanços hídricos. A escolha do balanço hídrico decendial, ao invés do mensal, se deve ao fato de fornecer informações mais detalhadas em intervalos de 10 dias, possibilitando analisar a influência da disponibilidade hídrica nas fases de desenvolvimento da cultura de cana de açúcar.

Através dos BH, foram obtidas séries históricas de 32 anos de Evapotranpiraçãode referencia (ET_0) e Evapotranspiração real (ETr), sendo que para a obtenção da Evapotranspiração potencial (ETp), necessária para o modelo de produtividade, foi utilizada uma correção feita pelo coeficiente de cultura (Kc), através da equação:

$$ETp = ET_0.Kc \qquad (3.2)$$

Onde Kc é específico para cada fase de cultura, e, de acordo com Doorembos e Kassam (1979), para a cana-de-açúcar, os coeficientes de cultura para as 4 fases fenológicas são: 0,75; 1,10; 1,25 e 0,70; e assim se pode calcular a Evapotranspiração potencial (ETp)para obtenção da deficiência hídrica relativa (DHR), necessária para a simulação através de modelagem agrometeorológica, além de séries de excedentes (EXC) e deficiências (DEF) hídricas para análise juntos com fases de desenvolvimento da cultura e correlação com a produtividade.

3.4 - Modelo Agrometeorológico.

Com o objetivo de desenvolver a previsão de safra agrícola, relacionada com elementos ambientais, e quantificar a perda de produtividade ao

longo do desenvolvimento da cultura e de suas fases, foi utilizado o Modelo multiplicativo de Doorenbos e Kassan (1994), que considera como resultado final o produto das relações (ETr/ETp), em nível mensal, com redução de produtividade, conforme acentua-se o efeito de deficiência hídrica nas fases fenológicas subsequentes da cultura. A expressão de estimativa de produtividade real (Pr) é dada por:

$$\frac{P_r}{P_P} = \left\{ \prod_{i=1}^{4} \left[1 - K_{yi} . \left(1 - \frac{ET_r}{ET_p} \right) \right] \right\} \tag{3.3}$$

Onde:

Pr = Produtividade real ou estimada (kg.ha-^{1});

Pp = Produtividade Potencial (kg.ha-^{1});

ETr = Evapotranspiração real (mm);

ET_0 = Evapotranspiração potencial (mm);

Ky = Fator de resposta da produtividade.

O modelo foi escolhido por disponibilizar, de forma detalhada, o comportamento da produtividade em nível de fase fenológica, permitindo avaliar, juntamente com a precipitação, quanto cada fase foi prejudicada pela redução da disponibilidade hídrica, além de permitir identificar onde houveram alterações, fornecendo informações sobre as necessidades de irrigação artificial para a cultura. O modelo também apresenta como vantagem a simplicidade na aplicação, pois necessita do balanço hídrico como dados de entrada, disponibilizando informações de monitoramento e previsão de safra agrícola, e como desvantagem, por ser um método empírico, necessita de calibração local.

O primeiro termo do modelo a ser calculado é a deficiência hídrica relativa, através de ETr e ETp obtidas através do balanço hídrico, como pode ser observado na equação 3.4:

$$\mathrm{DHR} = \left[1 - \left(\frac{\mathrm{ET_r}}{\mathrm{ET_P}}\right)\right] \tag{3.4}$$

Para determinação do fator de resposta da produtividade (Ky), é necessário determinar o período da safra agrícola. Neste trabalho foi considerada a cana de ano, com início em Setembro com o plantio e término em agosto com a colheita, devido ao fato de ser o ciclo mais usual no cultivo da cana na região centro-sul, além da impossibilidade de distinguir a contribuição da cana de ano e da cana de ano e meio na produtividade da cultura. O período das fases foi adotado de acordo com o Boletim 33 da FAO (1979): a primeira fase, de plantio e brotação dura em torno de 30 dias, a segunda fase, de perfilhamento, por volta de 150 dias, a terceira fase, de crescimento dos colmos, por volta de 120 dias, e a ultima fase, de maturação e colheita, em torno de 60 dias. Existem diversos valores de Ky na literatura para a cultura de cana-de-açúcar, neste trabalho foram testados diferentes fatores, até a obtenção de 2Kys ponderados para representar o comportamento da cultura perante diferentes condições de suprimento de água, de acordo com o número de dias de desenvolvimento da cultura, como pode ser observado na tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Fatores de reposta da produtividade para as fases da cana-de-açúcar.

KY 1			
FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
0,86	0,84	0,50	0,10
KY 2			
FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
0,60	0,50	0,40	0,10

A partir dos fatores de repostas e fases de desenvolvimento da cultura, foram determinados os termos de redução de produtividade por disponibilidade hídrica para cada safra agrícola, iniciando pela de 1980/1981 até a de 2010/2011. Através da aplicação mensal do fator de

penalização da cultura (redução de produtividade pelo déficit hídrico), foi possível estabelecer quantitativamente o rendimento em cada fase e o total de cada safra, para análise e aplicação no modelo de produtividade.

Para obtenção da produtividade real (Pr), o fator de penalização de produtividade por perda hídrica deve ser aplicado na produtividade potencial (Pp), conforme equação 3.5, que é obtida através da metodologia de zoneamento agroclimática.

$$P_r = P_p \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{4} \left[1 - k_{yi} \cdot \left(1 - \frac{ET_r}{ET_p} \right) \right] \right\} \tag{3.5}$$

3.4.1 - Método de Zona Agroclimática (MZA)

A estimativa de produtividade potencial (Pp) foi feita através da metodologia de zona agroclimática (MZA), desenvolvida por Doorembos e Kassam (1994). A produtividade potencial é o máximo rendimento de uma cultura, considerando a melhor adaptação ao ambiente de crescimento, sem estresse hídrico, nutricional, salinidade e fitossanitário, podendo ser calculado através da Equação 3.6, em unidades de Kg/ha:

$$\mathrm{Pp} = \mathrm{Ciaf} \,.\, \mathrm{Cres} \,.\, \mathrm{Ccol} \,.\, \mathrm{Cum} \,.\, \mathrm{ND}.\, \mathrm{PPBp} \tag{3.6}$$

Onde:

Pp = Produtividade Potencial;

Ciaf = Coeficiente de correção do índice de área foliar;

Cres = Coeficiente de correção de respiração da cultura;

Ccol = Índice de colheita;

Cum = Coeficiente de umidade;

ND = Dias de duração do ciclo da cultura;

PPBp = Taxa de produção bruta de matéria seca;

3.4.1.1 - Coeficiente de correção do índice de área foliar (Ciaf).

A correção para o índice de área foliar (IAF) visa ajustar a acultura para um comportamento mais próximo da realidade, sendo que de acordo com Fischer et al. (2002), o IAF atribuído para a cana-de-açúcar é igual a 5,3, e de acordo com Barbieri e Tuon (1992), Ciaf é igual a 0,5 para valores maiores ou iguais a 5 de IAF.

3.4.1.2 - Coeficiente de correção de respiração da cultura (Cres).

Segundo Teramoto (2003), durante o processo de fotossíntese e de crescimento vegetativo, uma parte dos carboidratos é utilizada no processo de fotorespiração e de manutenção de tecidos, dessa forma, é necessário adotar um coeficiente de correção para a respiração na estimativa de produtividade potencial, sendo esse valor estabelecido por Doorembos e Kassam (1979):

$$\text{Para } T < 20° \text{ C} : \mathrm{Cr} = 0{,}6 \tag{3.7}$$

$$\text{Para } T \geq 20° \text{ C} : \mathrm{Cr} = 0{,}5 \tag{3.8}$$

3.4.1.3 - Índice de colheita (Ccol).

Normalmente, apenas parte da matéria seca produzida pela cultura é colhida, na forma de colmo, fibra, fruto ou grão. Segundo Doorembos e Kassam (1994), o Ccol é a relação entre a matéria seca economicamente rentável e a massa seca produzida, e para a cana-de-açúcar, pode ser adotado Ccol=0,8.

3.4.1.4 - Coeficiente de umidade (Cum).

Segundo Pereira et al. (1997), um coeficiente de umidade deve ser utilizado para acrescentar a umidade residual na matéria seca da parte

rentável que normalmente fica retida no produto, para a cana-de-açúcar, a seguinte Equação 3.9 deve ser adotada, considerando U%=80:

$$\mathrm{Cum} = (1 - 0{,}01 \,.\, \mathrm{U\%})^{-1} \tag{3.9}$$

3.4.1.5– Dias de duração do ciclo da cultura (ND).

O Número de dias de duração do ciclo da cultura (ND) é fundamental para a determinação da Produtividade Potencial, sendo que na literatura muitos são as referências sobre os dias utilizados, para este trabalho, foram adotados os dias referentes a8 meses (243 dias) e 7 meses (212 dias), iniciando em outubro, por se tratarem dos meses com maior atividade orgânica de desenvolvimento para produção de biomassa e consumo hídrico (DOOREMBOS; KASSAM, 1979).

3.4.1.6 - Taxa de produção bruta de matéria seca (PPBp).

A Produtividade potencial bruta (PPBp) representa a produtividade bruta de matéria seca, que leva em consideração a presença ou ausência de nuvens, que alteram a quantidade de radiação solar, fazendo com que o aproveitamento de energia radiante pelas folhas seja diferente nas duas situações, dessa forma, PPBp é composto de um componente representativo de período nublado (PPBn) e outro de período de céu claro (PPBc), conforme Equação 3.10:

$$\mathrm{PPBp} = \mathrm{PPBn} + \mathrm{PPBc} \tag{3.10}$$

De acordo com Barbieir e Tuon (1992), PPBn e PPBc podem ser estimados através das Equações 3.11 e 3.12, respectivamente:

$$\mathrm{PPBn} = (31{,}7 + 0{,}219 \,.\, \mathrm{Q_0}) \,.\, \mathrm{cTn} \,.\, (1 - \mathrm{n/N}) \tag{3.11}$$

$$\mathrm{PPBc} = (107{,}2 + 0{,}36 \,.\, \mathrm{Q_0}) \,.\, \mathrm{cTc} \,.\, (\mathrm{n/N}) \tag{3.12}$$

Onde:

Q_0 = Irradiância solar global;

cTn = Correção devido à temperatura em céu nublado;

cTc = Correção devido à temperatura em céu sem nuvens;

n = Número efetivo de horas de brilho solar;

N = Fotoperíodo;

A irradiância solar global (Q_0) e o fotoperíodo (N) foram determinados de acordo com a latitude e a época do ano, segundo equações astronômicas propostas por Pereira et al. (2007). O número de horas de brilho solar foi obtido através do banco de dados de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMET/INMET) para o período de 1980 a 2011.

Os coeficientes cTn e cTc variam de acordo com cada tipo de cultura, pois a produção de matéria seca varia de acordo com a temperatura ambiente, espécie e processo de fixação de carbono, no mecanismo de adaptação ao clima, dessa forma, Barbieri e Tuon (1992) desenvolveram polinômios para estimativa dos coeficientes, sendo T, a temperatura média em graus Celsius, de acordo com as equações 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16, em função do valor de temperatura a ser utilizado:

Para T ≥ 16,5°C

$$\mathrm{cTn} = -1{,}064 + 0{,}173 \,.\, \mathrm{T} - 0{,}0029 \,.\, \mathrm{T}^2 \tag{3.13}$$

$$\mathrm{cTc} = -4{,}16 + 0{,}4325 \,.\, \mathrm{T} - 0{,}00725 \,.\, \mathrm{T}^2 \tag{3.14}$$

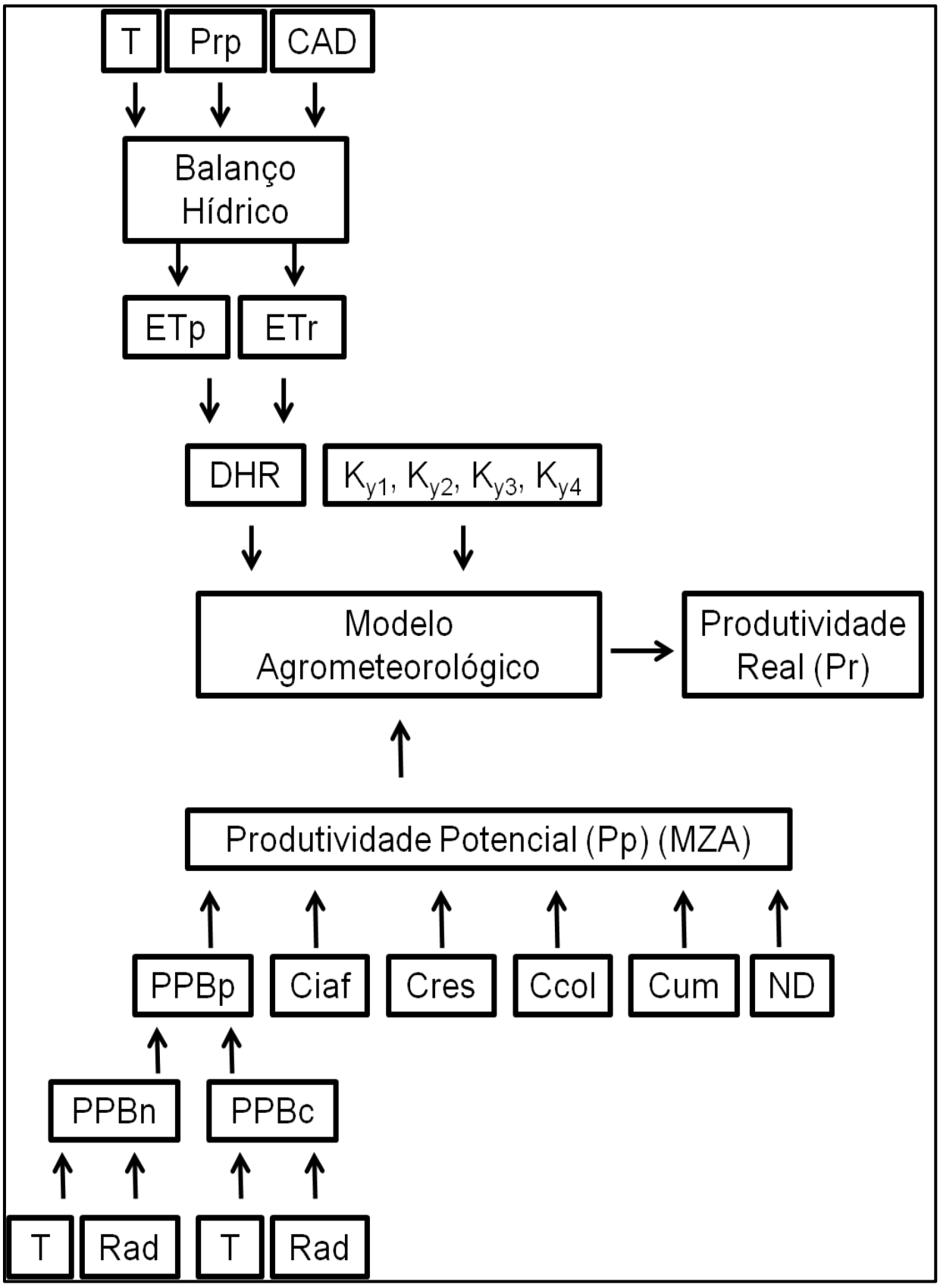
Para T < 16,5°C

$$\mathrm{cTn} = -4{,}16 + 0{,}4325 \,.\, \mathrm{T} - 0{,}00725 \,.\, \mathrm{T}^2 \tag{3.15}$$

$$\mathrm{cTc} = -9{,}32 + 0{,}865 \,.\, \mathrm{T} - 0{,}0145 \,.\, \mathrm{T}^2 \tag{3.16}$$

Após a obtenção de todos os coeficientes de correção, foi possível a obtenção da Produtividade bruta de matéria seca, e consequentemente a Produtividade potencial pelo método de zona agroecológica, completando todos os componentes para que o modelo agrometeorológico proposto por Doorembos e Kassam (1994) possa estimar a produtividade real (Pr) para as 7 áreas de estudo. O fluxograma do processo de modelagem pode ser observado na Figura 3.5, com todos os componentes e sub-rotinas.

Figura 3.5 – Fluxograma do Modelo Agrometeorológico.



3.5 - Avaliação de desempenho do modelo.

Para avaliar a exatidão do modelo na estimativa de produtividade, foram usadas várias estatísticas, como a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REQM), (Equação 3.17), e o Erro Médio Absoluto (EMA), que é a média das diferenças de valores absolutos entre previsão e observação, Equação 3.18.

$$REQM = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_{Pri} - P_{oi})^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.17}$$

$$EMA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_{Pri} - P_{oi}| \tag{3.18}$$

A análise da tendência e correlação foi aplicada sobre os erros obtidos REQM e EMA, através do método dos mínimos quadrados, em que existe o ajuste de uma reta dada pela regressão linear simples, bem como, o coeficiente de correlação, que significa o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias.A significância estatística da tendência dos erros foi verificada no nível de probabilidade (α) de 5%, através de p-valor, obtidos com a distribuição de Fisher e t de Student, onde se considerou p de 0,05 (95%), como patamar para avaliar a hipótese nula, ou seja, se o valor p for inferior a 0,05, rejeita-se a hipótese nula, (existe tendência significativa nos erros obtidos).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

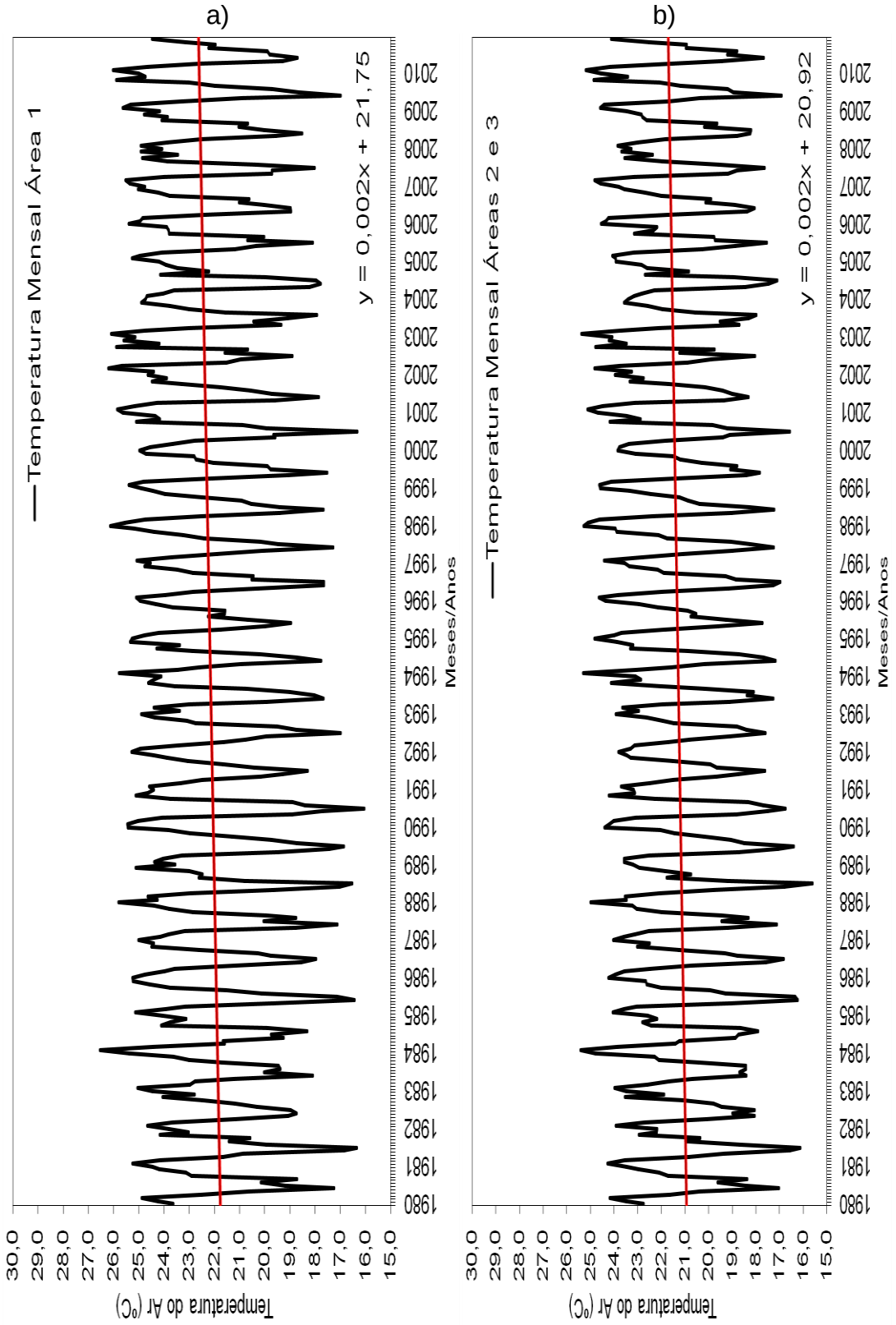
4.1 – Climatologia das temperaturas, precipitação, taxas de evapotranspiração real e potencial e déficits hídricos nas diferentes áreas consideradas nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná.

4.1.1 – Temperatura do ar.

A Figura 4.1 (a e b) mostra as temperaturas do ar médias mensais para o período de 1980 a 2010, para o Estado de São Paulo, onde foram selecionados 158 municípios produtores de cana-de-açúcar e o Estado foi dividido em 3subáreas (Figura 3.2, página 21): Área 1 com 40 municípios, abrangendo as microrregiões de Araçatuba, Presidente Prudente, Marília, Bauru e São José do Rio Preto; Área 2, com 75 municípios, abrangendo microrregiões paulista de Franca, Barretos, Ribeirão Preto e Central e área 3, com 43 municípios, abrangendo as microrregiões de Campinas e Sorocaba. Observa-se que, as temperaturas médias anuais para o período de 1980-1990, 1990-2000 e 2000-2010, para a área 1 foram de 21,9ºC, 22,1ºC e 22,3ºC; para as áreas 2 e 3 foram de 21,0ºC, 21,3ºC e 21,6ºC, respectivamente. Observamos ainda que, a área 1 apresenta valores mais elevados, quando comparado com as áreas 2 e 3 que apresentaram valores aproximados, mostrando uma variabilidade anual, caracterizado por um ciclo anual bem definido, com uma tendência de aumento nas temperaturas do ar. Nas áreas 1, 2 e 3 o ano mais quente ocorreu em 1984 com 26,5ºC e 25,4ºC e o menos quente na Área 1 ocorreu no ano de 1990 com 16,0ºC, enquanto que, nas áreas 2 e 3 foi no ano de 1988 com 15,6ºC, respectivamente.Os eventos da La Niña de 1984 influenciaram no aumento da temperatura do ar, como observado no ano mais quente, nas subáreas estudadas, bem como, os eventos de El Niño, que influenciaram na diminuição da temperatura do ar, nos anos de

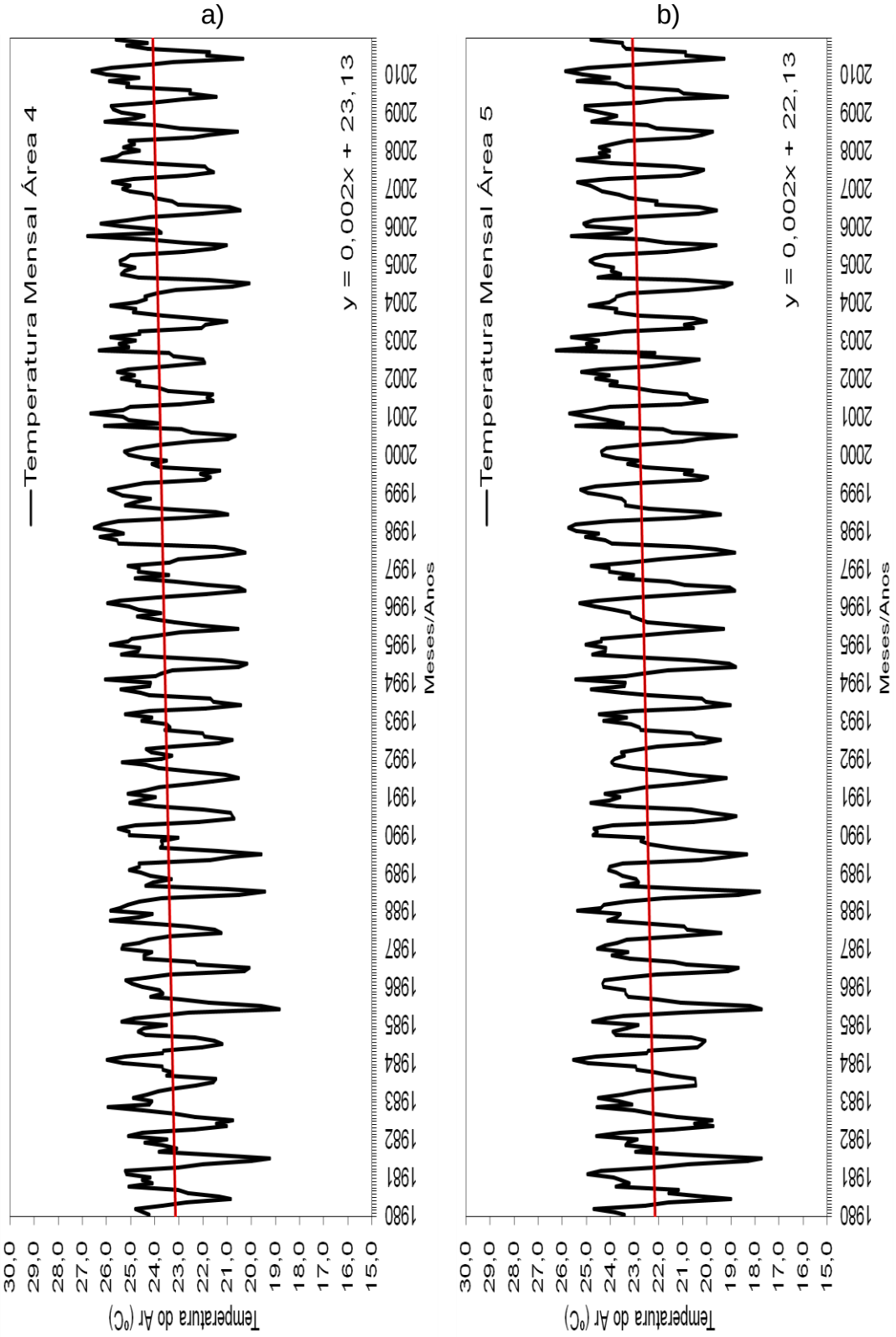
1988 e 1990, porém não podem ser desprezados outros fatores de escala global e os efeitos locais.

Figura 4.1 – Temperatura do ar mensal (°C) para Áreas 1 (a) e 2 e 3 (b), de 1980 – 2010.



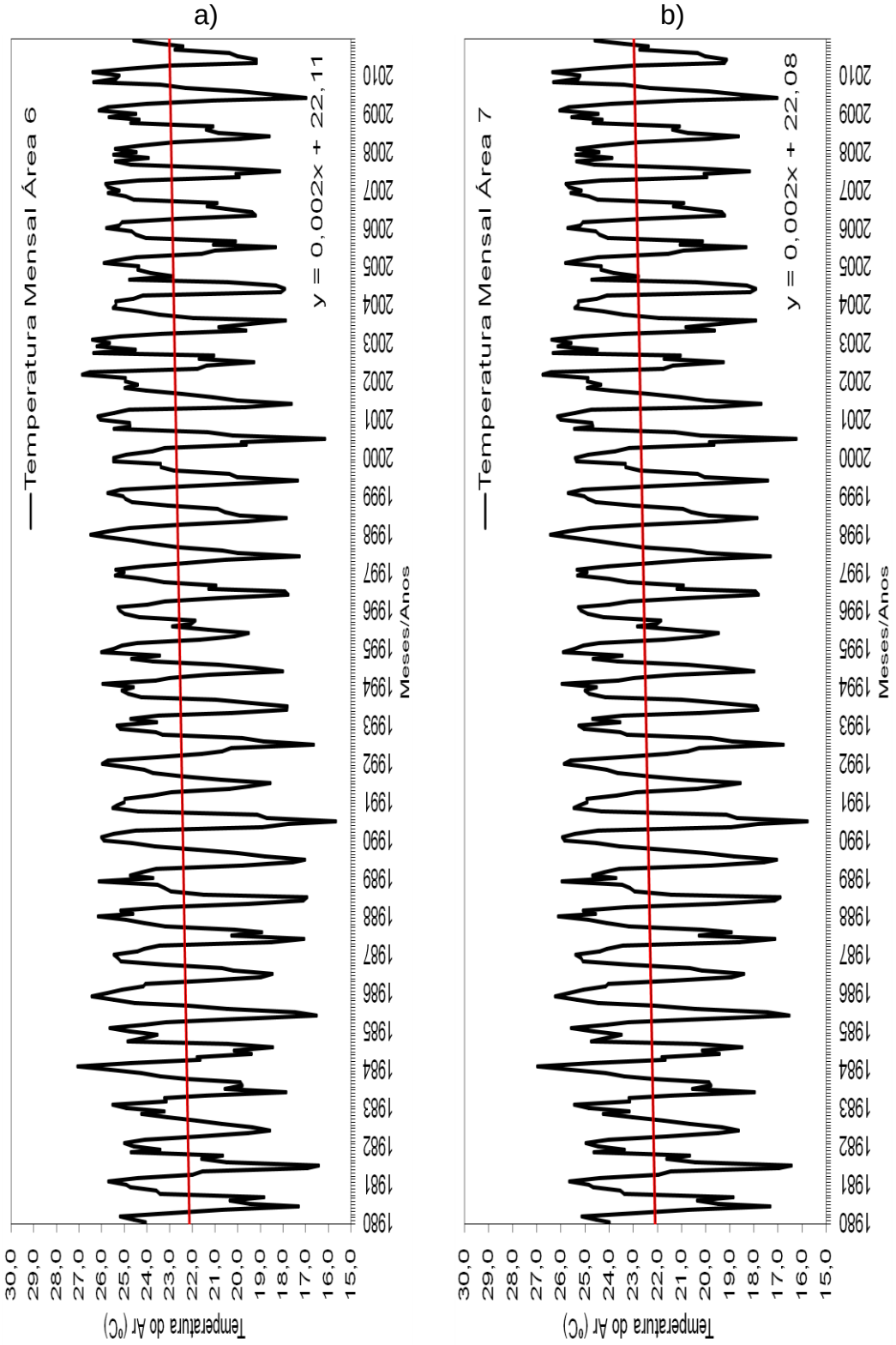
Na Figura 4.2 (a e b) são apresentadas as temperaturas médias mensais para o período de 1980 a 2010, para o Estado de Minas Gerais, onde foram selecionados 59 municípios produtores de cana-de-açúcar e o Estado foi dividido em 2 subáreas de produção (Figura 3.3, página 23): Área 4, região com 7 municípios, pertencentes as micro regiões do norte e noroeste de Minas Gerais e área 5 com 52 municípios que abrangem as micro regiões do triângulo mineiro e central. Observa-se que, as temperaturas médias anuais para o período de 1980-1990, 1990-2000 e 2000-2010, para a Área 4 foi de 23,3ºC, 23,5ºC e 23,9ºC e para a área 5 foi de 22,3ºC, 22,5ºC e 23,0ºC, respectivamente. Observamos que, a área 4 apresenta valores mais elevados, quando comparado com a área 5 porém ambas as áreas apresentam uma variabilidade anual, caracterizado por um ciclo anual bem definido, com uma tendência de aumento nas temperaturas do ar. Na área 4 o ano mais quente ocorreu em 2006 com 26,8ºC e na área 5 ocorreu no ano de 2002 com 26,2ºC e o menos quente na área 4 ocorreu no ano de 1985 com 18,8ºC, enquanto que, na área 5 foram nos anos de 1981, 1985 e 1988 com 17,7ºC, respectivamente. As subáreas do Estado de Minas Gerais, os eventos de La Niña e El Niño, apesar de apresentarem influência na temperatura do ar, os eventos não foram significativos, como nos anos mais quentes, 2002 e 2006, que foram anos de eventos de El Niño moderado e fraco, respectivamente, e os anos menos quentes, 1981, 1985 e 1988,que foram anos de El Niño forte, e anos de La Niña fraca e forte, respectivamente.

