

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Agrupamento de Modelos de Mudanças Climáticas e
Geração de Cenários de Impactos na Agricultura**

CELSO MACEDO JÚNIOR

CAMPINAS
AGOSTO 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Agrupamento de Modelos de Mudanças Climáticas e
Geração de Cenários de Impactos na Agricultura**

Dissertação de Mestrado submetida
à banca examinadora para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Agrícola, na área de Planejamento e
Desenvolvimento Rural Sustentável.

CELSO MACEDO JÚNIOR
Orientador: Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior
Co-Orientador: Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto

CAMPINAS
AGOSTO 2011

M151a Macedo Júnior, Celso
Agrupamento de modelos de mudanças climáticas e
geração de cenários de impactos na agricultura / Celso
Macedo Júnior. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientadores: Jurandir Zullo Junior, Hilton Silveira
Pinto.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Aquecimento global. 2. Zona rural. 3.
Zoneamento. 4. Climatologia agrícola. 5. Planejamento
agrícola. I. Zullo Junior, Jurandir. II. Pinto, Hilton
Silveira. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Grouping models and generation of climate change
scenarios for impacts on agriculture

Palavras-chave em Inglês: Global warming, Countryside, Zoning, Agricultural
climatology, Agricultural planning

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

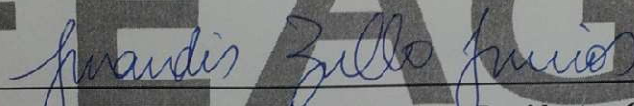
Banca examinadora: Giampaolo Queiroz Pellegrino, Ana Maria Heuminsk
Ávila

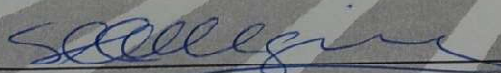
Data da defesa: 12/08/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Celso Macedo Junior**, aprovado pela Comissão Julgadora em 12 de agosto de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

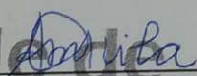
FEAGRI


Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior - Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino - Membro Titular
Embrapa/CNPq

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp


Dra. Ana Maria Heuminski Ávila - Membro Titular
Cepagri/Unicamp

À minha doce esposa.

Por sua dedicação.

Compreensão.

E por sempre acreditar em mim.

Mesmo nos momentos os quais até eu mesmo duvidei de mim.

AGRADECIMENTOS

A fé em Deus, que leva qualquer homem ao encontro dos seus sonhos.

À Faculdade de Engenharia Agrícola e sua Coordenadoria de Pós-Graduação no auxílio em todo o período de aspiração ao título de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro em todo o período do trabalho.

Ao CEPAGRI/UNICAMP e EMBRAPA/CNPTIA pela utilização de suas instalações sempre que necessitei.

Ao Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior pela sua amizade e ensinamentos, de suma importância em toda essa jornada.

Aos meus co-orientadores Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto e Dr. Eduardo Delgado Assad, não somente pelo conhecimento e suporte, mas por ensinarem valores éticos que levarei para o resto de minha vida.

Ao Prof. Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues (Lique) pelo auxílio na seleção dos modelos climáticos globais, utilizando a análise de *cluster*.

À minha eterna namorada Ana Paula por fazer que tudo de bom na minha vida seja possível.

À minha mãe por me ensinar valores de honra, humildade e força, fazendo com que eu nunca esquecesse de minhas origens.

Ao meu pai por despertar em mim a paixão pelo conhecimento e saber, mesmo com todas as dificuldades que a vida nos impôs.

À minha irmã Paula pelos nossos momentos de risos e descontração.

À minha tia ‘Zezé’ por ter acreditado e investido em mim no período o qual eu mais precisei.

Aos verdadeiros amigos de graduação da USP pelas conversas ‘iluminadoras’.

Aos amigos do CEPAGRI e EMBRAPA/CNPTIA por aturarem minhas piadas (mesmo aquelas que ninguém entendeu) e reclamações.

A nossa maior glória não reside no fato de nunca caírmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda.

Confúcio

RESUMO

As mudanças climáticas e seus possíveis impactos vêm sendo amplamente discutidos pela sociedade mundial. De acordo com o relatório do IPCC (2007), as temperaturas tenderão a subir neste século devido, principalmente, ao aumento da concentração dos gases do efeito estufa. Essas possíveis mudanças no clima poderão afetar diretamente o setor agrícola e acarretar mudanças drásticas no setor econômico do país. Vários modelos de previsão climática têm sido propostos pelos centros de previsão de tempo e clima do mundo. Nesse contexto, esse trabalho teve o objetivo principal de identificar e avaliar o desempenho de modelos climáticos globais do quarto relatório do IPCC (2007), considerando sua utilidade na avaliação dos impactos das mudanças climáticas no zoneamento agrícola de riscos climáticos de três das principais culturas agrícolas do país. Utilizando informações físico-químicas, 23 modelos globais do IPCC (2007) foram agrupados em dois *clusters* tendo como representante os modelos HadCM3 e MIROCmed. Após a escolha desses modelos, foram utilizadas suas anomalias de precipitação e/ou temperatura, inseridas no zoneamento agrícola das culturas do café, cana e milho para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná. As anomalias estavam compreendidas no período de 2010-2039 para o cenário de emissões SRA2. Os dados climáticos utilizados advieram dos maiores centros de tempo e clima do Brasil compreendido no período de 1976-2005. Os resultados das simulações mostraram que as culturas foram mais penalizadas em sua classe de baixo risco climático quando inserida a anomalia isolada de temperatura do modelo MIROCmed e a anomalia isolada de precipitação do modelo HadCM3. Quando comparado ao modelo MIROCmed, houve maior intensidade dos resultados das áreas, número de municípios e produção com a simulação do modelo HadCM3. Das culturas analisadas, o café foi a cultura que apresentou maior redução no número de municípios da classe baixo risco, segundo a média das percentagens das anomalias em conjunto (anom_T+P) dos dois modelos.

Palavras-Chave: IPCC, aquecimento global, zoneamento agrícola

ABSTRACT

The climate changes and their potential impacts have been widely discussed by the world society. According to the IPCC (2007), the temperatures will tend to rise in this century mainly due to increasing of greenhouse gases concentration. The possible changes in climate may directly affect the agricultural sector and lead to drastic changes in the economic sector of the country. Several climate prediction models have been proposed by the weather and climate centers in the world. In this context, this study had the aim of identifying and evaluating the performance of global climate models from the fourth IPCC report, considering their usefulness in assessing the impacts of climate change on climatic risks zoning in three of the major crops of the country. Using physicochemical information, 23 global models of the IPCC (2007) were grouped into two clusters having as components, the models HadCM3 and MIROCmed. After choosing these models, we used their precipitation anomalies and / or temperature, inserted in the agricultural zoning for the crops of coffee, sugar cane and maize in the states of Minas Gerais, São Paulo and Paraná. The anomalies were included in the period 2010-2039 for the emission scenario SRA2. The climate data used thereby made the greatest centers of weather and climate of Brazil within the period of 1976-2005. The simulation results showed which the crops were more penalized in the low-risk class when inserted the isolated anomalies of temperature from the MIROCmed and the isolated anomalies of precipitation from the HadCM3. When compared to the model MIROCmed, HadCM3 had a higher intensity of the results of areas, number of communes and production through of simulation from model HadCM3. From cultures analyzed, the coffee was the culture showed the highest increase in the number of municipalities in the low-risk class, according to the average of the percentages of anomalies together ($\text{anom}_T + P$) of the two models.

Keywords: IPCC, global warming, agricultural zoning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quantidade produzida pelos estados na safra do café no ano de 2009. Fonte: IBGE (2009).....	26
Figura 2 – As seis fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições do clima tropical do Brasil (CAMARGO e CAMARGO, 2001).....	28
Figura 3 – Quantidade produzida pelos estados na safra da cana-de-açúcar no ano de 2009. Fonte: IBGE (2009).....	29
Figura 4 – Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Adaptado de GASCHO e SHIH (1983).....	31
Figura 5 – Quantidade produzida pelos estados brasileiros nas safras do milho no ano de 2009. Fonte: IBGE (2009).....	33
Figura 6 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho. Adaptado de FANCELLI (1986) e IOWA STATE UNIVERSITY EXTENSION (1993).....	35
Figura 7 – Coeficientes de cultura em função da percentagem do ciclo de crescimento em duas condições de clima (EMBRAPA, 2009).....	36
Figura 8 – Temperatura Mínimas Médias do município de Campinas-SP no período de 1890 a 2006. Fonte: IAC/SAA.....	37
Figura 9 – Evolução das concentrações de CO ₂ para diferentes cenários do IPCC/AR4. Fonte: IPCC (2007).....	39
Figura 10 – Resoluções espaciais T42 e T85.....	44
Figura 11 – Exemplificação de um conjunto de dados segregados em seus respectivos <i>clusters</i> e centros de <i>clusters</i>	47
Figura 12 – Rede de estações pluviométricas dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná utilizando a série histórica de 1976-2005.....	51
Figura 13 – Anomalias mensais médias de temperatura do período 2010-2039 e cenário SA2, geradas pelo modelo climático global HadCM3.....	53
Figura 14 – Anomalias mensais médias de precipitação do período 2010-2039 e cenário SA2, geradas pelo modelo climático global HadCM3.....	54
Figura 15 – Anomalias mensais médias de temperatura do período 2010-2039 e cenário SA2, geradas pelo modelo climático global MIROCmed.....	55

Figura 16 – Anomalias mensais médias de precipitação do período 2010-2039 e cenário SA2, geradas pelo modelo climático global MIROCmed,.....	56
Figura 17 – Esquema da metodologia utilizado no zoneamento de riscos climáticos do milho (culturas anuais).....	59
Figura 18 – Esquema da metodologia utilizado no zoneamento de riscos climáticos do café arábica (culturas perenes) e da cana-de-açúcar (culturas semi-perenes).....	60
Figura 19 – Valores de SEQ para determinados <i>seed</i> e <i>k</i>	72
Figura 20 – Valores mínimos de SEQ dentre os <i>seeds</i> e <i>k</i> 's.....	73
Figura 21 – Distâncias dos modelos componentes do <i>Cluster 0</i> ao seu respectivo centro.....	76
Figura 22 – Distâncias dos modelos componentes do <i>Cluster 1</i> ao seu respectivo centro.....	76
Figura 23 – Número de municípios classificados e suas respectivas classes de risco climático para a cultura do café arábica, com base no cenário A2, gerados pelo modelo HadCM3, no período 2010 a 2039, para as variáveis temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	78
Figura 24 – Número de municípios e sua respectivas classe de riscos climáticos para a cultura do café arábica, com base no cenário A2, gerados pelo modelo MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	80
Figura 25 – Área de baixo risco climático para a cultura do café arábica, com base no cenário A2, gerada pelos modelos HadCM3 e MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	83
Figura 26 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar, com base no cenário A2, pelo modelo HadCM3, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	85
Figura 27 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar, com base no cenário A2, pelo modelo MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	87
Figura 28 – Área de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar, com base no cenário A2, pelos modelos HadCM3 e MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.	90

Figura 29 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo HadCM3, no período 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	92
Figura 30 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo MIROCmed, no período 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	97
Figura 31 – Área de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo HadCM3, no período de 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	100
Figura 32 – Área de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo MIROCmed, no período de 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela dos períodos de plantio anual do zoneamento agrícola de riscos climáticos.....	23
Tabela 2 – Modelos climáticos presentes no quarto relatório do IPCC (2007).....	41
Tabela 3 – Duração de ciclos e respectivas fases fenológicas do milho utilizadas normalmente no zoneamento agrícola.....	65
Tabela 4 – Variáveis meteorológicas do cenário de interesse (A2) disponíveis nos 23 modelos climáticos globais do quarto relatório do IPCC.....	68
Tabela 5 – Atributos utilizados em cada modelo e suas classes.....	69
Tabela 6 – Valores das variações da soma dos erros quadrados entre k_{n-1} e k_n para <i>seeds</i> com valores de SEQ mínimo.....	73
Tabela 7 – Elementos integrantes dos <i>clusters</i> 0 e 1 encontrados após a simulação.....	74
Tabela 8 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura do café arábica.....	77
Tabela 9 – Tabela de variação de classes de municípios de acordo com as anomalias do modelo HadCM3 para a cultura do café arábica.....	78
Tabela 10 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo HadCM3 na quantidade produzida de café arábica dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).....	79
Tabela 11 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura do café arábica.....	80
Tabela 12 – Tabela de variação de classes de municípios de acordo com as anomalias do modelo MIROCmed para a cultura do café.....	81
Tabela 13 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo MIROCmed na quantidade produzida de café arábica dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).....	81
Tabela 14 – Número de municípios em cada classe de risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual	

(1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura da cana-de-açúcar.....	84
Tabela 15 – Tabela de variação de classes de municípios de acordo com as anomalias do modelo HadCM3 para a cultura da cana-de-açúcar.....	85
Tabela 16 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo HadCM3, na quantidade produzida de cana-de-açúcar dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).....	86
Tabela 17 – Número de municípios em cada classe de risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura da cana-de-açúcar.....	86
Tabela 18 – Tabela de variação de classes de risco climáticos dos municípios de acordo com as anomalias do modelo MIROCmed para a cultura da cana-de-açúcar.....	87
Tabela 19 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo MIROCmed na quantidade produzida de cana-de-açúcar dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).....	88
Tabela 20 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura do milho.....	92
Tabela 21 – Número de municípios com alto risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura do milho.....	94
Tabela 22 – Tabela estatística de datas e municípios de acordo com as anomalias do modelo HadCM3 para a cultura do milho.....	94
Tabela 23 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo HadCM3 na quantidade produzida de milho dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual.....	94
Tabela 24 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura do milho.....	95

Tabela 25 – Número de municípios com alto risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura do milho.....	96
Tabela 26 – Tabela estatística de datas e municípios de acordo com as anomalias do modelo MIROCmed para a cultura do milho.....	98
Tabela 27 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo MIROCmed na quantidade produzida de milho dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).....	98
Tabela 28 – Variações médias dos modelos climáticos HadCM3 e MIROCmed para a classe de baixo risco climático em relação ao cenário atual das culturas de café arábica, cana-de-açúcar e milho.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

T Temperatura expressa em graus Celsius.

Q_0	Radiação solar extraterrestre, expressa em milímetros equivalentes.
n	Número de dias do período.
K	Fator de ajuste dependente da temperatura média.
C_i	Respectivo <i>cluster</i> .
x	Ponto do <i>cluster</i> C_i .
m_i	Centro do cluster correspondente.
Anom_T	Anomalia de Temperatura.
Anom_P	Anomalia de Precipitação.
Anom_T+P	Anomalia combinada de temperatura e precipitação.
$BR_{MUN.} \rightarrow BR$	Número de municípios que permaneceram na classe de médio risco.
$BR_{MUN.} \rightarrow MR$	Número de municípios de baixo risco que passaram para a classe de médio risco.
$BR_{MUN.} \rightarrow AR$	Número de municípios de baixo risco que passaram para a classe de alto risco.
P	Quantidade total produzida com base no período de 1990-2009.
$\bar{P}$	Quantidade média produzida com base no período de 1990-2009.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiv
SUMÁRIO.....	xvi
1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos.....	21
2.1.1 Evapotranspiração Potencial (ETP).....	24
2.1.2 Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA).....	24
2.1.3 Coeficiente de Cultura (K_c)	25
2.2 Culturas Agrícolas	25
2.2.1 Café Arábica	25
2.2.2 Cana-de-Açúcar	28
2.2.3 Milho	31
2.3 Mudanças Climáticas	36
2.3.1 Cenários de emissão de gases do Quarto Relatório do IPCC (AR4).....	37
2.3.2 Modelos Climáticos Globais	39
2.4 Data Mining	45
2.4.1 Operações de Reconhecimento de Padrões	46
2.4.2 <i>Clustering</i>	46
2.5 Mudanças Climáticas e Agricultura.....	48
3 MATERIAIS E MÉTODO.....	50
3.1 Materiais	50
3.1.1 Dados Agrometeorológicos	50
3.1.2 Dados de anomalia dos Modelos Climáticos.....	52
3.2 Método	57
3.2.1 Zoneamento agrícola de riscos climáticos.....	57
3.2.2 Seleção dos Modelos Climáticos Globais	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1 Café Arábica	77
4.1.1 HadCM3	77

4.1.2	MIROCmed	79
4.1.3	Comparação entre os modelos	81
4.2	Cana-de-açúcar	84
4.2.1	HadCM3	84
4.2.2	MIROCmed	86
4.2.3	Comparação entre os modelos	88
4.3	Milho.....	91
4.3.1	HadCM3	91
4.3.2	MIROCmed	95
4.3.3	Comparação entre os modelos	98
4.4	Comparação entre as culturas	102
5	CONCLUSÕES	104
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE	114
	Anexo	144

1 INTRODUÇÃO

As variações do tempo e do clima em escala global têm sido discutidas exaustivamente nas últimas décadas pela comunidade científica. O termo “mudanças climáticas”, utilizado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), refere-se a qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, seja devida à variabilidade natural ou à atividade humana. O Terceiro Relatório do IPCC (2001) projeta, para o final do século 21, elevações de temperatura da ordem de 1,4°C, no cenário mais otimista (B2), e 5,8°C, no caso mais pessimista (SRA2). Já, o Quarto Relatório do IPCC (2007) estima que a média da elevação mundial possa chegar a 4°C até o fim do século 21.

Para o setor agrícola, que é de fundamental importância para a economia nacional, o clima constitui-se um dos seus principais fatores, pois através das suas condições em determinadas regiões é possível estabelecer parâmetros ambientais adequados para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Sugerido por Costa (1994), a duração das fases fenológicas de uma cultura, avaliada pelo número de dias, varia entre regiões, anos e datas de semeadura, em razão das variações de parâmetros, como umidade relativa, temperaturas do ar e do solo, chuva, radiação solar e fotoperíodo. Dessa forma, possíveis alterações nos padrões do clima podem penalizar o ciclo das cultivares e os agricultores que usufruem o primeiro setor como fonte de renda. Estudos feitos por Camargo (1985) e Pinto *et al.* (2001) mostram que a ocorrência frequente de temperaturas máximas superiores a 34°C causa o abortamento de flores e, conseqüentemente, perda de produtividade do café arábica. Além disso, pode-se destacar que, para a agricultura brasileira, até o início da década de 90, o mais importante fator de risco climático era a precipitação pluvial, pois a seca e a chuva excessiva respondiam pela maioria dos sinistros agrícolas (GÖPFERT *et al.*, 1993).

Devido ao alto nível de perdas na agricultura, foi instituído, em 1996, o programa de zoneamento de riscos climáticos no Brasil, adotado, desde então, como política pública pelos Ministérios da Agricultura (MAPA) e do Desenvolvimento Agrário (MDA). O zoneamento serve de base para a concessão de créditos e de seguros agrícolas e, segundo Assad *et al.* (2001), estabelece, estatisticamente, uma orientação aos produtores quanto aos tipos de cultura a serem plantadas em cada região e período de plantio, com menor risco climático, ou seja, o que, quando e onde plantar. É importante ressaltar que o programa de zoneamento de riscos climáticos admite perdas máximas de 20% das safras, aumentando indiretamente a

produtividade agrícola. A implementação do Zoneamento Agrícola pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) tem permitido ao agricultor utilizar tecnologias adequadas à semeadura, utilizar racionalmente o crédito agrícola, melhorar o uso dos equipamentos agrícolas, proteger o solo e o ambiente, planejar adequadamente sua atividade, reduzir os custos e os riscos de produção e, especialmente, aumentar a produção e a produtividade nacional (ROSSETTI, 2001).

Segundo Cunha e Assad (2001), o zoneamento agrícola de riscos climáticos baseia-se em tecnologia de modelagem agrometeorológica, técnicas de análise de decisão e geoprocessamento, feitos por espacialização das culturas no território nacional, considerando as variáveis agroclimáticas. O zoneamento de riscos climáticos difere do zoneamento de potencial agrícola, pois avalia a classe de risco de uma determinada região para um tipo de cultura, não só com dados meteorológicos de chuva e temperatura, mas também com índices específicos desenvolvidos para apontar a sensibilidade das culturas a eventos extremos que podem ocorrer em fases fenológicas críticas da planta, fazendo com que o uso de geoprocessamento e de imagens de satélites seja fundamental nesse processo. No entanto, com os possíveis impactos decorrentes das mudanças climáticas, a distribuição agrícola tende a rearranjar-se nos anos vindouros.

As mudanças do clima são melhor compreendidas por modelos computacionais que se apresentam como ferramentas robustas para simular os cenários do clima futuro. No quarto relatório do IPCC (2007), 21 modelos computacionais dos principais centros de pesquisa climatológicas do mundo foram avaliados e apresentaram resultados das simulações e suas possíveis consequências em algumas variáveis meteorológicas. No entanto, para que as tomadas de decisões dos setores sociais, energéticos e econômicos sejam adequadas no futuro, é fundamental que se agreguem conhecimento desde então para reduzir os possíveis impactos adversos das mudanças do clima.