Figura 4.2 – Temperatura do ar mensal (°C) para Áreas 3 (a) e 4 (b), de 1980 – 2010.



Para o Estado do Paraná, que pertence à Região Sul do Brasil, a Figura 4.3 (a e b) apresenta as temperaturas médias mensais para o período de 1980 a 2010, onde foram selecionados 97 municípios produtores de cana-de-açúcar, sendo que, o Estado foi dividido em 2 sub- áreas de produção (Figura 3.4, página 24): Área 6, região com 80 municípios, pertencentes as regiões noroeste e norte central paranaense e área 7 com 17 municípios que abrangem as regiões norte pioneira do Paraná. Observa-se que, as temperaturas médias anuais para o período de 1980-1990, 1990-2000 e 2000-2010, para as áreas 6 e 7 apresentaram valores iguais e aproximados e foram de 22,2ºC, 22,5ºC e 22,9ºC, respectivamente, e ambas as áreas apresentam uma variabilidade anual, caracterizado por um ciclo anual bem definido, com uma tendência de aumento nas temperaturas do ar. Nas áreas 6 e 7 o ano mais quente ocorreu em 1984 com 27,1ºC e o menos quente ocorreu no ano de 1990 com 15,7ºC, respectivamente. Os eventos da La Niña de 1984 influenciaram no aumento da temperatura do ar, como observado no ano mais quente, nas subáreas estudadas, bem como, os eventos de El Niño, que influenciaram na diminuição da temperatura do ar, nos anos de 1990.

Figura 4.3 – Temperatura do ar mensal (°C) para Áreas 5 (a) e 6 (b), de 1980 – 2010.



A região de Minas Gerais é a região que apresenta maiores valores de temperatura do ar e São Paulo os menores valores, seguida da região do

Paraná. As temperaturas médias anuais para as regiões de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, para o período estudado de 1980 a 2010, foram de 21,6ºC, 23,1ºC e 22,6ºC, respectivamente, com valores máximos de 26,5ºC, 26,8ºC e 27,1ºC e valores mínimos de 15,6ºC, 17,7ºC e 15,7ºC, respectivamente. A zona do oeste do Estado de São Paulo, norte de Minas Gerais e todo o litoral, com exceção da porção situada no sul paulista, apresenta médias superiores a 22,0ºC, enquanto que, o norte do Estado de Minas Gerais e o oeste de São Paulo, apresentam altas temperaturas, que variam entre 19,0ºC e 21,0ºC, estando relacionadas à presença de altimetria, um pouco mais elevadas, que provocam decréscimos nas temperaturas. As temperaturas médias entre 14,0ºC e 18,0ºC encontram-se nas regiões montanhosas, entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, sendo maior a influência do fator da continentalidade, nas áreas centrais dos Estados de São Paulo e Minas Gerais. Os resultados mostraram também, a influência dos eventos de El Niño (ocorre aumento no volume de chuvas e diminuição na temperatura do ar) e da La Niña (diminuição no volume de chuvas e aumento nas temperaturas do ar), nos Estados de São Paulo e Paraná, enquanto que, no Estado de Minas Gerais, a Influência dos fenômenos, foi pouco significativa. Todas as áreas estudadas apresentaram um ciclo anual bem definido, porém com elevações nas temperaturas anuais, conforme os períodos estudados. De acordo com as condições climáticas em relação à temperatura média do ar, exigidas para o desenvolvimento das diferentes fases de crescimento e maturação da cultura, as regiões de um modo geral, apresentaram as condições favoráveis para o seu desenvolvimento.

4.1.2 – Precipitações mensais e anuais.

As precipitações acumuladas mensais, nas subáreas de São Paulo, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figura 4.4 (a, b e c) e observa-se que, os maiores índices pluviométricos, estão concentrados na área 2, com 1479 mm, seguida das áreas 3 e 1 com 1418 mm e 1361 mm, respectivamente. Os volumes máximos e mínimos de chuvas na

subárea1, ocorreram nos anos de 2009 e 1985 com 1898mm e 1085mm, nas subáreas 2 e 3, ocorreram em 1983 e 1984, com valores de 2282mm e 1217mm e 2151mm e 1068 mm, respectivamente, mostrando que os maiores índices pluviométricos, estão concentrados na subárea 2 e os menores volumes nas subárea 3 e 1, mostrando a influência do fenômeno El Niño, anos mais chuvosos, 1983 e 2009, e a influência do La Niña, anos menos chuvosos, 1984 e 1985, no Estado de São Paulo.

As precipitações acumuladas mensais, nas subáreas da região de Minas Gerais, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figuras 4.5 (a e b), e observa-se que, os maiores índices pluviométricos, estão concentrados na área 5, com 1473mm, seguida da área 4 com 1134mm, respectivamente. Os volumes máximos e mínimos de chuvas nas subáreas4 e 5, ocorreram nos anos de 1983 e 1990 com 1680mm e 774 mm, e 2141mm e 1187mm, respectivamente, mostrando que os maiores índices pluviométricos, estão concentrados na subárea 5 e os menores volumes na subárea 4, ou seja na parte norte de Minas Gerais.

As precipitações acumuladas mensais, nas subáreas da região do Paraná, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figura 4.6 e observa-se que, os maiores índices pluviométricos, estão concentrados na área 6, com 1514 mm, seguida da área 7 com 1444 mm, respectivamente. Os volumes máximos e mínimos de chuvas nas subáreas6, ocorreram nos anos de 1983 e 1988 com 2048 mm e 1130 mm, e na subárea 7 nos anos de 2009 e 1985 com valores de 1873 mm e 1090 mm, respectivamente, mostrando que os maiores índices pluviométricos, estão concentrados na subárea 6 e os menores volumes na subárea 7, ou seja na parte norte do Paraná. Os resultados mostraram também que, os eventos de El Niño e La Niña, influenciaram na precipitação da região, pois os anos mais chuvosos, 1983 e 2009, foram anos de El Niño, e os anos menos chuvosos, 1985 e 1988, foram anos da La Niña.

Figura 4.4 – Precipitação acumulada mensal (mm) para Áreas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), de 1980-2010.

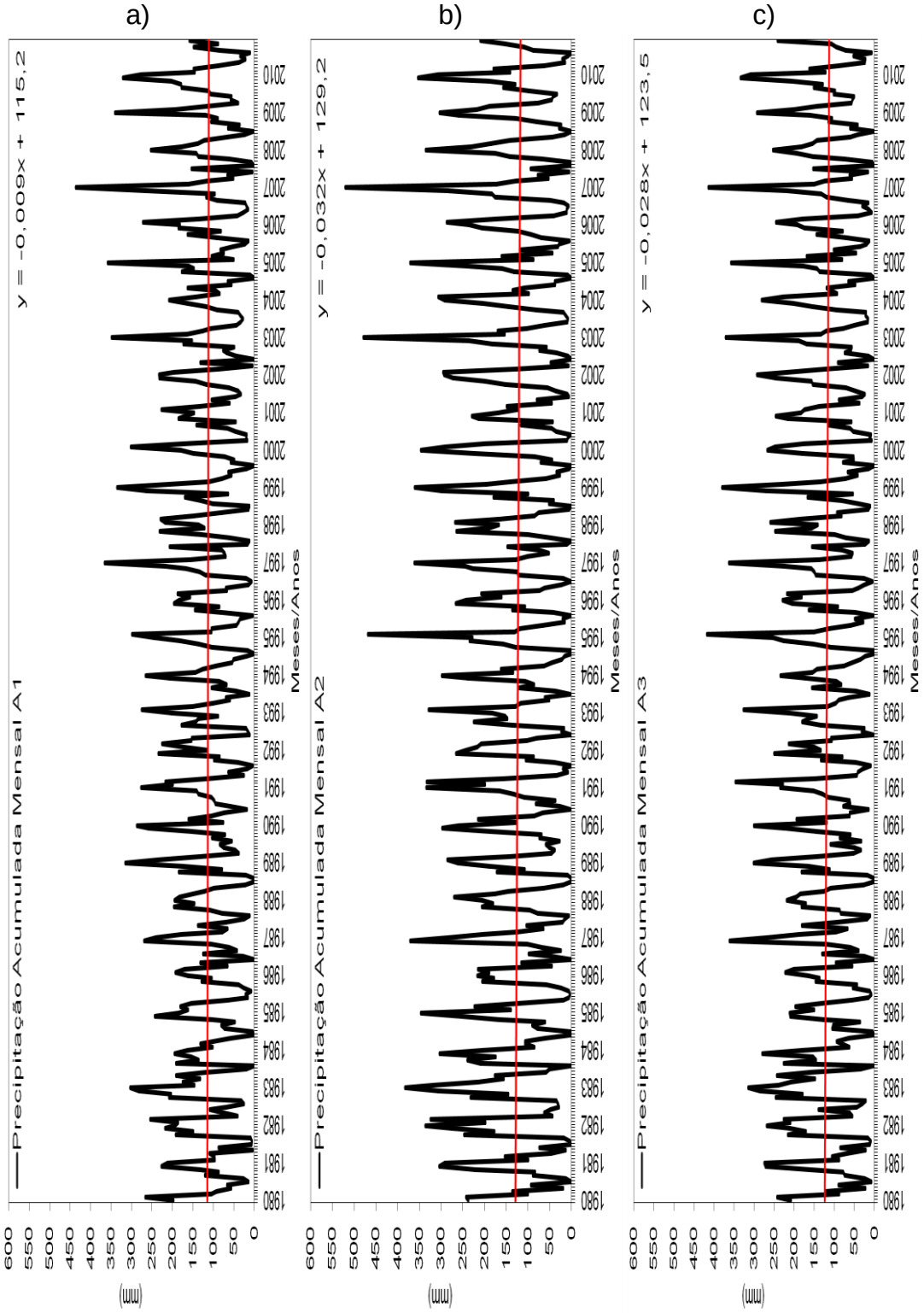


Figura 4.5 – Precipitação acumulada mensal (mm) para Áreas 4 (a), e 5 (b), de 1980-2010.

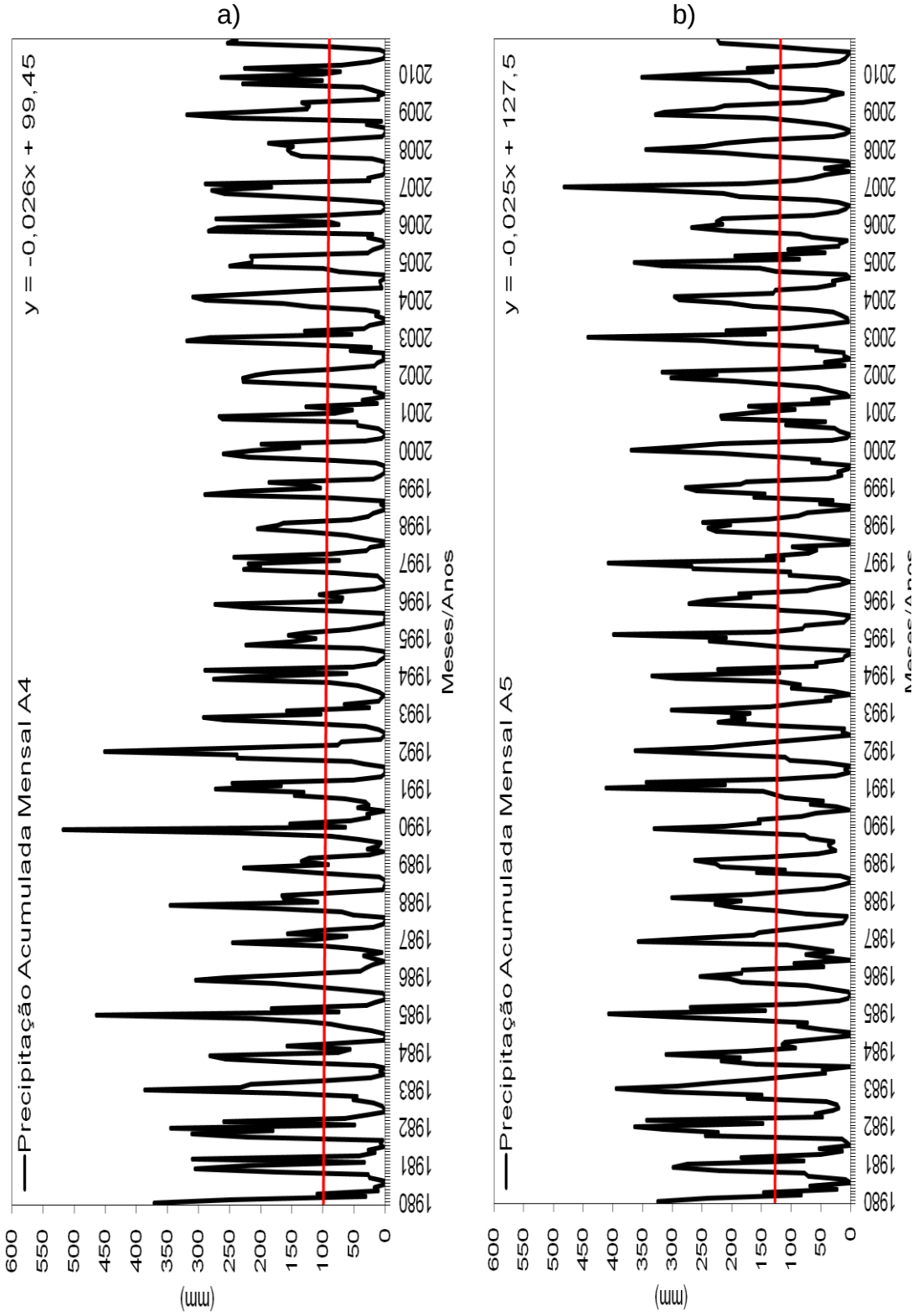
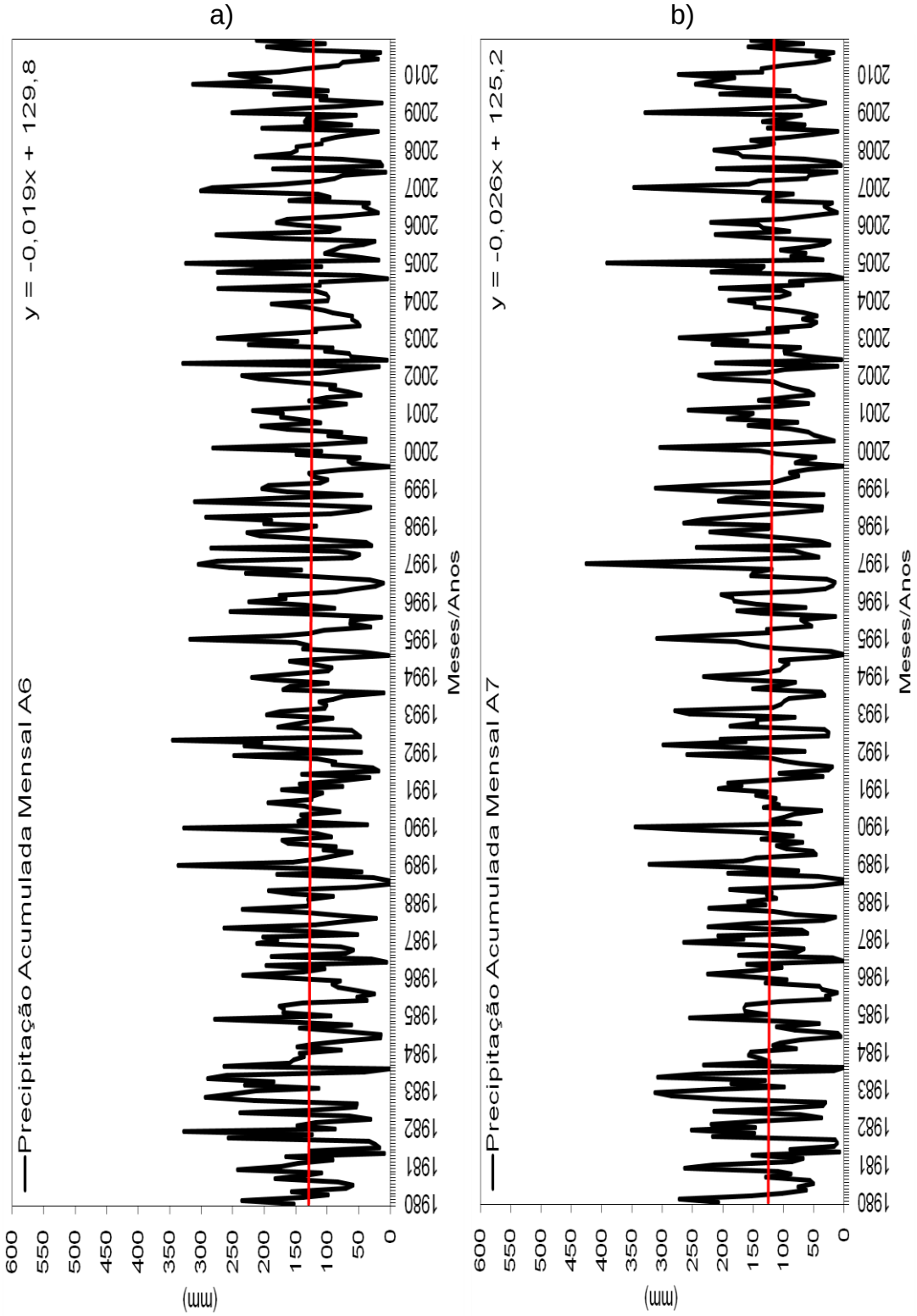


Figura 4.6 – Precipitação acumulada mensal (mm) para Áreas 6 (a), e 7 (b), de 1980-2010.



A distribuição da pluviosidade na região Sudeste é fortemente influenciada pelos sistemas atmosféricos que atuam na área, e apresentam grandes variabilidades inter e intra-anual, mostrando que, a

distribuição da precipitação é altamente irregular no espaço e no tempo. A zona que se estende pelo litoral paulista em direção S-N, apresenta índices anuais de chuva com média superiores a 2000mm; a zona SE-NW, é mostrada de forma menos intensa do que no litoral, que se estende do Rio de Janeiro ao oeste de Minas Gerais, apresentando volumes de chuvas em torno de 1500mm a 1700mm. A zona com pluviosidade entre 1250mm e 1400mm situa-se mais no interior do continente, destacando-se as planícies, o centro-norte mineiro, e onde atua a frente polar. A região Sul, apresenta grande contraste nos regimes térmicos e pluviométricos, devido à situação geográfica da região, transição entre os trópicos e as latitudes médias, onde o relevo também contribui para os contrastes. A região de Minas Gerais é a região que apresenta menores valores de precipitação pluviométrica e São Paulo os menores valores, onde as precipitações acumuladas anuais para as regiões de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, para o período estudado de 1980 a 2010, foram de 1419mm, 1304mm e 1479mm,respectivamente. Os resultados mostraram também a influência dos eventos extremos de El Niño e de La Niña, nos Estados de São Paulo e do Paraná, porém foi pouco significativo no Estado de Minas Gerais. De acordo com as condições climáticas em relação ao regime pluviométrico, exigidas para o desenvolvimento das diferentes fases de crescimento e maturação da cultura, as regiões de um modo geral, apresentaram as condições favoráveis para o desenvolvimento, da cultura de cana-de-açúcar.

4.1.3 – Taxas mensais e anuais de evapotranspiração potencial e real.

A evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR) acumuladas mensais, nas subáreas de São Paulo, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figura 4.7 (a , b e c) e observa-se que, os maiores índices de ETP e ETR estão concentrados na área 1, com 1100mm e 990mm, seguida das áreas 3 e 2 com 1022mm e 932mm; e 1020mm e 907mm, respectivamente.

A evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR) acumuladas anuais e as médias, nas subáreas de Minas Gerais, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figura 4.8 (a e b) e observa-se que, os maiores índices de ETP estão concentrados na área 4, com 1219mm e para a área 5 com 1121mm, enquanto que, a ETR é mais elevada na área 5 com 937mm e na área 4 com 800mm, respectivamente, apresentando pequenas variações no decorrer dos anos.

A evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR) acumuladas mensais, nas subáreas do Paraná, para o período de 1980-2010, estão ilustradas nas Figuras4.9 (a e b) e observa-se que, os maiores índices de ETP e ETR, estão concentrados na área 6 , com 1141mm e 1050mm, enquanto que, a área 7 apresenta valores de ETP e ETR de 1137mm e 1032mm, respectivamente.

A ETP apresenta maiores valores, sendo o máximo valor de ETP de 1170mm e menores valores de ETR de 869mm, na região de Minas Gerais, seguida da região do Paraná com ETP de 1139mm e ETR de 869mm e da região de São Paulo, com ETP de 1047mm e ETR de 944mm, mostrando elevada evapotranspiração em áreas mais continentais.

Figura 4.7 – Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) acumuladas mensais (mm), para Áreas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), de 1980 - 2010.

a) b) c)

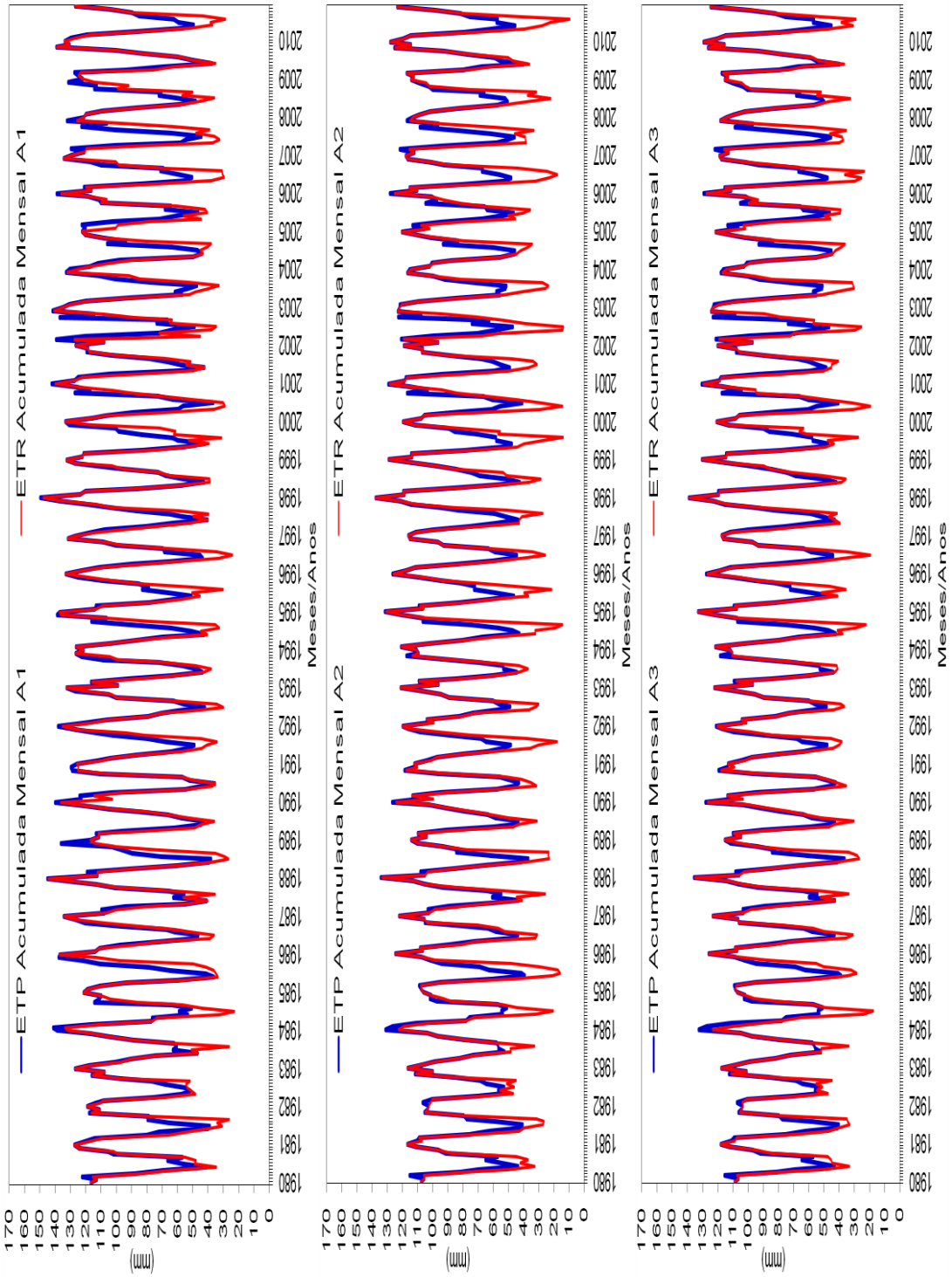


Figura 4.8 – Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) acumuladas mensais (mm), para Áreas 4 (a) e 5 (b), de 1980 - 2010.

a) b)

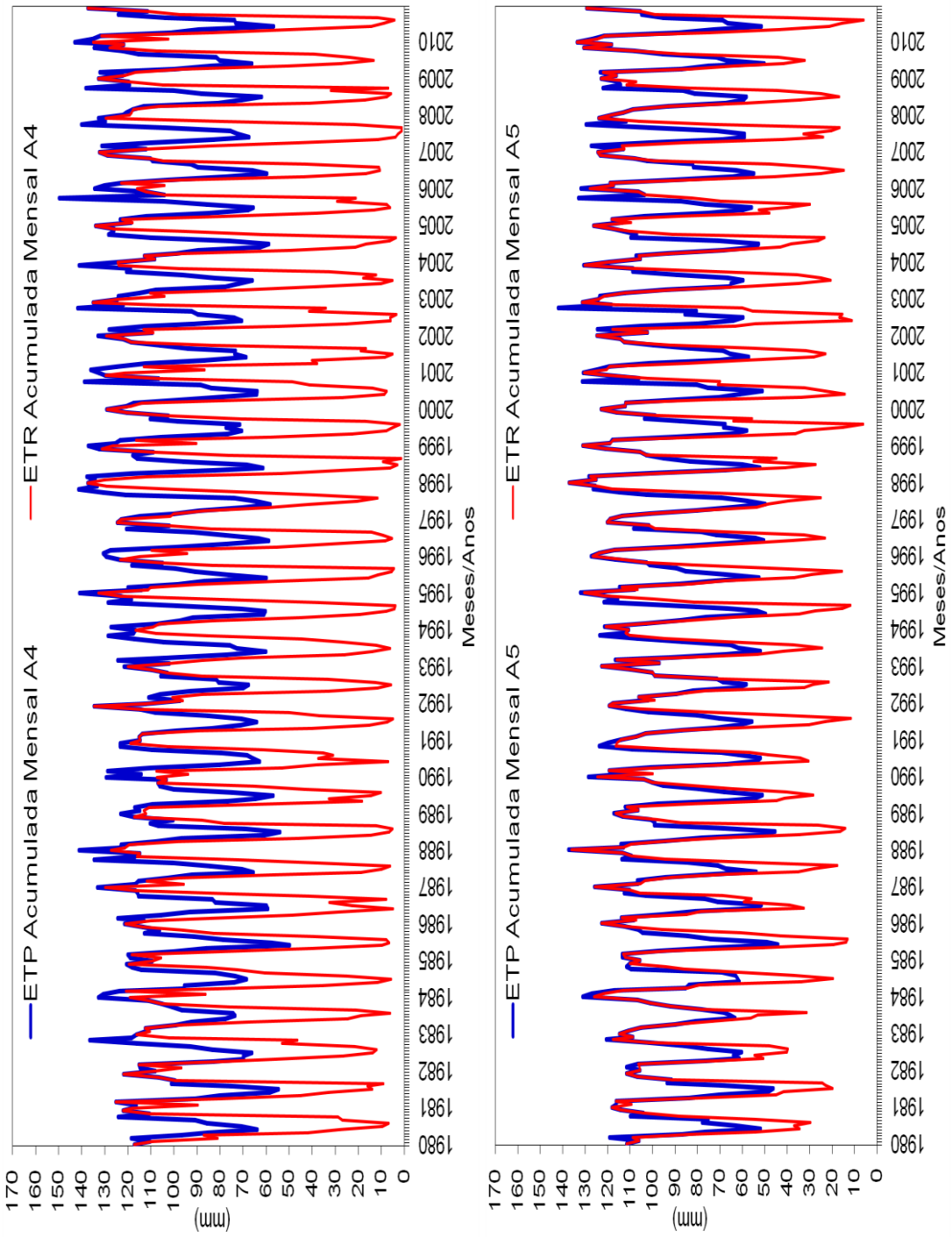
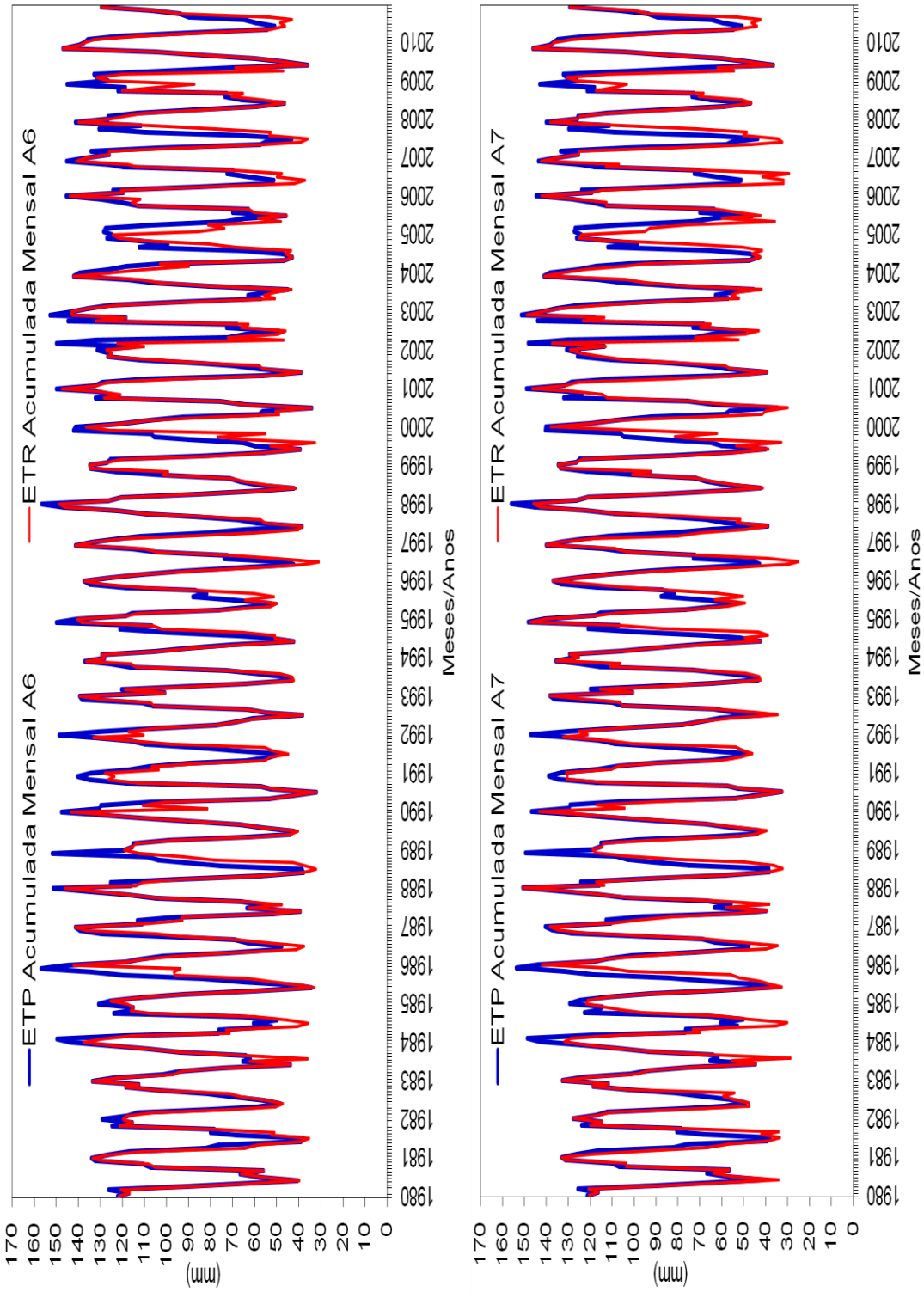


Figura 4.9 – Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) acumuladas mensais (mm), para Áreas 6 (a) e 7 (b), de 1980 - 2010.

a) b)



4.1.4 – Déficits e excedentes mensais e anuais de água no solo.