Com base no exposto acima, foi levantada a hipótese que modelos distintos de projeção climática global produzem respostas com diferenças significativas no zoneamento agrícola de riscos climáticos. Para essa verificação, foi utilizada neste trabalho exatamente a mesma metodologia do zoneamento de riscos climáticos, levando-se em conta as anomalias de temperatura média do ar e precipitação, que eventualmente poderão acarretar variações na

evapotranspiração e no balanço hídrico. Essas anomalias representam a média do período de 2010-2039 no cenário de emissão de gases SRA2.

O objetivo do trabalho foi avaliar as diferenças entre os modelos climáticos globais apontados pela *clusterização* do algoritmo *k-means*, o HadCM3 e o MIROCmed. Esses modelos são propostos por centros especializados em previsão de tempo e clima no mundo, gerando as anomalias que serviram de fonte para a avaliação dos impactos de mudanças climáticas em três culturas agrícolas de grande importância para o país: cana-de-açúcar (semi-perene), café (perene) e milho (anual).

Podem também ser citados como objetivos específicos do projeto: verificação das possíveis mudanças nas classes de risco climático para as datas de plantio, número de municípios, valores e áreas de produção das três culturas devido às variações de temperatura e/ou chuva segundo as mudanças climáticas apontadas pelos modelos do IPCC. Além disso, foi possível testar um método que agrupasse os modelos climáticos globais existentes segundo suas informações físico-químicas. É importante destacar que área de estudo abrangeu os estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais, pois possuem áreas representativas dos respectivos cultivos estudados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos

O zoneamento agrícola de riscos climáticos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é uma ferramenta de política agrícola e gestão de riscos na agricultura, que está sob a responsabilidade da Coordenação-Geral de Zoneamento Agropecuário, subordinada ao Departamento de Gestão de Risco Rural, da Secretaria de Política Agrícola do MAPA. Segundo Assad (2004), em 1990, a Embrapa Cerrados promoveu uma “Feira de Informática Aplicada à Agricultura” que apresentou, dentre outros, um programa de computador que caracterizava as chuvas nos Cerrados. Devido ao elevado interesse pelo assunto, começou uma parceria entre a Embrapa e o MAPA, cujo resultado final foi a implantação, por parte do Ministério, do Projeto de Redução de Riscos Climáticos na Agricultura, a partir de outubro de 1995, o qual se constituiu no primeiro passo para a concretização do Zoneamento Agrícola no Brasil.

Diferentemente de outros zoneamentos existentes, que foram elaborados com base nos conceitos de potencialidade e aptidão, o zoneamento agrícola de riscos climáticos, além das variáveis analisadas (clima, solo e planta), utiliza funções matemáticas e estatísticas (frequentistas e probabilísticas) com objetivo de quantificar o risco de perda das lavouras com base no histórico de ocorrência de eventos climáticos adversos, principalmente seca em fases críticas das culturas e o excesso de chuvas na colheita.

Com isso, após analisar séries históricas de dados meteorológicos, identifica-se, para cada município, a melhor época de semeadura para as culturas anuais nos diferentes tipos de solo e ciclos das cultivares, dentro de níveis de risco de perda pré-estabelecidos. Apesar da metodologia científica ser relativamente complexa, os indicadores resultantes e sua aplicação prática é de fácil entendimento e adoção pelos produtores rurais, extensionistas, agentes financeiros, seguradoras e demais interessados.

Essa ferramenta técnico-científica, resultante do trabalho de equipe técnica multidisciplinar, utiliza metodologia desenvolvida por diversas instituições federais e estaduais de pesquisa agrícola, como a Embrapa, IAPAR, EPAGRI/SC, IAC/SP, Fundações e Universidades, visando indicar datas ou períodos de plantio por município, correlacionados ao

ciclo da cultura e tipo de solo, de modo a minimizar a chance das adversidades climáticas coincidirem com a fase mais sensível das culturas ou com a colheita.

Esse trabalho é revisado anualmente e divulgado pelo MAPA em portarias publicadas no Diário Oficial da União, por Unidade da Federação, servindo de orientação para o crédito de custeio agrícola oficial. Além disso, o zoneamento agrícola também é divulgado de forma eletrônica pelos sites www.agricultura.gov.br e www.agritempo.gov.br.

Apesar da informação não ser utilizada diretamente na metodologia desenvolvida para o zoneamento agrícola de riscos climáticos, os dados de produção agrícola municipal são fatores a serem considerados. A partir deles e da experiência de especialistas regionais é que se verifica e analisa o histórico de produção para determinada cultura no município e avalia, portanto, se a região ou o município estudado possuem produções agrícolas bem sucedidas ou recorrência de perdas. Nessa etapa é importante dimensionar as áreas plantadas e colhidas, a produtividade e a variabilidade da produção em um intervalo de tempo, confrontando com as médias estadual e nacional, com a finalidade de obter um diagnóstico preliminar do potencial da região. Essas informações são levantadas em órgãos oficiais, tais como, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) ou Secretarias Estaduais.

Os solos são agrupados em três categorias, quanto à sua capacidade de retenção de água: Arenoso (Tipo 1), Textura média (Tipo 2) e Argiloso (Tipo 3). Os valores de teor de argila e areia para os três grupos são:

- a) Tipo 1: solos com teor de argila maior que 10% e menor ou igual a 15%
- b) Tipo 2: solos com teor de argila entre 15% e 35% e teor de areia menor que 70%
- c) Tipo 3: solos com teor de argila maior que 35%

Segundo as orientações técnicas das Portarias do Zoneamento Agrícola publicadas pelo MAPA, é expressamente proibido o plantio de qualquer cultura que esteja nas seguintes condições:

- a) Em áreas de preservação obrigatória, de acordo com a Lei 4.771 do Código Florestal
- b) Em solos que apresentem teor de argila inferior a 10% nos primeiros 50 cm de solo
- c) Em solos que apresentem profundidade inferior a 50 cm
- d) Em solos que se encontra em áreas com declividade superior a 45%

- e) Em solos muito pedregosos, isto é, solos nos quais calhaus e matacões (diâmetro superior a 2 mm) ocupam mais de 15% da massa e/ou da superfície do terreno.

No caso de culturas anuais, são listadas todas as cultivares indicadas no zoneamento agrícola pelos seus obtentores/detentores (mantenedores), agrupadas por ciclo de maturação fisiológica. Para a indicação das cultivares, é necessário que estejam registradas no Registro Nacional de Cultivares - RNC do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. No caso de culturas perenes, são indicadas todas as cultivares registradas no RNC, sem constar cada uma delas nas portarias de Zoneamento.

Em uma mesma cultura, o ciclo pode variar dependendo da cultivar, que são agrupadas em ciclos precoces, semi-precoces, médios ou intermediários e tardios. Pode-se definir ciclo como o número de dias corridos desde a emergência da planta até a sua maturação. A soja, por exemplo, tem cultivares agrupadas em ciclos precoce, médio e tardio.

O zoneamento agrícola de riscos climáticos segue uma divisão de 36 decêndios por ano, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela dos períodos de plantio anual do zoneamento agrícola de riscos climáticos.

Meses	JAN			FEV			MAR			ABR		
Datas	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-28	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30
Períodos	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12

Meses	MAI			JUN			JUL			AGO		
Datas	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-31
Períodos	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Meses	SET			OUT			NOV			DEZ		
Datas	1-10	11-20	21-30	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30	1-10	11-20	21-31
Períodos	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

2.1.1 Evapotranspiração Potencial (ETP)

Dentro do método do zoneamento agrícola, é importante entender os conceitos de Evapotranspiração e Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA). Segundo Thornthwaite (1948), a Evapotranspiração Potencial (ETP) é uma estimativa da perda de água do solo por evaporação em conjunto com a transpiração produzida pelas plantas, em uma determinada situação climática, considerando que o solo esteja completamente gramado e com bom suprimento hídrico. Pode-se considerar a ETP como o processo oposto à precipitação, pois representa a água em estado gasoso que retorna de forma forçada para a atmosfera, sendo também expressa em milímetros (CAMARGO e CAMARGO, 2000). No presente trabalho, assim como no zoneamento agrícola, os dados de ETP para cada estação consistem em um valor para cada um dos 36 decêndios do ano.

A ETP pode ser expressa como função da temperatura, de acordo com o método de Camargo (1983) expresso na equação (1).

$$ETP = T Q_0 n K \quad (1)$$

2.1.2 Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA)

A fim de avaliar a disponibilidade de água no solo durante as fases críticas das culturas, é utilizado um índice hídrico, o ISNA (Índice de Satisfação da Necessidade Hídrica), representado pela relação entre a Evapotranspiração Real (ETR) e a Evapotranspiração Máxima (ETM) que pode ser expressa na equação (2). A Evapotranspiração Real (ETR) é a quantidade de água realmente evapotranspirada por uma determinada cultura. No entanto, a Evapotranspiração Máxima (ETM) é a quantidade máxima de água evapotranspirada, considerando qualquer fase do desenvolvimento do ciclo de uma cultura, quando a resistência dos estômatos for mínima (DOOREMBOS e KASSAM, 1994).

$$ISNA = ETR / ETM \quad (2)$$

2.1.3 Coeficiente de Cultura (K_c)

O coeficiente de cultura (K_c) é um indicador de significado físico e biológico, pois depende da área foliar, parte aérea e sistema radicular, cobertura vegetal e da transpiração da planta (JENSEN, 1969; WRIGHT, 1982; ALLEN *et al.*, 1994).

2.2 Culturas Agrícolas

2.2.1 Café Arábica

O cafeeiro é uma planta perene de clima tropical pertencente à família *Rubiaceae* e apresenta por volta de 80 espécies distintas. Dentre as espécies conhecidas do gênero *Coffea*, existe uma ampla distribuição geográfica pelo continente Africano, principalmente em Madagascar e regiões circunvizinhas (BERTHAUD e CHARRIER, 1988). Apesar de haver um grande número de espécies de café, apenas o *Coffea arabica* L. e o *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner têm importância na economia mundial (BERTHAUD e CHARRIER, 1988). No Brasil, 67% provém de cultivares selecionadas em *Coffea arabica*, e o restante, 37%, em *Coffea canephora* (AGRIANUAL, 2005). Segundo o banco de dados agregados do IBGE (2009), a produção brasileira de café atingiu o total de 2.440.056 toneladas de grãos, sendo o estado de Minas Gerais o seu maior produtor (49% do total), São Paulo na terceira colocação (8,1%) e Paraná na sexta colocação (3,7%). Além disso, o Brasil configura-se como o maior exportador mundial dessa cultivar e o segundo maior consumidor, superado apenas pelos Estados Unidos. A quantidade produzida de café em 2009 pelos estados em percentagem podem ser vistas na Figura 1 abaixo:

Quantidade Produzida de Café (2009) - % Toneladas de Grãos

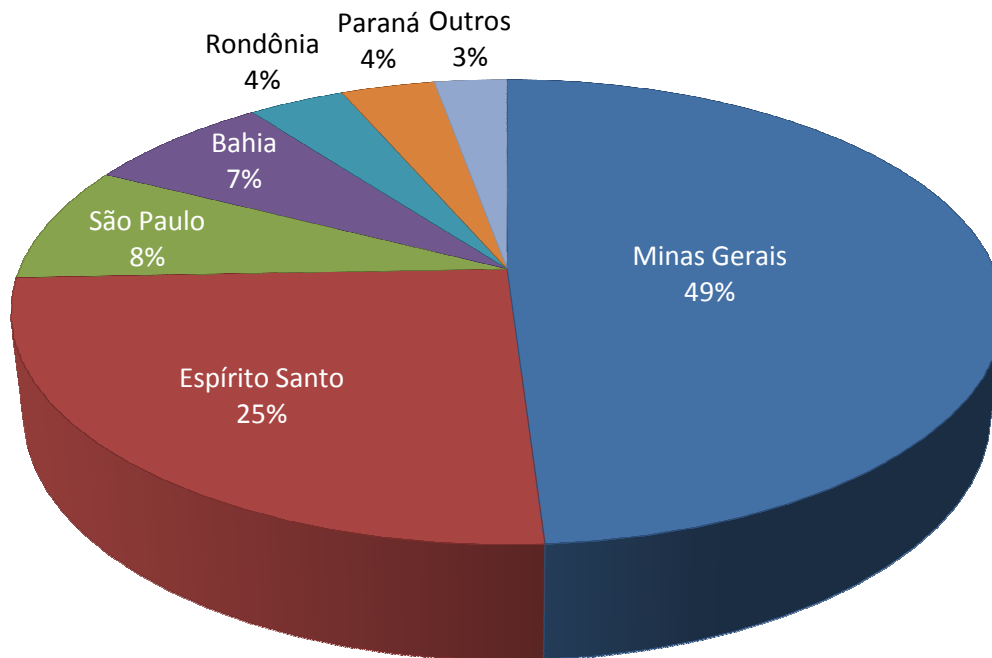


Figura 1 – Quantidade produzida pelos estados na safra do café no ano de 2009. Fonte: IBGE (2009).

O café chegou ao norte do Brasil, mais precisamente em Belém, em 1727, trazido da Guiana Francesa pelo Sargento-Mor Francisco de Mello Palheta a pedido do governador do Maranhão e Grão Pará, que o enviara às Guianas com essa missão, pois já naquela época, o café possuía grande valor comercial (TAUNAY, 1939). Desde então, devido às nossas condições climáticas, o café difundiu-se pelo país inteiro rapidamente e por quase um século foi o produto que alavancou o crescimento econômico do Brasil, assim como inseriu o país nas relações internacionais do comércio.

2.2.1.1 Clima e Solo

Segundo Camargo e Pereira (1994), a temperatura média anual das áreas tropicais da Etiópia onde o café é oriundo situa-se entre 18°C e 20°C, com temperaturas mínimas variando de 4°C a 5°C, e máximas variando de 30°C a 31°C, sendo também que a precipitação anual para o melhor desenvolvimento do café encontra-se por volta dos 1200 mm (MATIELLO,

1991). Quando a temperatura média anual do ar é inferior a 18°C, pode haver um retardo no período de dormência das gemas florais e o desenvolvimento dos frutos torna-se mais lento (CAMARGO e PEREIRA, 1994). Além disso, a ocorrência frequente de temperaturas máximas superiores a 34°C acarreta o abortamento de flores e, conseqüentemente, perda considerável de produtividade (CAMARGO, 1985; PINTO *et al.*, 2001; SEDIYAMA *et al.*, 2001). De acordo com Drinnan e Menzel (1995), temperaturas entre 28°C e 33°C provocam uma redução na produção de folhas e na atividade fotossintética do cafeeiro.

Os solos mais adequados ao cultivo do cafeeiro são os profundos, porosos e bem drenados, com uma média estrutura granular e moderadamente desenvolvida. A textura mais favorável é a média, não sendo recomendados solos com teor de argila menor que 20% (SEDIYAMA *et al.*, 2001).

2.2.1.2 Fenologia

Como se pode observar na Figura 2, a fenologia do cafeeiro arábica possui, em seu primeiro ano, a formação dos ramos vegetativos com gemas axilares nos nós e através das condições do clima são induzidas a se transformarem em gemas reprodutivas. As gemas florais, posteriormente, amadurecem e ficam aptas para a abertura das flores (antese), muito dependente da presença de precipitação. Já dentro do segundo ano fenológico, a florada evolui para o grão expandido, fase em que se houver um considerável estresse hídrico, o crescimento do fruto estará comprometido. Após essa fase, que ocorre em pleno verão austral, acontece a granação dos frutos e, a partir de abril, inicia-se o período de maturação.

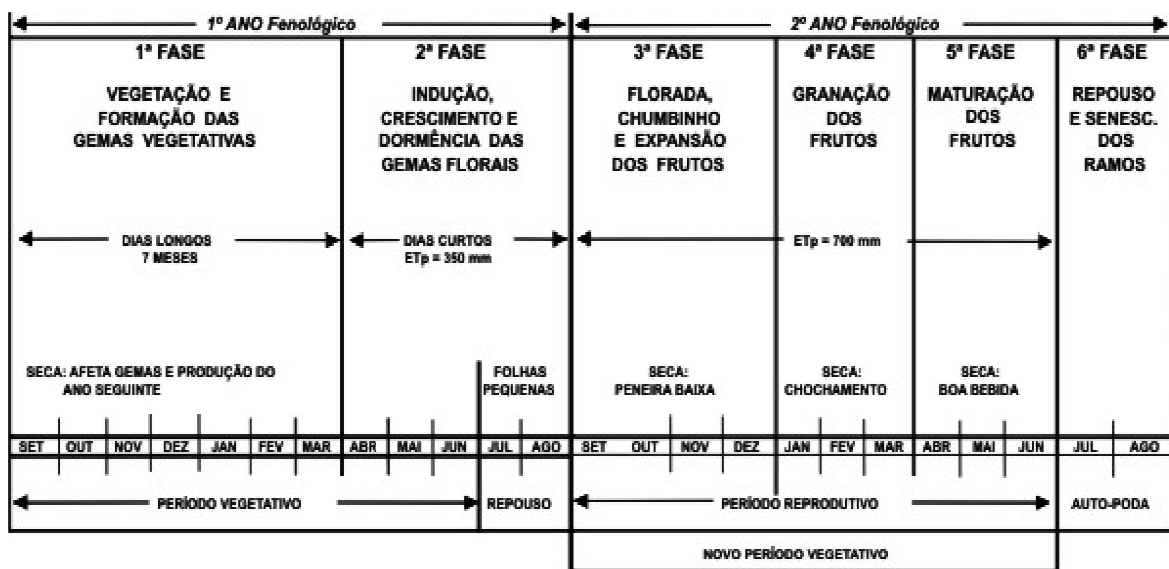


Figura 2 – As seis fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições do clima tropical do Brasil (CAMARGO e CAMARGO, 2001).

2.2.2 Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta do gênero *Saccharum officinarum* L. proveniente do sudeste da Ásia. É uma planta em que o primeiro produto da fixação do CO₂ é um composto de quatro carbonos (C4) e se encontra dentro da família Poaceae, juntamente com milho, sorgo, arroz e muitas outras gramíneas. As principais características dessa família são a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta. Esta gramínea possui elevadas taxa fotossintética e produtividade biológica, sendo uma das culturas mais eficientes e produtivas (IRVINE, 1980).

. As primeiras mudas de cana-de-açúcar chegaram em 1532, na expedição marítima de Martim Afonso de Souza, onde se espalhou em solo fértil e clima tropical quente e úmido. Foi a base da economia do nordeste brasileiro na época dos engenhos, utilizando mão-de-obra escrava, primeiramente indígena e em seguida majoritariamente de origem africana. A produção se expandiu no país tendo suporte político e culminou em 1975, com o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), que visou autonomia energética. Após algumas instabilidades, o álcool voltou a estar em alta com a grande difusão nacional dos carros bicompostíveis (flex).

Os maiores consumidores e, concomitantemente, os maiores produtores de açúcar do mundo, são responsáveis por 59% da produção mundial de açúcar. O Brasil é o maior produtor com uma participação de, aproximadamente, 21% da produção mundial. O segundo e o terceiro maiores produtores de açúcar são a Índia e a China, com uma participação aproximada de 15% e 10%, respectivamente.

Internamente, segundo o banco de dados agregados do IBGE (2009), a produção brasileira de cana-de-açúcar foi de 672.156.957 de toneladas, sendo o estado de São Paulo o seu maior produtor (57,9% do total), Minas Gerais na segunda colocação (8,7%) e o Paraná na terceira colocação (8,0%). A quantidade produzida de cana em 2009 pelos estados em percentagem podem ser vistas na Figura 2 abaixo:

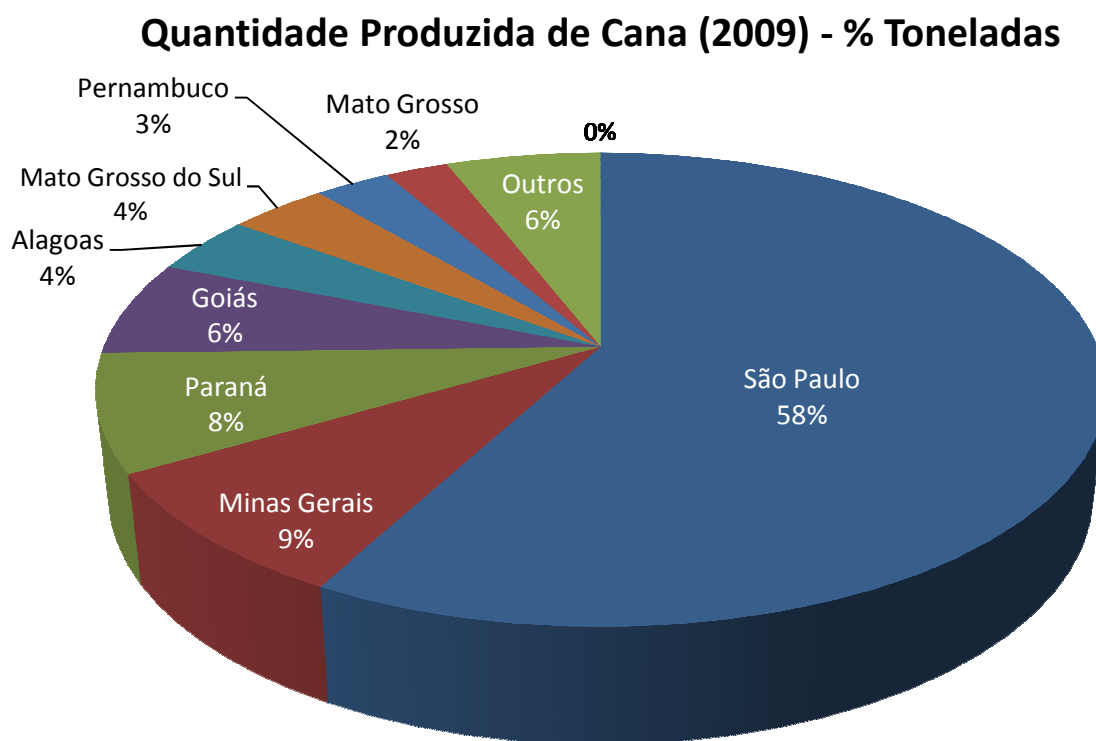


Figura 3 – Quantidade produzida pelos estados na safra da cana-de-açúcar no ano de 2009. Fonte: IBGE (2009).

2.2.2.1 Clima e Solo

A cultura da cana engloba vários climas, pois é cultivada entre as latitudes 35°N e 35°S, além de altitudes que variam de 0 a 1000 metros (DOORENBOS E KASSAM, 1994; MAGALHÃES 1987). A temperatura é um dos fatores meteorológicos de maior importância para o cultivo da cana-de-açúcar. Pode-se considerar a temperatura ótima para essa cultura, ou seja, temperatura onde o crescimento é máximo, em torno de 22°C e 30°C. Ressaltando que, acima de 38°C, cessa-se o crescimento (BARBIERI *et al.*, 1979). Quando observou as temperaturas mínimas, Grodzki *et al.* (1996) traçou uma relação entre a ocorrência da geada e a temperatura mínima no abrigo termométrico e verificou a existência de um gradiente de temperatura que varia, aproximadamente, de 3°C a 4°C entre o abrigo (localizado a 1,5 metro da superfície do solo) e a relva. Desta forma, temperaturas mínimas no abrigo em torno de 3°C correspondem a -1°C na relva, que pode causar danos à cana-de-açúcar. Para isso não há necessidade do congelamento da água, bastando uma queda brusca da temperatura (geada agrônômica), já que a temperatura base desta cultura encontra-se em 18°C (WREGGE *et al.*, 2005).

Segundo a avaliação da EMBRAPA (2006), a cana-de-açúcar no Brasil é cultivada em solos com profundidades maiores a um metro, pois suas raízes podem explorar volumes maiores. Os solos ainda devem apresentar baixa deficiência hídrica, boa capacidade de infiltração e capacidade de armazenamento de água (CAD) em torno 150 milímetros. Os solos arenosos são menos indicados para a cultura, pois apresentam baixa capacidade de armazenamento de água e ainda propiciam perdas de nutrientes por lixiviação e aumento da população de nematóides.

2.2.2.2 Fenologia

Segundo Gascho e Shih (1983), a cana-de-açúcar apresenta quatro diferentes fases em sua fenologia. Na primeira fase, ocorre a brotação e a emergência, onde o broto ou colmo primário surge e ainda é sucedido pelo enraizamento inicial e o aparecimento das primeiras folhas. Na segunda fase, ocorre o perfilhamento, que é o processo de emissão de colmos pela mesma planta, e a formação da touceira, que é o resultado do desenvolvimento radicular de

cada perfilho. A terceira fase caracteriza-se pelo crescimento dos colmos que após o auge do perfilhamento continua se desenvolvendo pela umidade, luz e calor. Nessa fase, o canavial pode atingir até 3 metros de altura. A etapa final da fenologia dessa cultura é a maturação, e inicia-se, concomitantemente, ao crescimento intenso dos colmos que restaram do perfilhamento das touceiras. Seguindo no tempo, ocorre o amarelecimento e a seca das folhas, indicando a intensa deposição de açúcar. A fenologia da cana-de-açúcar é ilustrada na Figura 4.

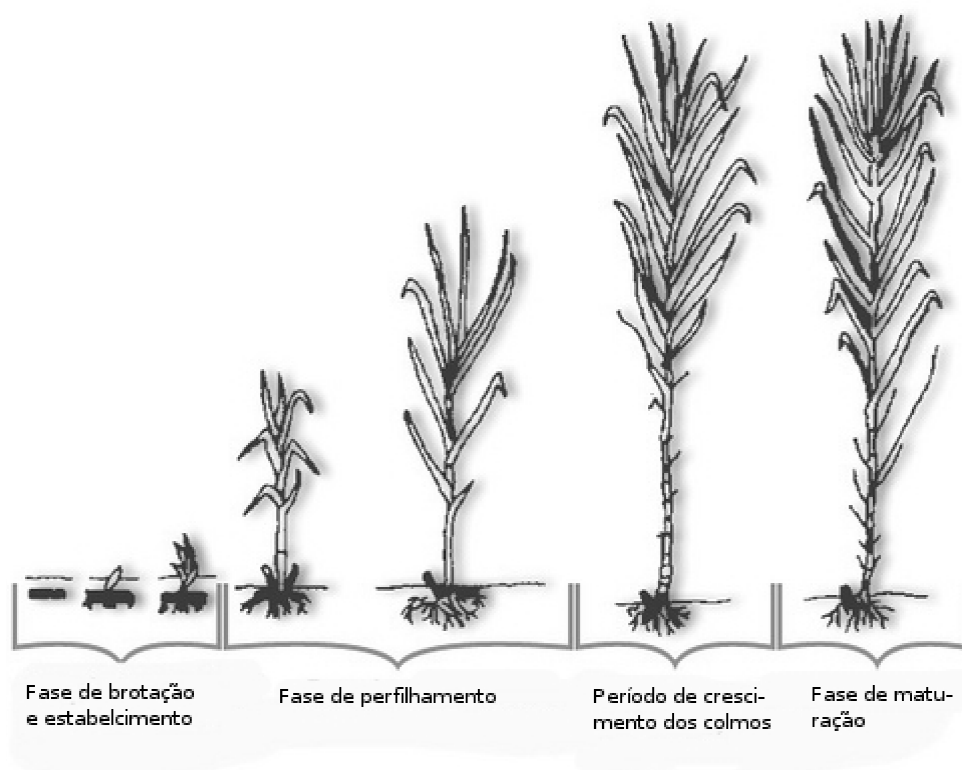


Figura 4 – Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Adaptado de GASCHO e SHIH (1983).

2.2.3 Milho

O milho é uma planta da família *Gramineae* e da espécie *Zea mays*, pertencente ao grupo C4. Cultivado em uma ampla faixa territorial compreendida entre as latitudes de 58°N a 40°S, desenvolve-se desde o nível do mar até 3.800 metros de altitude (HALLAUER e MIRANDA FILHO, 1988). Das espécies vegetais existentes, o milho lidera as pesquisas

genéticas, pois, segundo Nass e Paterniani (2000), devido à cultura possuir importância econômica, fácil reprodução manual com possibilidade de gerar diferentes tipos de progênies, contribui para este cereal ser um modelo para as espécies alógamas.

Segundo relatos históricos, junto com o Novo Continente (América), Cristóvão Colombo também redescobriu o milho, já que era utilizado como fonte energética pelos índios da região. Na Europa, o produto teve penetração inicialmente apenas nas classes mais humildes, já que sofria preconceito da elite por também se tratar de um alimento que suplementava a ração animal. Porém, logo se espalhou pelo Velho Continente como ingrediente para a polenta italiana e o fubá na França. No Brasil, há informações do milho desde a época dos portugueses que utilizavam como base da alimentação juntamente com a mandioca. Depois da utilização das matrizes americanas, a cultura se tornou uma das mais importantes do mundo.

Atualmente no Brasil existe também o plantio do milho safrinha (segunda safra) que foi implantado no Paraná no início dos anos 80 e acabou ganhando destaque como opção econômica na entressafra (PITOL *et al.*, 1995). A produção brasileira de milho de primeira safra no ano de 2008 foi de 39.828.794 toneladas de grãos, tendo como seu maior produtor o estado do Paraná, com 24,3% do total, sendo que os estados de Minas Gerais e São Paulo ocuparam o segundo e sexto lugares, respectivamente (IBGE, 2008). Já o milho de segunda safra ou safrinha, teve a quantidade produzida de 19.104.553 toneladas de grãos, sendo o estado do Mato Grosso o maior produtor, com 36,7% do total, e os estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais ocuparam o segundo, quinto e sétimo lugares, respectivamente, de acordo com o Banco de Dados Agregados do IBGE (2008).

A Figura 5 mostra a quantidade produzida da cultura nas duas safras, no ano de 2009, segundo o IBGE (2009).

Quantidade Produzida de Milho (2009) - % Toneladas

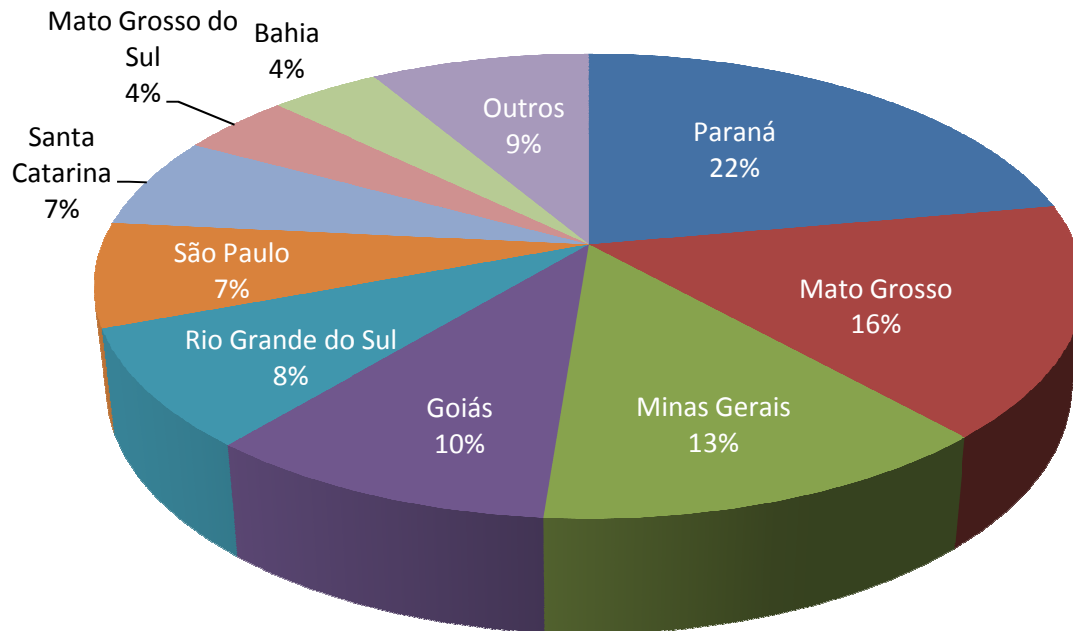


Figura 5 – Quantidade produzida pelos estados brasileiros nas safras do milho no ano de 2009. Fonte: IBGE (2009).

2.2.3.1 Clima e Solo

Segundo Fornasieri Filho (1992), o ciclo e o aspecto genético são definidos por variáveis meteorológicas como precipitação pluvial, temperatura, comprimento do dia e radiação solar. No entanto, para a obtenção de um maior potencial de rendimento, a cultura requer temperatura entre 24°C e 30°C, radiação solar elevada e adequada disponibilidade hídrica no solo (SILVA, 2001).

Limitações agrometeorológicas, como a deficiência hídrica durante o período vegetativo, podem atrasar a ocorrência de alguns estádios fenológicos e implicar em necessidade de maior acúmulo de graus-dia para o término do ciclo da cultura. Como discutido em França *et al.* (1999), também afetam negativamente o índice de área foliar e o acúmulo de matéria seca na parte aérea. Na cultura do milho, pode-se afirmar que, na maioria dos casos, o espigamento é mais suscetível às influências externas em comparação ao

pendoamento, gerando problemas como a defasagem temporal entre a liberação dos polens e a emissão de estigmas, reduzindo o número de grãos por espiga (SILVA, 2001).

Os solos mais recomendados para a cultura do milho são os de textura média com teores de argila em torno de 30-35%, os quais permitem uma drenagem adequada, retenção hídrica satisfatória e disponibilidade de nutrientes às plantas. No entanto, solos arenosos (com teor de argila inferior a 15%) possuem baixa retenção hídrica e alta lixiviação, sendo inadequados para a cultura do milho.

2.2.3.2 Fenologia

A cultura do milho transcorre por vários estádios de desenvolvimento como pode ser visto na Figura 6. A emergência das plântulas ocorre em torno de quatro a cinco dias após a semeadura e, logo após uma semana, uma folha já começa a se desenvolver.

No estágio V3 já se percebe a presença de aproximadamente três folhas em franco desenvolvimento, começando a definir as espigas e a quantidade de folhas que irá produzir. Nesta fase, a folha estabelece o seu potencial produtivo através do seu número máximo de grãos.

No estágio V6, o ponto de crescimento e o pendão já estão acima do solo e existe uma alta demanda por nutrientes nitrogenados. Atingindo o estágio V8, ocorrem as quedas das primeiras folhas e inicia-se a definição do número de fileiras de grãos nas espigas. O excesso de precipitação pluvial é bastante tolerado pela planta, porém, encharcamentos por períodos superiores a cinco dias podem acarretar prejuízos consideráveis. Em contrapartida, o estresse hídrico nesse período diminui a capacidade de armazenamento de açúcar no colmo, resultando em plantas de menor porte.

Quando a planta atinge o estágio V9, ocorre alta taxa de desenvolvimento dos órgãos florais, sendo que o pendão inicia um rápido desenvolvimento e o caule permanece alongado. Próximo ao estágio V10, a planta do milho começa um rápido e contínuo crescimento que permanecerão até os estádios reprodutivos. Nesse período, desenvolvem-se as raízes adventícias ou ‘esporões’ e estilos-estigmas ou ‘cabelos’, culminando com o pendoamento.

No estágio de pendoamento (VT) as espigas apresentam, na maioria dos casos, a exposição dos ‘cabelos’ que, individualmente, deve emergir e ser polinizado para resultar em

um grão. Após a polinização, o grão passa pelos estádios que vão de R2 a R6, sendo este ultimo, o estágio onde todos os grãos da espiga alcançam o peso máximo seco e, a partir desta fase, as folhas entram em senescência.

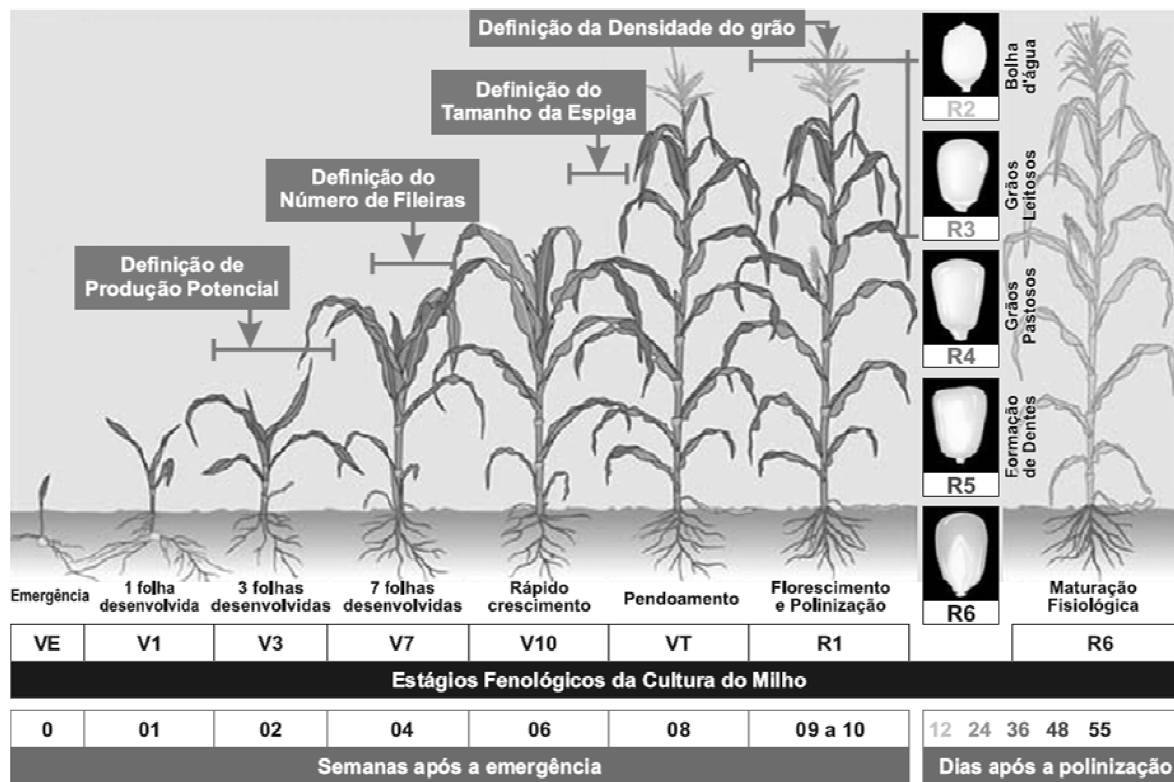


Figura 6 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho. Adaptado de FANCELLI (1986) e IOWA STATE UNIVERSITY EXTENSION (1993).

2.2.3.3 K_c do milho

Os valores do coeficiente de cultura do milho são influenciados pelas características da variedade ou cultivar empregada, época de semeadura, estágio de desenvolvimento da cultura e condições gerais de clima. A Figura 7 mostra a evolução do K_c do milho ao longo do seu ciclo.

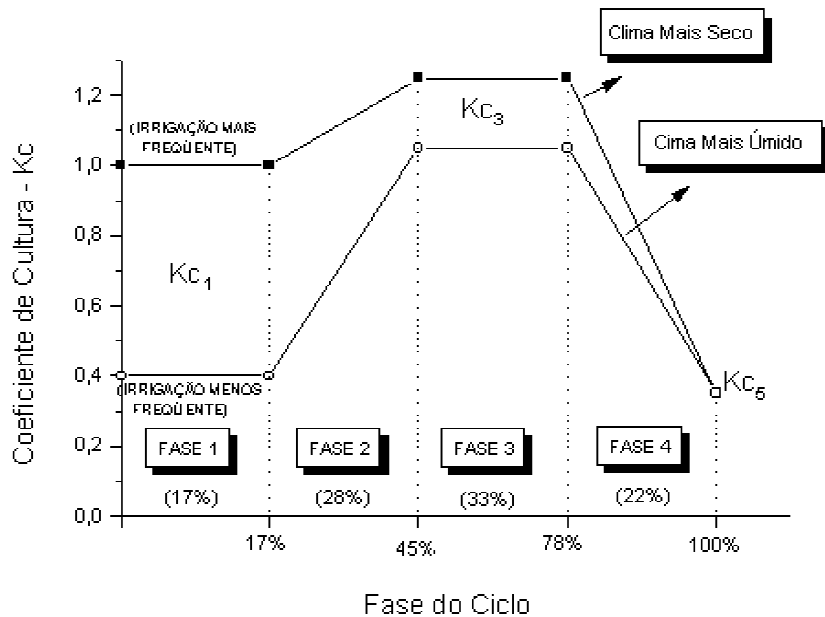


Figura 7 – Coeficientes de cultura em função da percentagem do ciclo de crescimento em duas condições de clima (EMBRAPA, 2009).

2.3 Mudanças Climáticas

A elevação da concentração dos gases de efeito estufa (GEE), resultante da intensificação das atividades antrópicas, tem causado alterações significativas no clima, como pode ser visto em IPCC (2007), sendo que o aumento da temperatura do planeta pode ser um dos efeitos principais desse fato. A temperatura da superfície terrestre aumentou, aproximadamente, 0,2°C por década, nos últimos trinta anos, e 0,8°C no século passado, existindo a probabilidade que a temperatura média global eleve-se de 2,0°C a 4,5°C durante o século XXI (IPCC, 2007). Além disso, o aquecimento global pode alterar os padrões de variabilidade de grande escala oceânica e atmosférica. Isso pode ser visto nas projeções de diversos modelos que indicam eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS) mais intensos, como já foi observado em Boer *et al.* (2000).