Quando a curva da precipitação cai abaixo da curva de ETP, ocorre utilização de água no solo até que se esgote a capacidade de campo disponível, começando em seguida o período de deficiência de água no solo, o que prolonga até que a curva da precipitação ultrapasse a ETP, iniciando a reposição de água no solo, até completar a capacidade de campo, uma vez completados, a sobra é considerada como excedente de água no solo ou água que percola além da zona das raízes. O déficit (DEF) e o excedente de água no solo (EXC) acumulados mensais, nas subáreas de São Paulo, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figura 4.10 (a, b e c), e observa-se que, os maiores índices de DEF, estão concentrados na área 2, com 114mm, seguida da área 1 com 110mm e da área 3 com 90mm, enquanto que, os maiores excedentes de água no solo (EXC) ocorrem na área 2 com 574mm, área 3 com 488mm e área 1 com 382mm, respectivamente.

Completando o balanço de água no solo, observa-se que, as retiradas e as reposições de água no solo, antecedendo/sucedendo, respectivamente, o período menos chuvoso da região. O déficit (DEF) e o excedente de água no solo (EXC) acumulados mensais, nas subáreas de Minas Gerais, para o período de 1980-2010, estão ilustradas nas Figuras 4.11 (a e b), e observa-se que, os maiores índices de DEF, estão concentrados na área 4 , com 419mm, seguida da área 5 com 184mm, enquanto que, os maiores valores de excedente de água no solo (EXC), ocorrem na área 5 com 536mm, seguida da área 4, com 341mm, respectivamente.

O déficit (DEF) e o excedente de água no solo (EXC) acumulados mensais, nas subáreas da região do Paraná, para o período de 1980-2010, estão ilustradas na Figura 4. 12 (a e b), e observa-se que, os maiores índices de DEF, estão concentrados na área 7, com 104mm, seguida da área 6 com 92mm, enquanto que, os maiores volumes de excedente de água no solo (EXC), ocorre na área 6 com 483mm, seguida da área 7, com 426mm, respectivamente.

A deficiência de água no solo apresenta maiores valores na região de Minas Gerais, igual à302mm, região de São Paulo com 105mm e a região do Paraná com menor deficiência, igual à 98mm, e valores mais elevados de excedentes ocorrem na região de São Paulo, seguida da região do Paraná e com menores valores na região de Minas Gerais, mostrando maiores deficiências de água no solo, em áreas mais continentais.

Figura 4.10 – Déficit (DEF) e excedente (EXC) acumulados mensais (mm), para Áreas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), de 1980 -2010.

a) b) c)

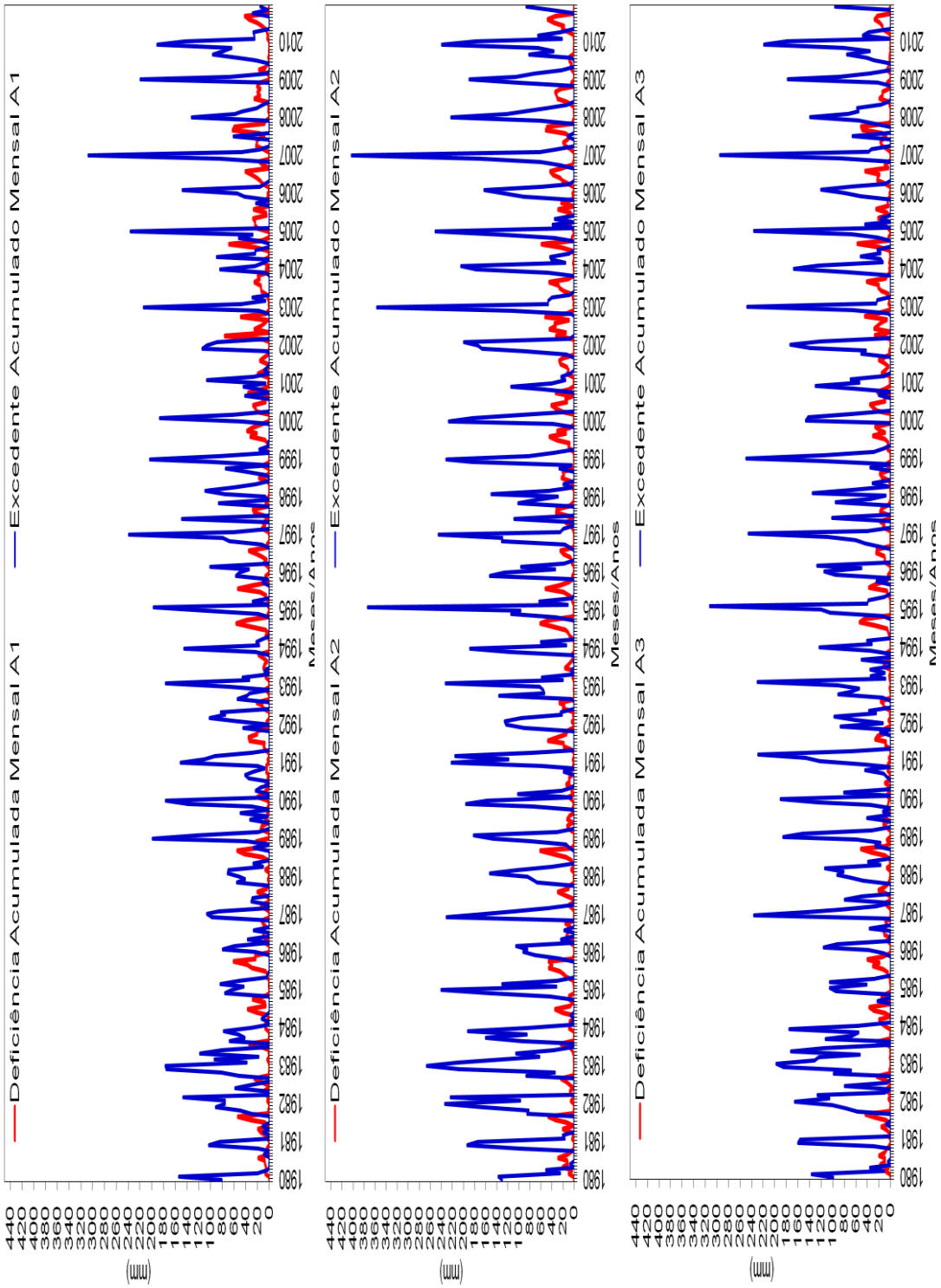


Figura 4.11 – Déficit (DEF) e excedente (EXC) acumulados mensais (mm), para Áreas 4 (a) e 5 (b), de 1980 -2010.

a) b)

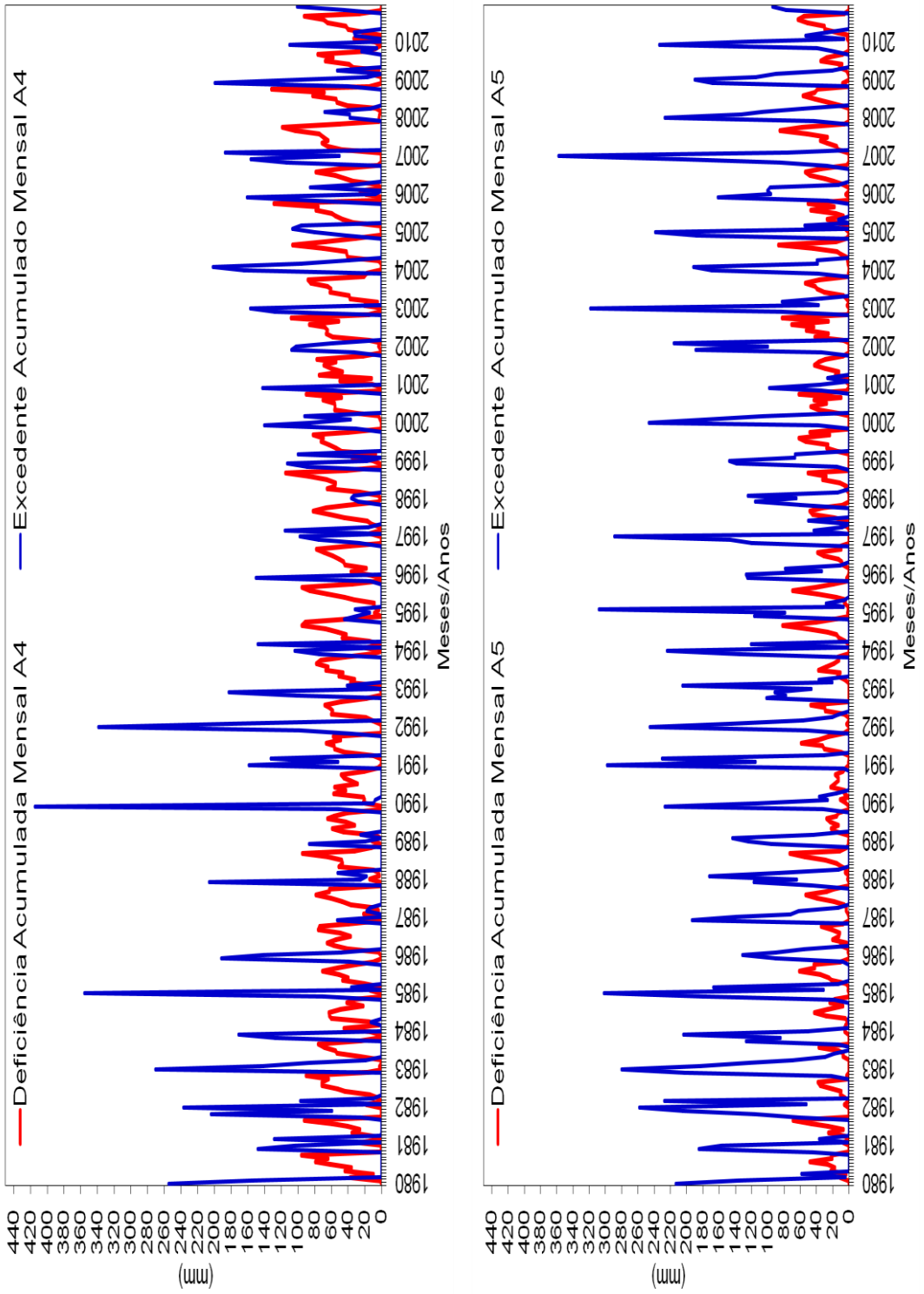
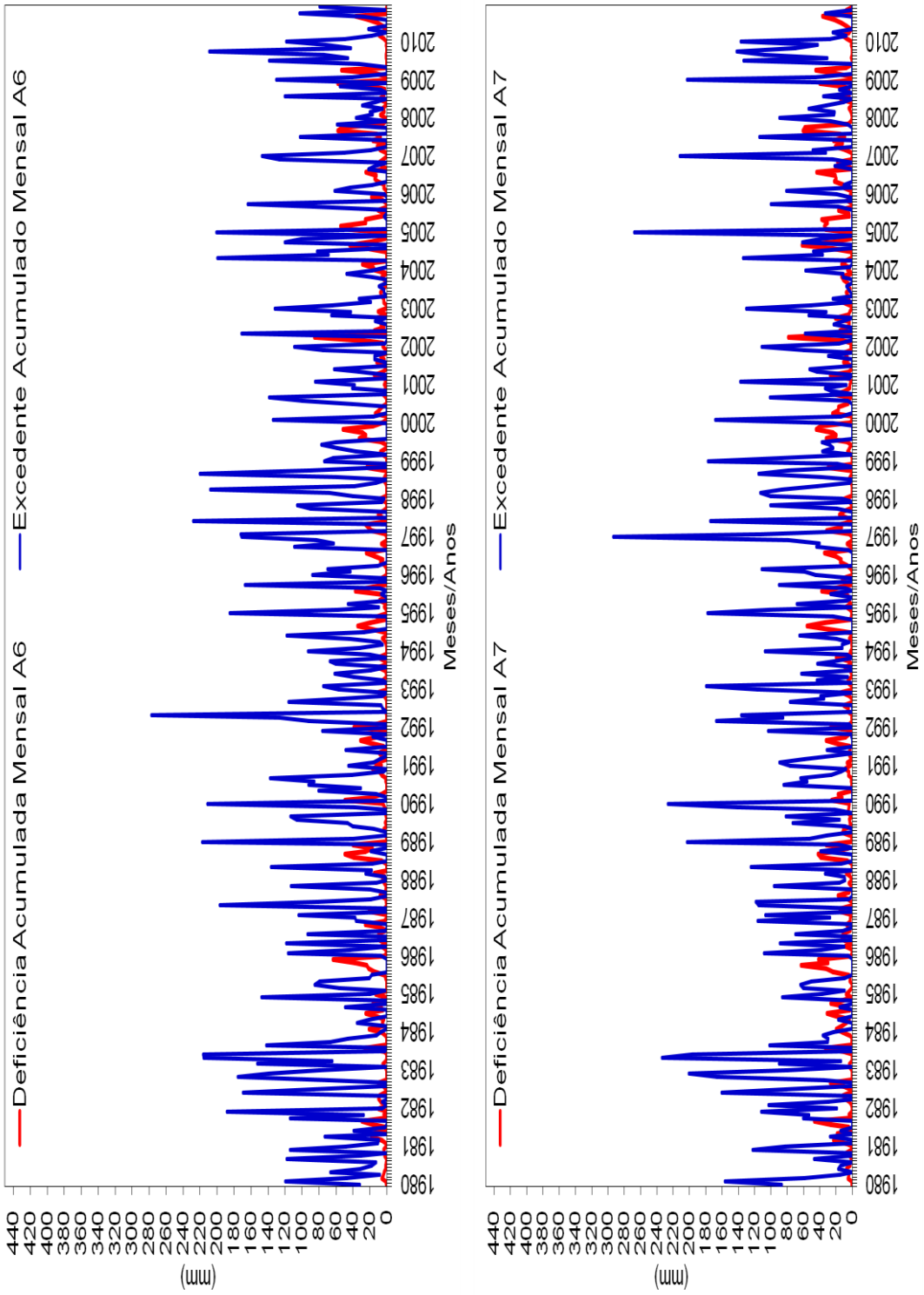


Figura 4.12 – Déficit (DEF) e excedente (EXC) acumulados mensais (mm), para Áreas 6 (a) e 7 (b), de 1980 -2010.

a) b)



4.1.5. Comportamento em relação à média

Analisando os desvios padrões (DP) e as temperaturas médias anuais para as subáreas 1, 2 e 3, para o período de 1980 à 2010, para as regiões de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, ilustradas nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, e observa-se uma tendência de elevação nas temperaturas do ar, com um movimento cíclico, com variações interdecenais. Observa-se ainda que, para a região de São Paulo, Figura 4.13, os maiores índices de temperatura médias anuais ocorrem na área 1, com 22,2ºC, seguida das áreas 2 e 3, com 21,3ºC, respectivamente. Com base nos cálculos estatísticos, de desvio-padrão, observa-se que, ocorre uma significativa variabilidade com DP em todas as subáreas da região, com maior variabilidade na área 1 com DP médio de 3,4ºC e nas áreas 2 e 3 com DP médio de 2,4ºC, respectivamente. Na região de Minas Gerais, Figura 4.14, os maiores valores de temperatura do ar e de desvio-padrão, ocorrem na área 4, com temperatura média anual de 23,6ºC e DP de 1,4ºC e para a área 5 com temperatura média anual de 22,6ºC e desvio padrão de 1,7ºC e na região do Paraná, Figura 4.15, as de temperatura do ar média anual e os desvio-padrão das áreas 6 e 7 foram próximas, com temperatura do ar igual a 22,6ºC e 22,5ºC e os DP iguais a 2,7ºC, respectivamente.

Figura 4.13 – Desvios padrões e temperaturas médias anuais para Áreas 1, 2 e 3, para o período de 1980 - 2010.

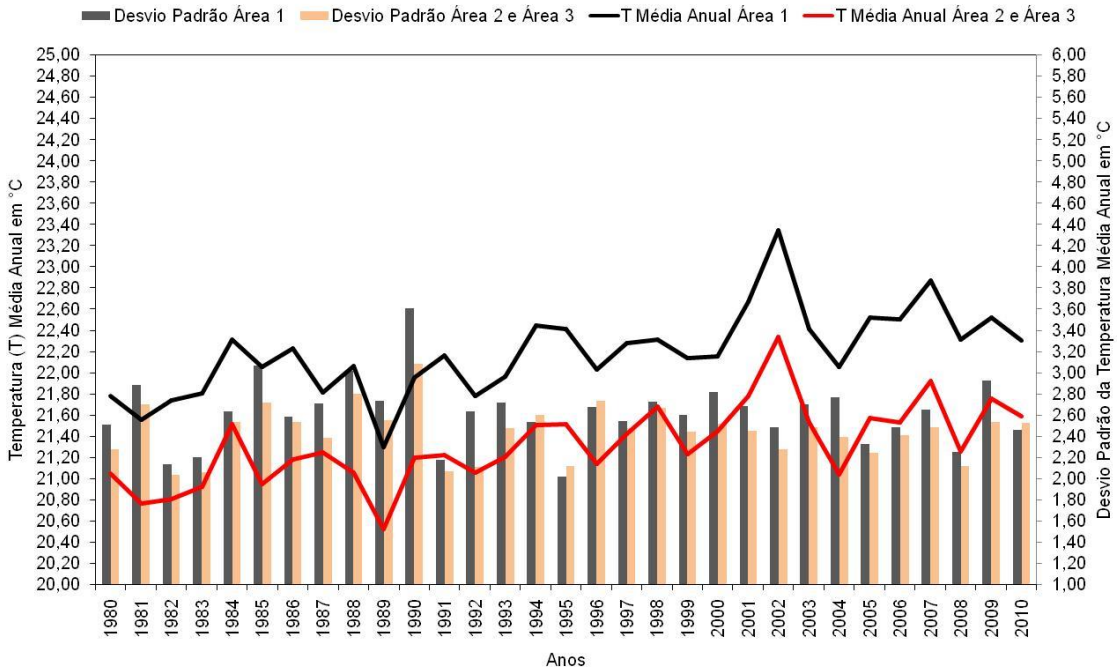


Figura 4.14 - Desvios padrões e temperaturas médias anuais para Áreas 4 e 5, para o período de 1980 - 2010.

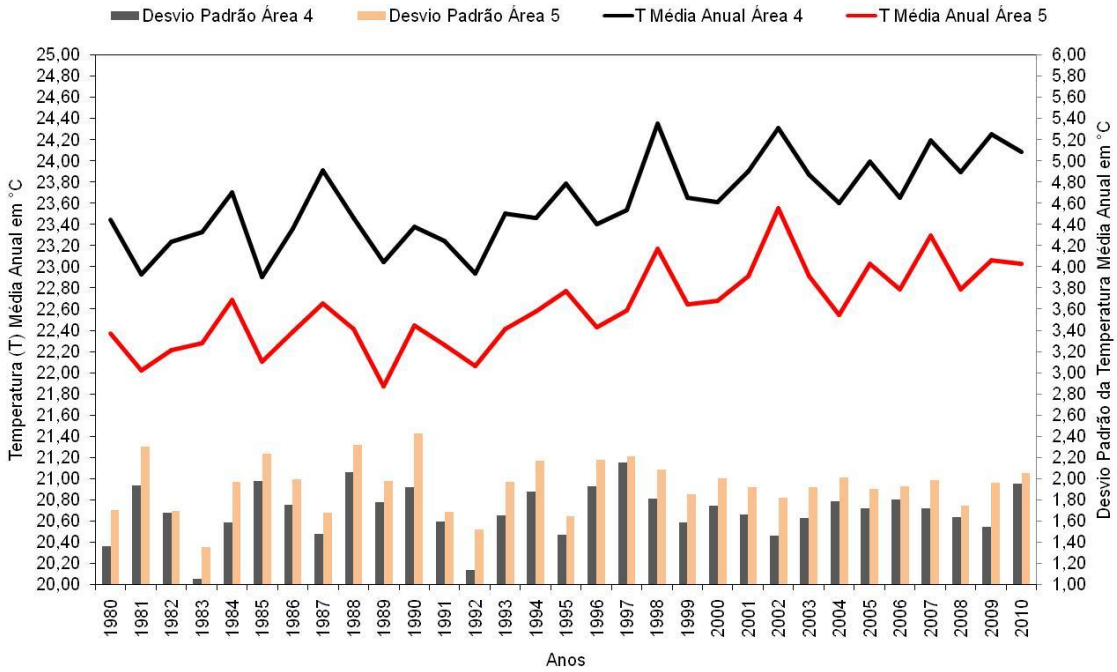
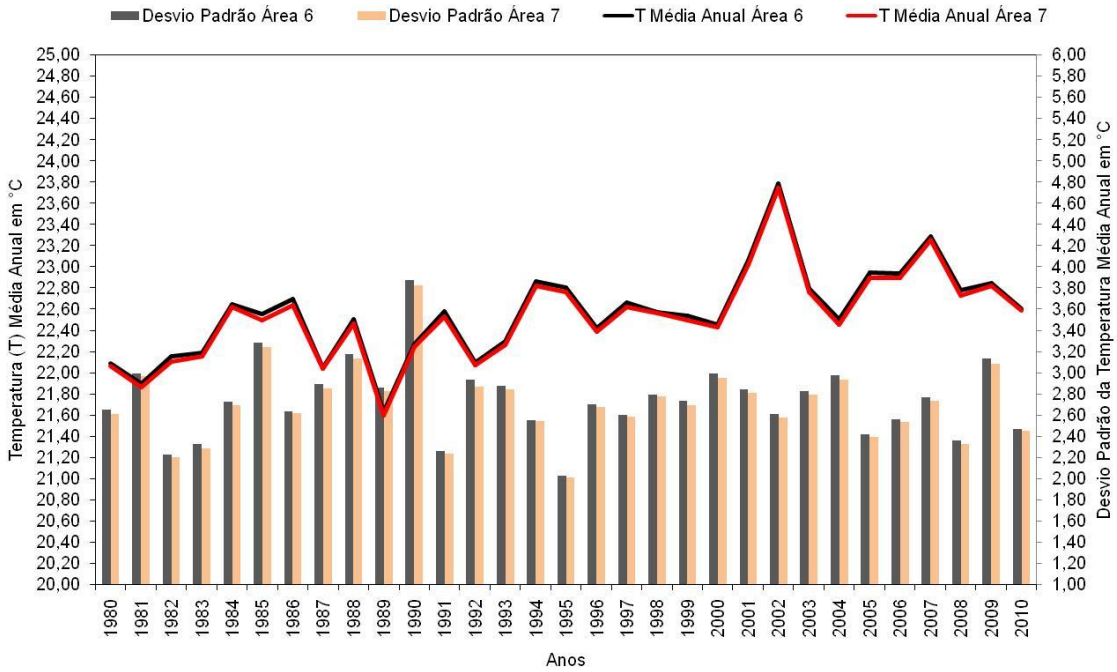


Figura 4.15 - Desvios padrões e temperaturas médias anuais para Áreas 6 e 7, para o período de 1980 - 2010.



Foram analisados os desvios padrões (DP) das precipitações anuais (PRP), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), déficit de água no solo (DEF) e excedente de água no solo (EXC), Figuras 4.16, 4.17, 4.18 4.19 4.20, 4.21 e 4.22, para as áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e período de 1980 à 2010, para as regiões de São Paulo, Minas Gerais e Paraná. As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 para as subáreas, 1, 2 e 3, da região de São Paulo, mostram que, os desvio-padrão da precipitação, foram de 35mm, 43mm e 38mm; da ETP os desvios foram de 10,3mm, 8,9mm e 9,1mm; da ETR foram de 12,0mm, 11,6mm e 10,9mm; da Deficiência foram de 4,7mm, 4,7mm e 3,9mm e o desvio do excedente foi de 21,7mm, 30,4mm e 25,8mm, mostrando maior variabilidade na área 2, com maiores desvio-padrão nos valores da PRP e no EXC, enquanto que a área 1, apresentou maior variabilidade nos valores dos desvios da ETP, da ETR e da deficiência, respectivamente. As Figuras 4.19 e 4.20, para as subáreas, 4 e 5 da região de Minas Gerais, mostram que, os desvio-padrão da precipitação, foram de 40,2mm e 42,8mm; da ETP os desvios foram de 8,0mm e 8,3mm; da ETR foram de 15,9mm e 12,9mm; da deficiência foram de 11,1mm e 6,9mm e desvio do excedente foi de

23,1mm e 30,2mm, mostrando maior variabilidade na área 5, com maiores valores de desvio-padrão na PRP, na ETP e no EXC, enquanto que, a área 4, apresentou maior variabilidade nos valores dos desvios da ETR e da DEF, respectivamente. As Figuras 4.21 e 4.22, para as subáreas, 6 e 7 da região do Paraná, mostram que, os desvio-padrão da precipitação, foram de 35,8mm e 36,5mm; da ETP os desvios foram de 11,3mm e 11,2mm; da ETR foram de 11,8mm e 12,1mm; da deficiência foram de 4,4mm e 4,7mm e o desvio do excedente foi de 24,6mm e 23,7mm, mostrando que, a área 7, apresenta maior variabilidade nos valores de desvio-padrão da PRP, da ETR e no DEF, enquanto que a área 6, apresentou maior variabilidade nos valores dos DP da ETP e do EXC, respectivamente.

Figura 4.16 – Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 1.

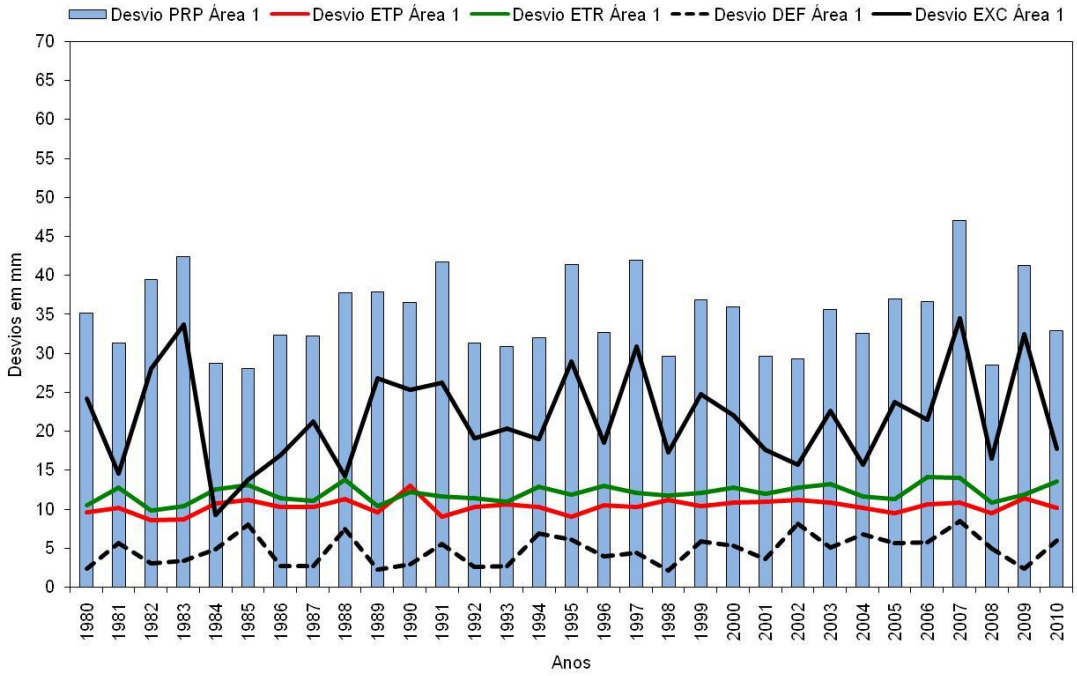


Figura 4.17 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 2.

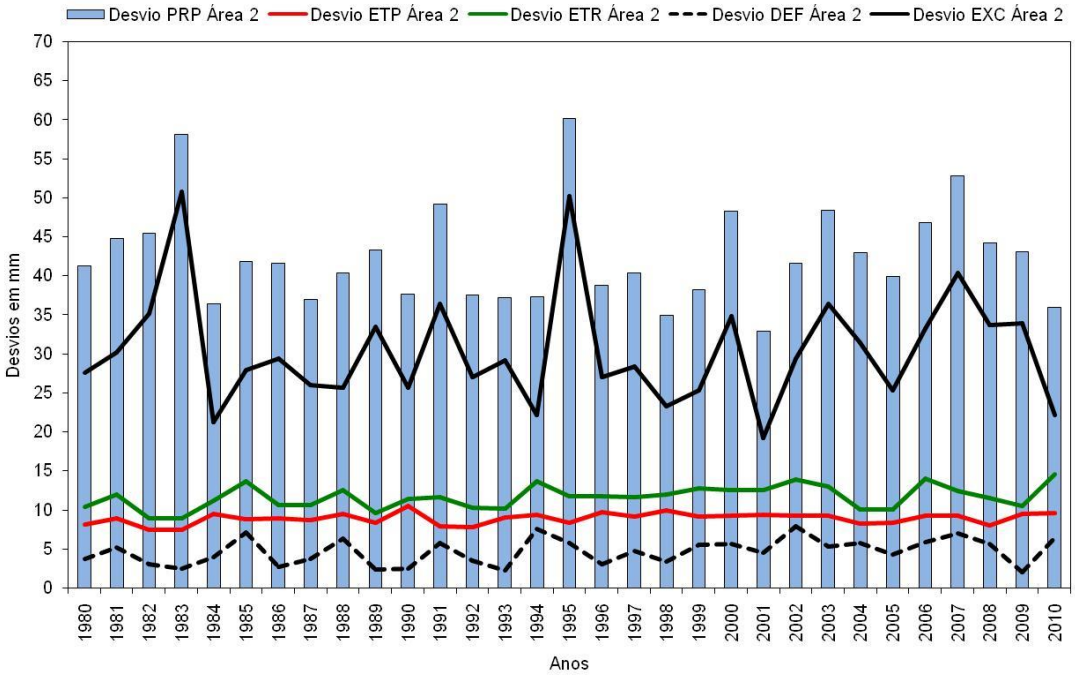


Figura 4.18 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 3.

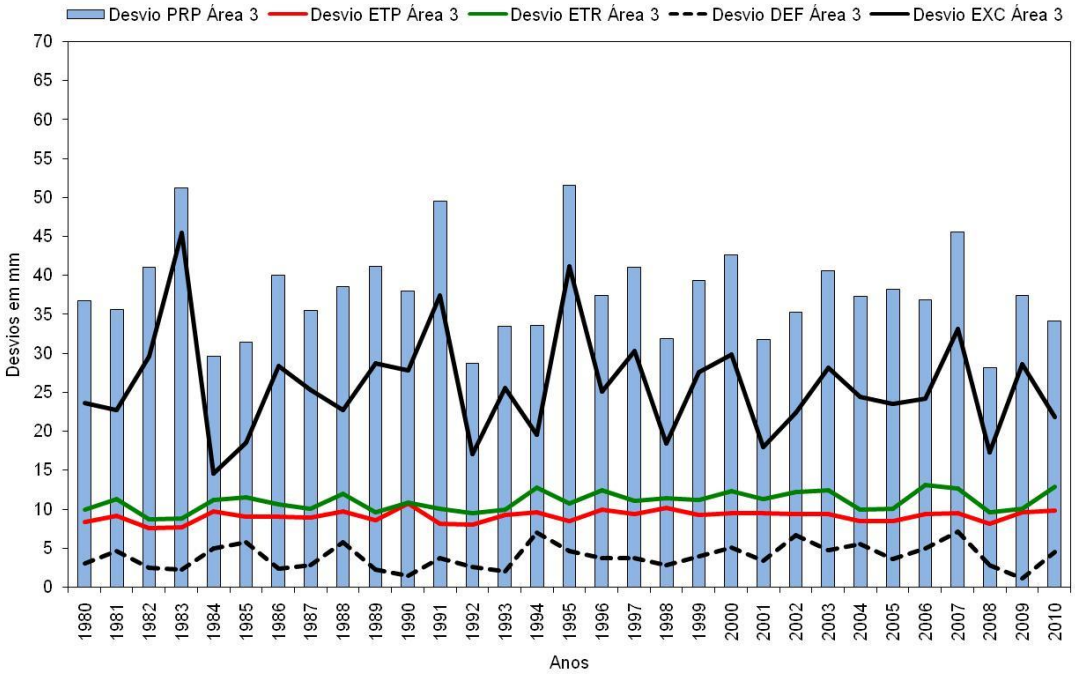


Figura 4.19 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 4.

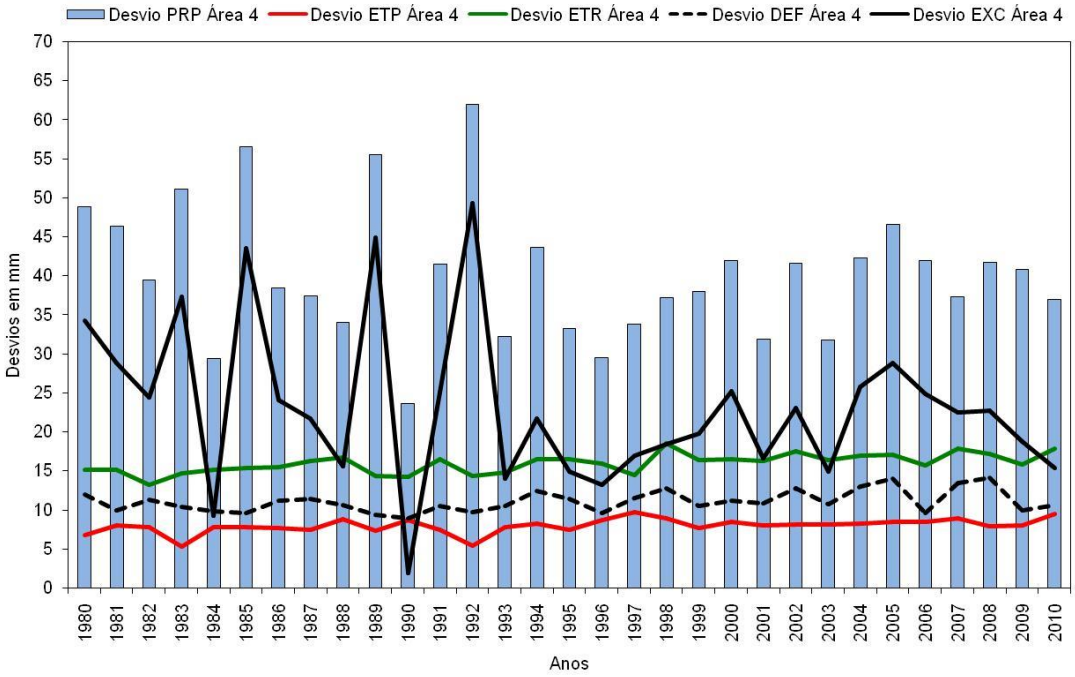


Figura 4.20 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 5.

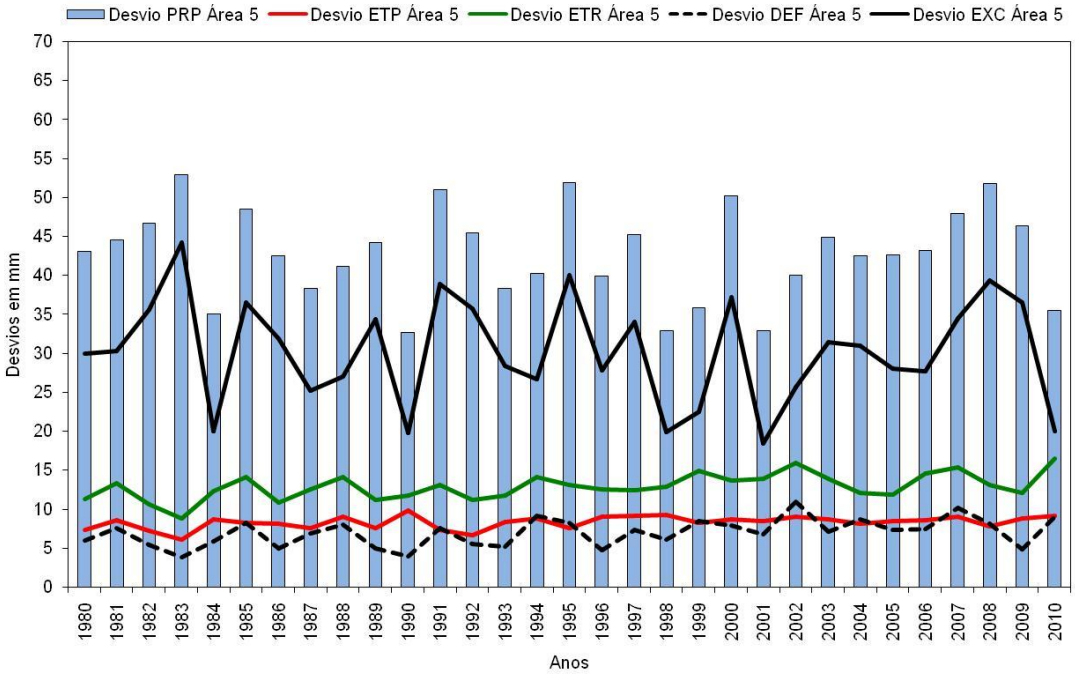


Figura 4.21 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 6.

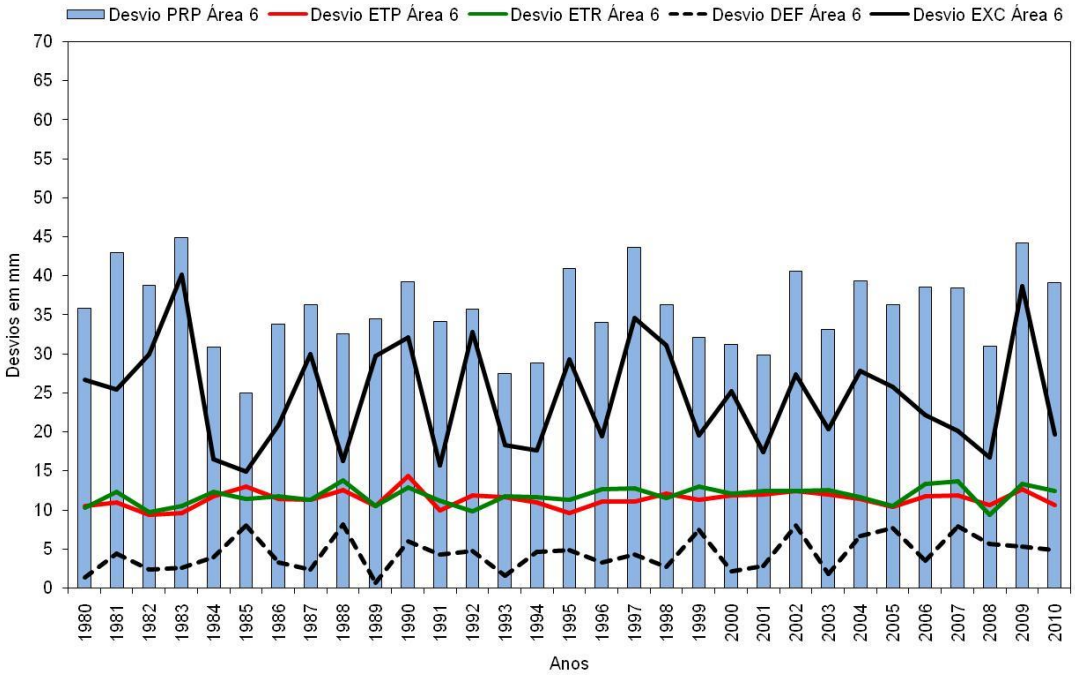
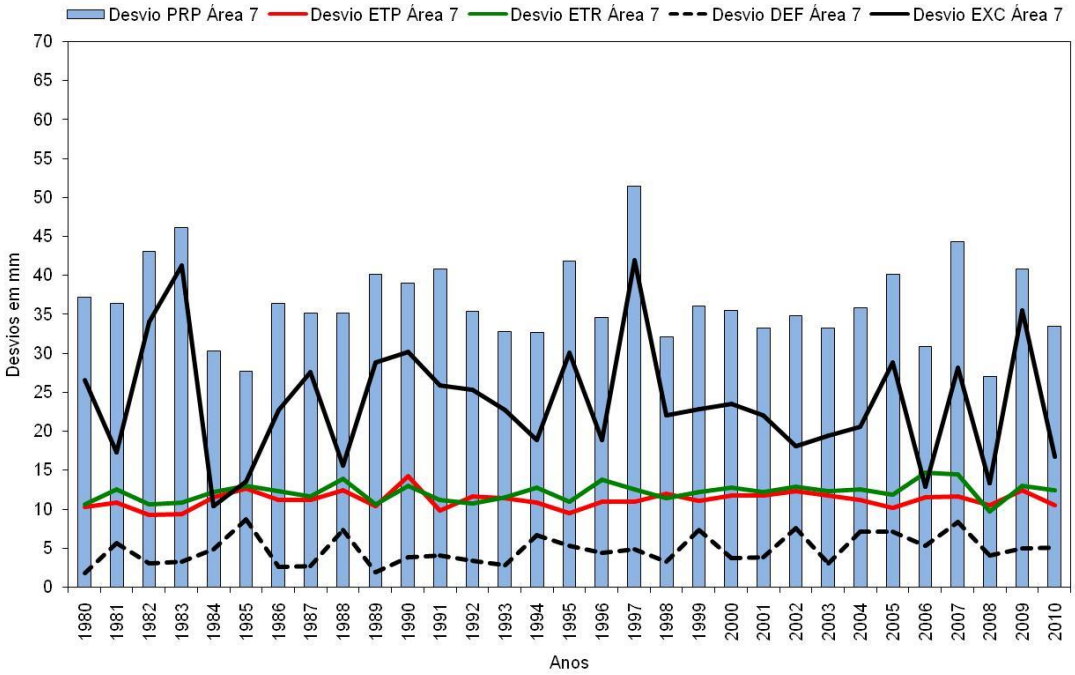


Figura 4.22 - Desvios padrões para valores acumulados anuais de precipitação (PRP), evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), déficit (DEF) e excedente (EXC) de água no solo, para o período de 1980 - 2010 para Área 7.



4.2 – Evapotranspiração Potencial e Real por fase de desenvolvimento da cultura.

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, mostram as relações ETR/ETP para as 3subáreas de São Paulo e para as 4 fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar. Os maiores valores de ETR/ETP ocorre nas fases 2 e 3, fases de perfilhamento e de crescimento dos colmos e menores valores nas fases 1 e 4, fases de plantio e de maturação e colheita da cultura. A área A1, apresenta relação média de 0,8 na fase 1 (ETP de 75,1mm e ETR de 56,5mm), 0,9 na fase 2 (ETP de 594,3mm e ETR de 564,0mm), 0,9 na fase 3 (ETP de 316,2mm e ETR de 287,5mm) e 0,7 na fase 4 (ETP de 114,6mm e ETR de 81,9mm) com menor valor mínimo de 0,3 na fase 1 (ETP de 56,5mm e ETR de 26,3mm) e em todas as outras fases com valor máximo de 1,0, porém, os máximos valores ocorrem na fase 2 com ETP de 659,0mm e ETR de 629,4mm, e todos os maiores valores médios de ETP e ETR e valores médios máximos e mínimos ocorrem na fase 2, seguida da fase 3 e 4 e os menores valores médios ocorrem na fase 1.

A área A2 apresenta média de 1,0 e 0,9 na relação ETR/ETP, nas fases 2 e 3, e nas fases 1 e 4, média de 0,7 e 0,6, respectivamente, com menor valor mínimo na fase 1 com 0,2 e valor máximo de 1,0 em todas as outras fases de desenvolvimento. Os valores médios e os maiores valores máximos e mínimos, acontecem na fase 2 com ETP de 601,6 mm e ETR de 584,9 mm e valores mínimos na fase 1 com ETP de 69,2 mm e ETR de 53,1 mm.

A área A3 apresenta valor médio de 1,0 nas fases 2 e 3 e de 0,8 na fase 1 e 0,7 na fase 4, com menor valor mínimo de 0,3 na fase 1 e de 1,0 valor máximo, em todas as fases. Os maiores valores médios de ETP e ETR acontecem na fase 2 com ETP de 541,2mm e ETR de 522,3mm, com valores máximos de ETP e ETR de 601,6mm e 584, mm e valores mínimos na fase 1 com ETP e ETR de 55,6mm e 22,2mm, respectivamente.

Observa-se ainda nas figuras, pequena variabilidade nos valores da relação entre ETR/ETP até 1999, com valores muito próximos nas fases 2

e 3, e aumento à partir do ano 2000, isso pode ser justificado, pela diminuição da precipitação e aumento na deficiência de água no solo, bem como, os maiores valores da relação ETR/ETP, encontram-se na área A1, seguida das áreas A3 e A2.

Figura 4.23 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 1 (1981-2010).

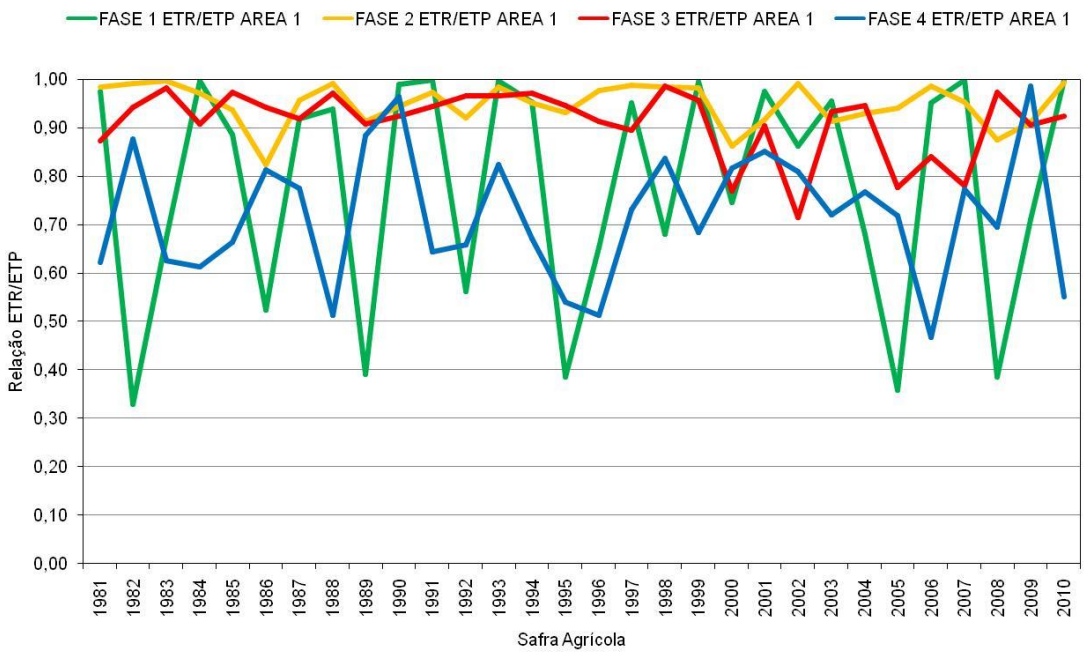


Figura 4.24 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 2 (1981-2010).

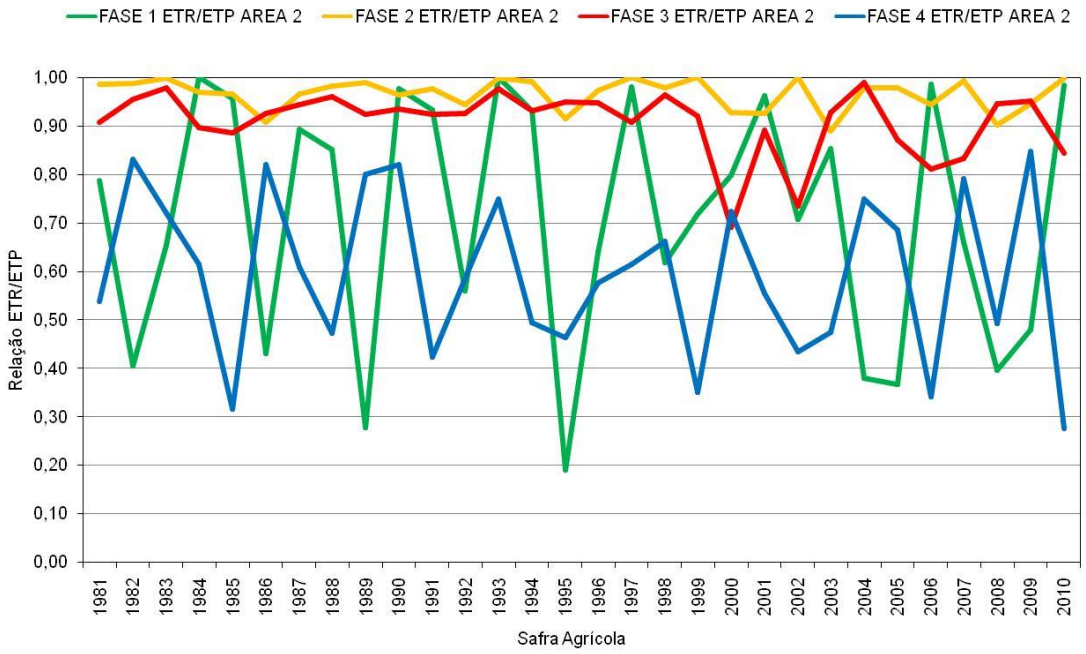
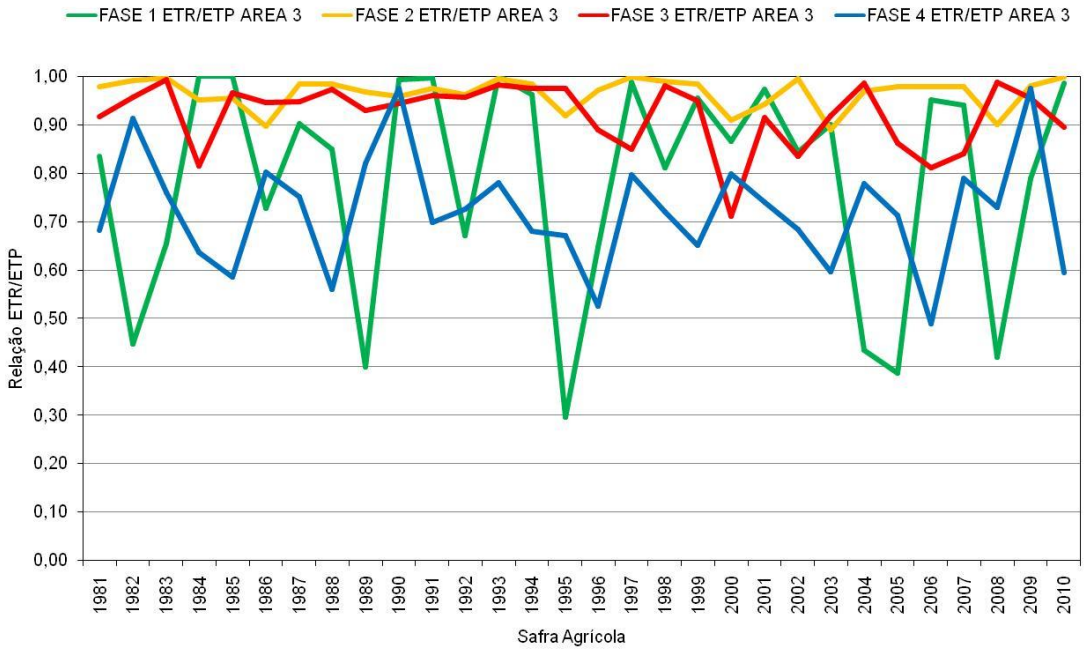


Figura 4.25 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 3 (1981-2010).



As figuras 4.26 e 4.27, mostram a relação ETR/ETP, para as 4 fases de cultivo, paras as 2 subáreas(A4 e A5), do Estado de Minas Gerais.Observa-se que a área A4 apresenta valor médio de 1,0 e 0,9 nas fases 2 e 3 e de 0,7 na fase 1 e 0,6 na fase 4, com menor valor mínimo de 0,2 na fase 1 e de 1,0 valor máximo, nas fases 1, 2 e 3 e de 0,8 na fase 4.Os maiores valores médios de ETP e ETR acontecem na fase 2 com valor médio de ETP de 603,3mm e ETR de 509,7mm, com valores máximos de ETP e ETR de 676,3mm e 594,6mm e valores mínimos na fase 1 com ETP e ETR de 79,8mm e 1,2mm, respectivamente. A área A5 apresenta valor médio de 0,9 nas fases 2 e 3 e de 0,6 na fase 1 e 0,4 na fase 4, com menor valor mínimo de 0,1 na fase 1 e de 1,0 valor máximo, nas fases 1, 2 e 3 e de 0,8 na fase 4.Os maiores valores médios de ETP e ETR acontecem na fase 2com valor médio de ETP de 572,2mm e ETR de 541,6mm, com valores máximos de ETP e ETR de 639,0mm e 614,2mm e valores mínimos na fase 1 com ETP e ETR de 69,2mm e 11,9mm, respectivamente. A área A4 apresentou grande variabilidade em todas as fases, justificado pelas menores precipitações apresentadas, o que dificulta o desenvolvimento da cultura, enquanto que, a área A5

apresentou valores próximos nas fases 2 e 3 até 1999 e aumento à partir de 2000, mesmo comportamento das subáreas do Estado de São Paulo.

Figura 4.26 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 4 (1981-2010).

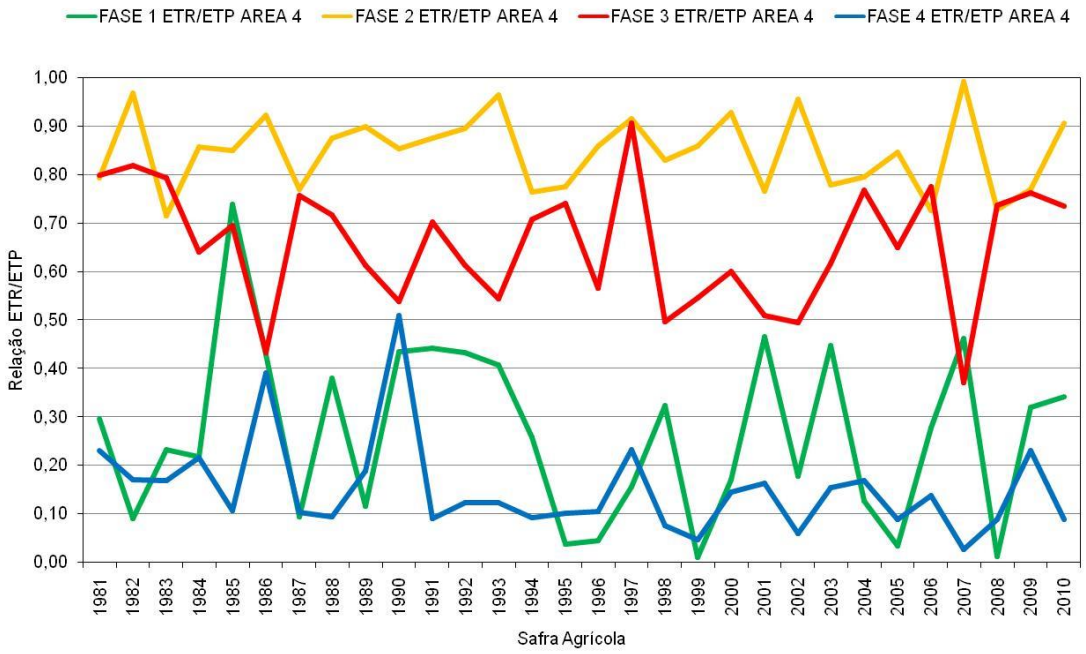
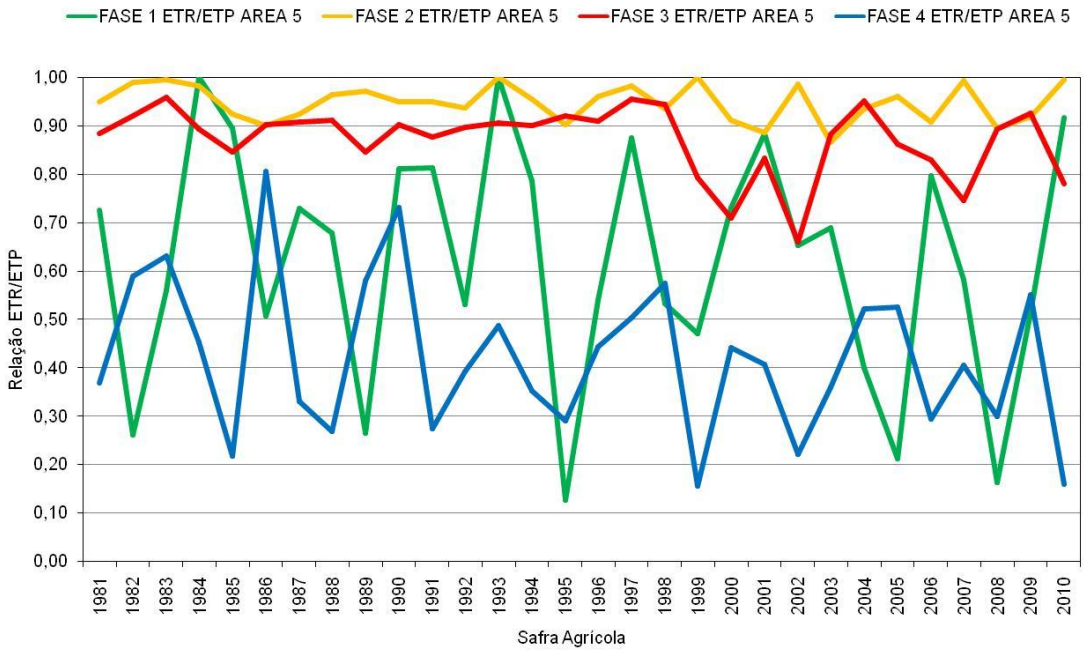


Figura 4.27 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 5 (1981-2010).



As Figuras 4.28 e 4.29, mostram a relação ETR/ETP, para as 4 fases de cultivo, paras as 2 subáreas(A6 e A7), no Estado do Paraná. Observa-se que a área A6 apresenta valor médio de 0,9 para todas as fases e valor mínimo de 0,5 para a fase 1 e de 1,0 valor máximo, em todas as fases. Os maiores valores médios de ETP e ETR acontecem na fase 2com valor médio de ETP de 627,6mm e ETR de 591,8mm, com valores máximos de ETP e ETR de 694,4mm e 671,8mm e valores mínimos na fase 1 com ETP e ETR de 56,0mm e 42,6mm, respectivamente. A área A7 apresenta valor médio de 0,8 para as fases 1 e 4 e de 0,9 nas fases 2 e 3 com valor mínimo de 0,4 para a fase 1 e de 1,0 valor máximo, em todas as fases de desenvolvimento da cultura. Os maiores valores médios de ETP e ETR acontecem na fase 2com valor médio de ETP de 623,3mm e ETR de 588,8mm, com valores máximos de ETP e ETR de 690,6mm e 661,1mm e valores mínimos na fase 1 com ETP e ETR de 56,3mm e 33,9mm, respectivamente. As áreas A6 e A7 apresentaram as menores variabilidades e comportamento semelhante ao Estado de São Paulo.

Observa-se que é nas fases 2 e 3 que ocorrem os maiores valores da relação ETR/ETP, fases de perfilhamento e de crescimento dos colmos e os menores valores nas fases 1 e 4, fases de plantio e de maturação e colheita da cultura, ou seja, maior aproveitamento de água no solo pelas plantas, para o seu desenvolvimento e crescimento da cultura e observa-se também que todas as áreas apresentaram comportamento semelhante, com exceção da subárea A4, que apresentou grande variabilidade nos resultados, devido ser a área com menor índice pluviométrico, maiores valores de evapotranspiração real e maior déficit de água no solo, quando comparada com as outras áreas em estudo.

Figura 4.28 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 6 (1981-2010).