Na Figura 8 tem-se a série temporal das temperaturas mínimas médias do município de Campinas-SP que ilustra o aumento gradativo dessa variável no decorrer do período.

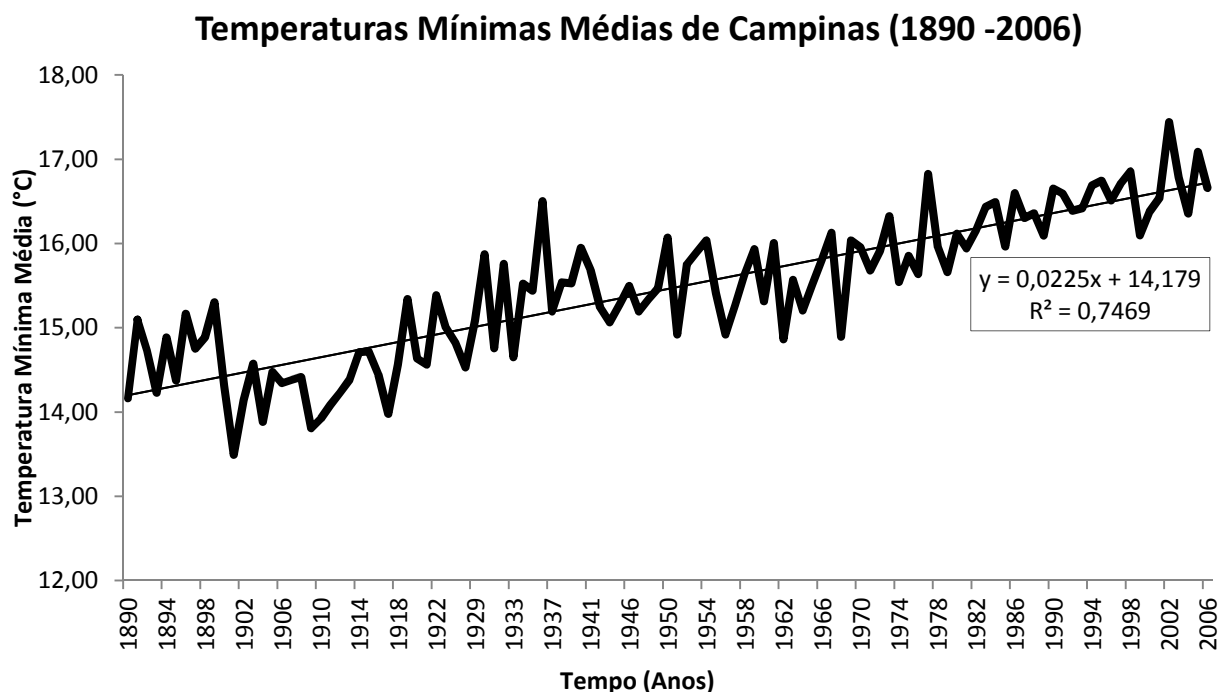


Figura 8 – Temperatura Mínimas Médias do município de Campinas-SP no período de 1890 a 2006. Fonte: IAC/SAA

2.3.1 Cenários de emissão de gases do Quarto Relatório do IPCC (AR4)

No quarto relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), seis grupos de cenários diferentes foram descritos analisando as consequências possíveis do aumento dos GEE na atmosfera. Esses cenários foram denominados de: A1B, A1F1, A1T, A2, B1 e B2. De acordo com o IPCC (2007), o contexto e a família de cenários A2 descrevem um mundo muito heterogêneo. O tema subjacente é a auto-suficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, o que acarreta um aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado primeiramente para a região e o crescimento econômico *per capita* e a mudança tecnológica são mais fragmentados, além de serem mais lentos que nos outros contextos. No caso do cenário A1, o contexto e a família desse cenário descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. Existe convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda per capita. A família de

cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1F1), fontes energéticas não-fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B).

O cenário B2 descreve um mundo em que a ênfase está nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo em que a população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior à do A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica menos rápida e mais diversa do que nos contextos B1 e A1. O cenário está orientado, também, para a proteção ambiental e a equidade social, mas seus focos são os níveis locais e regionais. Todos esses cenários mostram, além da elevação da temperatura, uma aceleração significativa no ritmo dessa elevação.

O contexto e a família de cenários B1 descrevem um mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, como no cenário A1, mas com uma mudança rápida nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informação, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos. A ênfase está nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, inclusive a melhoria da equidade, mas sem iniciativas adicionais relacionadas com o clima B1. A Figura 9 apresenta a evolução das emissões e concentrações de CO₂ para os diferentes cenários do IPCC/AR4.

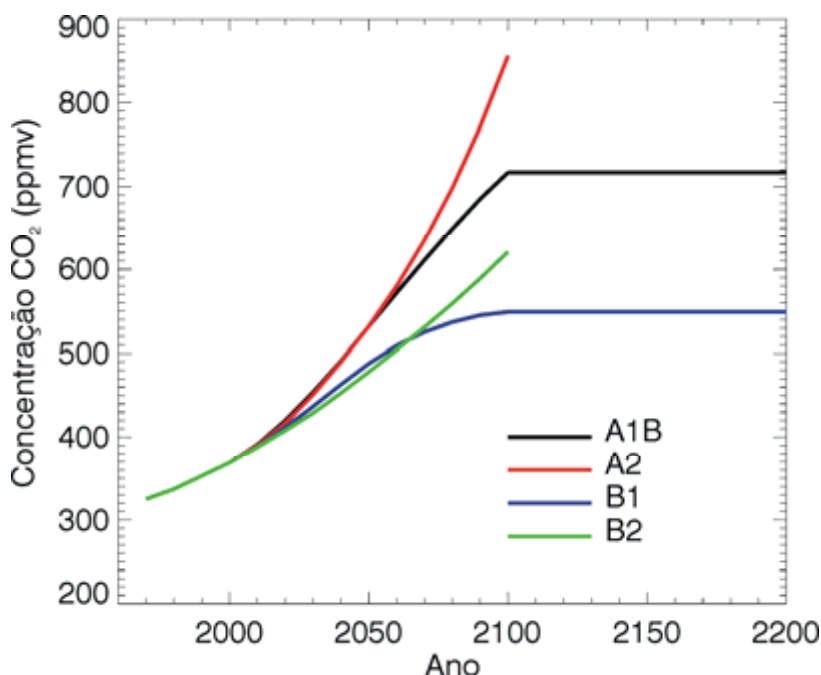


Figura 9 – Evolução das concentrações de CO₂ para diferentes cenários do IPCC/AR4. Fonte: IPCC (2007).

2.3.2 Modelos Climáticos Globais

Modelos de Circulação Geral (MCG) são modelos matemáticos de circulação geral da atmosfera planetária ou oceânica baseados nas equações de Navier-Stokes em uma esfera rotativa de fontes termodinâmicas. As equações diferenciais parciais não-lineares de Navier-Stokes são utilizadas para descrever o movimento turbulento dos fluidos e surgiram da aplicação da Segunda Lei de Newton ao movimento dos fluidos. Em suma, estabelecem que mudanças no momento e na aceleração de uma partícula fluida são simplesmente o produto das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas atuando dentro do fluido.

Juntamente com o gelo oceânico e os constituintes da superfície da terra, são componentes fundamentais dos Modelos Climáticos Globais, os Modelos de Circulação Geral Atmosférica (MCGA) e os Modelos de Circulação Geral Oceânica (MCGO). Quando estes dois últimos são acoplados, gera um Modelo de Circulação Geral Acoplado (MCGA) ou Modelo de Circulação Geral Oceano-Atmosfera (MCGOA). Desta forma, quando outros pequenos modelos como o de Gelo Oceânico ou Evapotranspiração são anexados, produz-se um completo Modelo Climático, muito utilizado para previsões de tempo, clima e projeções climáticas.

Modelos que incluem componentes climáticos detalhados precisam de muitos recursos computacionais para produzir projeções para muitos anos no futuro, necessitando de equipamentos cada vez mais poderosos. Caso isso não seja possível, a alternativa é simplificar os cálculos realizados. Além disso, os modelos possuem limitações e incertezas, que de acordo com Kerr (2001), advêm dos modelos químicos, físicos e sociais.

Os modelos climáticos estão sendo submetidos a testes mais abrangentes, incluindo as avaliações das previsões em escalas de dias a um ano. Dessa forma, um conjunto diversificado de ensaios aumenta a confiança na fidelidade com que os modelos representam os processos que afetam as projeções do clima. Como exemplo, Hamada *et al.* (2011) agruparam 15 modelos climáticos globais de acordo com a precipitação média em cada estação do ano para a região sudeste do Brasil com as anomalias do período de 2071-2100.

2.3.2.1 Modelos climáticos globais do AR4

No último relatório do IPCC (2007), 23 modelos climáticos globais foram utilizados para simular os cenários propostos, analisando os possíveis impactos das alterações do clima em todo o globo terrestre. A Tabela 2 descreve cada um desses modelos por sua instituição e país de origem.

Tabela 2 – Modelos climáticos presentes no quarto relatório do IPCC (2007).

Modelo	Instituição	País
BCC-CM1	<i>Beijing Climate Center</i>	China
BCCR-BCM2.0	<i>Bjerknes Centre of Climate Research</i>	Noruega
CCSM3	<i>National Center for Atm. Research</i>	EUA
CGCM3.1(T47)	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>	Canadá
CGCM3.1(T63)	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>	Canadá
CNRM-CM3	<i>Météo France</i>	França
CSIRO-MK3.0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Org.</i>	Austrália
ECHAM5/MPIOM	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	Alemanha
ECHO-G	<i>Meteorological Inst. of the Univ. of Bonn/ Meteorological Research Inst. of the Korea Met. Adm.</i>	Alemanha/ Coreia
FGOALS-g1.0	<i>Institute of Atmospheric Physics</i>	China
GFDL-CM2.0	<i>NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	EUA
GFDL-CM2.1	<i>NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	EUA
GISS-AOM	<i>NASA/Goddard Institute for Space Studies</i>	EUA
GISS-EH	<i>NASA/Goddard Institute for Space Studies</i>	EUA
GISS-ER	<i>NASA/Goddard Institute for Space Studies</i>	EUA
INM-CM3.0	<i>Institute for Numerical Mathematics</i>	Rússia
IPSL-CM4	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	França
MIROC3.2(hires)	<i>Center for Climate System Research/ National Inst. for Environmental Studies/JAMSTEC</i>	Japão
MIROC3.2(medres)	<i>Center for Climate System Research/ National Inst. for Environmental Studies/JAMSTEC</i>	Japão
MRI-CGCM2.3.2	<i>Meteorological Research Institute</i>	Japão
PCM	<i>National Center for Atmospheric Research</i>	EUA
UKMO-HadCM3	<i>Hadley Centre for Climate Prediction and Research/ Met Office</i>	RU
UKMO-HadGEM1	<i>Hadley Centre for Climate Prediction and Research/ Met Office</i>	RU

2.3.2.2 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)

O PCMDI foi criado em 1989 no Lawrence Livermore National Laboratory localizado na Califórnia. A missão do PCMDI é desenvolver métodos e ferramentas para o diagnóstico e a comparação de modelos de circulação geral (GCMs) que simulam o clima global. Como os modelos de circulação geral tornam-se cada vez mais complexos, faz-se necessária análises inovadoras que diminuam as divergências entre estas simulações e às observações climáticas. O foco atual dos projetos científicos está na comparação de modelos, no desenvolvimento de parametrizações e na elaboração de sólidos métodos estatísticos para detecção de mudanças climáticas. Também incluem o desenvolvimento de software para gerenciamento de dados, visualização e cálculo, montagem e organização de conjuntos de dados observacionais para validação do modelo e da documentação consistente de funções de modelo climático.

2.3.2.3 Estrutura dos Modelos de Circulação Geral

A estrutura dos Modelos de Circulação Geral utilizados atualmente consiste, em sua maioria, de representações tridimensionais detalhadas dos principais componentes do sistema climático.

Os Modelos de Circulação Geral Atmosférica (MCGA) contém, geralmente, um modelo de superfície da terra e influenciam a Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Esses modelos possuem um núcleo dinâmico que integra as equações de movimento do fluido para pressão de superfície, componentes horizontais do vento, temperatura e vapor d'água. Para a radiação existe um código que a divide em radiação solar e onda curta, além de ondas terrestre, infra-vermelho e longa. A fim de representar no modelo processos de pequenas escalas, existe parametrização nos MCGA's mais desenvolvidos para a convecção, processos da superfície terrestre, albedo, hidrologia e cobertura de nuvem. Já, os Modelos de Circulação Geral Oceânica (MCGO) são modelos de oceano com fluxos advindos da atmosfera que podem ou não conter modelo de gelo marítimo.

Os Modelos de Circulação Geral Acoplado (MCGA) eliminam a necessidade de especificar fluxos na interação ar-mar, sendo os modelos bases para a construção de predições

de clima futuro. Esses são os modelos climáticos mais complexos existentes, e desta forma, possuem difícil compreensão em suas análises e resultados.

Os MCGA's utilizam equações de fluidos, discretizados por método de diferenças finitas ou método espectral. Para o método de diferenças finitas, uma grade é imposta sobre a atmosfera. Os modelos mais simples usam grade angular constante de espaçamento (latitude e longitude), entretanto, existem outros modelos mais sofisticados que não são retangulares e grades de resolução variável, sendo este último mais utilizado. Alguns modelos podem utilizar uma grade oceânica com maior resolução nos trópicos para auxiliar em processos que acreditam serem importantes para a formação do El-Niño. Já para o método espectral, é utilizada uma grade gaussiana, devido à matemática de transformação entre o espaço espectral e a grade de pontos.

2.3.2.4 Resolução Espacial

Os modelos climáticos, em geral, utilizam grades de 'células' para estabelecer os locais onde serão realizados os cálculos e, portanto, estimar as variáveis (temperatura, velocidade do vento, etc.) que são importantes para as simulações. Apesar de sabermos que variáveis como a temperatura variam continuamente em toda a face da Terra, calcular tais propriedades para o globo inteiro torna-se uma tarefa muito complexa. Desta forma, os modelos normalmente utilizam um algoritmo que calcula a temperatura em um ponto e, em seguida, percorre uma distância d (dependente da resolução do modelo) a oeste e calcula a temperatura novamente, assim o fazendo varrer todo o globo terrestre.

Os MCGA's possuem resoluções típicas variando entre 1° e 5° em latitude e longitude (ordem de 200 ou 300km) e com algumas dezenas de níveis na vertical. Segundo o *Met Office Hadley Centre* (2008), no caso do modelo climático britânico HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model, version 3*), existe o acoplamento do modelo atmosférico HadAM3 com o modelo oceânico HadOM3 que possui modelo de gelo marítimo (POPE et al., 2000). O modelo HaCM3 possui resolução espacial de $2,5^\circ$ de latitude e $3,75^\circ$. Como na maioria dos modelos climáticos globais, seu modelo oceânico possui maior resolução espacial comparado ao modelo atmosférico, possuindo seis pontos de grade para cada ponto de grade atmosférico.

Nas Figuras 10a e 10b, pode-se comparar como variações na resoluções podem acarretar em níveis maiores de detalhamento no modelo. A Figura 10a mostra a resolução T42

que possui grades de 200 por 300 km. Em contrapartida, a Figura 10b mostra uma resolução mais alta, T85, que possui grades de 100 por 150 km.

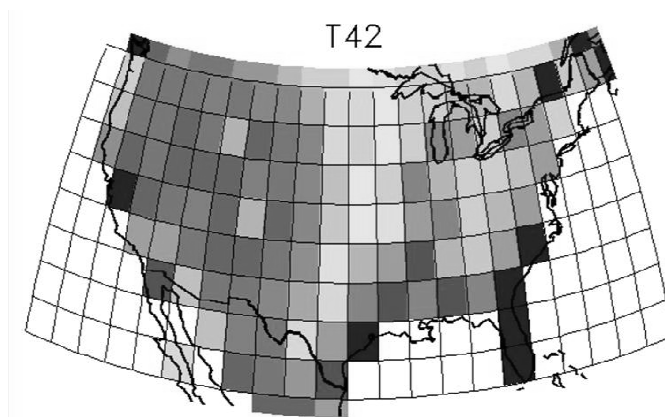


Figura 10a – Resolução espacial T42. Cortesia de *Warren Washington, NCAR*.

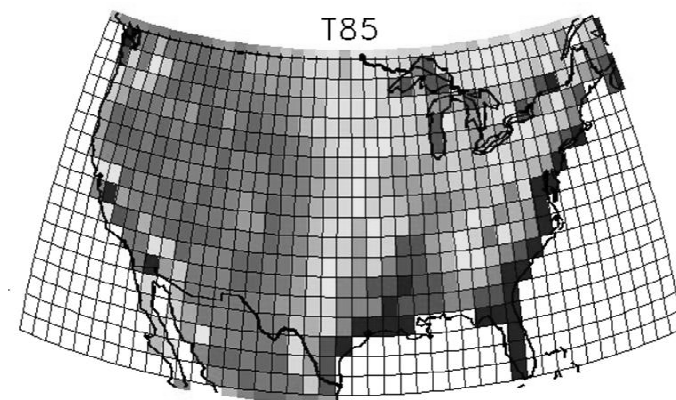


Figura 10b – Resolução espacial T85. Cortesia de *Warren Washington, NCAR*.

Figura 10 – Resoluções espaciais T42 e T85.

2.3.2.5 Resolução Temporal

Resolução Temporal refere-se ao tamanho dos passos de tempo utilizados nos modelos. Pode-se dizer que mostram com que frequência estão ocorrendo os cálculos das várias propriedades físico-químicas, sendo valores de 12 horas bastante comuns.

2.3.2.6 Incertezas dos modelos Climáticos Globais

Nenhum modelo existente reproduz de forma perfeita e fiel o sistema envolvido. Apesar dessa premissa, os resultados obtidos através da modelagem podem ser de bastante utilidade quando corretamente analisados. E, desta forma, segundo o *Met Office Hadley Centre* (2008), os GCM's são capazes de reproduzir as características da temperatura global durante o século passado.

Alguns elementos meteorológicos como a cobertura de nuvens desencadeiam incertezas nos modelos climáticos. As nuvens refletem parte da radiação incidente resfriando a superfície, além de absorver e emitir a radiação de onda longa, aquecendo a atmosfera. Em IPCC (2001), a cobertura de nuvens foi considerada uma das principais fontes de incerteza dos modelos.

Também, de acordo com o estudo de Forest *et al.* (2002), os aerossóis atmosféricos respondem como uma grande fonte incerteza nos cenários climáticos. Essa afirmação tem bastante pertinência haja vista que alterações significativas nas concentrações e composições dos aerossóis podem levar a modificações nas propriedades óticas das nuvens e nos processo de núcleos de condensação (RAMANATHAN, et al., 2001).

Segundo o Terceiro Relatório do IPCC (2001), modelos que não possuem ajuste de fluxo podem ser incertos em até 1°C por século, sendo que todos os modelos possuem falhas em simulações do clima atual da estratosfera. O mesmo relatório também alerta na dispersão dos modelos em relação às temperaturas topicais. Porém, a temperatura atmosférica na superfície é bem simulada, com a maioria dos modelos obtendo correlações altas ($r > 0,95$).

2.4 Data Mining

2.4.1 Operações de Reconhecimento de Padrões

As operações que designam o reconhecimento de padrões podem ser divididas em supervisionadas e não-supervisionadas. As operações supervisionadas fornecem previamente ao sistema um atributo meta (*target*) ou amostras rotuladas, como ocorre na classificação (árvore de decisão e indução de regras) em caso do atributo meta de valores discretos ou regressão para atributos meta de valores contínuos. No caso das operações não-supervisionadas, os algoritmos assumem o desconhecimento da classe a qual pertence um determinado conjunto de dados. Como não necessitam de um atributo meta previamente estabelecido, estas operações analisam um conjunto de dados e descobrem relações entre eles, como é o caso do *clustering* e associação.

2.4.2 Clustering

Agrupamento ou *clustering* é uma operação não-supervisionada que agrupa uma população heterogênea em vários subgrupos (*clusters*) homogêneos. O processo de clustering agrupa o conjunto de acordo com o critério de similaridade, mantendo um alto grau de semelhança entre os elementos de um mesmo cluster e baixo grau de semelhança *inter-clusters*. O registro é inserido no cluster mais próximo, aquele o qual a distância do seu centro for menor. Segundo Rodrigues (2000), quando se atribui um novo registro a um *cluster*, altera-se o valor do centro que define esse *cluster*, podendo dar origem a novos *clusters*.