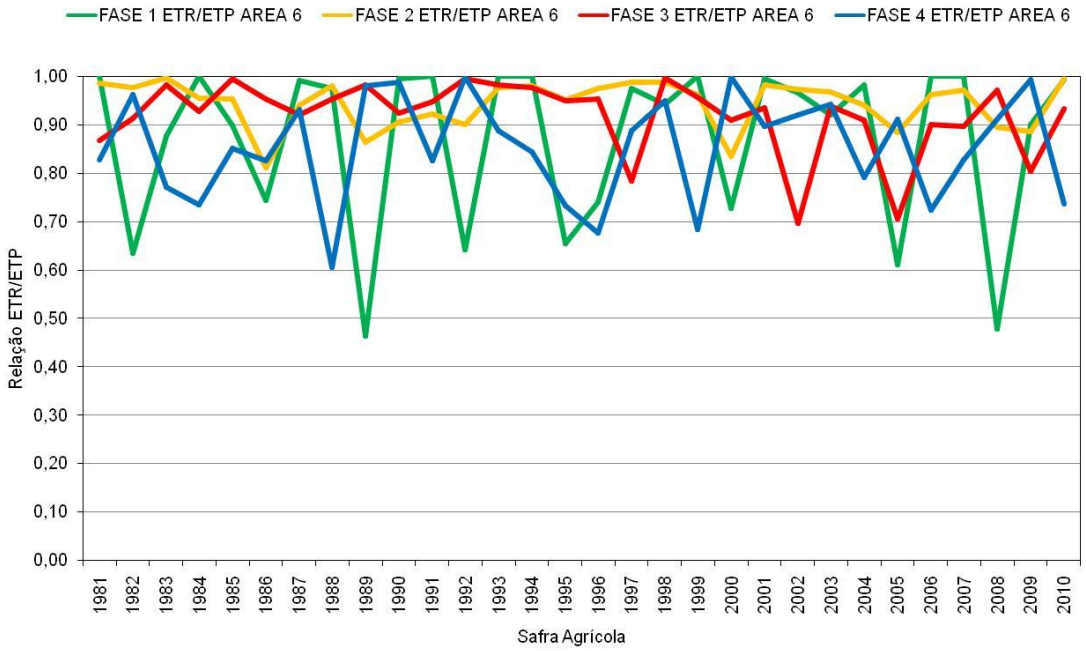
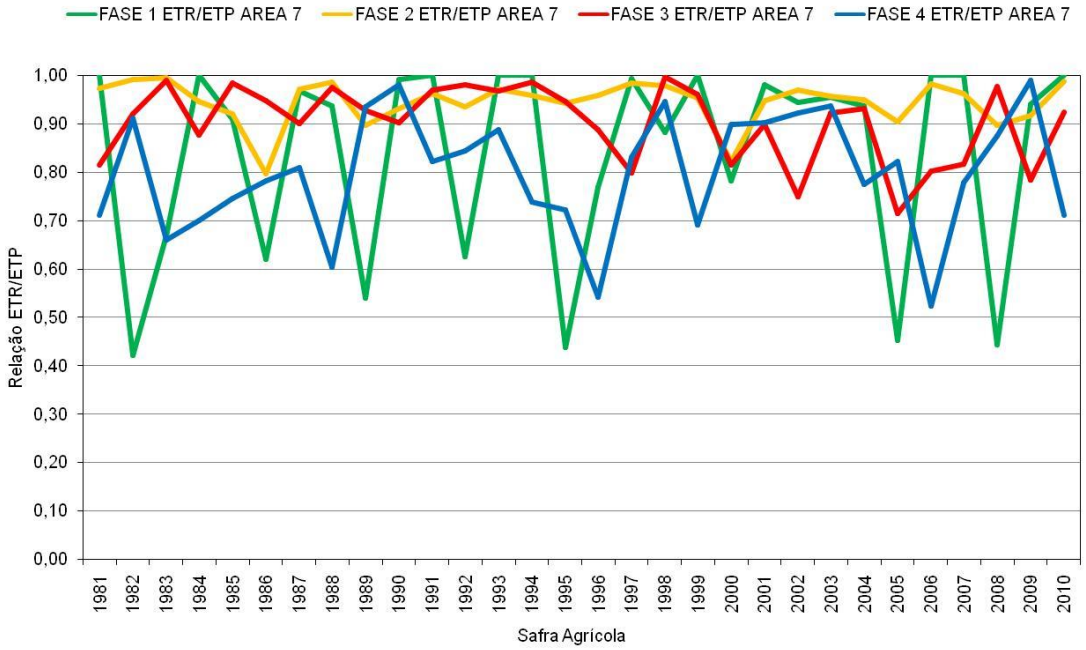


Figura 4.29 – Relação ETR/ETP para as 4 fases de cultivo, para a Área 7 (1981-2010).



4.3 – Aplicação do Modelo Agrometeorológico.

4.3.1 – Produtividade Potencial

As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram a Produtividade potencial (YPotencial em kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 1, Área 2 e Área 3 para o Estado de São Paulo, e observamos que, a produtividade potencial para 243 dias de cultivo apresenta média de 125617Kg/ha; 124431Kg/ha e 119222Kg/ha, respectivamente, e para 212 dias de cultivo para as 3 subáreas, as médias foram de 109591Kg/ha; 108557Kg/ha e de 104013Kg/ha, respectivamente, mostrando que, a área 1 apresenta maior produtividade e a área 3, menor produtividade.

Figura 4.30 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 1 (1981-2010).

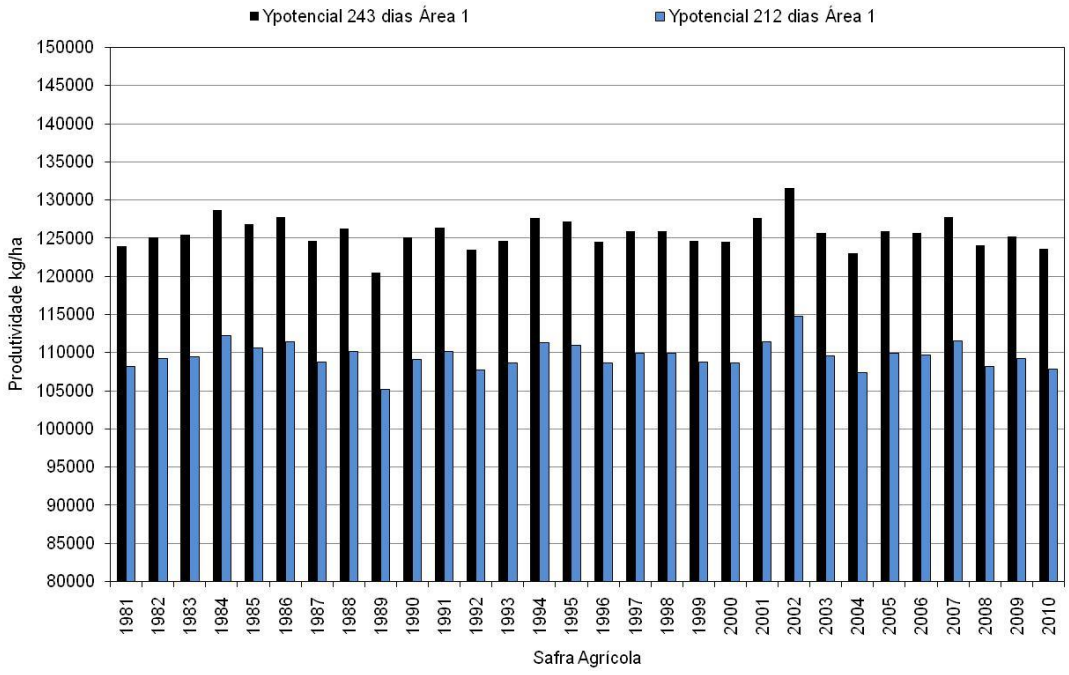


Figura 4.31 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 2 (1981-2010).

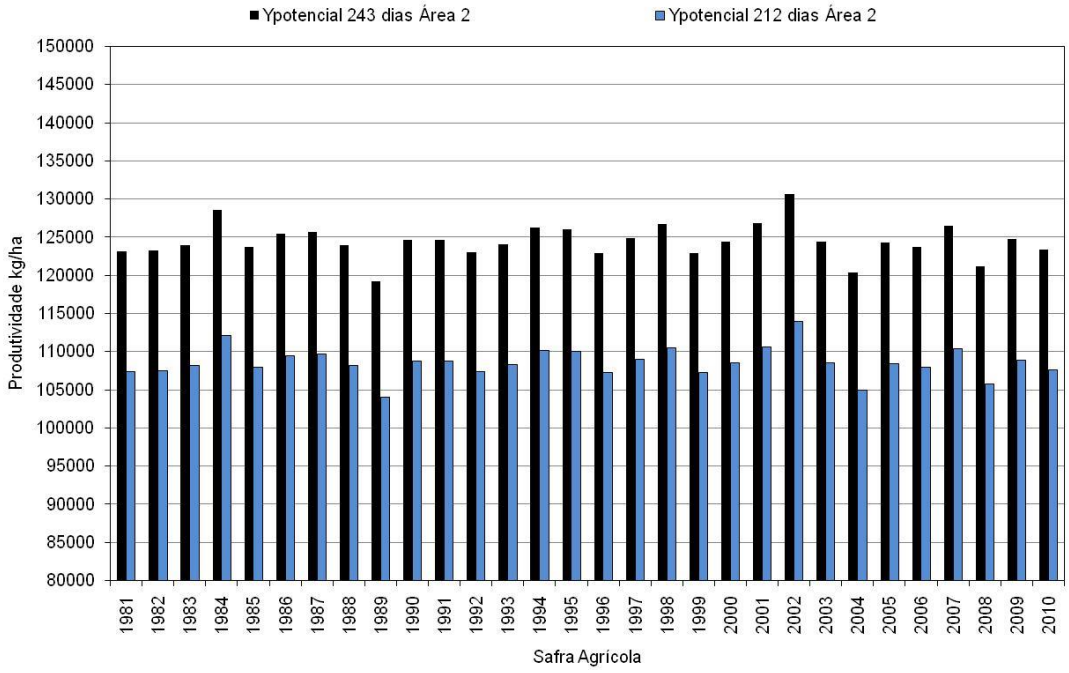
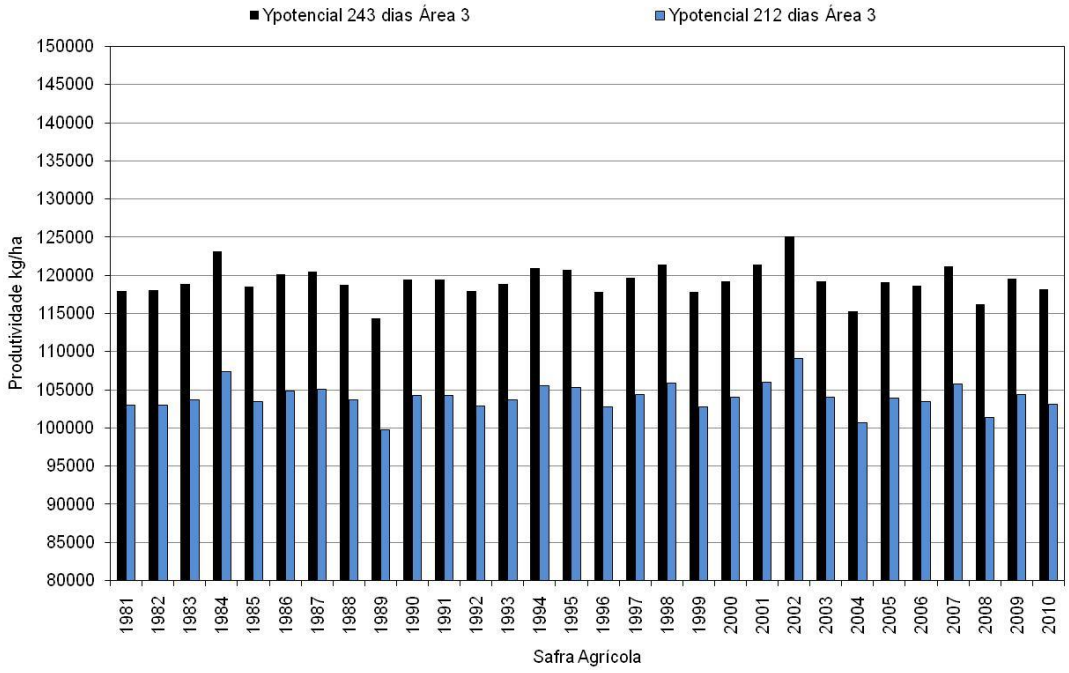


Figura 4.32 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 3 (1981-2010).



As Figuras 4.33 e 4.34mostram as Produtividades potenciais, em Kg/ha, calculados para 243 e 212 dias de cultivo, no Estado de Minas Gerais nas Áreas 4 e 5, para o período de 1981 a 2010, e observa-se que, a área 4 apresenta produtividade média para 243 e 212 dias de cultivo, de

141758Kg/ha e 123673Kg/ha e para a área 5, produtividade média de 123673 e 120785 Kg/ha, logo, a área 4 apresenta maiores produtividades potenciais.

Figura 4.33 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 4 (1981-2010).

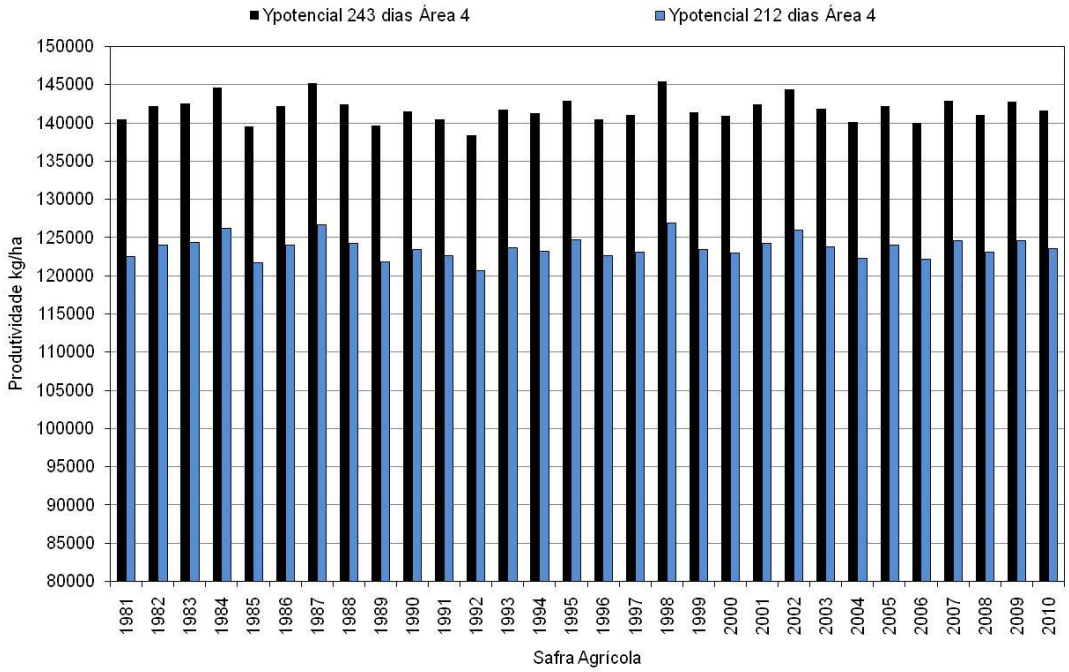
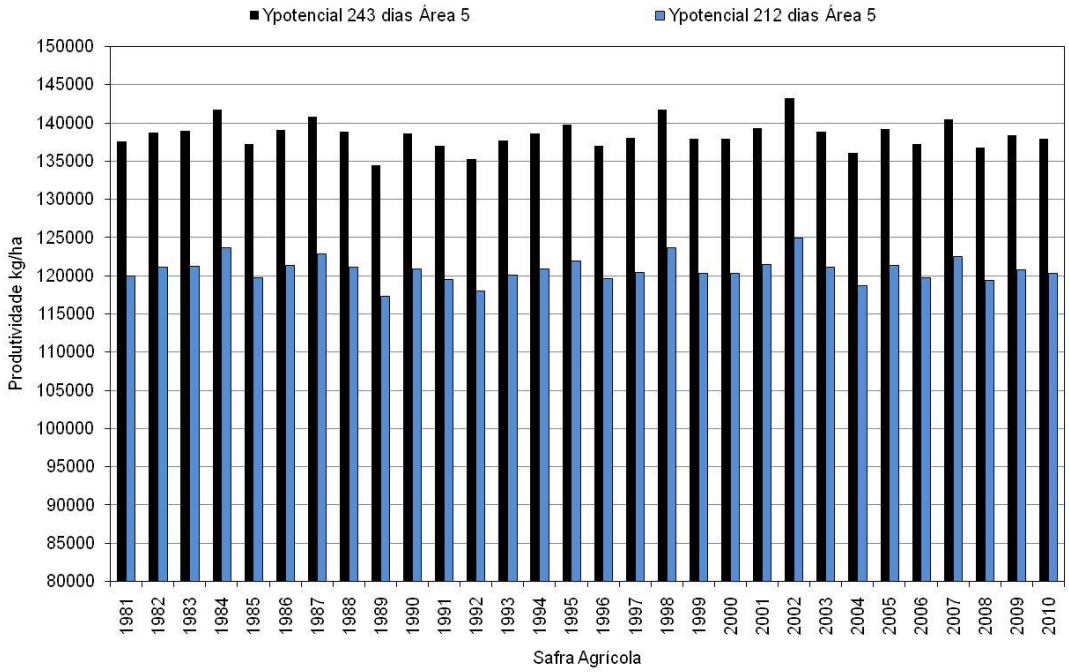


Figura 4.34 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 5 (1981-2010).



As Figuras 4.35 e 4.36, mostram a Produtividade potencial, em Kg/ha, calculados para 243 e 212 dias de cultivo no Estado do Paraná, nas áreas6 e 7, para o período de 1981 a 2010. Observa-se que a área 6 apresenta produtividade média para 243 e 212 dias de cultivo, de 129687Kg/ha e 113142Kg/ha e para a área 7, a produtividade média foi de 129439Kg/ha e 112926Kg/ha, logo, as áreas 6 e 7 apresentam pequenas diferenças.

A maior produtividade potencial média, para 243 e 212 dias de cultivo, ocorreu na região de Minas Gerais, com 140103Kg/ha e 122229Kg/ha, seguida da região do Paraná, com 129563Kg/ha e 113034,65Kg/ha e a região de São Paulo que, apresentou menor média de produtividade, com 123090Kg/ha e 107387Kg/ha, respectivamente.

Figura 4.35 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 6 (1981-2010).

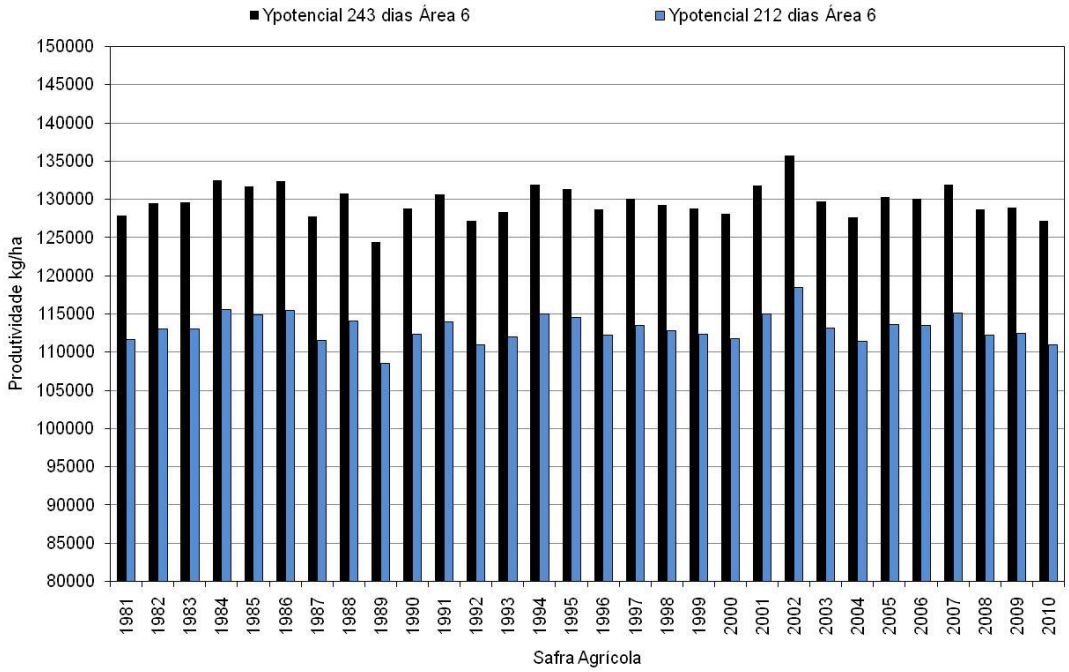
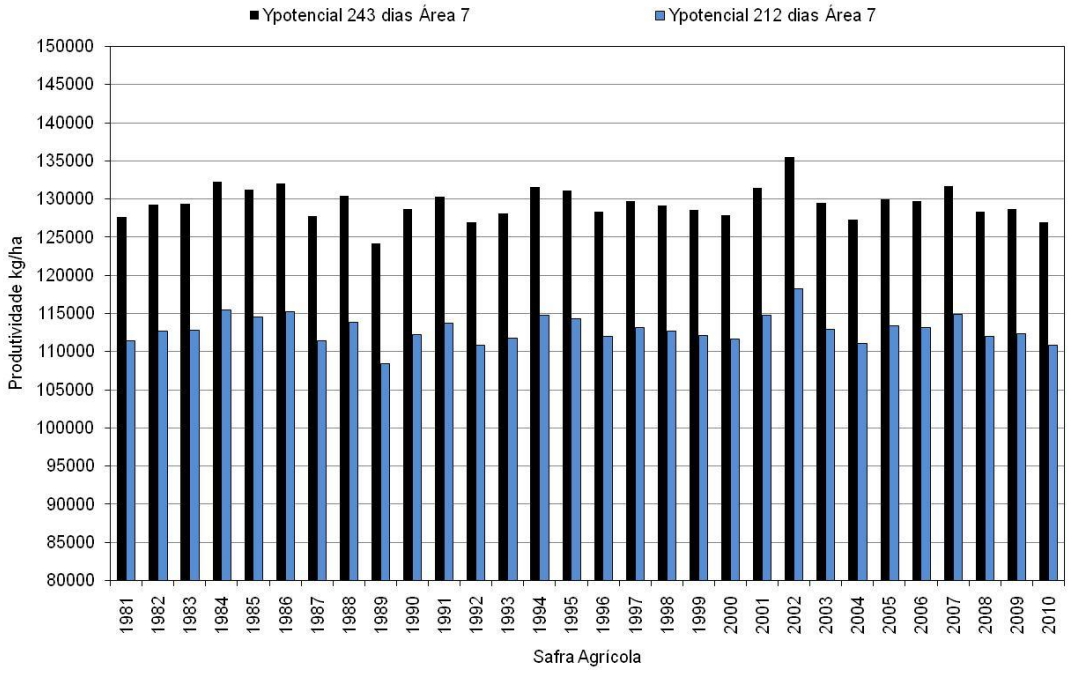


Figura 4.36 – Produtividade potencial (em Kg/ha) calculados para 243 e 212 dias de cultivo, para Área 7 (1981-2010).



4.3.2 – Rendimento por fases de cultivo.

As Tabelas A.1, A.2 E A.3 (Apêndice A), apresentam os rendimentos percentuais para cada fase de cultivo, a primeira fase, de plantio e brotação; a segunda fase, de perfilhamento; a terceira fase, de crescimento dos colmos e a quarta fase, de maturação e colheita, em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas 1, 2 e 3, para o período de 1981 a 2010, para o Estado de São Paulo, onde a média anual para o rendimento por fase utilizando Ky1, foi de 99%; 97% e 99% (fase 1);de 91%para as 3 subáreas (fase 2); 62%; 60% e 62% (fase 3); e de 95%; 93% e 95% (fase 4); a média anual para o rendimento por fase utilizando Ky2, para as áreas 1, 2 e 3, foi de 99% para as áreas 1 e 3 e 98% para a área 2 (fase 1); de 96 para as 3 áreas (fase 2); 68 para as 3 áreas (fase 3 e 95% para as áreas 1 e 3 e de 93%, área 2 (fase 4). Através da aplicação do fator de penalização da cultura, é possível estabelecer quantitativamente o rendimento em cada fase e no total de cada safra, mostrando que, foi na fase 3 que, apresentou menores valores de rendimento através de Ky1 e Ky2, para todas as subáreas.

As TabelasA.4 E A.5 (Apêndice A), apresentam os rendimentos percentuais para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas4 e 5, para o período de 1981 a 2010, para o Estado de Minas Gerais , onde a média anual para o rendimento por fase com Ky1, foi de 66% e 93% (fase 1);de 73% e 91% (fase 2); de 33% e 54% (fase 3) e de 84% e 89% (fase 4); a média anual para o rendimento por fase com Ky2, para as áreas 4 e 5, foi de 77% e 95% (fase 1); de 86% e 96% (fase 2); 42 e 62 (fase 3) e de 84% e 89% (fase 4). O menor rendimento em cada fase e no total de cada safra, ocorreu na fase 3, que representa a fase de crescimento dos colmos, tanto para os valores de Ky1, quanto para Ky2, para todas as subáreas.

As Tabelas A.6 e A.7 (Apêndice I), apresentam os rendimentos percentuais para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas6 e 7, para o período de 1981 a 2010, para o Estado do Paraná, onde a média anual para o rendimento por fase Ky1, foi de 100% para ambas as áreas (fase 1);de 87% e 89% (fase 2); de 64% e 62% (fase 3) e de 97% e 96% (fase 4); a média anual para o rendimento por fase Ky2, para as áreas 6 e 7, foi de 100% para ambas as áreas (fase 1); de 94% e 95% (fase 2); 70% e 68% (fase 3) e de 97% e 96% (fase 4). O menor rendimento em cada fase e no total de cada safra, ocorreu na fase 3, que representa a fase de crescimento dos colmos, tanto para os valores de Ky1, quanto para Ky2, para as subáreas 6 e 7, na região do Paraná.

A Tabela 4.1, apresenta os rendimento percentuais para as safras agrícolas de 1981 a 2010, para cada fase de cultivo, considerando dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas 1, 2 e 3, para o Estado de São Paulo, para as subáreas4 e 5, no Estado de Minas Gerais, e para subáreas 6 e 7, para o Estado do Paraná. Os valores de rendimento médio e para cada fase de cultivo com Ky1, para as áreas 1, 2 e 3, foi de 98%;para as áreas 4 e 5 foi de 80% e para as áreas 6 e 7 foi igual a 100% (fase 1); de 91%; 82% e 88% (fase 2); 61%;

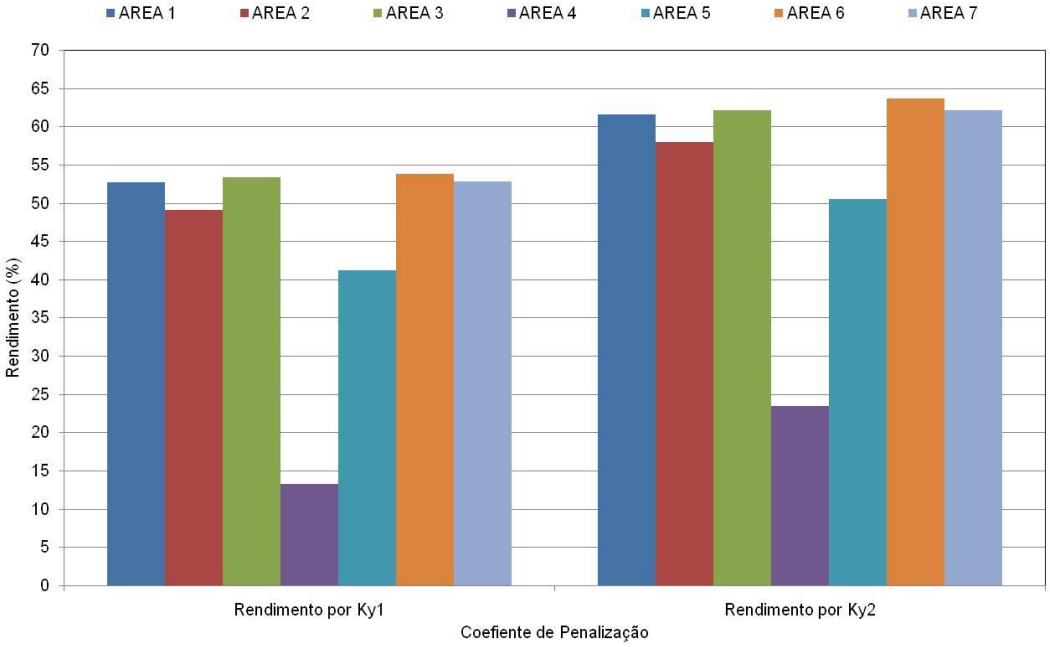
44% e 63% (fase 3) e 94%; 87% e 97% (fase 4), respectivamente. Para Ky2, e para as áreas 1, 2 e 3 , os valores de rendimento médio foi de 99%; para as áreas 4 e 5, foi de 86% e para as áreas 6 e 7 foi 100% (fase 1); 96%, 91% e 95% (fase 2); 68%, 52% e 69% (fase 3) e de 94%, 87% e 97%, respectivamente. Através da aplicação do fator de penalização da cultura, é possível estabelecer quantitativamente o rendimento em cada fase e no total de cada safra, mostrando que, a fase 3 é a que apresenta menores valores de rendimento com Ky1 e Ky2, para todas as 7 subáreas estudadas.

Tabela 4.1 - Valores de rendimento médio (em %), para o período de safras agrícola de 1981 - 2010, para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as áreas de estudo.

	KY1				KY2			
	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
AREA 1	99	91	62	95	99	96	68	95
AREA 2	97	91	60	93	98	96	67	93
AREA 3	99	91	62	95	99	96	69	95
AREA 4	66	73	33	84	77	86	42	84
AREA 5	93	91	54	89	95	96	62	89
AREA 6	100	87	64	97	100	94	70	97
AREA 7	100	89	62	96	100	95	68	96

A Figura 4.37 apresenta o rendimento total para cada área de estudo em cada coeficiente de penalização (Ky) utilizado. Pode-se observar que as maiores penalizações ocorrem na área 4 (Minas Gerais) com 87% e 77% de penalização para Ky1 e Ky2 respectivamente, que se deve ao fato de menor precipitação e menor disponibilidade hídrica na região resultou em maior consumo de água disponível e menos recurso hídrico aproveitado pela cultura, enquanto que as menores perdas foram para o estado do Paraná e São Paulo, em torno de 36% a 38%, mostrando que a cultura está adequada ao clima nessas regiões.

Figura 4.37 – Rendimento total por área de estudo para diferentes coeficientes de penalização.



4.3.3 – Rendimento por safra agrícola.

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40, apresentam os rendimento da produtividade (em %), obtidos através de saídas do modelo por dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas 1, 2 e 3, Estado de São Paulo, para o período de 1981 a 2010, e os rendimentos de produtividade para Ky1 e Ky2, para as áreas 1, 2 e 3, foram de 53% e 62%para as subáreas1 e 3 e de 49% e 58% para a subárea 2, respectivamente, mostrando que as subáreas 1 e 3 apresentaram os mesmos valores e foram mais elevados que os valores da subárea 2.

Figura 4.38 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 1.

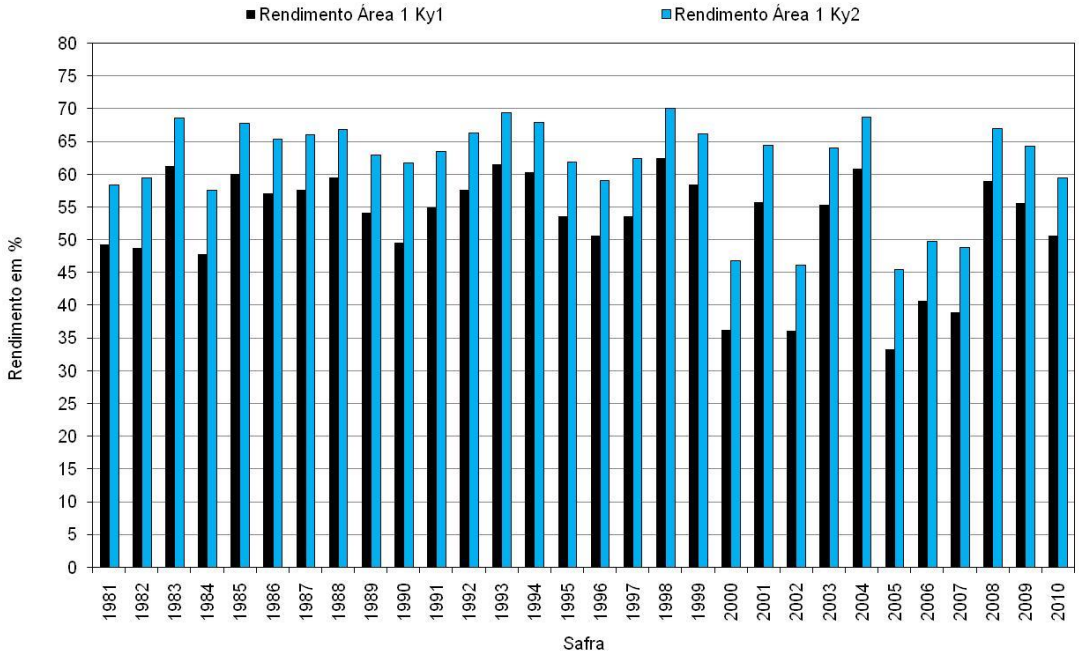


Figura 4.39 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 2.

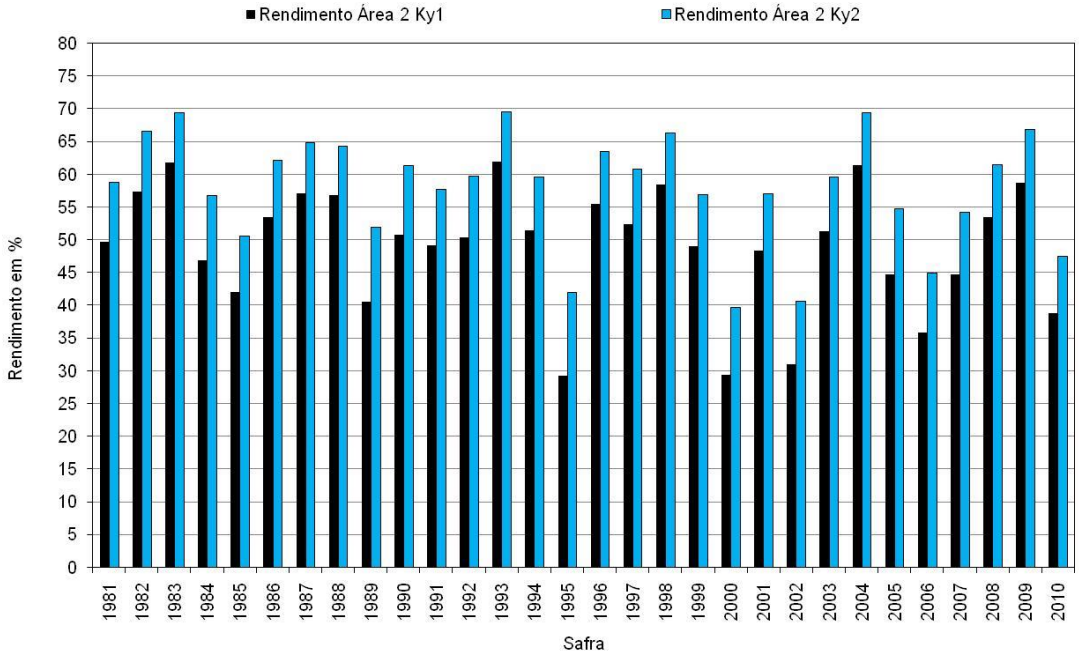
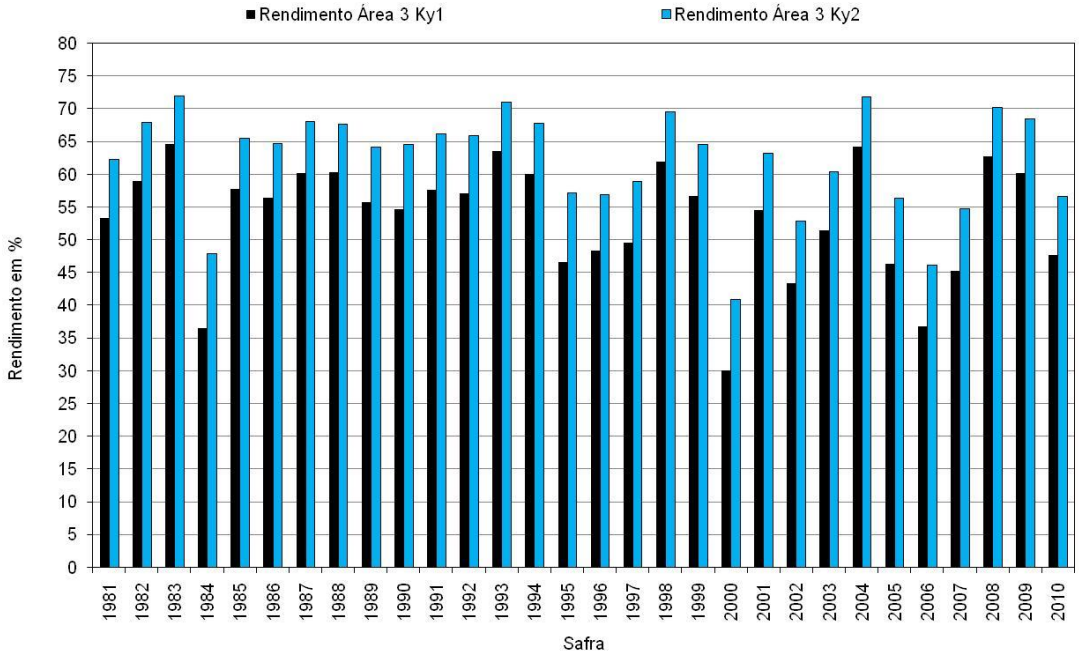


Figura 4.40 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 3.



As Figuras 4.41 e 4.42, apresentam os rendimento da produtividade (em %), obtidos através de saídas do modelo por dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas4 e 5, Estado de Minas Gerais, para o período de 1981 a 2010. Os rendimentos de produtividade para Ky1 e Ky2, para as áreas 4 e 5, foram de 12% e 23% para a subárea 4 e de 41% e 51% para a subárea 5, respectivamente, mostrando que a subárea 4 apresenta os menores valores de rendimento.

Figura 4.41 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 4.

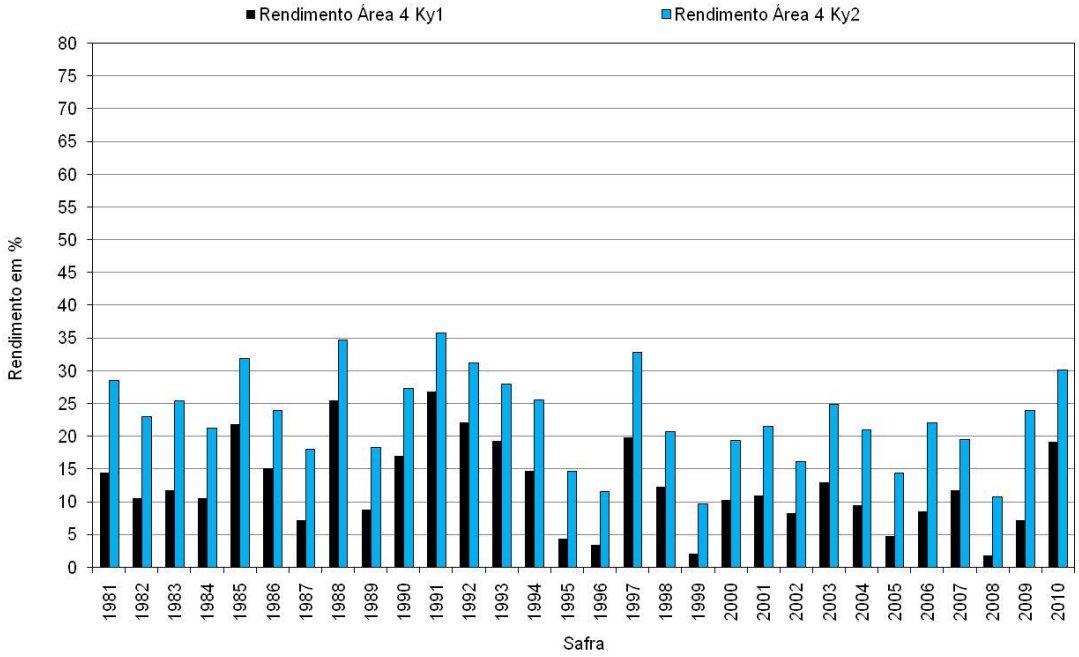
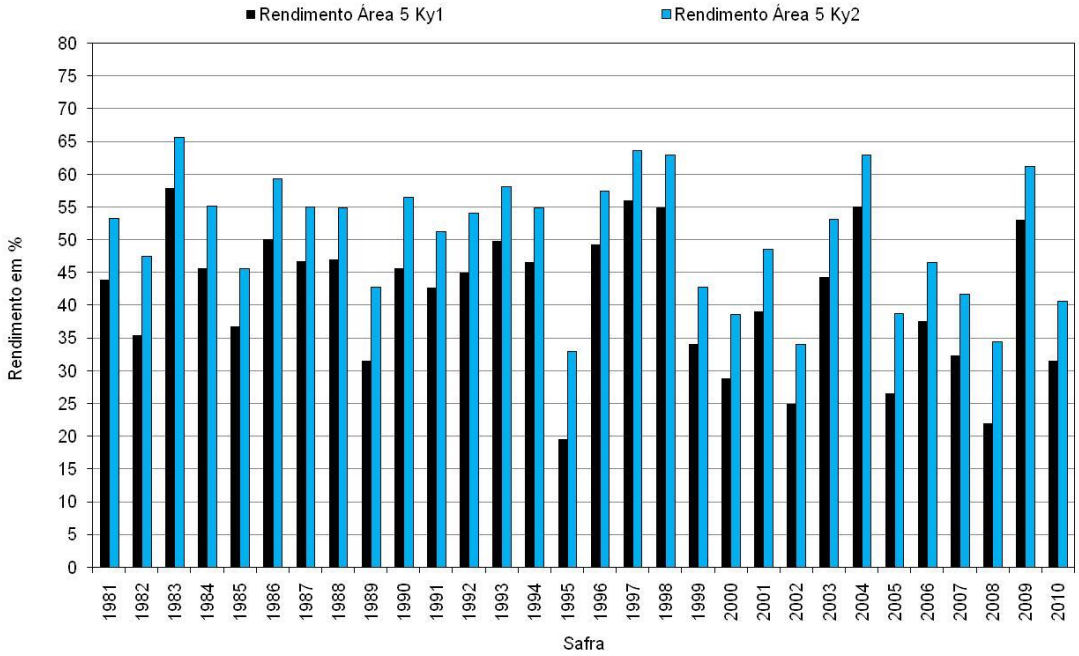


Figura 4.42 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 5.



As Figuras 4.43 e 4.44, apresentam os rendimento da produtividade (em %), obtidos através de saídas do modelo por dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas6 e 7, Estado do Paraná,

para o período de 1981 a 2010. Os rendimentos de produtividade para Ky1 e Ky2, para as áreas 6 e 7, foram de 54% e 64% para a subárea 6 e de 53% e 62% para a subárea 7, respectivamente, mostrando que as subáreas, apresentam valores de rendimento muito próximos.

Figura 4.43 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 6.

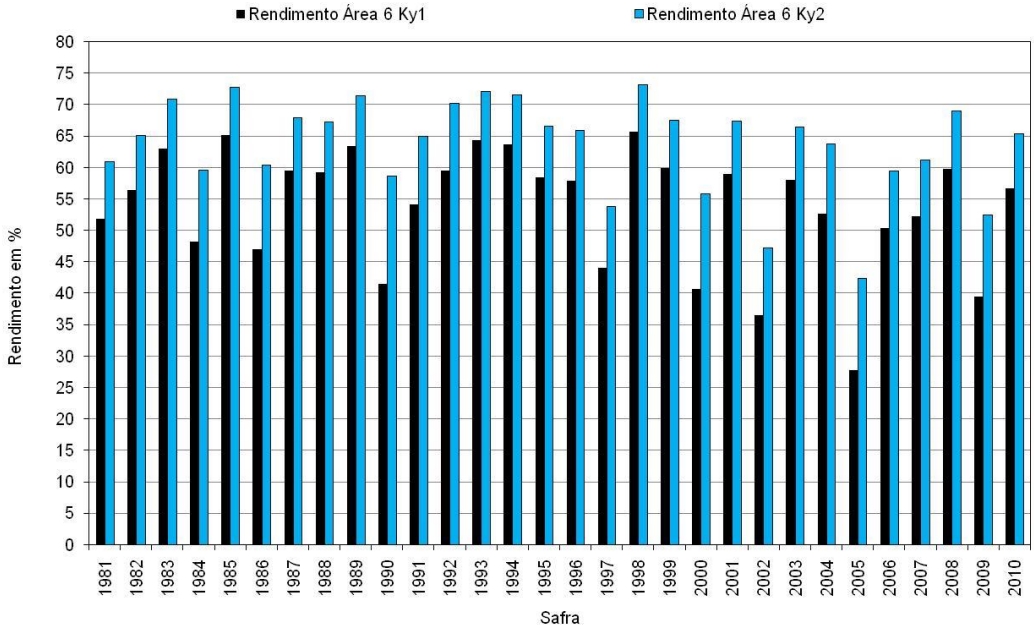
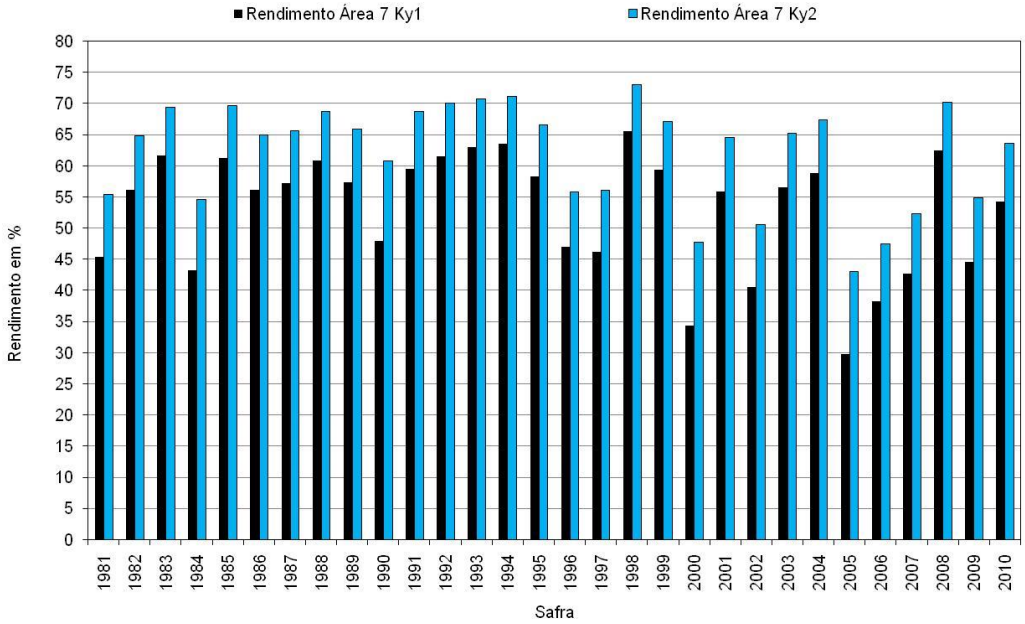


Figura 4.44 – Rendimentos percentuais obtidos a partir das saídas do modelo para dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) para Área 7.



4.3.4 – Produtividade Estimada pelo modelo.

As Figuras 4.45, 4.46 e 4.47, apresentam a produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para as subáreas 1, 2 e 3, Estado de São Paulo, para o período de 1981 a 2010. A produtividade estimada pelo modelo para Ky1 e Ky2 para a subárea1, foi de 66931Kg/ha e de 67974Kg/ha; para a subárea 2 foi de 70912Kg/ha e 73599Kg/ha e para a subárea 3 foi de 64346Kg/ha e 65079Kg/ha, respectivamente, mostrando que, a subárea 2 apresentou maior produtividade, seguida da subárea 1 e 3, bem como, os valores de produtividade com o Ky2, apresentou maiores valores de produtividade.

Figura 4.45 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 1.

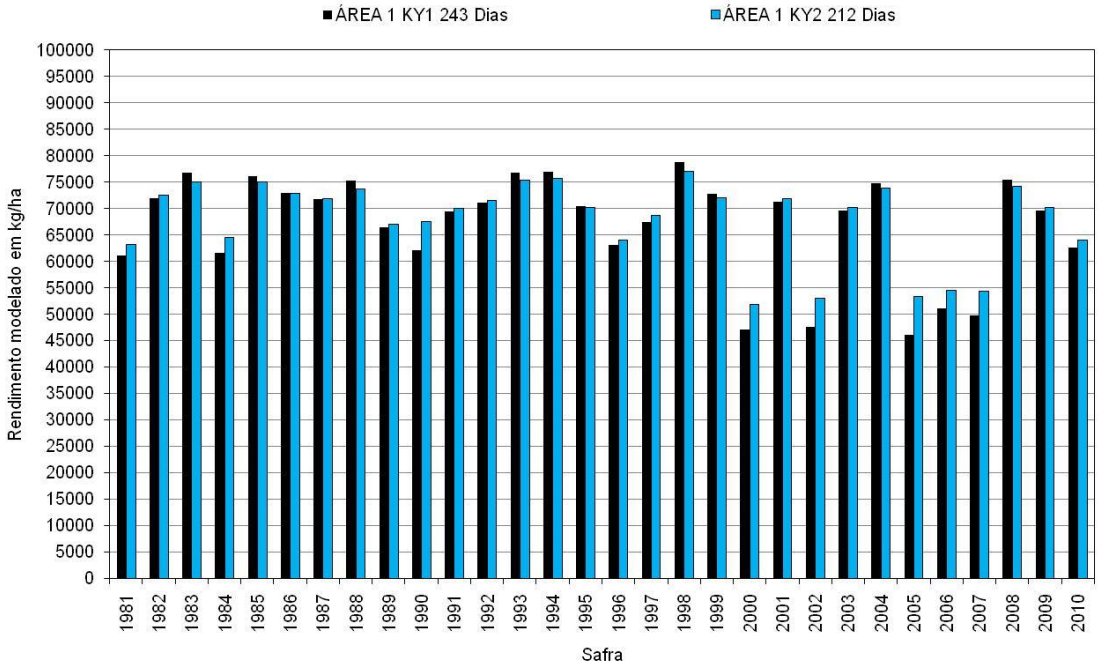


Figura 4.46 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 2.

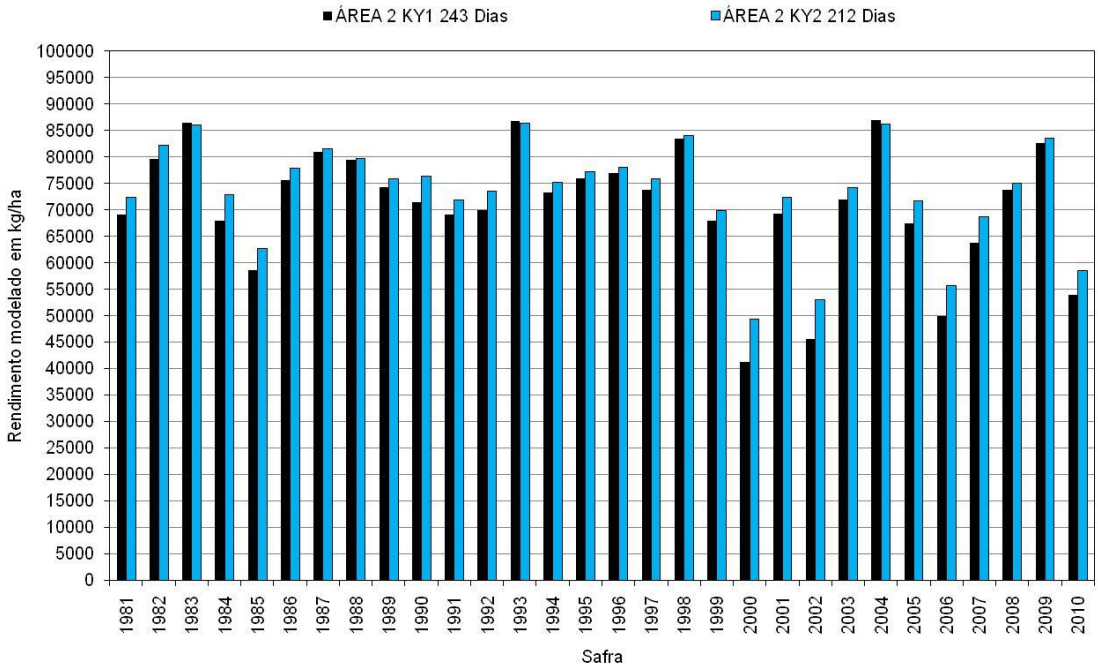
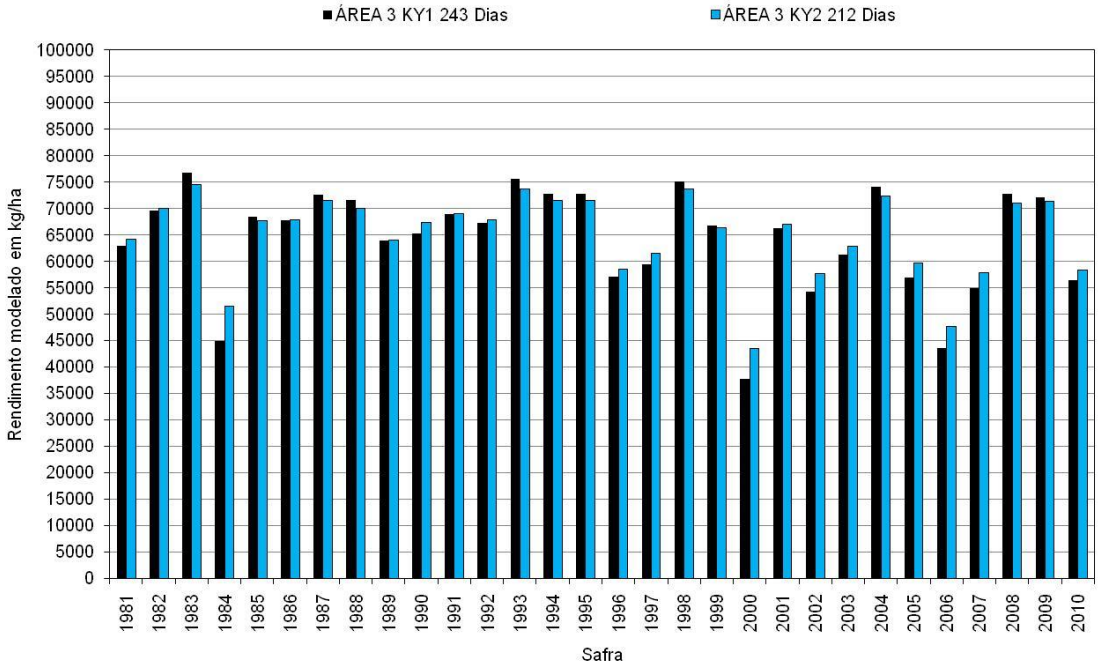


Figura 4.47 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 3.



As Figuras 4.48 e 4.49, apresentam as produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de

respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para as subárea4 e 5, Estado de Minas Gerais, para o período de 1981 a 2010. A produtividade estimada pelo modelo para Ky1 e Ky2 para a subárea4, foi de 39300,39Kg/ha e de 40539Kg/ha; porém para a subárea 5 a melhor combinação foi somente a de Ky1 com 212 dias de cultivo, sendo que a outra estimativa foi descartada por não apresentar resultados, sendo que o valor médio de produtividade para a estimativa escolhida foi de 53631Kg/ha.

Figura 4.48 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 4.

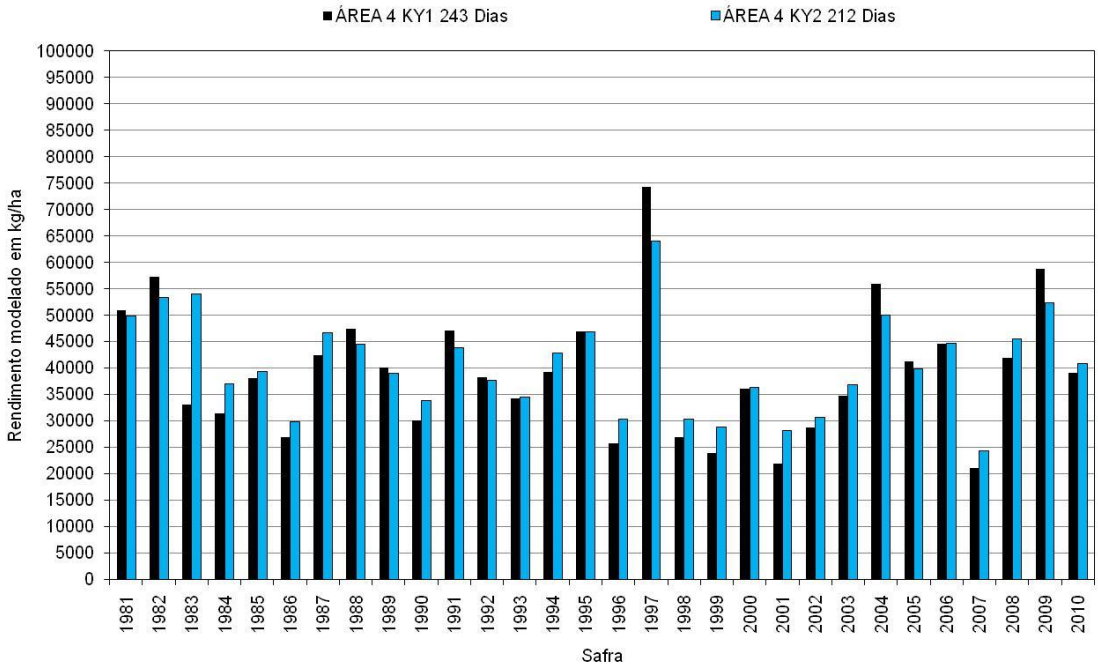
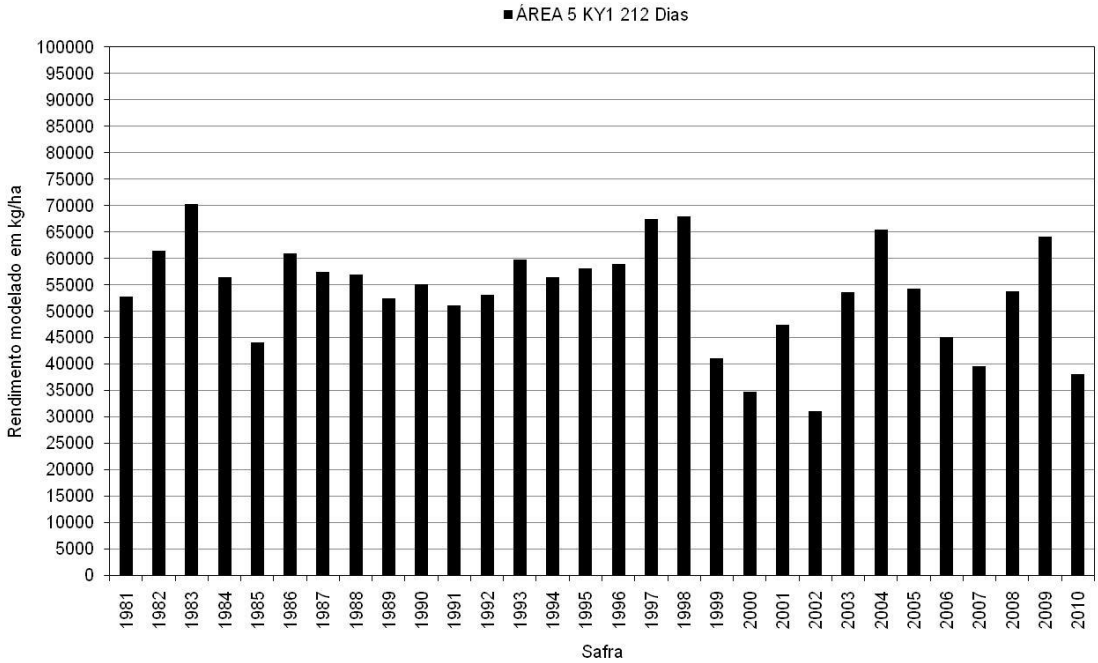


Figura 4.49 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através da melhor cominação de fator de resposta de produtividade (Ky1) com a faixas de dias de cultivo proposto (212) para Área 5.



As Figuras 4.50 e 4.51, apresentam as produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores combinações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para as subárea6 e 7, Estado do Paraná, para o período de 1981 a 2010. A produtividade estimada pelo modelo para Ky1 e Ky2 para a subárea6, foi de 71387Kg/ha e de 72814Kg/ha; para a subárea 7, foi de 69090Kg/ha e de 70512Kg/ha, respectivamente, mostrando que a produtividade com o Ky2, apresentou maiores valores de produtividade, e que a subárea 6 apresentou maior produtividade.

Figura 4.50 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 6.

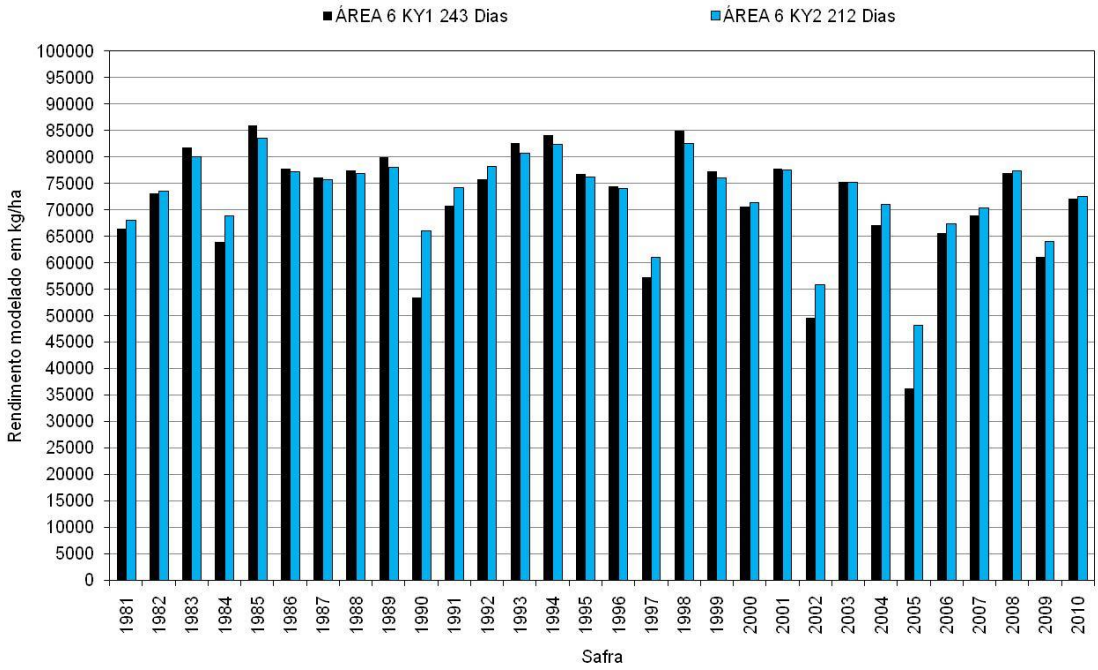
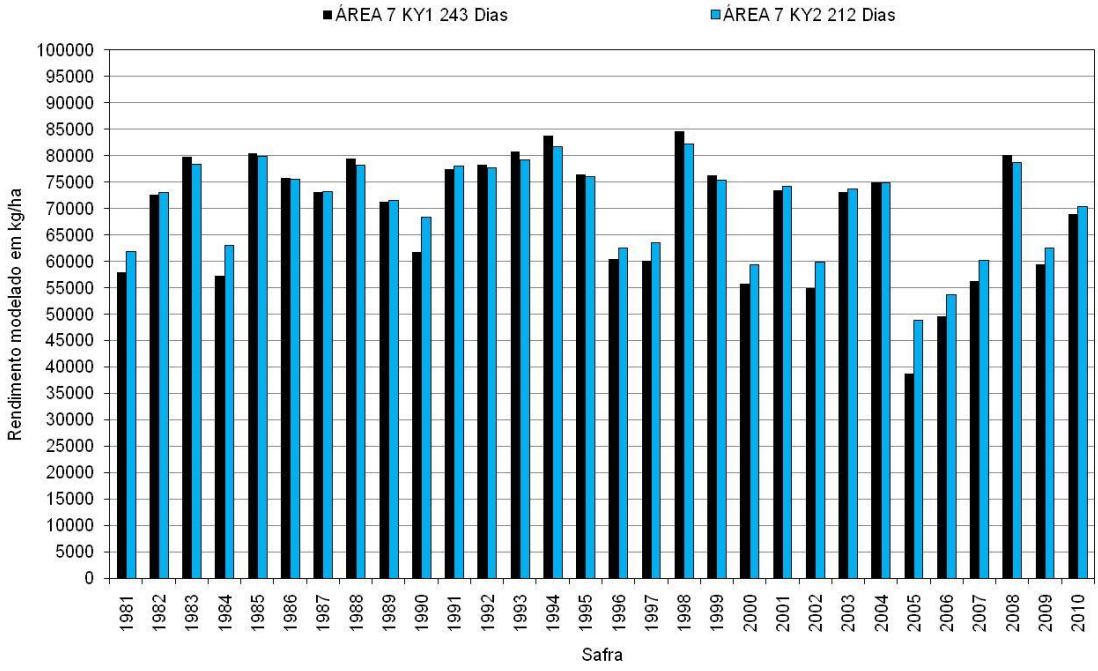


Figura 4.51 – Produtividade estimada (em kg/ha), obtidos através das melhores cominações de dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de dias de cultivo propostos (243 e 212) para Área 7.