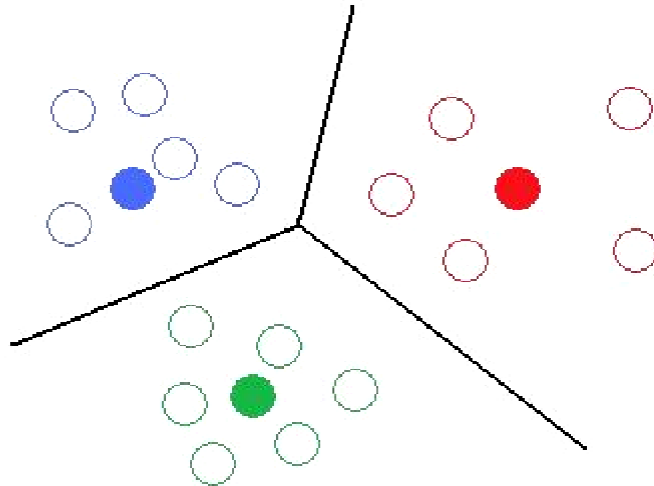


Figura 11 – Exemplificação de um conjunto de dados segregados em seus respectivos *clusters* e centros de *clusters* (bolinhas cheias).

2.4.2.1 *K-Means*

O *K-Means* é um método estatístico de aprendizado de máquina, que particiona as n observações em k clusters, sendo que cada observação pertence ao cluster com a localização média mais próxima.

Dado um conjunto de observações $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde cada observação é um vetor dimensional real, o *k-means* tem por objetivo a partição de n observações em k conjuntos ($k \leq n$), $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, de modo a minimizar a soma dos quadrados dentro do cluster. Em outras palavras, o algoritmo atribui aleatoriamente os P pontos a k grupos e calcula as médias dos vetores de cada grupo. Em seguida, cada ponto é deslocado para o grupo correspondente ao vetor médio do qual ele está mais próximo. Com este novo rearranjo dos pontos em k grupos, novos vetores médios são calculados. O processo de realocação de pontos a novos grupos cujos vetores médios são os mais próximos deles continua até que se chegue a uma situação em que todos os pontos já estejam nos grupos dos seus vetores médios mais próximos.

A maioria dos algoritmos *K-Means* utiliza a distância Euclidiana como métrica de cálculo das distâncias envolvidas, sendo o número de clusters (k) informado pelo usuário.

2.4.2.2 Soma dos Erros Quadrados (SEQ)

Considera-se como erro a distância de cada ponto ao centro do cluster mais próximo. A soma quadrática desses erros gera o SEQ, que pode ser visto na Equação 3.

$$SEQ = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} dist^2(m_i, x) \quad (3)$$

2.5 Mudanças Climáticas e Agricultura

De acordo com Pinto *et al.* (2008), a produção de alimentos no país pode ter um déficit em torno de 11% em 2020, podendo chegar a 16% até 2070, se nenhuma providência de mitigação e adaptação às mudanças climáticas for tomada. O levantamento destes impactos foi realizado utilizando a metodologia do programa de zoneamento de riscos climáticos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), considerando novas condições climáticas definidas pelos modelos de previsão existentes até então. Nas primeiras simulações, realizadas a partir de 2001, foram consideradas elevações de 1°C, 3°C e 5,8°C nas temperaturas e variações de 5 a 15% nas chuvas, uniformemente, em todas as áreas analisadas, sem diferenciação por região e época de previsão. Nas simulações feitas a partir de 2008, começaram a ser utilizados modelos mais detalhados, com resolução espacial de 50km x 50km, e cenários de previsão distintos para os anos de 2020, 2050 e 2070. Apesar da utilidade destes modelos e dos resultados obtidos e apresentados por Pinto *et al.* (2008), é importante que os cenários de impactos das mudanças climáticas na agricultura sejam sempre revisados, considerando as previsões mais atuais possíveis e disponíveis.

Neste trabalho, foram utilizados outros modelos climáticos, além dos utilizados por Pinto *et al.* (2008). Isto é importante porque, apesar de haver uma variação de temperatura que as projeções de todos os modelos convergem para o aquecimento, os padrões pluviométricos possuem divergências em vários modelos (IPCC, 2007). Sendo assim, não são conclusivas as projeções de mudança no regime e distribuição das chuvas, derivadas dos modelos globais do terceiro e quarto relatórios do IPCC para climas mais quentes no futuro, sendo que as

incertezas ainda são grandes, pois dependem dos modelos e das regiões consideradas (MARENGO *et al.*, 2007).

O interesse pelo tema das mudanças climáticas está incentivando a proposição e o desenvolvimento de novos modelos de previsão pelos centros especializados na previsão de tempo e clima no mundo. Por essa razão, é importante comparar e avaliar o desempenho de modelos que simulem os impactos de mudanças climáticas como foi feito em Marengo e Valverde (2006), focalizando, porém, o domínio agrícola. Ghini *et al.* (2007) apresentam os impactos das mudanças climáticas em doenças de plantas como é o caso da sigatoka-negra da bananeira no Brasil, utilizando seis modelos climáticos distintos do IPCC (2001). Marin *et al.* (2007) avaliaram o efeito da alteração do clima na aptidão climática da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Recentemente, Zhai e Zhuang (2009) utilizaram modelos econômicos para descrever os impactos econômicos possíveis que agricultura do Sudeste da Ásia pode enfrentar.

Vários laboratórios internacionais vêm se especializando em projeções de cenários climáticos futuros utilizando modelos globais. Dentre eles, destacam-se o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e o *NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, dos Estados Unidos; o *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, da Inglaterra; o *Max Planck Institute for Meteorology*, da Alemanha e o *Centre National de Recherches Météorologiques* da França.

Modelos propostos por outros institutos também podem ser avaliados, ressaltando-se que as atividades dos centros citados acima são coordenadas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) dentro do projeto World Climate Research Programme (WCRP). Esse projeto foi criado em 1980 para compreensões fundamentais do sistema físico do clima e os processos envolvidos para predizer os cenários climáticos futuros, além da influência humana exercida sobre o mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Materiais

3.1.1 Dados Agrometeorológicos

Para o cálculo dos cenários atual e futuro dentro da metodologia do zoneamento de riscos climáticos de cada cultura, foram utilizados dados de temperatura do ar, precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial (ETP). Esta foi calculada pelo método proposto por Thornthwaite e Matter (1955), adaptado por Camargo e Camargo (1983), baseado em valores de temperatura média mensal, estimados pelas equações apresentadas por Pinto *et al.* (1972) a partir das coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) de cada estação pluviométrica utilizada.

As séries históricas foram obtidas no Sistema de Monitoramento Agrometeorológico Agritempo, desenvolvido pelo Cepagri/Unicamp e Embrapa Informática Agropecuária e alimentado por dados provenientes de instituições públicas, tais como o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) e ANA (Agência Nacional de Águas), e privadas, como cooperativas agrícolas (PEREIRA-COLTRI *et al.*, 2007). O banco de dados foi composto por dados diários de chuva provenientes de cerca de 663 estações pluviométricas localizadas nos três estados (MG, SP e PR). O período compreendido foi de 1976-2005 para as variáveis de temperatura média e precipitação dos estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo. Essa base de 30 anos de dados meteorológicos atende a recomendação climatológica da OMM (Organização Meteorológica Mundial). No entanto, utilizou-se um período mais atual que torna a relação com agricultura mais fidedigna, haja vista a velocidade das mudanças tecnológicas nesse setor.

A fim de estimar a produção, após as simulações dos cenários futuros gerados pelos modelos climáticos, foi utilizada a série histórica de 1990-2009, para os três estados e culturas estudadas, do banco de dados agregados do IBGE. Para o caso específico da cultura do café, o IBGE não fornece, em seu banco de dados agregados, a série de produção 1990-2009 para a variedade arábica especificamente, mas o valor de todas as variedades de café. Como os

estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo apresentaram, nos últimos 20 anos, uma produção majoritariamente arábica, a estimativa não ficou prejudicada por este fato.

Pode-se observar, na Figura 12, a rede de estações pluviométricas dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná utilizados no trabalho. Nela, pode-se constatar que há uma boa distribuição espacial dos postos que foram utilizados, com alta densidade, de grande utilidade nos processos de interpolações dos dados.

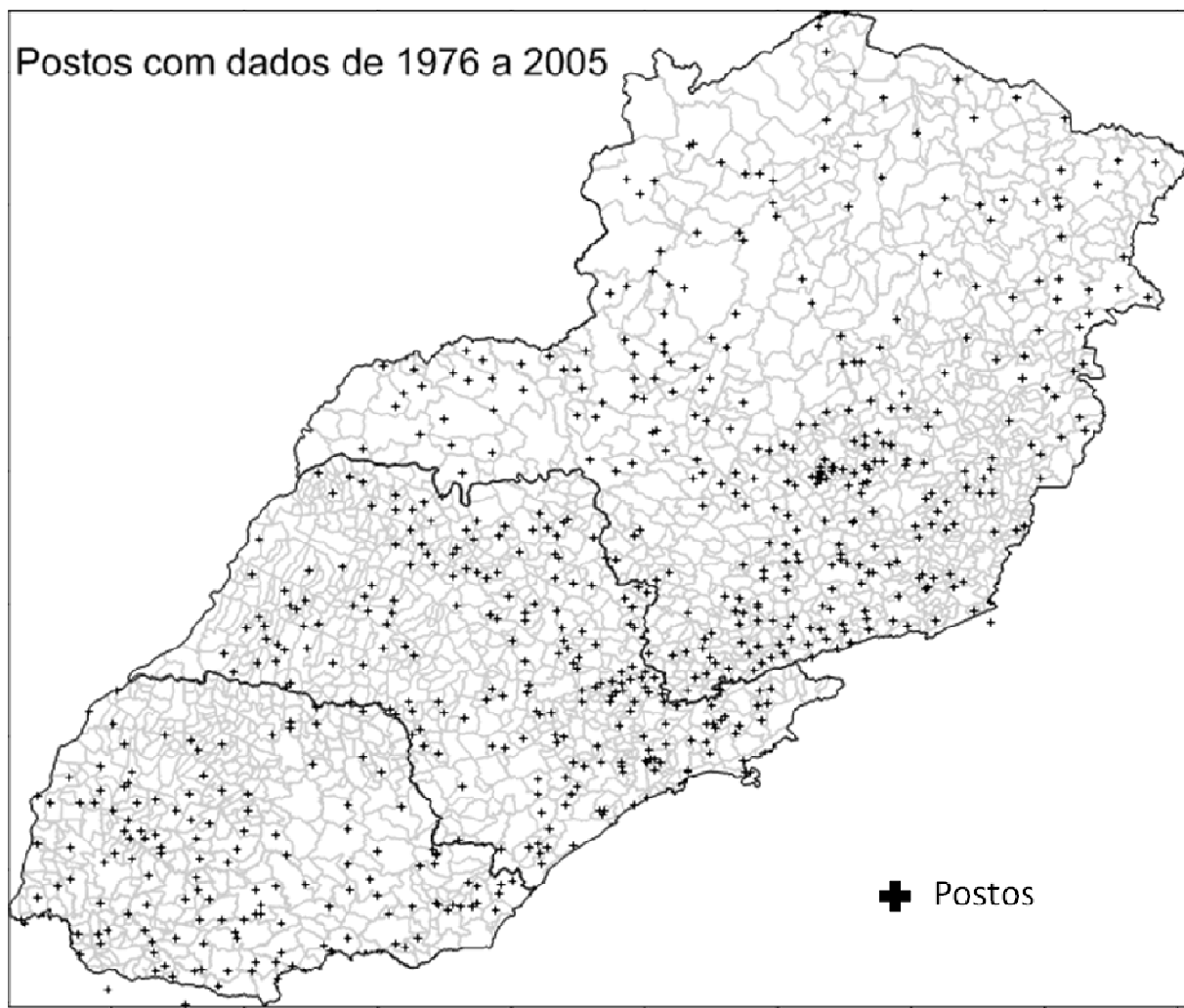


Figura 12 – Rede de estações pluviométricas dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná utilizando a série histórica de 1976-2005.

3.1.2 Dados de anomalia dos Modelos Climáticos

Foram utilizados dados de modelos climáticos globais dos centros especializados em previsão de tempo e clima do mundo, tais como os utilizados no 4º Relatório de Avaliação do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), disponíveis na página do *IPCC Data Distribution Centre* na internet (<http://www.ipcc-data.org>). Neste caso, foram utilizados os dados de anomalia de precipitação e temperatura do período de 2010-2039 do cenário SRA2, que representam os desvios desse período em relação aos dados de linha de base do período de 1961-1990. As anomalias representam valores médios do período predito de 2010-2039, que vem a ser o primeiro período de simulação de 30 anos disponível e, consequentemente, com menores valores de incerteza. O sistema *IPCC Data* disponibiliza dados mensais dos modelos climáticos globais, por cenário de emissão de gases de efeito estufa presentes no IPCC AR4, para os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

As anomalias advieram de dois modelos climáticos globais que foram selecionados dentre os 23 existentes do IPCC. A seleção dos modelos climáticos globais foi realizada segundo os critérios definidos no item 3.2.2 e foi feita com o intuito de reduzir o volume de simulações, além de identificar modelos com princípios físico-químicos semelhantes e, possivelmente, redundantes.

As Figuras 13, 14, 15 e 16 mostram as anomalias mensais médias de temperatura e precipitação do período de 2010-2039, geradas pelos modelos HadCM3 e MIROCmed que foram utilizadas no trabalho. Pode-se observar, pelas Figuras 13 e 15, que as anomalias de temperatura do modelo MIROCmed possuem valores superiores em relação ao modelo HadCM3, principalmente nas porções mais ao norte da área estudada. Já, as Figuras 14 e 16 mostram que as anomalias de precipitação apresentam maiores divergências. As anomalias dos dois modelos possuem convergência de sinal matemático na maior parte dos estados estudados de fevereiro a agosto, apresentando cenários mais secos no caso do modelo MIROCmed. Para os demais meses, de setembro a janeiro, a divergência entre os modelos é mais significativa, inclusive nos sinais das anomalias e, principalmente, para o estado de Minas Gerais. Nesse período, o modelo HadCM3 aponta um aumento significativo de precipitação, enquanto o modelo MIROCmed indica o oposto.

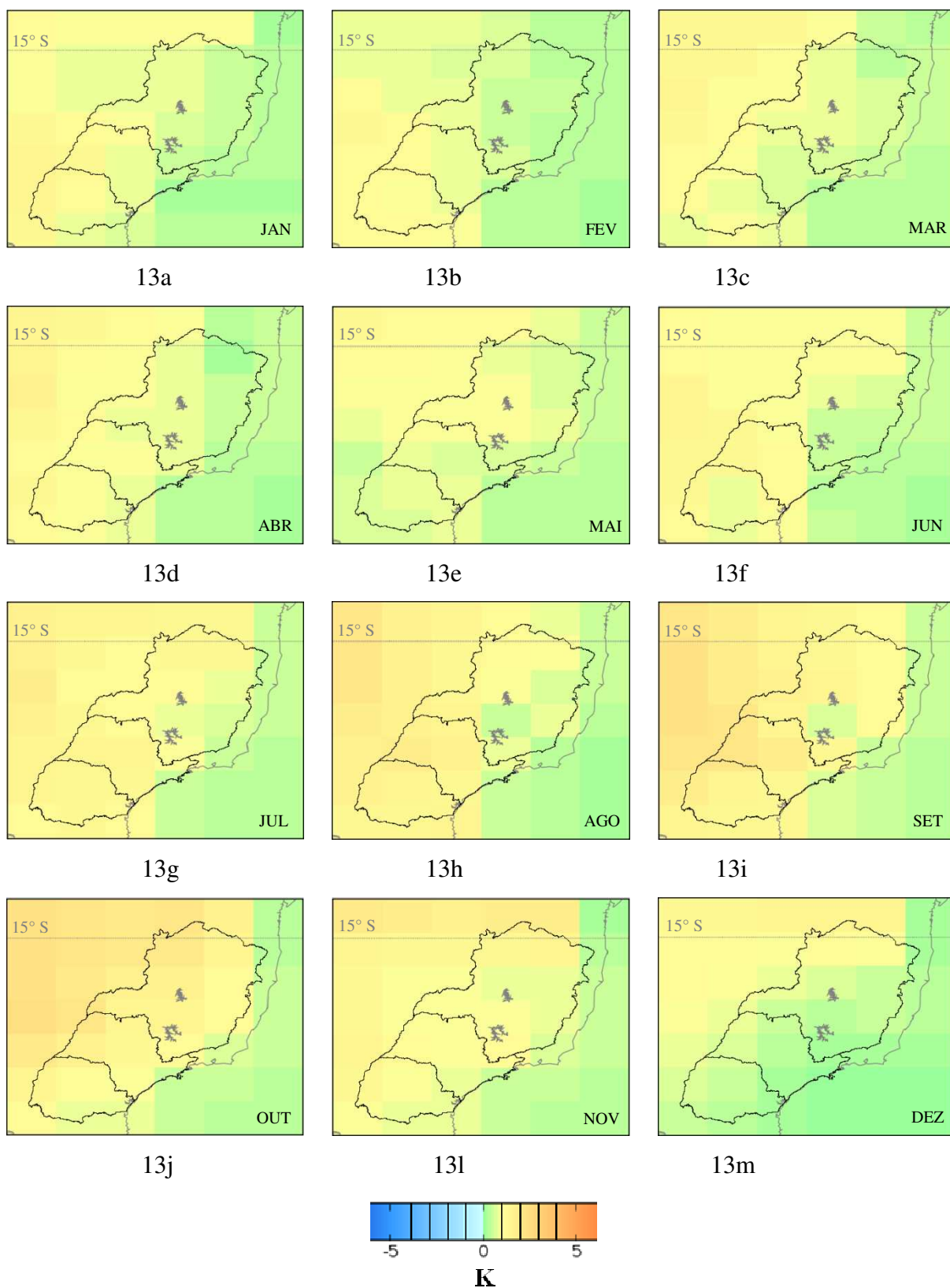


Figura 13 – Anomalias mensais médias de temperatura do período 2010-2039 e cenário SA2, geradas pelo modelo climático global HadCM3.

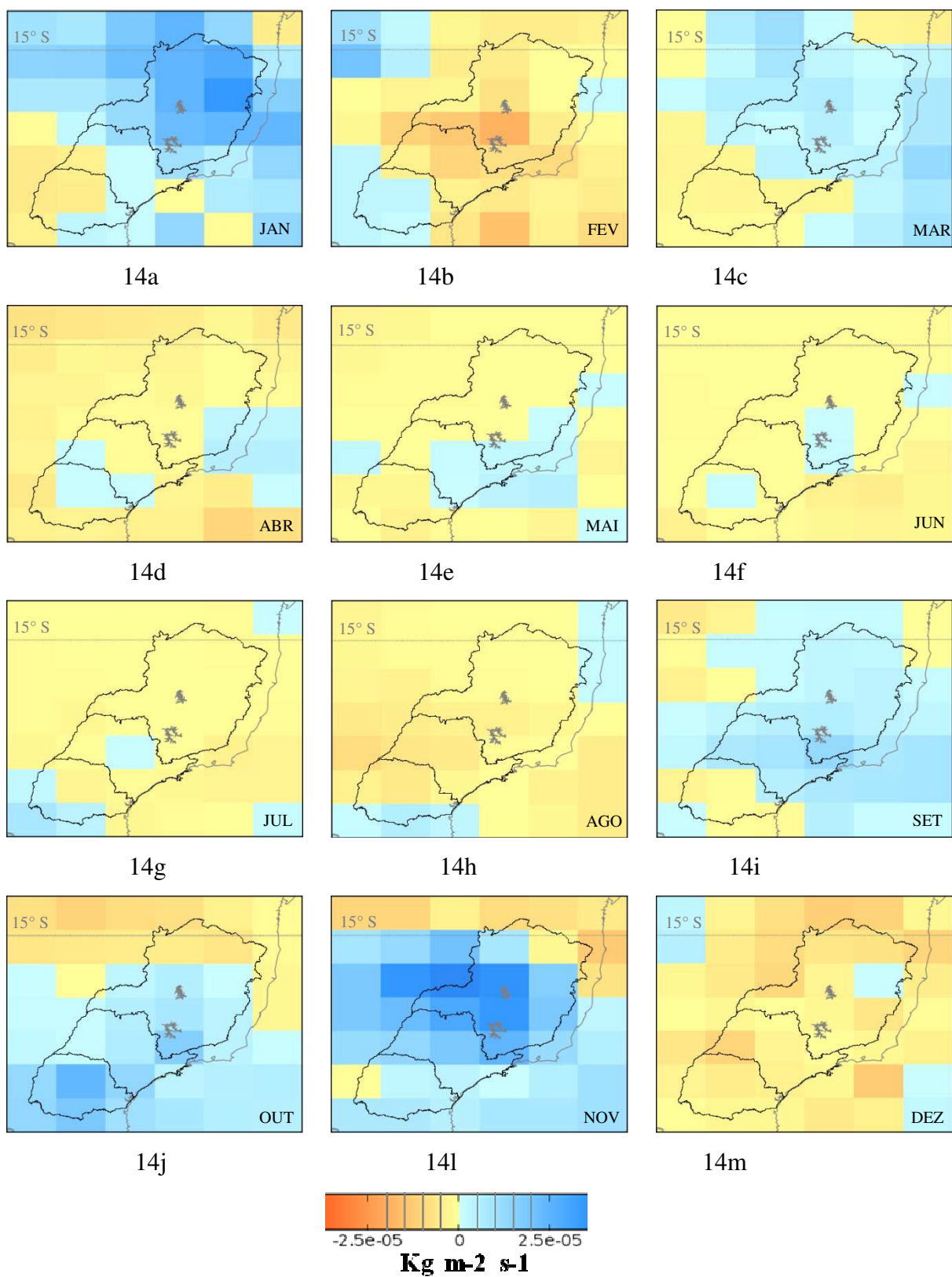


Figura 14 – Anomalias mensais médias de precipitação do período 2010-2039 e cenário SA2, geradas pelo modelo climático global HadCM3.