4.3.5 – Comparação com dados de referência do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Para fins de comparação de magnitude das estimativas do modelo de penalização hídrica, as produtividades simuladas foram comparadas com as séries históricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para que as comparações fossem realizadas removeram-se tendências tecnológicas das séries históricas, para as áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente: de 358 Kg/ha, 388 Kg/ha, 519 Kg/ha, 449 Kg/ha, 1013 Kg/ha, 494 Kg/ha e 437 Kg/ha.

As Figuras 4.52, 4.53 e 4.54, apresentam os valores de produtividade potencial, considerando 243 dias e 212 dias de cultivo, produtividades estimadas por modelagem agrometeorológica, através de coeficientes ky1 e ky2 e a produtividades observadas pelo IBGE, em kg/ha, para as subáreas A1, A2 e A3, no Estado de São Paulo, para o período de 1981 a 2010, e observa-se que as estimativas de produtividade da cana-de-açúcar pelo modelo, seguiram o comportamento temporal da série histórica de dados totais de produtividade do IBGE. Embora o modelo tenha capturado as variações observadas ao longo da série do IBGE, foi aplicada uma penalização por déficit hídrico na produtividade, com redução nos valores do modelo, para ky1, para as subáreas A1 e A3 de 47%, respectivamente, e de 51% para a subárea A2 e para ky2 a penalização foi de 38% para as subáreas A1 e A3 e de 42% para A2,respectivamente, mostrando que a maior penalização ocorreu na subárea A2, Figura 4.53. Observa-se também, valores superestimados nos anos de 1983, 1987, 1993, 1998, 2002 e 2009 e valores subestimados nos anos de 1985, 2000, 2002, 2006 e 2010, enquanto que, nos valores observados pelo IBGE, observam-se pequenas variações e a partir de 1999, os valores são quase que constantes.

Figura 4.52 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 1 (1981 - 2010).

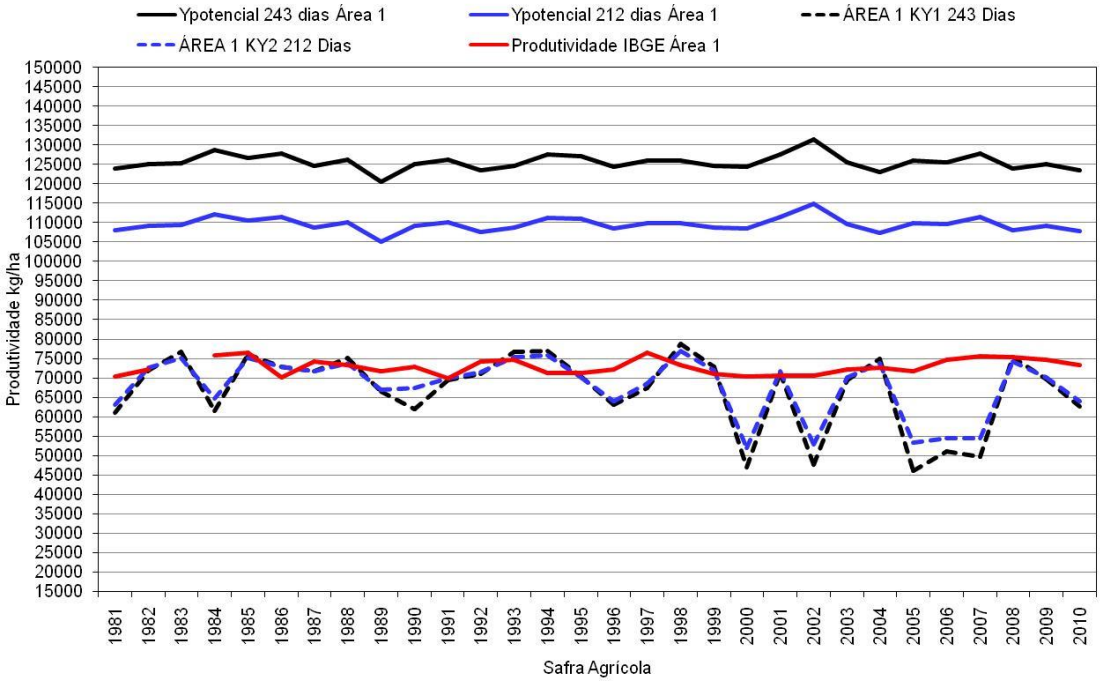


Figura 4.53 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 2 (1981 - 2010).

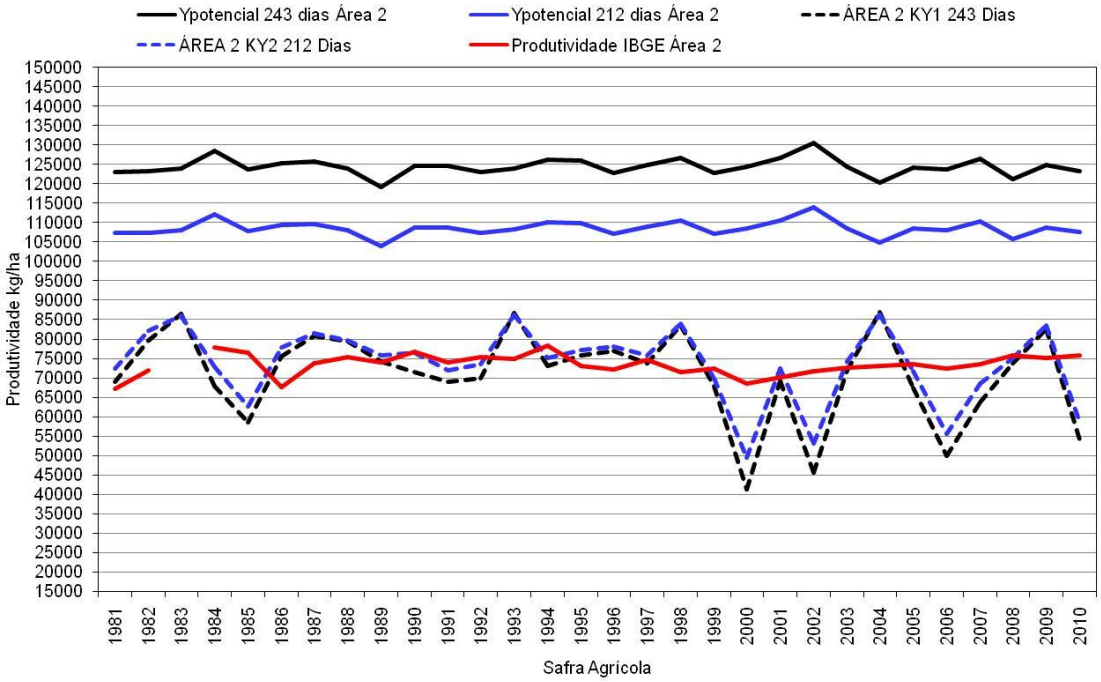
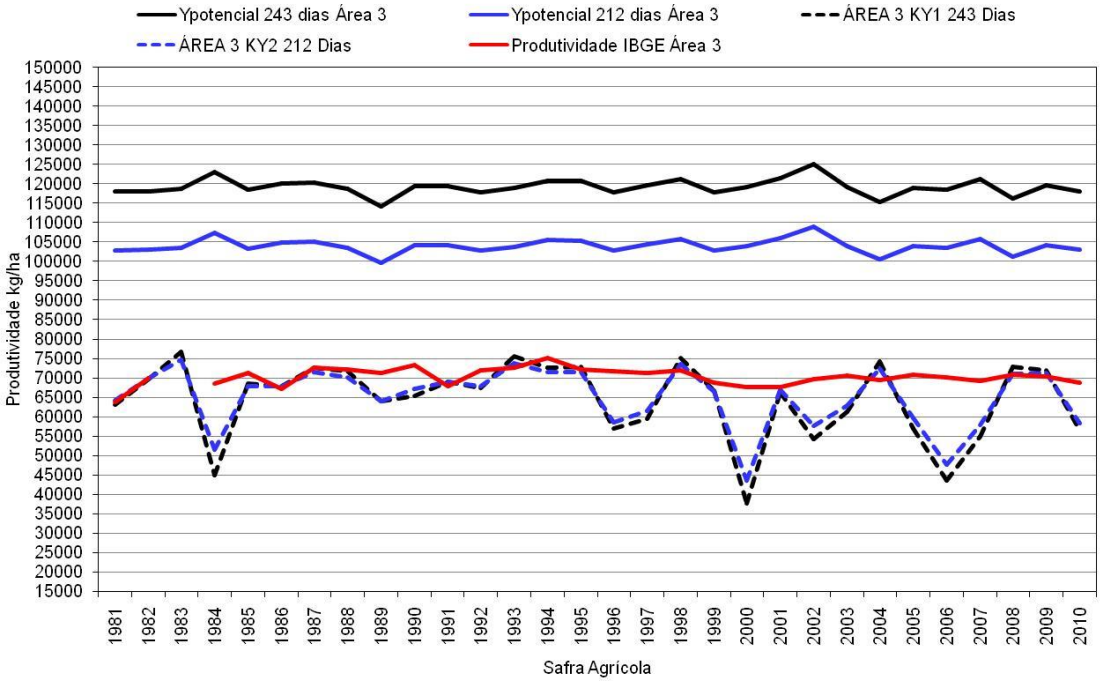


Figura 4.54 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 3 (1981 - 2010).



As Figuras 4.55 e 4.56 apresentam os valores de produtividade potencial, considerando 243 dias e 212 dias de cultivo, as produtividades estimadas por modelagem agrometeorológica, através de coeficientes ky1 e ky2 e as produtividades do IBGE, em kg/ha, para as subáreas A4 e A5 no Estado de Minas Gerais, para o período de 1981 a 2010, e observa-se que as estimativas de produtividade da cana-de-açúcar pelo modelo, seguiram o comportamento temporal da série histórica de dados totais de produtividade do IBGE. Embora o modelo tenha capturado as variações observadas ao longo da série do IBGE, foi aplicada uma penalização por déficit hídrico na produtividade, com redução nos valores do modelo, para ky1, para as subáreas A4 e A5 de 87%, e de 59% e de 77% para ky2, para a subárea A4, mostrando que, a maior penalização ocorreu na subárea A4. Observa-se também, valores superestimados nos anos de 1982, 1983, 1997, 2004 e 2009 e valores subestimados nos anos de 1985, 1986, 1999, 2000, 2001, 2002 e 2007, enquanto que, nos valores observados pelo IBGE, observa-se pequenas variações e à partir de 1999, valores quase que constantes.

Figura 4.55 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 4 (1981 - 2010).

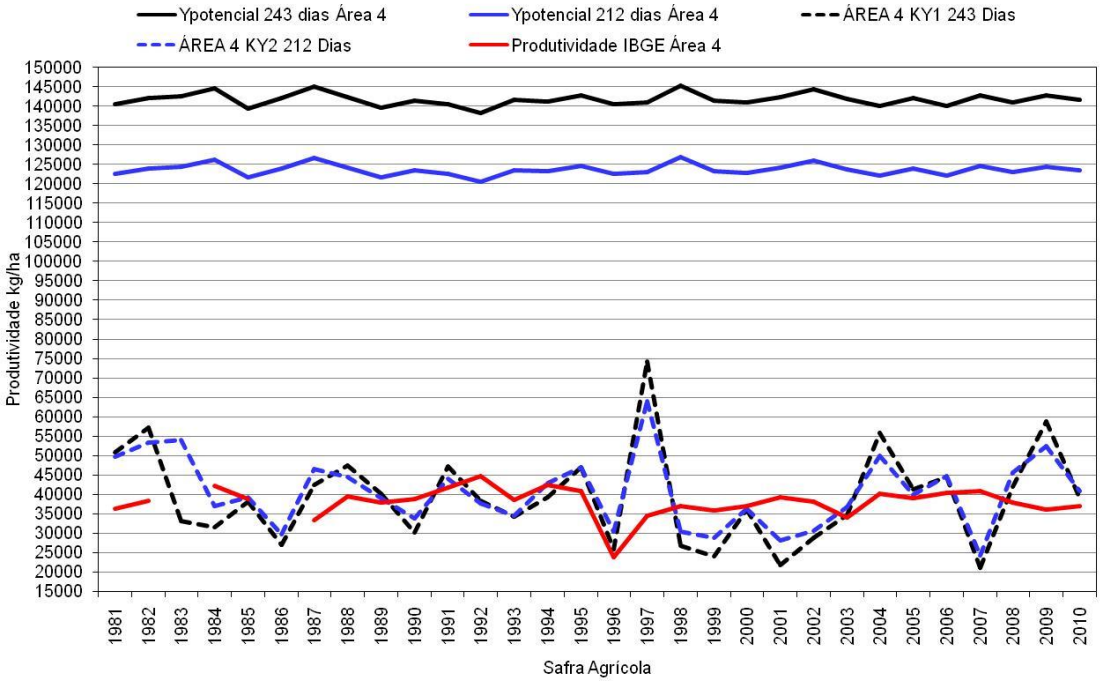
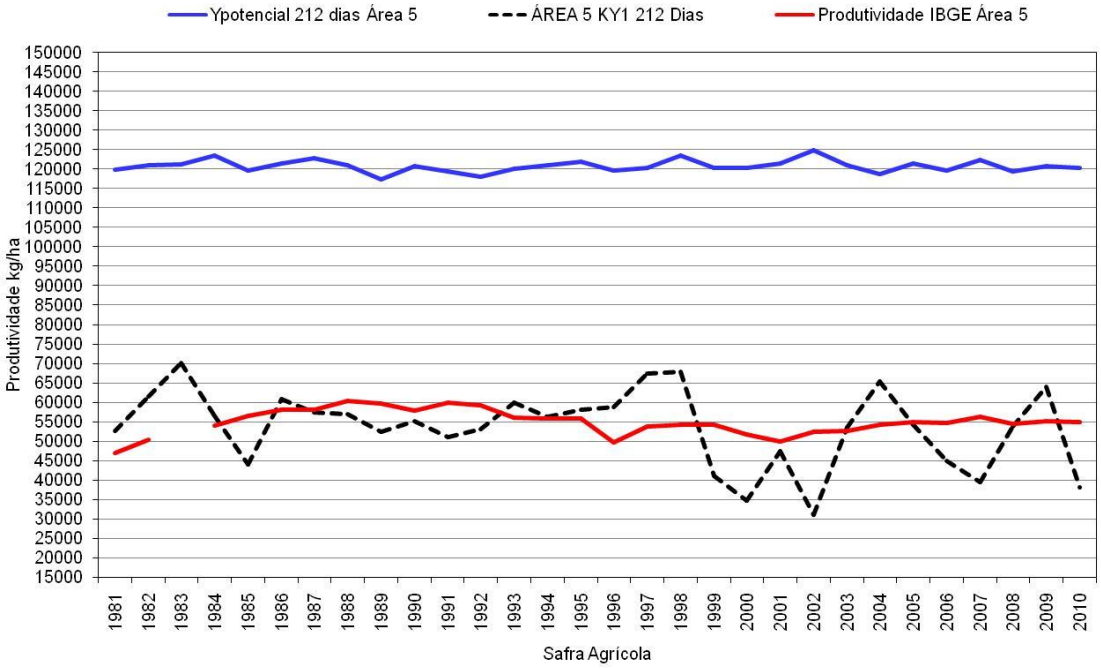


Figura 4.56 – Produtividades Potenciais (212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 5 (1981 - 2010).



As Figuras 4.57 e 4.58 apresentam os valores de produtividade potencial, considerando 243 dias e 212 dias de cultivo, produtividades estimadas por modelagem agrometeorológica, através de coeficientes ky1 e ky2 e a

produtividades observadas pelo IBGE, em kg/ha, para as subáreas A6 e A7 no Estado do Paraná, para o período de 1981 a 2010. Observa-se que as estimativas de produtividade da cana-de-açúcar pelo modelo, seguiram o comportamento temporal da série histórica de dados totais de produtividade do IBGE. Embora o modelo tenha capturado as variações observadas ao longo da série do IBGE, foi aplicada uma penalização por déficit hídrico na produtividade, com redução nos valores do modelo, para ky1, para as subáreas A6 e A7 de 46%, e de 47% e de 36 e de 38% para ky2, respectivamente, mostrando que as penalização foram próximas em ambas as áreas. Observa-se também, valores superestimados nos anos de 1983, 1985, 1991, 1894,1995, 1998, 2001 e valores subestimados nos anos de 1990, 1997, 2000, 2002 e 2005, mostrando a influência dos fenômenos El Niño e La Niña, respectivamente, enquanto que, nos valores observados pelo IBGE, observam-se pequenas variações.

Conclui-se que, o estado com menor penalização foi o Paraná com 47% para ky1 e de 37% para ky2, seguido de São Paulo com penalizações de 48% e de 39%, respectivamente, e o estado de Minas Gerais, estado com menor índice pluviométrico e maior déficit hídrico, aplicando maiores penalizações por déficit hídrico, de 73% para ky1 e de 60% para ky2, Diante dos resultados, o modelo foi capaz de reproduzir a produtividade da cana-de-açúcar em face às variações climáticas, pois dos anos analisados, foram poucos os que apresentaram erros discrepantes, só indicando a complexidade do desenvolvimento de modelos para prever a produtividade de uma cultura, em determinada região.

Figura 4.57 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 6 (1981 - 2010).

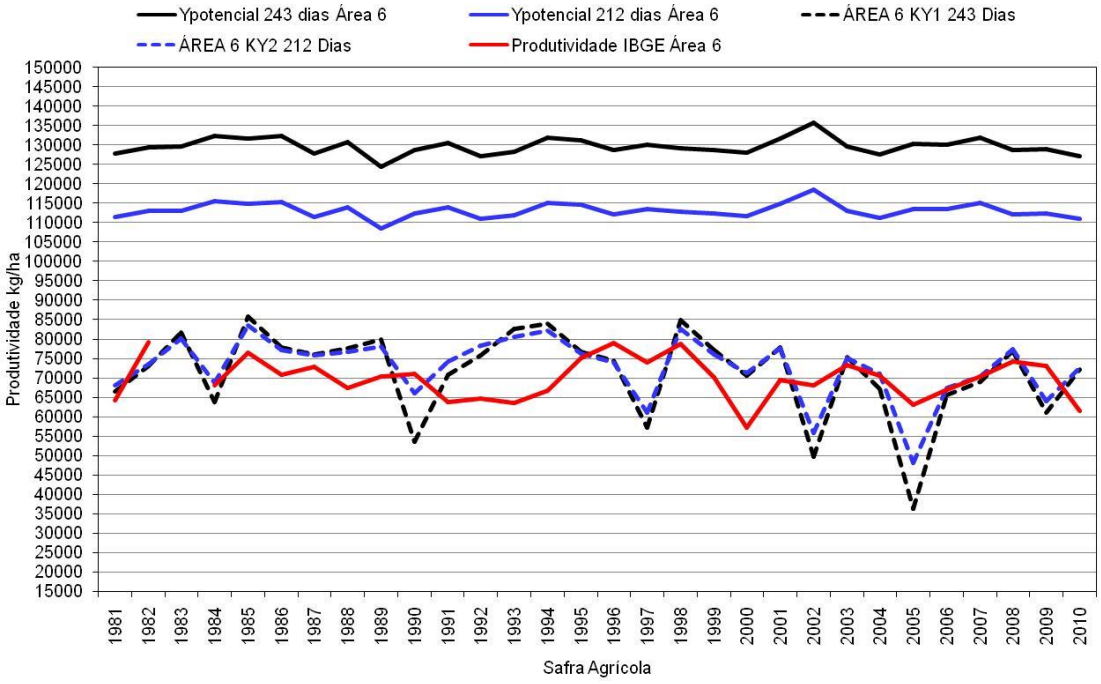
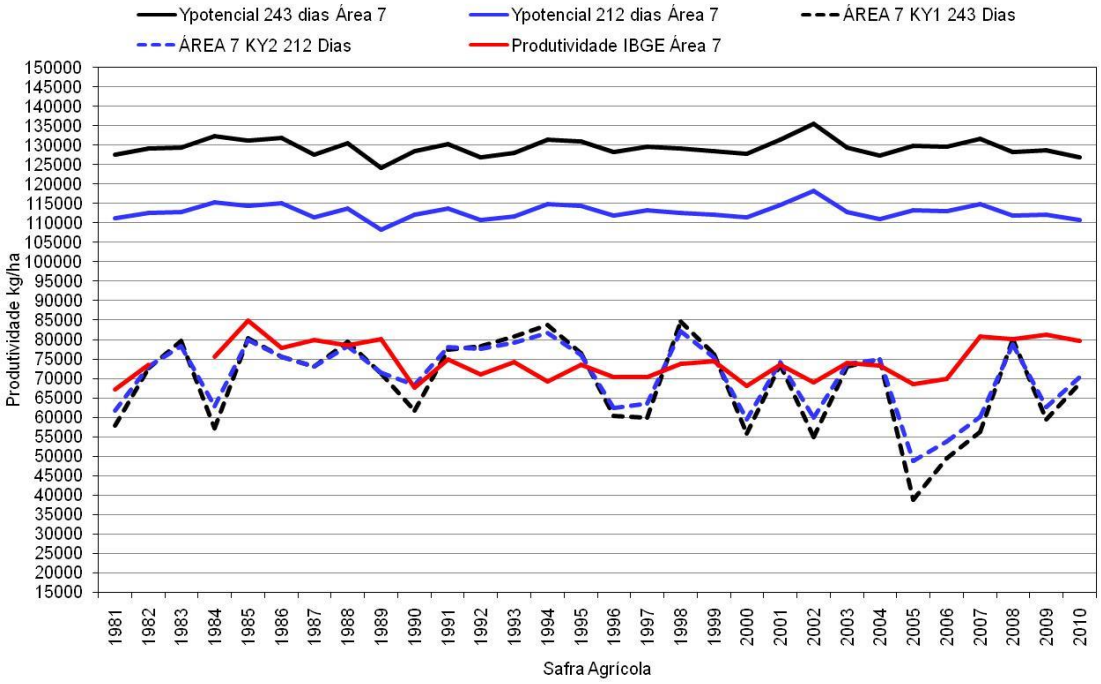


Figura 4.58 – Produtividades Potenciais (243 e 212 dias), Produtividades Estimadas (através de coeficientes Ky1 e Ky2) e Produtividades Observadas (IBGE), em Kg/ha, para Área 7 (1981 - 2010).



4.3.6 - Variação dos dados de Produtividades.

Comparando as estimativas com os dados do IBGE, pode-se observar nas 7 sub-regiões que o modelo estimou satisfatoriamente as magnitudesda produtividade agrícola de cana-de-açúcar através da penalização da produtividade potencial, sendo que, comparando as 7 áreas de estudo, nos 20 primeiros anos, o a estimativa de produtividade efetiva (em Kg/ha) esteve bem próxima da estimativa do IBGE, enquanto que nos últimos 10 anos da série histórica ocorreram oscilações, que se explicam pelo fato de as precipitações estarem abaixo da média climatológica na última década de estudo. Observa-se que quando a precipitação esteve acima da média, as comparações entre os valores estimados e observados estiveram muito próximos, enquanto que quando ocorreram períodos de redução de precipitação, as estimativas apresentaram picos em torno dos dados observados. É importante observar que em todas as regiões as estimativas estiveram na mesma ordem de magnitude dos dados observados, inclusive na área 5, Minas Gerais, que é uma área com condições não tão favoráveis ao desenvolvimento da cultura, pela menor precipitação disponível, enfatizando a importância das estimativas do modelo para fins de monitoramento e previsão de safra agrícola.

4.3.7 – Variação de dados estimados.

Foram realizadas análises em gráficos Box Plot, para verificar a distribuição doconjunto de dados, comparando as médias, à dispersão e a sua distribuição, As Figuras 4.59 e 4.60, mostram os Box Plot das variações dos dados de produtividade potencial, em Kg/ha, para 243 dias e 212 dias de cultivo da cultura, para as 7 subáreas de estudo e observa-se que,o Estado de São Paulo apresenta níveis médios diferentes de produtividade potencial, decrescente da área A1 para a área A3, o mesmo acontecendo nas subáreas no Estado de Minas Gerais, enquanto que, o Estado do Paraná, apresenta valores muito próximos nas subáreas de

estudo. A subárea A3 (São Paulo) apresenta menores valores de produtividade potencial, para 243 dias, com valores da mediana de 119138 kg/ha e para 212 dias, mediana de 103940 kg/ha, valor máximo de 125020 kg/ha e 109071 kg/ha (menor valor máximo de produtividade) e valor mínimo de 114301 kg/ha e 99719 kg/ha (menor valor mínimo de produtividade) com quartis Q1 de 118052 kg/ha e 102992 kg/ha (significando que, 25% da área produziu abaixo deste valor) e Q3 de 120424 kg/ha e 105061 kg/ha), respectivamente,e a subárea A4 (Minas Gerais) apresenta maiores valores de produtividade potencial, para 243 dias e 212 dias, com mediana de 141653 kg/ha e de 123582 kg/ha, valor máximo de 145404 kg/ha e de 126855 kg/ha (menor valor máximo de produtividade) e valor mínimo de 138309 kh/ha e de 120665 kg/ha (menor valor mínimo de produtividade) com quartis Q1 de 140480 kg/ha e de 122559 kg/ha (significando que, 25% da área produziu abaixo deste valor) e Q3 de 142535 kg/ha e de 124352 kg/ha (significando que 25% da área produziu acima deste valor), respectivamente, mostrando que, quanto maior o ciclo da cultura, maior a produtividade.

Figura 4.59 – Box Plots de variação de dados de Produtividade Potencial, em kg/ha, para 243 dias de cultivo da cultura, para as 7 áreas de estudo.

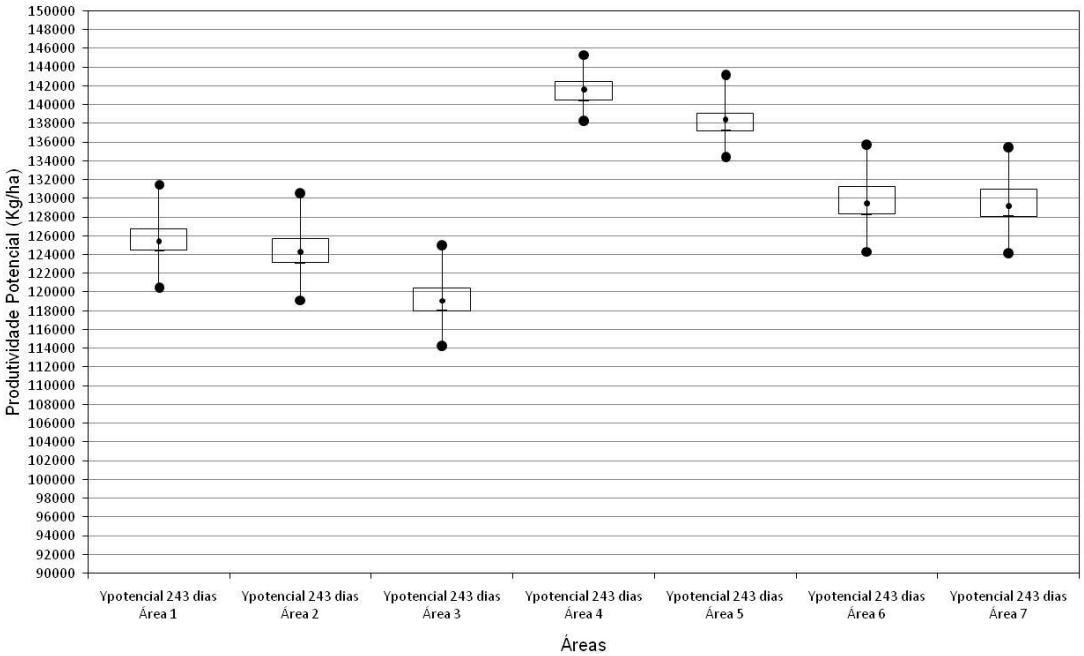
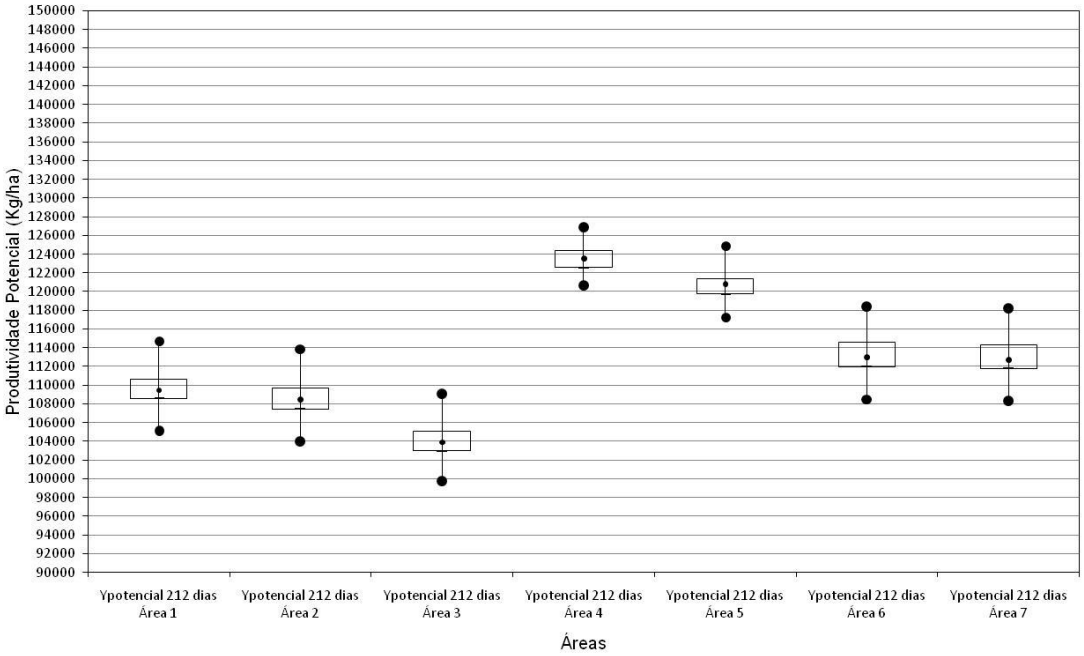


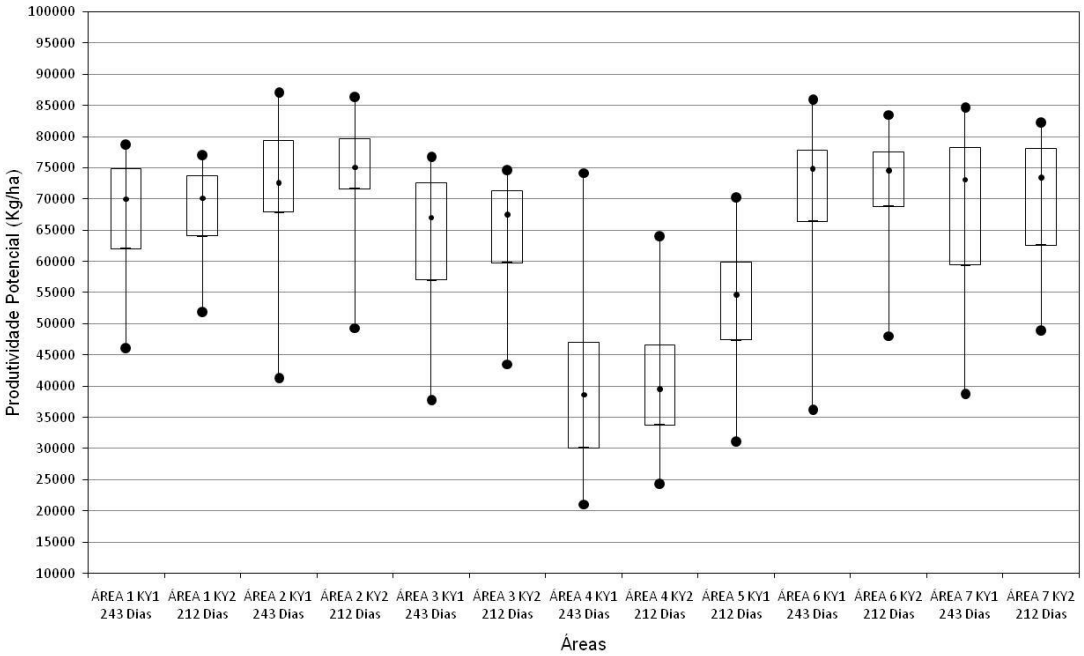
Figura 4.60 – Box Plots de variação de dados de Produtividade Potencial, em kg/ha, para 212 dias de cultivo da cultura, para as 7 áreas de estudo.



A Figura 4.61 mostra o Box Plot das variações dos dados de Produtividade Estimada, para os coeficientes ky1 (243 dias) e ky2 (212 dias) em kg/ha, para as 13 estimativas de produtividade, para as 7subáreas de estudo nos Estados de São Paulo (subáreas A1, A2 e A3), Minas Gerais (subáreas A4 e A5) e Paraná (subáreas A6 e A7), onde observa-se que, as subáreas apresentam níveis médios próximos para ky1 e ky2, com a subárea A6 (Paraná) apresentando maiores valores de produtividade estimada com mediana de 74879 kg/ha para ky1 e 74651 para ky2, valor máximo de 85897 kg/ha e 83610 kg/ha, valor mínimo de 36244 kg/ha e de 48119 kg/ha, Q1 com 66424 kg/ha e 68832 kg/ha e Q3 com valores de 77785 kg/ha e 77560 kg/ha, respectivamente, e a subárea A4 (Minas Gerais) apresenta menores valores de produtividade estimada com mediana de 38673 kg/ha para ky1 e 39577 para ky2, valor máximo de 74292 kg/ha e 64032 kg/ha, valor mínimo de 21142 kg/ha e de 24289 kg/ha, Q1 com 30108 kg/ha e 33792 kg/ha e Q3 com valores de 47007 kg/ha e 46633 kg/ha, respectivamente. Observa-se ainda que, as subáreas A1, A2, A3, A5, A6,e A7 apresentam, medianas mais próximas de Q3, logo as produtividades estimadas são negativamente assimétricas,

enquanto que, na subárea A4 a mediana está mais próxima de Q1, então, as produtividades estimadas são positivamente assimétricos.

Figura 4.61 – Box Plots de variação de dados de Produtividade Estimada (com coeficientes Ky1 e Ky2), em kg/ha, para as 13 estimativas de Produtividade, para as 7 áreas de estudo.



4.3.8 – Avaliação de desempenho do modelo.

A magnitude média das diferenças entre valores medidos pelo IBGE e estimados pelo modelo, foi obtida através da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REQM), Tabela 4.2, e através das médias das diferenças dos valores absolutos entre estimativa e observação, foi obtido o Erro Médio Absoluto (EMA), Tabela 12, ambos para Ky1 e Ky2 para as subáreas dos Estados de São Paulo (Áreas 1, 2 e 3), Minas Gerais (Áreas 4 e 5) e Paraná (Áreas 6 e 7).

Os valores de REQM para Ky1 e Ky2, para as subáreas do estado de São Paulo, foram de 9,3% e 6,8% para Área 1; de 11,2% e 9,5% para Área 2, e de 12,8% e 9,7% para a Área 3, mostrando que, a Área 3 apresentou as maiores diferenças entre valores medidos e estimados e a Área 1 as menores diferenças. No estado de Minas Gerais para as subáreas4 e 5,

apresentou valores de 34,0% e 26,3% para Área 4, respectivamente, e 18,2% para a Área 5, apresentando significativas diferenças entre os valores, e para o Estado do Paraná, para as subáreas 6 e 7, os valores foram de 16,2% e 9,5%, e de 23,0% e 16,7% respectivamente, mostrando também grandes diferenças entre valores medidos e estimados.

Tabela 4.2 – Cálculo da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REMQ) para as 13 situações propostas, em Kg/ha.

Raiz do Erro Médio Quadrático (REQM)	
Saída do Modelo	REQM
AREA 1 KY1 243	6234
AREA 1 KY2 212	4627
AREA 2 KY1 243	7927
AREA 2 KY2 212	7000
AREA 3 KY1 243	8249
AREA 3 KY2 212	6307
AREA 4 KY1 243	13304
AREA 4 KY2 212	10649
AREA 5 KY1 212	9784
AREA 6 KY1 243	11570
AREA 6 KY2 212	8355
AREA 7 KY1 243	15875
AREA 7 KY2 212	11757

Os valores de EMA para Ky1 e Ky2, Tabela 4.3, para as subáreas do Estado de São Paulo, 1, 2 e 3, foram de 6,8% 5,0%; de 9,3% e 7,7%; e de 7,7% e 6,1%, respectivamente, mostrando que, a Área 1 apresentou menor diferença nos valores absolutos entre estimativa e dados observados. O Estado de Minas Gerais, para as subáreas4 e 5, apresentou valores de 22,1% e 18,0% para a Área 4 e 14,6% para a Área 5, para Ky1, apresentando significativas diferenças nos valores absolutos e para o Estado do Paraná, para as subáreas 6 e 7, os valores foram de 12,5% e 9,1%; e 17,0% e 12,2%, respectivamente, mostrando também

significativas diferenças nos valores absolutos entre estimativa e observação.

Tabela 4.3 - Cálculo do Erro Médio Absoluto (EMA) para as 13 situações propostas, em Kg/ha.

Erro Médio Absoluto (EMA)	
Saída do Modelo	EMA
AREA 1 KY1 243	4551
AREA 1 KY2 212	3399
AREA 2 KY1 243	6573
AREA 2 KY2 212	5686
AREA 3 KY1 243	4518
AREA 3 KY2 212	3939
AREA 4 KY1 243	8680
AREA 4 KY2 212	7306
AREA 5 KY1 212	7815
AREA 6 KY1 243	8897
AREA 6 KY2 212	6591
AREA 7 KY1 243	11732
AREA 7 KY2 212	8633

A Área 1, no Estado de São Paulo, foi a que apresentou as menores diferenças nos valores de REMQ e EMA, indicando uma boa concordância nos dados medidos e estimados e nos valores absolutos entre estimativa e observação. A Área 4, no estado de Minas Gerais, foi a que apresentou as menores produtividade estimadas pelo modelo e as maiores diferenças nos valores de REMQ e EMA e podem ser associados, ao fato de que apenas a água é o fator limitante da produtividade, desconsiderando outros fatores importantes na produtividade da cultura, como doenças, pragas, etc.

As diferenças entre as produtividades estimadas e observadas (ou erros) foram avaliadas de acordo com os anos considerados no estudo, onde os valores dos coeficientes de correlação, para o estado de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, foram próximos, REQM e EMA, r=0,57; r=0,56 e

r=0,68, respectivamente, mostrando correlação significativa, ao nível de significância de 5%, concluindo-se pela equivalência dos dois erros, ou nos valores estimados e observados.

5 – CONCLUSÕES

A caracterização climática das subáreas produtoras de cana–de–açúcar nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná (1980 a 2010), mostrou que o Estado de Minas Gerais é o que apresenta os maiores valores de temperatura do ar e São Paulo os menores valores, seguido do Paraná. As precipitações médias totais anuais no período foram de 1419mm, 1304 mm e 1479 mm para São Paulo, Minas Gerais e Paraná, respectivamente, mostrando alguma influência dos eventos de El Niño e da La Niña nas temperaturas do ar e nas precipitações, em São Paulo e no Paraná, porém pouco significativa em Minas Gerais. Em relação ao regime térmico e pluviométrico exigido para o desenvolvimento das diferentes fases de crescimento e maturação da cultura, as 7 sub-regiões, de um modo geral, apresentaram condições relativamente favoráveis para a cultura de cana-de-açúcar.

As taxas de Evapotranspiração Potencial e Real apresentam as maiores médias de ETPe menores de ETR, em Minas Gerais, seguida do Paraná e São Paulo, mostrando os maiores valores nas áreas mais continentais.

A deficiência de água no solo (DEF) apresentou maiores valores médios em Minas Gerais, seguida por São Paulo e Paraná, e valores médios mais elevados de excedentes hídricos (EXC) em São Paulo, seguido do Paraná e Minas. Os maiores déficits hídricos observados ocorrem nas áreas mais continentais e os excedentes nas áreas mais centrais.

A relação entre ETR/ETP mostram que, os maiores valores ocorrem nas fases 2 e 3, fases de perfilhamento e de crescimento dos colmos e os menores valores nas fases 1 e 4, fases de plantio e colheita da cultura, com todas as subáreas apresentando comportamento semelhantes, com pequena variabilidade nas fases 2 e 3 e grande variabilidade nas fases 1 e 4.

As temperaturas médias do ar, precipitação, evapotranspiração potencial e real, deficiência e excedente de água no solo, exigidas para o desenvolvimento das diferentes fases de crescimento e maturação da cultura, as subrregiões consideradas, de um modo geral, apresentaram

condições favoráveis para o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar.

O modelo de penalização por déficit hídrico permitiu estimar adequadamente os valores da produtividade potencial, calculados para os ciclos de 243 e 212 dias de cultivo, para o período de 1981 a 2010, em São Paulo, Minas Gerais e Paraná. A maior produtividade potencial estimada foi constatada em Minas Gerais e foi respectivamente para os dois ciclos 140 Ton/ha e 122 Ton/ha, seguido do Paraná com 129 Ton/ha e 113Ton/ha e São Paulo, com 123 Ton/ha e 107 Ton/ha. Os rendimentos, para o período de safras agrícolas de 1981 a 2010, para cada fase de cultivo, com os dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para as subáreas estudadas, mostraram que, através da aplicação do fator de penalização da cultura, foi possível estabelecer quantitativamente o rendimento em cada fase e no total de cada safra, onde foi a fase 3, a que apresentou os menores valores de rendimento através dos coeficientes Ky1 (0,5) e Ky2 (0,4), para todas as subáreas estudadas, ou seja, a maior penalização por deficiência hídrica ocorreu, como esperado, na fase 3 de desenvolvimento dos colmos,onde ocorre a maior necessidade hídrica para o desenvolvimento das plantas, e as penalizações por déficit hídrico para São Paulo foram de 40% para Ky1 e de 39% para Ky2, Minas Gerais foram de 53% e 50% para Ky1 e Ky2 e Paraná foram de 40% para Ky1 e de 37% para Ky2. Os rendimento percentuais da produtividade, obtidos através das saídas do modelo pelos dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2), para as 7subáreas, foram: 53% e 61% nas subáreas 1, 2 e 3; 27% e 37% nas subáreas 4 e 5 e 54% e 63%, nas subáreas 6 e 7.As produtividades estimadas, obtidas através das melhores combinações dos dois fatores de respostas de produtividade (Ky1 e Ky2) com as duas faixas de cultivo propostas (243 e 212 dias) nas 7subárea estudadas, no período de 1981 a 2010, para as subáreas 1, 2 e 3, variaram de 64 Ton/ha à 73 Ton/ha, de 39 Ton/ha à 53 Ton/ha para subáreas 4 e 5; e de 69 Ton/ha à 72 To/ha para as subáreas 6 e 7,mostrando que, as subáreas 6 e 7 apresentaram as maiores produtividades no Estado do Paraná, seguida das subáreas 1, 2 e 3, no Estado de São Paulo, e das subáreas de Minas Gerais, com

menor produtividade, bem como, os valores de produtividades com o fator Ky2,levou aos maiores valores de produtividade.

Observa-se que, a estimativa da produtividade efetiva, está na mesma ordem de magnitude das referências do IBGE, bem como, valores próximos nos 20 primeiros anos de estudo, enquanto que, nos últimos anos da série histórica, ocorreram oscilações, explicadas pelas precipitações estarem abaixo da média climatológica na última década de estudo, enfatizando a relação do modelo com as perdas hídricas, para fins de planejamento e previsão da safra da cultura de cana- de- açúcar.

O estado com menor penalização foi o Paraná com 47% para Ky1 e de 37% para Ky2, seguido de São Paulo 48% e 39%, respectivamente, e Minas Gerais, estado com menor índice pluviométrico e maior déficit hídrico, aplicando maiores penalizações, 73% para Ky1 e 60% para Ky2, diante dos resultados, o modelo foi eficaz em reproduzir a produtividade da cana-de-açúcar em face às variações climáticas.

A avaliação de desempenho do modelo mostrou que, a raiz quadrada do erro quadrático médio, REQM e o Erro Médio Absoluto, EMA, para os coeficientes Ky1 e Ky2apresentaram, respectivamente, valores médios para as áreas de São Paulo, da ordem de 8,25%, para o Estado de Minas Gerais estes valores foram da ordem de 16,8% e para o Estado do Paraná na ordem de 14,8%, mostrando que o Estado de São Paulo, apresentou menores diferenças entre dados estimados e os observados, bem como, pequenas diferenças nos valores absolutos entre estimativa e dados observados.

Conclui-se que o modelo utilizado se mostrou uma importante ferramenta para monitoramento e previsão da produtividade da cana-de-açúcar, em níveis de grandes regiões produtoras, como no caso das sub-regiões dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, podendo auxiliar no planejamento da expansão regional da cultura, sendo útil para planejamento e previsão de safras, devido à importância econômica da cultura, além disso, o modelo permite analisar a viabilidade de irrigação suplementar nas diferentes fases das cultura, auxiliando também no planejamento do ciclo, reduzindo os custos de produção e maximizando o uso dos recursos naturais sem prejudicar o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES. L. M.; MARENGO, J. A.; CAMARGO JR., H.; CASTRO, C. Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 – Estudos Observacionais, **Bras. Meteor**., v. 20, n. 3, p. 385-394, 2005.

ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C. Brazilian maize to water deficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,**Brasilia, v. 44, n. 7, p. 653-660, july, 2009.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Sistema de previsão de safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.5, p.615-625, Maio 2007.

BARBIERI, V.; TUON, R. L.**Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1992, 17p.

BAIER, W. Note ontheTerminologyofCrop-WeatherModels. **Agric. Meteorol***. v.* 20, p: 137-145. 1979.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações e previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003, p. 110.

BOWEN, W. T. *et al*. Evaluation of the nitrogen submodel of Ceres-Maize following legume green manure incorporation. **Agron. J., Madison**, v.85, n.1, p.153-159, 1993.

BRAIDO, L. M. H. **Caracterização climática e dos anos extremos (chuvoso e seco)**: Os efeitos na produção de cana-de-açúcar, milho e soja para a região do Pontal do Paranapanema – SP. Revista Formação, n. 17, vol1, p.13-34, 2010.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. S., **Tempo e clima no Brasil.** São Paulo: Oficina de textos, 463p. 2009.

CARVALHO, G. L. **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. 2009. 120p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CUNHA, G. R.; DALMAGO, G. A.; ESTEFANEL, V. ENSO influences on wheat crop in Brazil.**Revista Brasileira de Meteorologia**, v.7, n.1, p.127-138, 1999.

CORAL, G.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; IAFFE, A. Utilização de um modelo agrometeorológico na estimativa de produtividade de cultura da soja no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia –CBAgro. 14..2005, Campinas.**Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**.Italy:Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper, Rome, 1979.33p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeitos da água no rendimento das culturas.**Roma: FAO, 1994, 212 p. (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 33).

FERREIRA, D. B. **Relações entre a variabilidade da precipitação e a produtividade agrícola de soja e milho nas regiões sul e sudeste do Brasil.**2005.123p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1913/2005/04.28.13.02>. Acesso em: 23 jan. 2013.

FERREIRA, D. B.**Análise da variabilidade climática e suas consequências para a produtividade da soja na Região Sul do Brasil**. 141p. 2010. (sid.inpe.br/mtc-m18/2010/11.11.18.05-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2010.Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/38JEG65>. Acesso em: 23 jan. 2013.

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V. SHAH, M.; NACHRGAELE, F. O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century**: Methodology and results.Laxenburg: IIASA, 2002.IIASA RR-02-02.

FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B.; GAN, M. A.; SANTO, C. M. E. Onset and end of rainy season and corn yields in São Paulo State, Brazil. **Geofísica Internacional.**v. 49. 2.p. 69-76, 2010.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GHOSH, S. LUNIYA, V.; GUPTA, A. Trend analysis of Indian summer monsoon rainfall at different spatial scales.**Atmospheric Science Letters**, v.10, n.4, p.285-290, 2009.

GOUVÊA, J. R. F.**Mudanças Climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura de cana-de-açúcar na região de Piracicaba-SP.** 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Piracicaba: ESALQ, 2008.

GOUVÊA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Souther Brazil. **Scientia Agrícola**, v.66, n.5, p.593-605, 2009.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer moosoon in Brazil: reginal processes versus remote influences. **Journalofclimate**, v. 16, p. 263-280, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), Produção agrícola municipal: Culturas temporárias e permanentes. Vol 37. 89p 2012.

_____.**Sistema de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em http://www.sidra.ibge.gov.br, acesso em 28 de agosto de 2013.

LIEBMANN, B.; ALLURED, D.Daily precipitation grids for South America.**Bull. Amer. Meteor. Soc**., 86, 1567-1570, 2005.

MACHADO, E. C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar, in: PARANHOS, S. B. (coord.). **Cana-de-açúcar**: Cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. V. 1.

MARTINS, M. A.**Estimativa de produtividade das culturas de milho e do sorgo a partir de modelos agrometeorológicos em algumas localidades da região nordeste do brasil**. 2012. 123 p. (sid.inpe.br/mtc-m18/2012/02.10.11.29-TDI).. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituo Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2012.Disponível em:<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3BBGU25>. Acesso em: 23 jan. 2013.

MONTEIRO, L. A.**Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Piracicaba: ESALQ, 2012.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar.in: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NOBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba, CP 2, 2006. P. 11-18.

MORAES, A. V.C; CAMARGO, M. B. P.; MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M.A.C.; PEREIRA, J.C.V.N.A. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n. 2, 393-406 p. 1998.

OLIVEIRA, R. A.**Modelagem da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais**. 90p. Dissertação (Mestrado Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: UFV, 2010.

PAULA, A. L. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar em ambiente protegido, sob diferentes níveis freáticos**. 2008. 150 p. Tese Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C.. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.183p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.**Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 478p. 2007.

PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña and the southern oscillation**. San Diego – CA: Academic Press, 1990. 293p. InternationalGeophysics Series.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p. 789-795, 2009.

RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, pp. 25-32, 1998.

RAO, V. B.; SÁ, L. D. A.; FRANCHITO, S. H.; HADA, K. Interanual variations of rainfall and corn yields in northeast Brazil. **Agriculturaland Forest Meteorology**. V.85, p.63-74, 1997

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estmativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114p. (INPE-3744-TDL/202).Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.Disponível em: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GNpic>. Acessoem: 23 jan. 2013.

ROPELEWSKI, C. F.; JONES, P. D.An extension of Tahiti-Darwin Southern oscillation index.**Mon. Wea. Rev**., v.115, p. 2161-2165, 1987.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J. C.M. (org.).**Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP2, 2006. p. 19-36.

SEGATO, S. V.; ALONSON, O.; LAROSA, G. Terminologias no setor sucroalcooleiron In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.;

NÓBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. P. 397-405.

SILVA, L. L.; COSTA, R. F.; CAMPOS, J. H. B.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produção agrícola no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13. P. 454-461. 2009.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produçõ de cana-de-açúcar (Saccharumspp) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 96p. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2003.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, R. J.**The Water Balance**.New Jersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 104p. 1955.

THORNELY, J.H.M. **Mathematical models in plant phisiology**: a quantitative approach to problems in plant crop physiology. London: Academic Press. 1976.318p.

WALKER, G. T. Correlations in seazonal variations of weather, VIII. **Men.India Meteorological Department**, v.24, p.75-131, 1923.

WALKER, G. T. Correlations in seazonal variations of weather, IX. **Men.India Meteorological Department**, v.24, p.333-345, 1924.

WALKER, G. T. World weather II. **Royal Meteorological Society**, v.11, n.17, p.97-106, 1927.

WALKER, G. T.;BLISS, E. W. World weather IV.**Royal Meteorological Society**, n.3, p. 81-95, 1929.

WALKER, G. T.; BLISS, E. W.World weather V. **Royal Meteorological Society**,v.4, n.36, p.53-84, 1932.

WALKER, G. T.;Bliss, E. W. World weather VI.**Royal Meteorological Society**, v.4, n.39, p.119-139, 1937.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **AgriculturalWater Management**, v. 43, p. 173-182, 2000.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 1.

	AREA 1							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	100	91	58	94	100	96	65	94
1982	85	90	65	98	89	95	71	98
1983	100	92	72	93	100	96	77	93
1984	100	88	58	93	100	94	65	93
1985	100	92	69	95	100	96	75	95
1986	100	92	64	96	100	96	71	96
1987	100	91	65	96	100	96	71	96
1988	100	92	70	92	100	96	76	92
1989	98	92	62	97	99	96	68	97
1990	100	80	63	98	100	90	70	98
1991	100	91	65	94	100	96	71	94
1992	100	89	68	95	100	95	74	95
1993	100	92	69	96	100	96	75	96
1994	100	92	69	94	100	96	75	94
1995	97	92	66	91	98	96	72	91
1996	100	92	60	92	100	96	67	92
1997	100	91	62	96	100	96	68	96
1998	100	92	71	96	100	96	76	96
1999	100	92	67	94	100	96	73	94
2000	100	89	42	97	100	95	51	97
2001	100	92	62	98	100	96	69	98
2002	100	92	41	96	100	96	50	96
2003	100	92	63	96	100	96	70	96
2004	100	92	68	97	100	96	74	97
2005	91	80	48	96	94	90	56	96
2006	100	92	49	91	100	96	57	91
2007	100	92	44	96	100	96	53	96
2008	97	92	70	95	98	96	75	95
2009	100	92	61	98	100	96	68	98
2010	100	90	61	92	100	95	68	92

Tabela A.2 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 2.

	AREA 2							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	100	90	60	92	100	95	67	92
1982	100	89	67	97	100	95	73	97
1983	100	92	70	95	100	96	76	95
1984	100	88	57	93	100	94	65	93
1985	100	92	52	87	100	96	60	87
1986	100	92	61	96	100	96	67	96
1987	100	92	67	93	100	96	73	93
1988	100	92	68	91	100	96	74	91
1989	73	92	62	96	82	96	69	96
1990	100	86	61	97	100	93	68	97
1991	100	91	61	89	100	95	68	89
1992	100	89	61	93	100	95	68	93
1993	100	92	70	96	100	96	76	96
1994	100	92	62	91	100	96	68	91
1995	55	92	65	90	69	96	71	90
1996	100	92	65	93	100	96	71	93
1997	100	92	61	93	100	96	68	93
1998	100	92	67	94	100	96	73	94
1999	100	92	61	88	100	96	67	88
2000	100	92	33	96	100	96	43	96
2001	100	92	57	92	100	96	64	92
2002	100	92	37	90	100	96	47	90
2003	100	92	62	91	100	96	69	91
2004	96	92	72	96	97	96	77	96
2005	93	90	56	95	95	95	64	95
2006	100	92	44	88	100	96	53	88
2007	100	92	50	97	100	96	58	97
2008	99	92	64	91	99	96	70	91
2009	100	92	66	97	100	96	72	97
2010	100	92	49	86	100	96	57	86

Tabela A.3 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 3.

	AREA 3							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	100	91	62	95	100	96	69	95
1982	100	90	67	98	100	95	73	98
1983	100	92	73	96	100	96	78	96
1984	100	82	48	93	100	91	57	93
1985	100	92	67	93	100	96	73	93
1986	100	92	64	96	100	96	70	96
1987	100	92	68	96	100	96	74	96
1988	100	92	71	93	100	96	76	93
1989	100	92	63	96	100	96	70	96
1990	100	88	64	98	100	94	70	98
1991	100	90	67	95	100	95	73	95
1992	100	90	66	96	100	95	72	96
1993	100	92	72	96	100	96	77	96
1994	100	92	69	94	100	96	75	94
1995	77	92	69	94	84	96	75	94
1996	100	92	57	92	100	96	64	92
1997	100	92	56	97	100	96	63	97
1998	100	92	70	96	100	96	76	96
1999	100	92	66	94	100	96	72	94
2000	100	88	36	96	100	94	45	96
2001	100	92	62	96	100	96	68	96
2002	100	92	50	94	100	96	58	94
2003	100	90	61	93	100	95	68	93
2004	100	92	72	97	100	96	77	97
2005	97	89	56	96	98	95	63	96
2006	100	92	44	90	100	96	53	90
2007	100	92	51	97	100	96	59	97
2008	100	92	71	95	100	96	77	95
2009	100	92	67	98	100	96	73	98
2010	100	92	56	93	100	96	63	93

Tabela A.4 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 4.

	AREA 4							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	77	48	45	86	84	73	54	86
1982	33	80	48	84	53	91	56	84
1983	64	49	45	84	75	75	54	84
1984	61	66	31	86	73	84	41	86
1985	100	82	32	83	100	91	42	83
1986	100	90	19	89	100	95	28	89
1987	34	64	40	83	54	82	49	83
1988	96	91	35	83	97	96	45	83
1989	38	91	30	85	57	96	39	85
1990	100	79	24	91	100	90	33	91
1991	100	92	35	83	100	96	45	83
1992	100	91	29	84	100	96	39	84
1993	100	92	25	84	100	96	35	84
1994	69	71	37	83	79	85	46	83
1995	22	64	38	83	46	82	48	83
1996	23	71	25	83	47	86	35	83
1997	47	84	59	85	63	92	66	85
1998	83	86	21	83	88	93	30	83
1999	16	71	23	82	42	86	33	82
2000	50	91	27	84	66	96	37	84
2001	100	58	22	85	100	79	32	85
2002	52	92	21	82	66	96	31	82
2003	100	53	29	84	100	76	39	84
2004	41	67	41	84	59	84	50	84
2005	21	92	30	83	45	96	40	83
2006	74	35	39	84	82	66	49	84
2007	100	92	16	81	100	96	25	81
2008	16	38	37	83	42	67	47	83
2009	82	24	42	86	88	63	51	86
2010	87	74	36	83	91	88	46	83

Tabela A.5 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 5.

	AREA 5							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	100	88	56	88	100	94	64	88
1982	70	88	62	93	79	94	68	93
1983	100	92	67	93	100	96	73	93
1984	100	89	56	91	100	95	64	91
1985	100	92	47	85	100	96	56	85
1986	100	92	57	96	100	96	64	96
1987	100	92	58	87	100	96	66	87
1988	100	92	59	86	100	96	66	86
1989	71	92	52	93	80	96	60	93
1990	100	85	56	95	100	93	64	95
1991	100	92	54	86	100	96	62	86
1992	100	90	56	89	100	95	64	89
1993	100	92	59	91	100	96	66	91
1994	100	92	58	88	100	96	65	88
1995	41	91	60	86	59	96	67	86
1996	100	92	59	90	100	96	66	90
1997	100	92	67	91	100	96	73	91
1998	100	92	64	93	100	96	70	93
1999	100	92	44	84	100	96	53	84
2000	100	92	35	90	100	96	44	90
2001	100	90	49	90	100	95	57	90
2002	100	92	32	85	100	96	41	85
2003	100	91	55	88	100	96	63	88
2004	100	92	65	91	100	96	72	91
2005	59	90	55	91	72	95	62	91
2006	100	92	47	87	100	96	55	87
2007	100	92	40	89	100	96	49	89
2008	49	92	56	87	65	96	64	87
2009	100	92	62	93	100	96	69	93
2010	100	91	41	84	100	96	51	84

Tabela A.6 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 6.

	AREA 6							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	100	92	58	97	100	96	65	97
1982	100	92	63	98	100	96	69	98
1983	100	91	72	96	100	96	77	96
1984	100	82	62	95	100	91	69	95
1985	100	92	72	98	100	96	77	98
1986	100	74	66	96	100	87	72	96
1987	100	92	66	98	100	96	72	98
1988	100	91	70	94	100	96	75	94
1989	100	91	71	98	100	96	76	98
1990	100	64	67	98	100	83	72	98
1991	100	84	67	97	100	92	73	97
1992	100	84	73	98	100	92	78	98
1993	100	92	71	98	100	96	77	98
1994	100	92	71	98	100	96	76	98
1995	100	92	66	96	100	96	72	96
1996	100	92	66	95	100	96	72	95
1997	100	91	49	97	100	96	58	97
1998	100	92	73	97	100	96	78	97
1999	100	92	69	94	100	96	74	94
2000	100	68	61	98	100	84	68	98
2001	100	92	66	98	100	96	72	98
2002	100	89	42	97	100	95	51	97
2003	100	92	65	97	100	96	71	97
2004	100	83	65	97	100	92	71	97
2005	100	67	43	98	100	84	51	98
2006	100	92	57	96	100	96	64	96
2007	100	92	59	97	100	96	66	97
2008	100	88	70	97	100	94	76	97
2009	100	77	52	98	100	89	60	98
2010	100	91	65	96	100	96	71	96

Tabela A.7 – Valores de rendimento (em %) para cada fase de cultivo em dois fatores de resposta de produtividade (Ky1 e Ky2), para área 7.

	AREA 7							
	KY1				KY2			
SAFRA	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
1981	100	88	54	96	100	94	61	96
1982	100	92	62	98	100	96	69	98
1983	100	91	73	93	100	96	78	93
1984	100	82	56	94	100	92	63	94
1985	100	90	70	96	100	95	76	96
1986	100	91	65	96	100	95	71	96
1987	100	92	64	97	100	96	70	97
1988	100	91	72	94	100	96	77	94
1989	100	92	64	97	100	96	70	97
1990	100	77	63	98	100	89	70	98
1991	100	88	69	98	100	94	75	98
1992	100	90	71	97	100	95	76	97
1993	100	92	70	98	100	96	75	98
1994	100	92	72	96	100	96	77	96
1995	100	91	67	96	100	96	73	96
1996	100	92	55	92	100	96	63	92
1997	100	90	53	97	100	95	60	97
1998	100	92	73	97	100	96	78	97
1999	100	92	68	94	100	96	74	94
2000	100	73	49	97	100	87	57	97
2001	100	92	62	98	100	96	69	98
2002	100	92	46	97	100	96	54	97
2003	100	91	63	98	100	96	70	98
2004	100	91	67	97	100	96	73	97
2005	100	73	42	97	100	87	51	97
2006	100	92	45	91	100	96	54	91
2007	100	92	48	96	100	96	56	96
2008	100	92	71	96	100	96	76	96
2009	100	89	51	98	100	95	59	98
2010	100	89	64	96	100	95	70	96