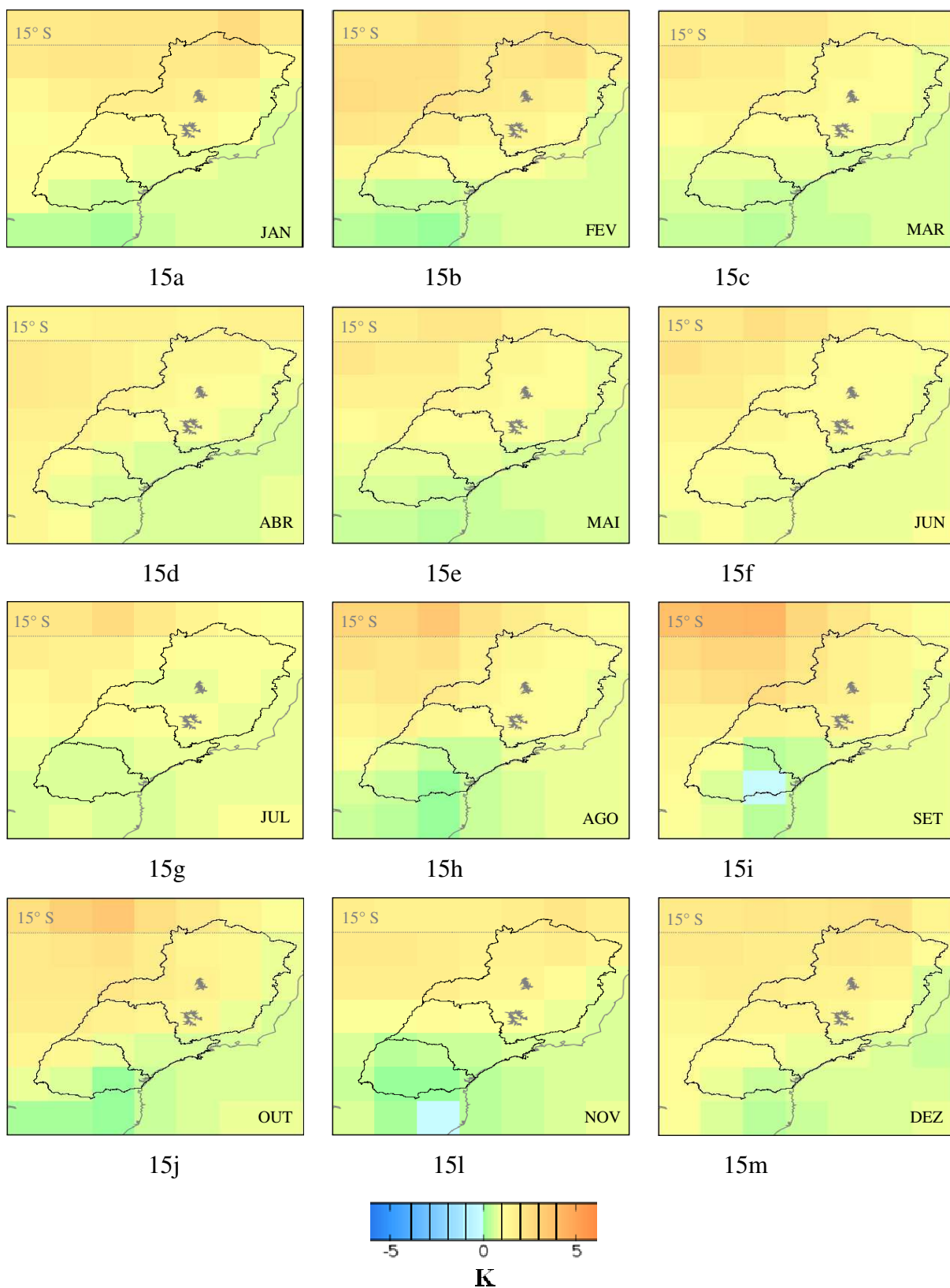


Figura 15 – Anomalias mensais médias de temperatura do período 2010-2039 e cenário SA2, gerado pelo modelo climático global MIROCmed.

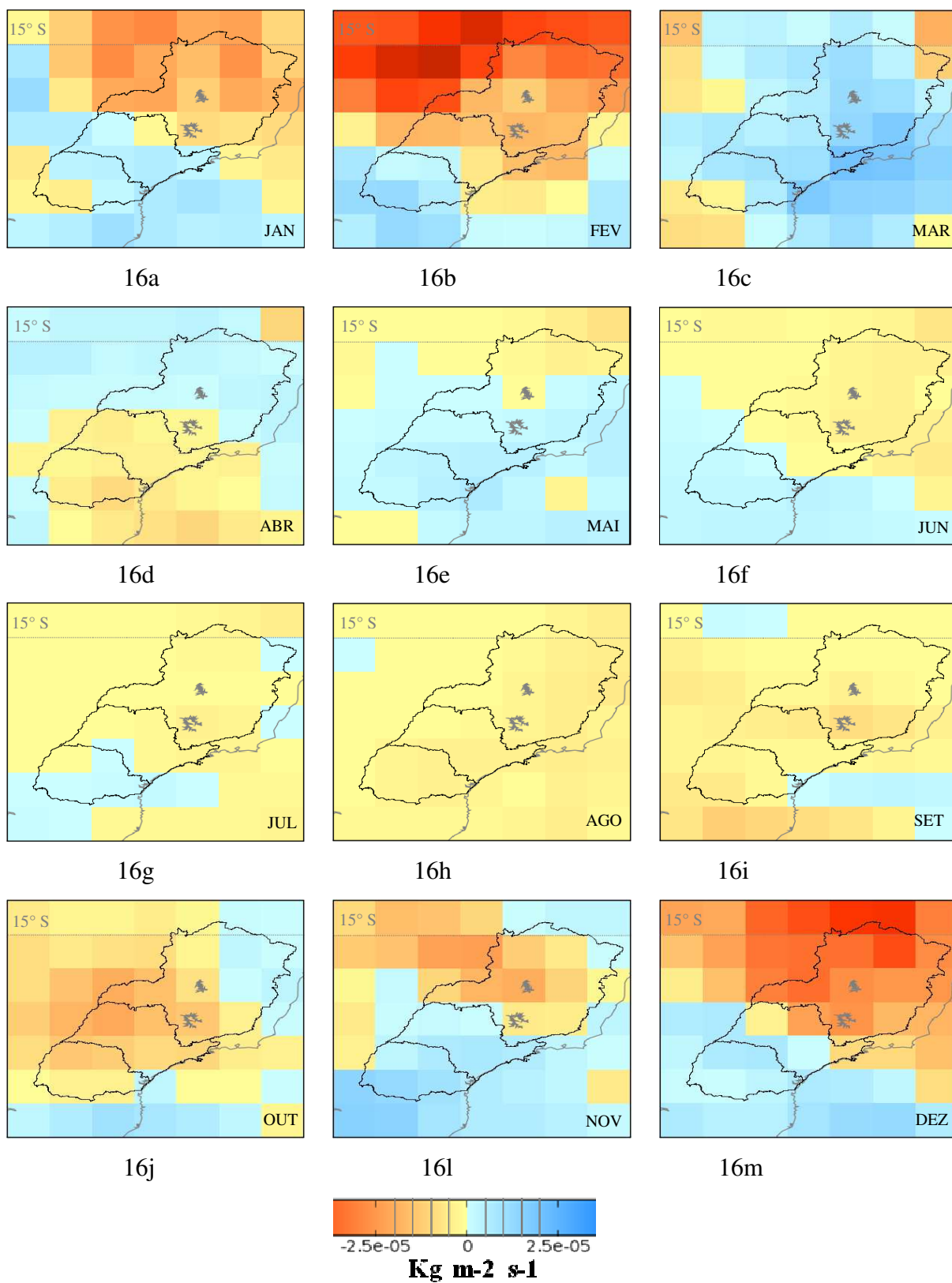


Figura 16 – Anomalias mensais médias de precipitação do período 2010-2039 e cenário SA2, gerado pelo modelo climático global MIROCmed.

3.2 Método

3.2.1 Zoneamento agrícola de riscos climáticos

3.2.1.1 Simulações

Foi desenvolvido um sistema computacional em linguagem Fortran, denominado MUDCLIMSP.F, destinado à geração automática dos zoneamentos de riscos climáticos para todas as combinações possíveis de datas de plantio, ciclos de cada cultura, tipos de solo, variáveis climáticas e modelos de previsão. Esse sistema foi baseado no programa proposto por Forest (1984), testado por Assad (1986) e modificado por Vaksman (1990), para simulação de balanços hídricos sequenciais. O método de interpolação utilizado no sistema foi o inverso do quadrado da distância, associado ao vizinho mais próximo para somar os valores das anomalias dos modelos que se encontravam no centro de cada pixel (Figuras 13, 14, 15 e 16) com os postos da rede de estações pluviométricas (Figura 12) utilizados no trabalho. No caso específico da temperatura, pode-se refinar a interpolação utilizando a regressão dos valores de temperatura das três unidades da federação envolvidas, obtendo uma equação geral da variável, para cada latitude, longitude e altitude desejada, seguindo o *lapse rate* adiabático. O *lapse rate* é definido como a taxa a qual a temperatura decresce de acordo com a variação da altura da atmosfera (JACOBSON, 2005). Segundo Kittel e Kroemer (1980) sua aproximação pela curva adiabática seca pode ser descrita pela Equação (4).

$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = -9,8^\circ\text{C/km} \quad (4)$$

Após essas aproximações, esses valores foram cruzados com os dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de resolução de 30 km, refinando a interpolação da variável de temperatura. Deve-se ressaltar que foram feitos diversos testes com outros interpoladores, que responderam inferiormente quando comparados ao método adotado. As saídas do sistema MUDCLIMSP.F foram de dois tipos principais:

- a) Mapas de risco, em formato GIF, indicando as áreas de suas respectivas classes de risco climático para cada tipo de simulação realizada; e
- b) Tabelas sintéticas, contendo a quantidade de municípios, estimativa de produção e número de datas de baixo risco climático, com e sem cada anomalia climática considerada.

A Figura 17 apresenta o esquema da metodologia empregada para o zoneamento de riscos climáticos da cultura de milho (anuais). No caso do café arábica (cultura perene) e da cana-de-açúcar (cultura semi-perene), o esquema da metodologia de zoneamento agrícola utilizada é apresentado na Figura 18. Foram incorporadas, a fim de simular a componente de mudanças climáticas, em ambas as metodologias, os três tipos diferentes de cenários de anomalias, isto é:

- a) Apenas temperatura (Anom_T);
- b) Apenas precipitação (Anom_P);
- c) Temperatura e precipitação, em conjunto (Aom_T+P).

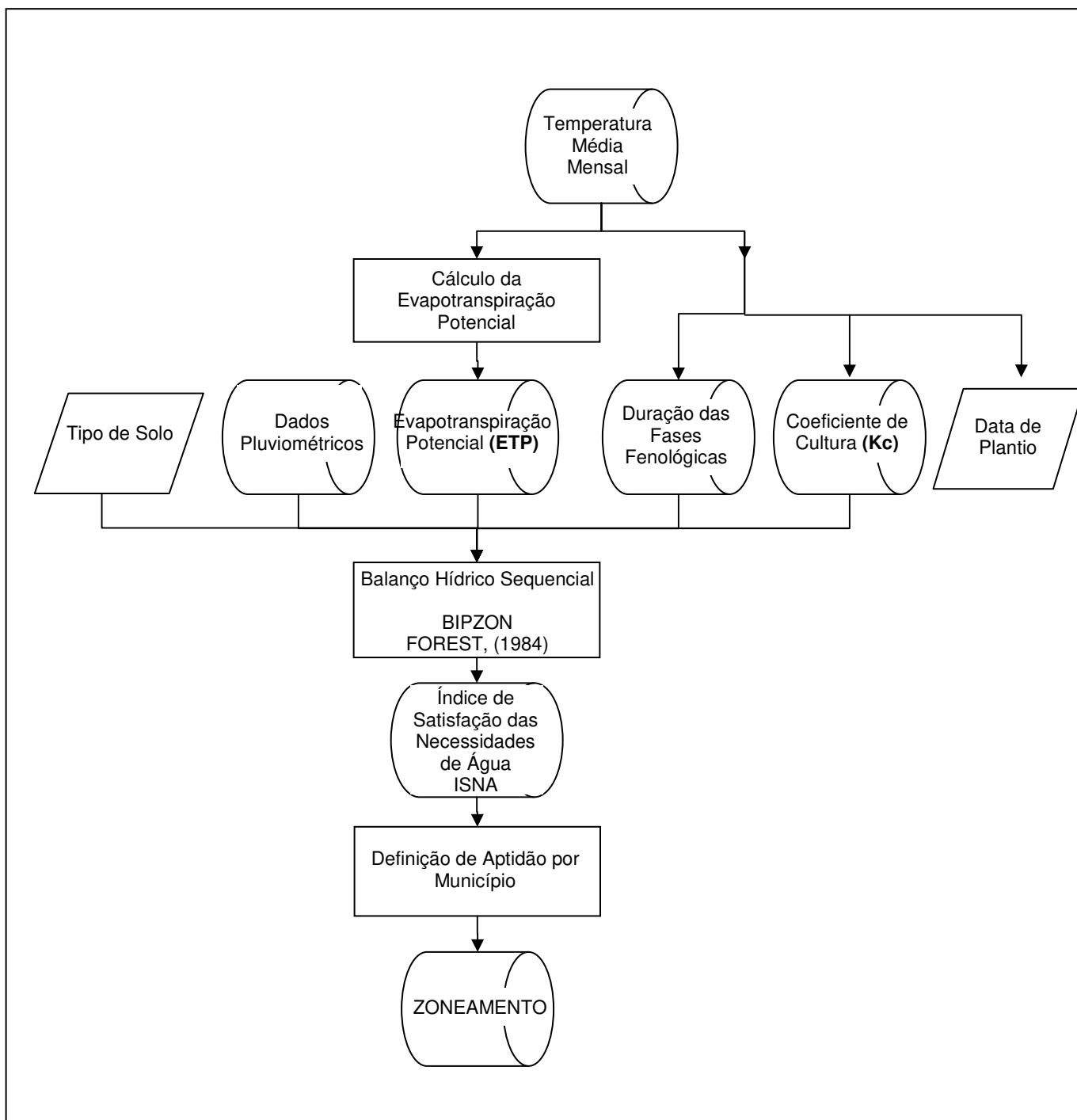


Figura 17 – Esquema da metodologia utilizado no zoneamento de riscos climáticos do milho (culturas anuais).

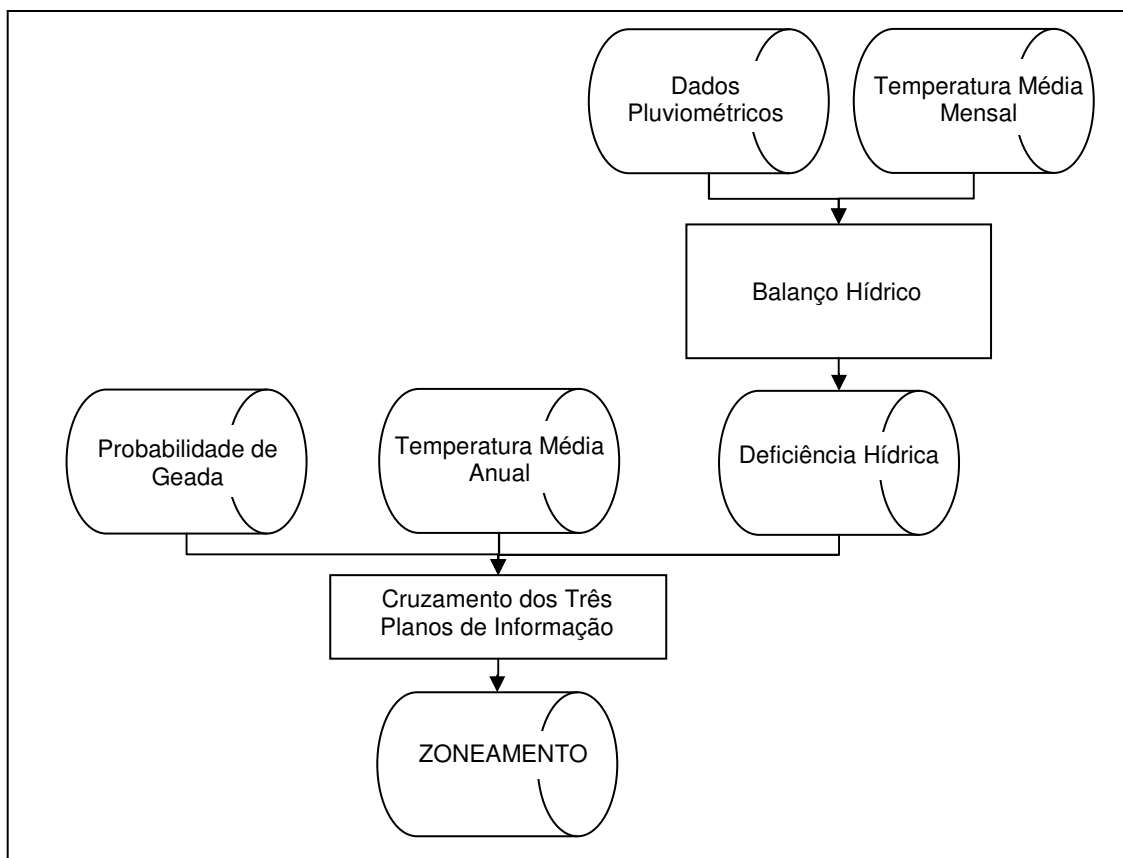


Figura 18 – Esquema da metodologia utilizado no zoneamento de riscos climáticos do café arábica (culturas perenes) e da cana-de-açúcar (culturas semi-perenes).

Como pode ser visto na metodologia mais complexa da Figura 17, o sistema de simulação desenvolvido para a cultura do milho foi composto pelos seguintes módulos principais:

- a) Definição dos parâmetros de entrada para a simulação (cultura, ciclos, períodos de plantio, sequeiro ou irrigado, K_c para cada quinquídio, valor de corte do índice hídrico ISNA, testes térmicos, porcentagem mínima da área do município para ser considerada de baixo risco climático, número de municípios contíguos para configurar uma “ilha” de baixo ou alto risco);
- b) Cálculo da evapotranspiração potencial para cada decêndio;
- c) Simulação dos balanços hídricos sequenciais e cálculo do índice hídrico ISNA para cada um dos postos pluviométricos utilizados;
- d) Determinação de equações de regressão do índice hídrico ISNA em função de coordenadas geográficas (longitude, latitude e altitude);

e) Cálculo do índice hídrico ISNA para cada ponto da grade que contém valores de altitude a cada 800m de distância linear entre um ponto e outro, aproximadamente;

f) Definição do risco climático para cada município em função das restrições hídricas e térmicas existentes para cada cultura;

g) Cálculo da quantidade e da porcentagem de municípios dos três estados estudados:

i) Com baixo risco climático, sem e após anomalias;

ii) Que tiveram redução de datas de baixo risco climático, após anomalias;

iii) Que tiveram ampliação de datas de baixo risco climático, após anomalias;

iv) Que não tiveram nem redução nem ampliação de datas de baixo risco climático, após anomalias;

v) Que tiveram redução completa a zero de datas de baixo risco climático, após anomalias;

vi) Que tiveram inclusão de datas de baixo risco climático, após anomalias, isto é, municípios que não tinham nenhuma data de baixo risco climático e começaram a ter algumas, após anomalias.

h) Cálculo do número médio de datas de baixo risco climático por município (que contém pelo menos uma data de baixo risco climático). Trata-se de parâmetro útil para avaliar a variação do risco climático associado às anomalias consideradas. A redução do número de datas de baixo risco climático diminui a flexibilidade de escolha do período de plantio e aumenta o risco da agricultura.

O sistema de simulação utilizado para as culturas semi-perenes e perenes podem ser considerados mais simples que o sistema das culturas anuais descrito acima. Como pode ser constatado na Figura 18, os valores de temperatura média e precipitação servem de fonte para o cálculo do balanço hídrico. Neste caso, não foi calculado o ISNA, mas foram avaliadas a probabilidade de geada, as temperaturas médias anuais e a deficiência hídrica. Os resultados criaram classes intermediárias que foram, depois, resumidas em risco climático médio.

As anomalias de precipitação foram incorporadas nos dados de Evapotranspiração Potencial (ETP) com sinal trocado ao original, no caso de culturas anuais, considerando o exposto descrito por Camargo e Camargo (2000). Essa estratégia foi adotada considerando que as anomalias de precipitação são disponíveis em valores mensais. Isso é adequado na

metodologia de culturas perenes e semi-perenes, mas não diretamente nas culturas anuais, necessitando da adaptação proposta.

3.2.1.2 Parâmetros das culturas avaliadas

Foram avaliados os efeitos das possíveis alterações do clima previstas pelos modelos climáticos globais utilizados neste trabalho, no zoneamento de riscos climáticos das culturas do café arábica, cana-de-açúcar e milho, considerando as condições e os períodos de plantio adotados, comumente, nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná. Desta forma, foram adotadas condições de sequeiro para todas as culturas. É importante destacar que não foi utilizado o conceito de graus-dias para definir os tamanhos das quatro fases fenológicas (estabelecimento inicial, crescimento vegetativo, florescimento e enchimento de grãos e maturação) de cada cultura, porque esse método não vem mais sendo utilizado efetivamente pelo programa de zoneamento agrícola do MAPA, apesar de algumas tentativas já realizadas. O valor utilizado para a reserva máxima de água utilizável pelas plantas nos balanços hídricos, de acordo com a textura dos solos, foi o de 50mm (correspondendo a solos de textura média ou do tipo 2).

3.2.1.2.1 Café Arábica

Para cada uma das estações pluviométricas utilizadas, foram simulados balanços hídricos e calculadas as deficiências e excedentes hídricos, interpoladas linearmente pelos pontos da grade de altitude, sendo que o armazenamento máximo de água admitido no solo foi de 125 milímetros.

Para a definição das zonas de risco para o cultivo do cafeeiro arábica, foram utilizados os seguintes critérios que podem ser vistos nas Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do Apêndice:

- Municípios com Irrigação Necessária: temperatura média anual entre 18°C e 23°C; deficiência hídrica maior que 150 milímetros e probabilidade de geadas menor ou igual a 25%.

- Municípios com Baixo Risco Climático: temperatura média anual entre 18°C e 23°C, deficiência hídrica média anual entre 0 e 150 milímetros e probabilidade de geadas menor ou igual a 25%;
- Municípios com Irrigação Recomendada: temperatura média anual entre 18°C e 23°C; deficiência hídrica entre 100 e 150 milímetros e probabilidade de geadas menor ou igual a 25%;
- Municípios com Risco de Temperatura Elevada: temperatura média anual maior que 23°C, deficiência hídrica média anual entre 0 e 150 milímetros e probabilidade de geadas menor ou igual a 25%;
- Municípios com Risco de Geadas: temperatura média anual entre 18°C e 23°C, deficiência hídrica média anual entre 0 e 150 milímetros e probabilidade de geadas acima de 25%;
- Municípios com Alto Risco: temperatura média anual maior que 23°C; deficiência hídrica maior que 150 milímetros ou probabilidade de geadas acima de 25%.

Após a simulação, foram geradas planilhas para o zoneamento atual, anomalia de temperatura, anomalia de precipitação e a combinação das duas anomalias para os dois modelos climáticos globais utilizados. Essas planilhas contêm, para cada município dos três estados da federação estudados, a percentagem de área das seis classes de risco citadas acima.

A fim de fazer uma contagem do número de municípios em cada uma das classes, e dessa forma, poder comparar com a cultura do milho, que utilizou somente duas classes (alto risco e baixo risco), a cultura do café foi reclassificada em três classes:

- Baixo Risco: municípios com áreas de baixo risco maior ou igual a 15%;
- Médio Risco: municípios com áreas diferentes de baixo e alto risco;
- Alto Risco: municípios com áreas diferentes de baixo risco e áreas de alto risco maior que a somatória das áreas de irrigação necessária, irrigação recomendada, risco de temperatura elevada e risco de geadas.

Através dessa metodologia, classificou-se cada município em três classes, podendo contabilizar o número de municípios em classes que dominam suas áreas individuais.

3.2.1.2.2 Cana-de-açúcar

Para delimitar as áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar com risco climático baixo, foram consideradas as variáveis: temperatura média anual, deficiência hídrica acumulada durante o período seco do ano, probabilidade de atendimento das necessidades hídricas da cultura durante o período úmido do ano e probabilidade de geadas.

Os valores das temperaturas médias anuais foram obtidos através de modelos estatísticos de regressão linear múltipla que consideram a dependência existente com a altitude, longitude e latitude. O cálculo foi feito para os três estados envolvidos, utilizando as informações de altitude do satélite SRTM30, o que permite uma resolução espacial de 30 metros.

As informações sobre as deficiências hídricas anuais foram determinadas a partir da simulação de balanços hídricos, especificamente para cada localidade com estação pluviométrica disponível no banco de dados, tendo como principais dados de entrada a precipitação pluviométrica média mensal e a temperatura média mensal. A disponibilidade de água adotada foi de 125 mm.

Para a definição das zonas de risco para o cultivo da cana-de-açúcar foram utilizados os seguintes critérios:

- Municípios com Baixo Risco Climático: temperatura média anual igual ou superior a 21°C e deficiência hídrica média anual entre 0 e 200 milímetros;
- Municípios com Irrigação Recomendada: temperatura média anual igual ou superior a 21°C e deficiência hídrica entre 200 e 400 milímetros;
- Municípios com Risco de Temperaturas Baixas: temperatura média anual entre 19°C e 21°C e deficiência hídrica média anual superior a 0 milímetros;
- Municípios com Ausência de Estação Seca: temperatura média anual igual ou superior a 19°C e deficiência hídrica média anual igual a 0 milímetros;
- Municípios com Risco de Geadas: temperatura média anual igual ou inferior a 18°C;
- Municípios com Alto Risco: deficiência hídrica maior que 400 milímetros.

Assim como no café, foi utilizado o mesmo critério de reclassificação para a contagem dos municípios: baixo, médio e alto riscos.

3.2.1.2.3 Milho

O modelo de balanço hídrico adotado para o milho foi diferente das culturas do café e da cana-de-açúcar, com o ciclo da cultivar sendo dividido em quatro fases: germinação/emergência, crescimento/desenvolvimento, floração e enchimento de grãos e maturação fisiológica/colheita. A duração média dos ciclos e de suas respectivas fases fenológicas utilizadas normalmente no zoneamento agrícola está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Duração de ciclos e respectivas fases fenológicas do milho utilizadas normalmente no zoneamento agrícola.

Ciclos	Fases fenológicas				Total de dias
	Emergência (fase 1)	Desenvolvimento (fase 2)	Floração/enchimento de grãos (fase 3)	Maturação (fase 4)	
Superprecoce	15	30	20	25	90
Precoce	15	35	25	25	100
Semiprecoce	15	40	30	25	110
Médio	15	45	35	25	120
Semitardio	15	50	40	25	130
Tardio	15	55	45	25	140

O ciclo utilizado nas simulações foi o médio, com 120 dias de duração.

Como coeficiente de cultura (Kc), foram utilizados valores médios para períodos decendiais. A reserva útil de água do solo considerou a capacidade média de água disponível dos respectivos grupos de solos e também a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. Para efeito da simulação, foi considerado o solo com capacidade de retenção de água de 50 mm. Ao contrário das culturas da cana-de-açúcar (semi-perene) e café (perene), o zoneamento da cultura do milho (anual) utilizou como corte de classes a variável ISNA (Índice de Satisfação das Necessidades de Água – Item 2.1.2). Foram realizadas simulações para 12 períodos de semeadura, espaçados de 10 dias, nos meses de setembro a dezembro. Para cada data, o modelo estimou o ISNA, sendo utilizada a seguinte classificação dos municípios:

a) Municípios com Alto Risco Climático: $ISNA \leq 0,55$ em, pelo menos, 80% das simulações realizadas e

b) Municípios com Baixo Risco Climático: $ISNA \geq 0,55$ em, pelo menos, 20% das simulações realizadas.

A fim de contabilizar o número de municípios para possíveis análises, foram considerados como baixo risco climático os municípios que apresentaram mais de 15% do seu território com baixo risco climático para o cultivo. Além disso, foram classificados como alto risco climático previamente 94 municípios dos estados de São Paulo e Paraná por excesso de umidade, já que se localizam em áreas litorâneas ou encostas da Serra do Mar. Esses municípios foram incluídos na classe de alto risco climático apenas nos mapas do zoneamento de riscos do milho que podem ser vistos no Apêndice, porém não foram contabilizados nas análises de resultados.

3.2.1.3 Estimativa de produção das culturas

A fim de tentar compreender como as anomalias dos modelos climáticos poderão impactar a produção das culturas agrícolas, foi utilizado uma metodologia simplificada de estimativa baseada no banco de dados agregados do IBGE. Foi feita a somatória e a média dos últimos 20 anos (1990-2009) das culturas do café, cana e milho para os estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo a nível municipal. Admitindo-se, hipoteticamente, que a produção total de cada uma das culturas nos próximos 20 anos (2010-2029) mantenha-se constante, pode-se inferir que o valor total possua equivalência do período (1990-2009). Logicamente, é sabido que outros fatores incrementam a produção agrícola, variando o seu valor em curto e longo prazo, porém, por se tratar de um modelo simples, não foram considerados. É interessante ressaltar que as anomalias utilizadas encontram-se dentro do período de 2010-2039, com média no ano de 2025, e o período estimado com a produção constante envolve o período 2010-2029, com média no ano de 2020, existindo proximidade nos períodos.

Após os cálculos da produção dos últimos 20 anos e sua média anual, no intuito de prosseguir com a extrapolação dos cenários futuros, utilizou-se o resultado do período atual do zoneamento de riscos climáticos. Assim, foram utilizados apenas os municípios classificados como baixo risco climático no período atual e que são produtores da cultura, segundo os dados atuais do IBGE. Consequentemente, evitou-se a ausência de valores de produção daqueles municípios que não foram produtores nos últimos 20 anos. Entretanto, somente foi possível

analisar e estimar a produção agrícola dos municípios que possuíam classificação de baixo risco climáticos pelo zoneamento atual e que fossem produtores atualmente.

No caso específico da cultura do milho, foram cruzadas as 12 datas do zoneamento e classificado como alto risco climático os municípios que apresentassem pelo menos uma das datas inapta.

3.2.2 Seleção dos Modelos Climáticos Globais

O cenário de emissão de gases de interesse utilizado foi o SA2, que, juntamente com o cenário antagônico SB1, são bastante utilizados pela comunidade científica. No entanto, resultados como visto em Macedo Junior *et al.* (2009) e Pinto et al. (2008) mostraram que é pequena a diferença dos resultados produzidos por esses dois cenários no zoneamento agrícola, além de algumas verificações iniciais dos dados de 2010 já mostrarem que o cenário considerado mais drástico (SA2) encontra-se subestimado em relação às projeções do terceiro relatório do IPCC.

As variáveis temperatura e precipitação que foram utilizadas para a simulação do zoneamento agrícola das culturas estudadas não são geradas em todos os 23 modelos climáticos globais. Desta forma, a fim de reduzir os 23 modelos climáticos globais para um número menor, foram excluídos, previamente, aqueles modelos que não tivessem como saída uma dessas duas variáveis, isto é, temperatura e precipitação. A disponibilidade das variáveis por modelo climático pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis meteorológicas do cenário de interesse (A2) disponíveis nos 23 modelos climáticos globais do quarto relatório do IPCC.

Modelo Climático	Temperatura	Precipitação
BCC-CM1		
BCCR-BCM2.0	X	
CCSM3	X	X
CGCM3.1(T47)		
CGCM3.1(T63)		
CNRM-CM3	X	X
CSIRO-MK3.0	X	X
ECHAM5/MPIOM	X	X
ECHO-G	X	X
FGOALS-g1.0		
GFDL-CM2.0	X	X
GFDL-CM2.1	X	X
GISS-AOM		
GISS-EH		
GISS-ER	X	X
INM-CM3.0	X	X
IPSL-CM4	X	X
MIROC3.2(hires)		
MIROC3.2(medres)	X	X
MRI-CGCM2.3.2	X	X
PCM	X	X
UKMO-HadCM3	X	X
UKMO-HadGEM1	X	X

Após a exclusão dos modelos, discutida acima, sobraram 15 modelos climáticos globais que seguiram na análise. Os modelos restantes foram: CCSM3, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, ECHAM/MPIOM, ECHO-G, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-ER, INM-CM3.0, IPSL-CM4, MIROC3.2(medres), MRI-CGCM2.3.2, PCM, UKMO-HadCM3 e UKMO-

HadGEM1. É importante destacar que o modelo PCM foi previamente excluído pela ausência de informações contidas no arquivo texto, a fim de evitar onerar a soma dos erros quadrados.

As características técnicas (tais como física, química, processamento, resoluções e acoplamento, por exemplo) desses modelos climáticos globais disponíveis no site do PCMDI (<http://www-pcmdi.llnl.gov>) em formato de texto (.pdf) foram separadas em 27 atributos e colocadas em uma matriz com duas classes ou mais, dependendo do atributo em questão. Atributos para os quais todos os modelos possuíam a mesma classe foram excluídos, pois não contribuiriam para a descoberta de conhecimento no agrupamento. Obviamente, o número de atributos que cada modelo possui é superior ao número aqui utilizado. No entanto, para que fosse feita a comparação, o atributo precisava ser separados em poucas classes, isto é, alguns atributos possuíam uma classe diferente para cada modelo, o que impossibilitava sua comparação dentro da matriz. A Tabela 5 mostra os atributos utilizados para a comparação dos clusteres e suas respectivas classes.

Tabela 5 – Atributos utilizados em cada modelo e suas classes.

Atributo	Classe
Resolução Atmosférica Horizontal (Latitude)	Numérica (graus)
Resolução Atmosférica Horizontal (Longitude)	Numérica (graus)
Resolução Atmosférica Vertical	Numérica (número de níveis)
Pressão no Topo da Atmosfera	Numérica (hPa)
Condição no Topo da Camada Limite	Superfície Livre Tampa Rígida
Presença de Química Atmosférica	Booleano
Interação Biogeoquímica	Booleano
Tipo de Aerossóis	Vários Sulfatos Efeito Indireto de Sulfatos Nenhum
Presença de Geleira Continental	Booleano

Dinâmica da Geleira	Reologia (ramo da mecânica dos fluidos) Deslizamento Livre Sem Reologia
Conservação de Calor e Água no Acoplamento	Booleano
Ajuste de Fluxo	Calor e Água Calor, Água e Momento Nenhum
Frequencia de Acoplamento	Numérica (horas)
Mistura de Marés	Booleana
Presença da Camada Limite	Booleana
Resolução Oceânica horizontal (Latitude)	Numérica (graus)
Resolução Oceânica horizontal (Longitude)	Numérica (graus)
Resolução Oceânica Vertical	Numérica (número de níveis)
Tratamento da Camada Limite Inferior	Booleana
Mistura na Foz do Rio	Booleana
Mistura de Mares Isolados com o Oceano	Booleana
Tratamento de Salinidade no Gelo	Booleana
Tratamento de <i>Permafrost</i>	Booleana
Tratamento do Rejeito do Sal	Booleana
Tipo de Solo	Camada Simples Multicamadas
Tratamento do Escoamento Superficial	Booleana
Tratamento da Coordenada Z	Sigma Profundidade Sigma/ Profundidade

Após montada a matriz dos atributos que seria utilizada para a seleção dos modelos, pode-se avançar no processo de agrupamento. Através de uma análise não-supervisionada, esses atributos foram agrupados (*clustering*) com o propósito de obter k grupos de modelos climáticos globais o mais distante *inter-clusteres* e mais próximos *intra-cluster*, garantindo uma linearidade independente entre os grupos. Para isso, dentro do pacote de software de Licença Geral Pública *Weka 3.5.8 (Waikato Environment for Knowledge Analysis)*, desenvolvido em linguagem *Java* pela Universidade de Wakato (Nova Zelândia), foram inseridos os atributos dos 14 modelos climáticos globais selecionados anteriormete. O Weka tem como objetivo agregar algoritmos provenientes de diferentes abordagens em uma das áreas da inteligência artificial que se dedica ao estudo de aprendizado de máquinas. O software recorre às técnicas de *data-minning*, que procede à análise computacional e estatística dos dados fornecidos, e, de forma indutiva, utiliza padrões encontrados para gerar conhecimento e teorias.

Dentro do ambiente do *software* Weka foi utilizado o algoritmo K-means, sendo sua escolha feita após alguns pré-testes executados com os algoritmos DBSCAN e EM que não se mostraram sensíveis ao conjunto de dados estudados.

Foram testados, através do K-means, alguns valores de k , já que para este algoritmo o usuário é que determina previamente o número de *clusters* desejado (k). O intuito desse procedimento foi encontrar o menor número k possível que produzisse a maior variação de erro quadrático entre k e $k+1$, para um pré-determinado valor de *seed*. Desta forma, como seria impossível testar todos os valores de *seed*, foram escolhidos, arbitrariamente, cinco valores: 11, 100, 900, 9090 e 10000. Os valores da soma de erros quadrados (SEQ) para cada *seed* escolhido, sendo $6 \leq k \leq 1$, podem ser vistos na Figura 19.

Gráfico de (SEQ) para determinados valores de *seed* e *k*.

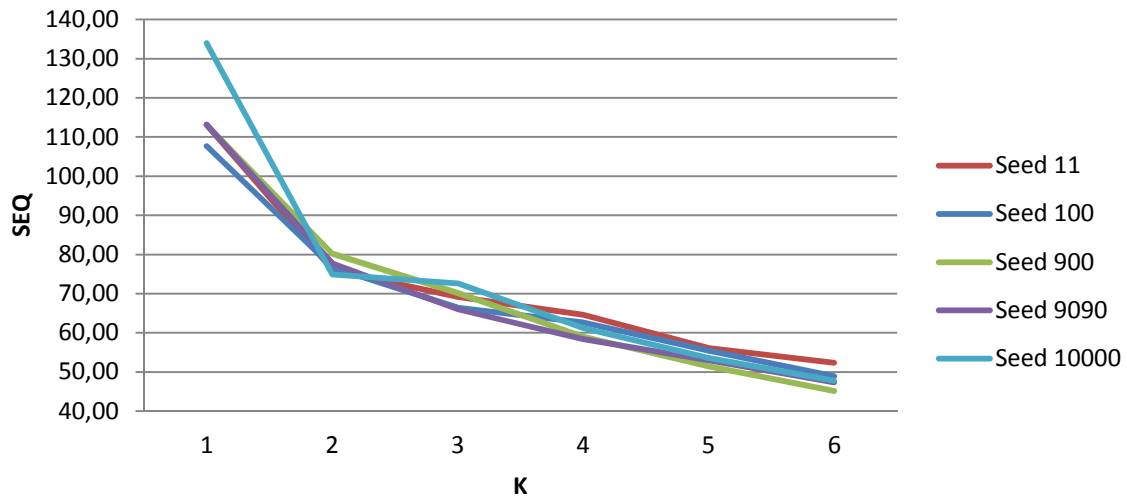


Figura 19 – Valores de SEQ para determinados *seed* e *k*.

Após calculado o valor de cada soma de erros quadrados (SEQ) para cada *seed* e *k*, como apresentado na Figura 19, foram calculados o valores das variações de SEQ entre k_{n-1} e k_n para os *seeds* que possuissem o valor mínimo de SEQ. A Figura 20 abaixo modtra o gráfico dos valores mínimos de SEQ para cada *seed* e *k*.

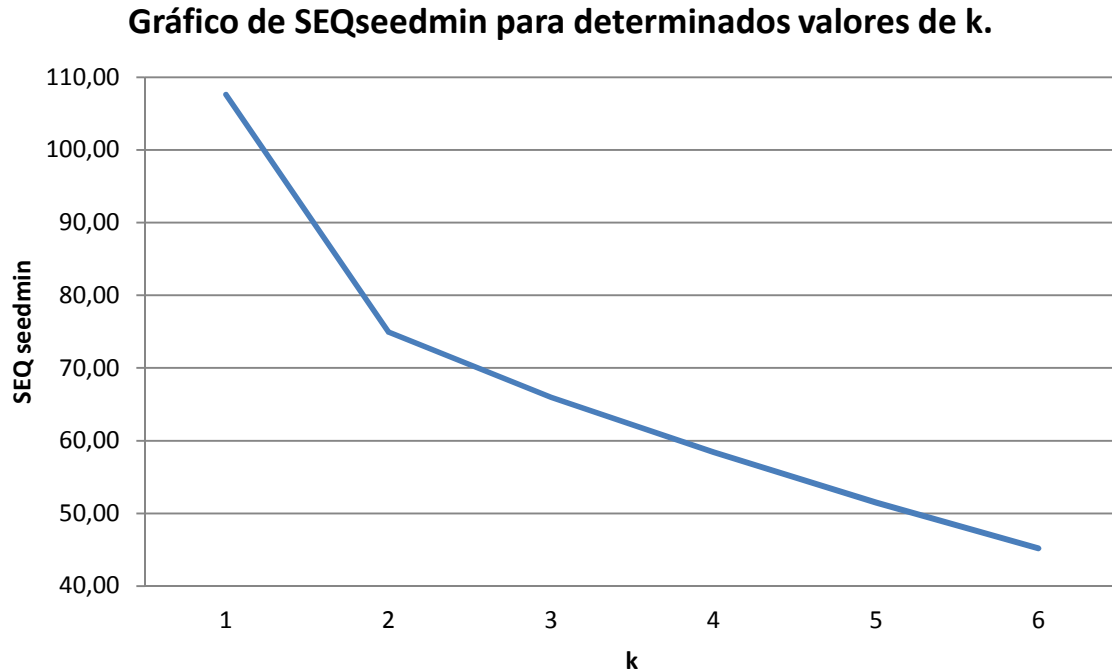


Figura 20 – Valores mínimos de SEQ dentre os seeds e k's.

Com isso, conseguiu-se determinar o melhor k entre os *seeds* escolhidos, reduzindo os erros quadrados. Os valores encontrados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das variações da soma dos erros quadrados entre k_{n-1} e k_n para *seeds* com valores de SEQ mínimo.

$k_{n-1}seedmin, k_nseedmin$	$\Delta SEQ_{seedmin}$
k_1100, k_210000	32,71
k_210000, k_39090	8,94
k_39090, k_49090	7,61
k_49090, k_5900	6,88
k_5900, k_69090	6,32

A Tabela 6 mostra que a maior variação ocorre entre k_1 e k_2 , demonstrando ser o número $k = 2$ a escolha para este trabalho, além de ser o menor k de maior variação entre k_{n-1} e k_n , os valores de $k > 2$ decrescem desaceleradamente. Obviamente, a escolha do *seed* = 10000 ocorre devido ao seu menor valor de SEQ quando comparado aos erros quadrados dos demais *seeds*.

3.2.2.1 Utilizando o k-means para k=2

Após a escolha pelo valor de $k = 2$ e *seed* 10000, foi executada a rodada com estes parâmetros substituindo as instâncias faltantes com valores de média e moda automáticos do software WEKA (*Replace Missing Values*). O algoritmo forneceu como saída dois clusters denominados de 0 e 1, sendo que em cada um deles havia a quantidade de sete elementos, gerando um erro quadrado de 74,93. Os elementos de cada cluster são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Elementos integrantes dos *clusters* 0 e 1 encontrados após a simulação.

<i>Cluster 0</i>	<i>Cluster 1</i>
CCSM3	CSIRO
CNRM-CM3.0	ECHAM
GFDL	ECHO-G
GISSEH	FGOALS
INCM3	HadCM3
IPCM4	HadGem1
MIROCmed	MRICGCM

3.2.2.2 Distância aos centros dos clusters

Após a determinação dos *clusters* 0 e 1, foram gerados os valores médios de cada atributo numérico e a moda de cada atributo nominal nos respectivos *clusters*. Para cada atributo, esses valores representavam os respectivos centros de seus clusters. A fim de determinar qual modelo climático global que se encontrava mais próximo do centro de seu *cluster* e, conseqüentemente, o mais distante possível inter-*clusters*, foi comparado o valor de cada atributo por modelo e comparado com o valor médio de seu *cluster*. Dessa forma, para cada atributo, foi contabilizado o modelo que estava mais próximo do valor médio (numérico) ou moda (nominal), sendo aquele de maior soma o modelo escolhido como o mais próximo do centro do cluster e, desta forma, o modelo climático global que foi utilizado neste trabalho.

As Figuras 21 e 22, ilustram o excerto acima. As circunferências da extrema direita representam o centro de cluster ou o local mais próxima dela, já que existem erros na distância

euclidiana do algoritmo. Hipoteticamente, o modelo que possuísse todos os valores de seus atributos exatamente igual aos valores do centro de cluster, seria exatamente o centro de cluster. Da mesma forma que, se um modelo climático estivesse mais próximo dos valores do centro do cluster nos 27 atributos, esse modelo estaria próximo do centro de cluster. Observa-se que na Figura 21, o modelo MIROCmed do *cluster* 0 em 8 atributos não foi o mais próximo dos valores da média ou moda do centro de *cluster*. Já o modelo INCM3, foi o mais distante com 13 atributos que não estava entre os mais próximos do centro do *cluster*. Esse argumento pode ser realmente concluído quando, em alguns valores instáveis testados de *k*, ele mudava de cluster facilmente com alteração do valor de *seed*. No caso da Figura 22, podem ser vistas as distâncias do *cluster* 1. Os modelos ECHAM e HadCM3 foram os mais próximos com 20 atributos entre os mais próximos do centro de seus cluster. No entanto, a fim de se escolher apenas um modelo por *cluster*, foi escolhido o HadCM3 que produziu menores distâncias euclidianas nos seus atributos numéricos.

Desta forma, utilizando a metodologia adotada, os modelos intra-*cluster* tendem a apresentar resultados semelhantes e dispares, inter-*clusteres*.

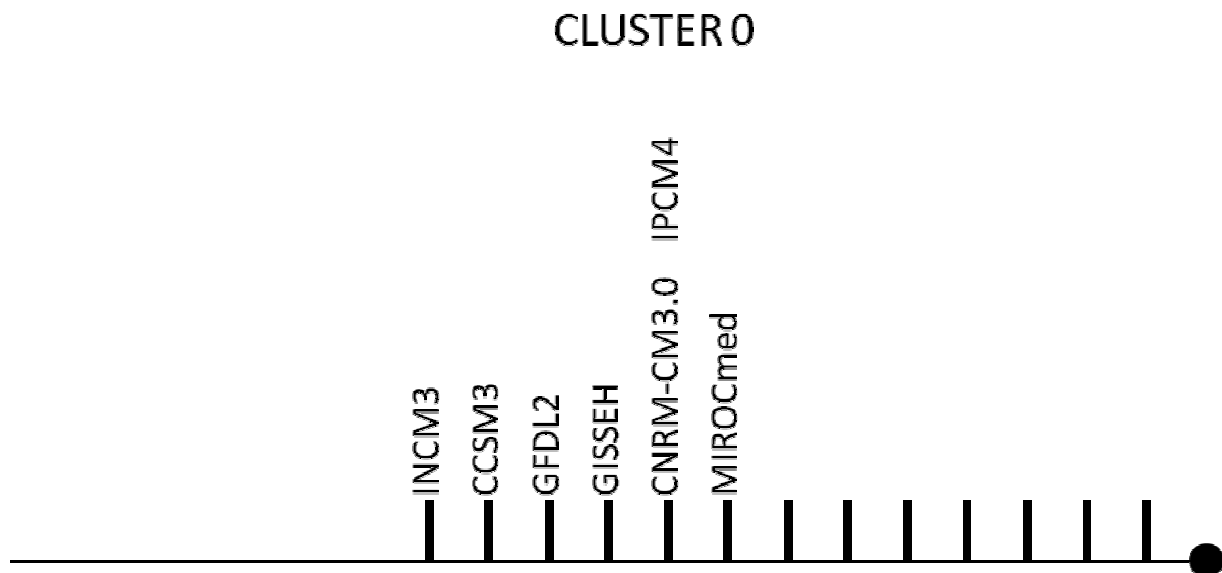


Figura 21 – Distâncias dos modelos componentes do *Cluster 0* ao seu respectivo centro.

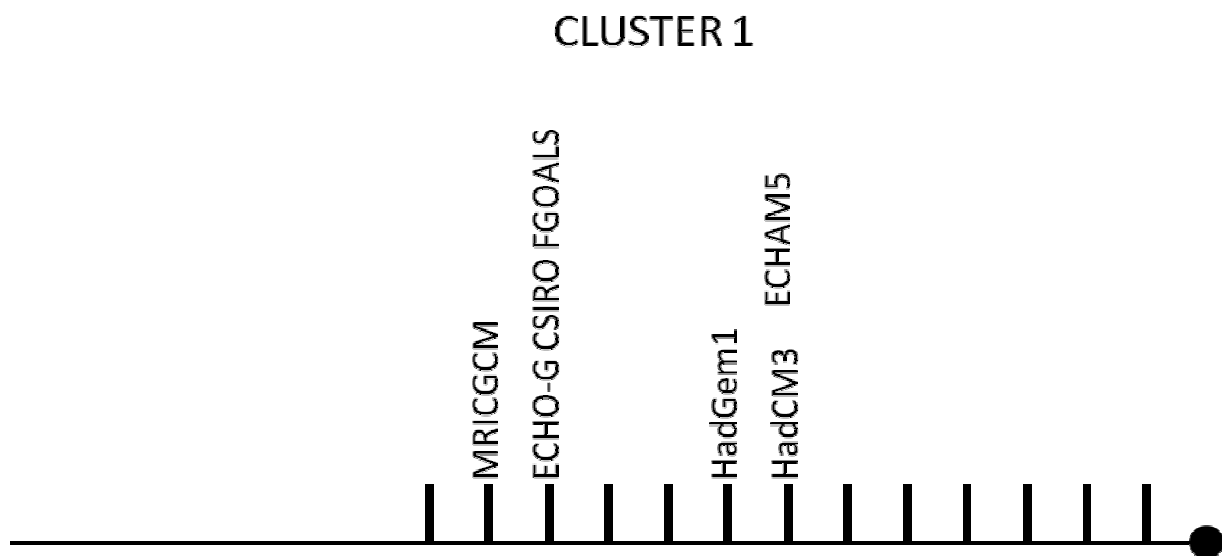


Figura 22 – Distâncias dos modelos componentes do *Cluster 1* ao seu respectivo centro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Café Arábica

4.1.1 HadCM3

A Tabela 8 e a Figura 23 mostram através do número de municípios o resultado do zoneamento de riscos climáticos para a cultura do café arábica alimentado pelas anomalias do modelo britânico HadCM3. Nota-se que a classe de baixo risco climático apresentou retração no período de 2010-2039 em relação ao período atual (1976-2005), tanto considerando as anomalias de temperatura e precipitação isoladamente quanto de forma conjunta. Para o modelo HadCM3, a anomalia de precipitação penalizou a cultura do café diminuindo a classe de baixo risco em 31%, enquanto a anomalia de temperatura diminuiu em 2,8%. Entretanto, o aumento do número de municípios da classe de alto risco climático foi maior para anomalia de temperatura, permanecendo praticamente constante quando inserida a anomalia de precipitação. Esta última anomalia aumentou significativamente a classe de médio risco, demonstrando restrição em uma das variáveis agrometeorológicas e não as três concomitantemente.

Tabela 8 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura do café arábica.

Risco Climático	Atual	Anom_T	$\Delta_{\text{anom_T, Atual}} (\%)$	Anom_P	$\Delta_{\text{anom_P, Atual}} (\%)$	Anom_P+T	$\Delta_{\text{anom_T+P, Atual}} (\%)$
Baixo	794	772	-2,8	548	-31,0	553	-30,4
Médio	664	638	-3,9	909	36,9	858	29,2
Alto	439	487	10,9	440	0,2	486	10,7

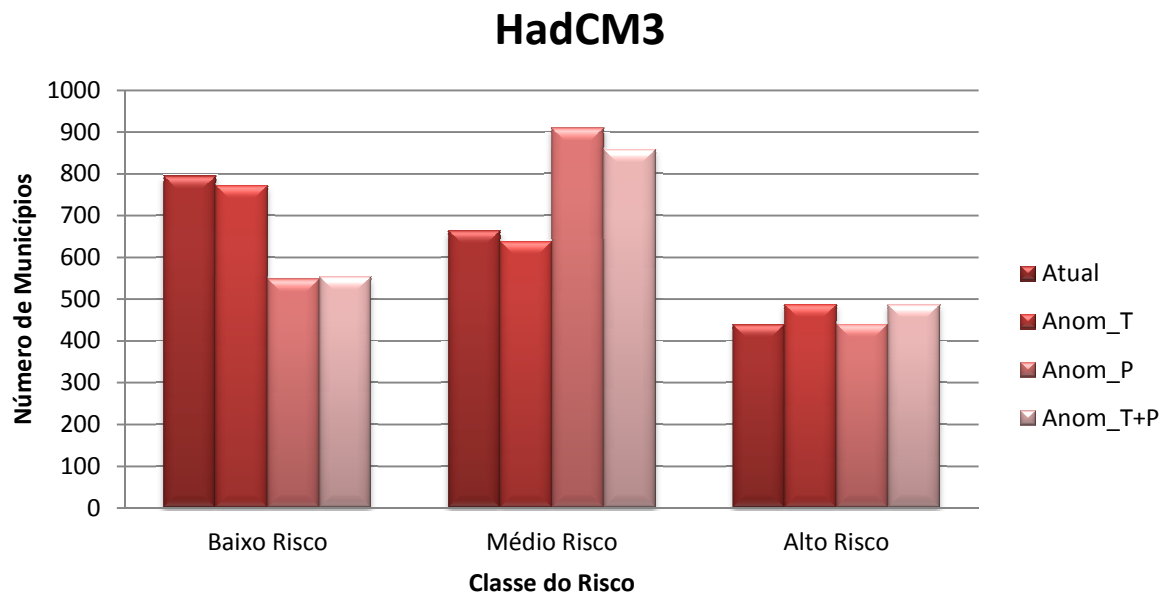


Figura 23 – Número de municípios classificados e suas respectivas classes de risco climático para a cultura do café arábica, com base no cenário A2, gerados pelo modelo HadCM3, no período 2010 a 2039, para as variáveis temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

A Tabela 9 mostra a migração das classes dos municípios seguindo as anomalias do modelo HadCM3. Pode-se observar que, quando comparado ao período atual (1976-2005), um número maior de municípios de baixo risco climático migrou para a classe de médio risco quando foi somente inserido a anomalia de precipitação. Entretanto, quando foi inserida exclusivamente a anomalia temperatura a maioria dos municípios permaneceram na classe de baixo risco. O resultado dessas duas afirmações foi a elevação do número de municípios que passaram a ser de médio risco climático e a elevação dos que permaneceram em baixo risco climático, não havendo praticamente alteração em municípios que já eram de alto risco climático, quando considerada a combinação das duas anomalias.

Tabela 9 – Tabela de variação de classes de municípios de acordo com as anomalias do modelo HadCM3 para a cultura do café arábica.

	Anom_T	%	Anom_P	%	Anom_P+T	%
BR_{MUN.}→MR	51	6,4	245	30,9	269	33,9
BR_{MUN.}→AR	2	0,3	1	0,1	2	0,3
BR_{MUN.}→BR	741	93,3	548	69,0	523	65,9

A Tabela 10 descreve a estimativa de produção com a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo HadCM3. Pode-se observar que a quantidade produzida pelos municípios que possuem indicação de baixo risco climático no zoneamento atual, e possuem produção de café arábica nos últimos 20 anos, pode ter um risco médio de 53,2%, se a somatória das produções dos próximos 20 anos se mantiver constante.

Tabela 10 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo HadCM3 na quantidade produzida de café arábica dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).

	Atual	Baixo Risco	%	Médio Risco	%	Alto Risco	%
Num. Municípios	676	419	62,0	257	38,0	0	0,0
P (10⁶ t)	21,65	10,13	46,8	11,52	53,2	0,00	0,0
$\bar{P}$ (10⁶ t)	1,08	0,51	46,8	0,58	53,2	0,00	0,0

4.1.2 MIROCmed

A Tabela 11 e a Figura 24 mostram o resultado do zoneamento de riscos climáticos para a cultura do café arábica com anomalias do modelo japonês MIROCmed. A classe de alto risco climático apresentou uma expansão significativa de 72% no período de 2010-2039 em relação ao período atual (1976-2005) quando foi considerada isoladamente a anomalia de temperatura. Para esse modelo climático global, a anomalia de temperatura diminuiu a classe de baixo risco em 20,7%, enquanto a anomalia de precipitação aumentou em 3,9%. Quando observa-se a composição das duas anomalias, obteve-se redução nas classes de baixo e médio risco climático e um crescimento significativo dos municípios classificados como alto risco climático.

Tabela 11 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura do café arábica.

Risco Climático	Atual	Anom_T	$\Delta_{anom_T, Atual} (\%)$	Anom_P	$\Delta_{anom_P, Atual} (\%)$	Anom_P+T	$\Delta_{anom_T+P, Atual} (\%)$
Baixo	794	630	-20,7	825	3,9	653	-17,8
Médio	664	512	-22,9	623	-6,2	491	-26,1
Alto	439	755	72,0	449	2,3	753	71,5

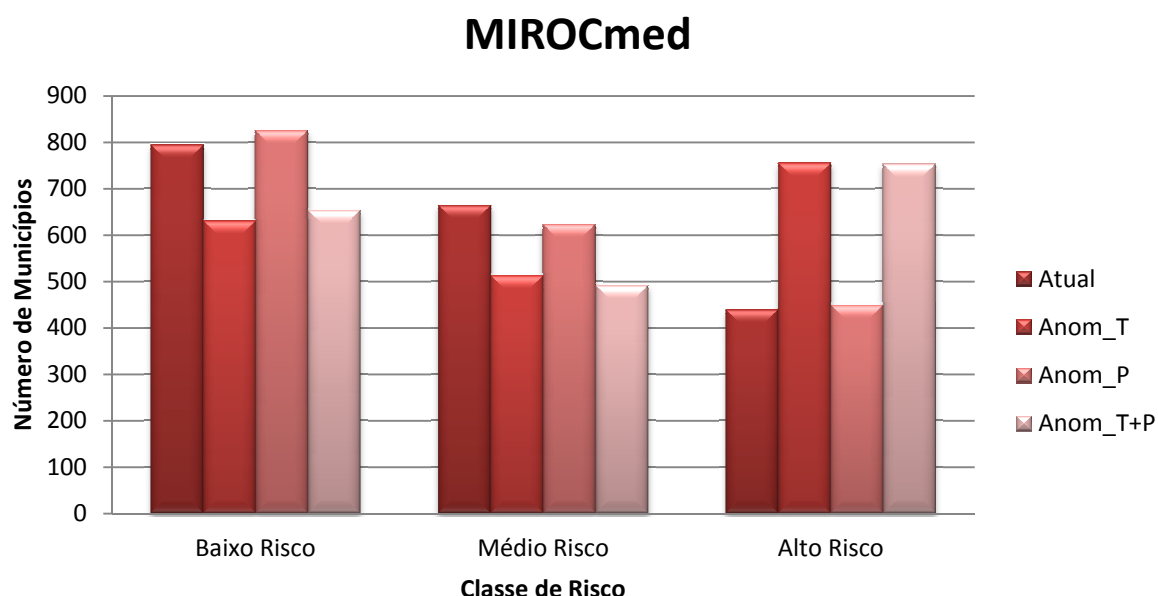


Figura 24 – Número de municípios e sua respectivas classe de riscos climáticos para a cultura do café arábica, com base no cenário A2, gerados pelo modelo MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

Pode-se observar na Tabela 12 que não existiu migração, em relação ao período atual, das classes de baixo risco climático para as de médio e alto risco climático, quando utilizada a anomalia de precipitação. Isso não se repetiu quando foi inserida a anomalia de temperatura. Como resultado disso, para a ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação, houve aumento das classes de alto e médio risco climático, porém, em sua maioria, houve permanência na classe de baixo risco climático quando comparado ao período atual.

Tabela 12 – Tabela de variação de classes de municípios de acordo com as anomalias do modelo MIROCmed para a cultura do café.

	Anom_T	%	Anom_P	%	Anom_P+T	%
BR_{MUN.}→MR	196	24,7	0	0,0	178	22,4
BR_{MUN.}→AR	45	5,7	0	0,0	43	5,4
BR_{MUN.}→BR	553	69,6	794	100	573	72,2

A estimativa de produção com a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed é descrita na Tabela 13. Pode-se avaliar que a quantidade produzida de café arábica pelos municípios que possuem indicação de baixo risco climático no zoneamento atual e possuem produção de café nos últimos 20 anos, pode ter um risco médio de 13,5% e comprometer em 2% por passar a ocupar áreas de alto risco climático, se a somatória das produções dos próximos 20 anos se mantiver constante.

Tabela 13 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo MIROCmed na quantidade produzida de café arábica dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).

	Atual	Baixo Risco	%	Médio Risco	%	Alto Risco	%
Num. Municípios	676	479	70,9	163	24,1	34	5,0
P (10⁶ t)	21,65	18,27	84,4	2,93	13,5	0,44	2,0
$\bar{P}$ (10⁶ t)	1,08	0,91	84,4	0,15	13,5	0,022	2,0

4.1.3 Comparação entre os modelos

Na comparação da anomalia conjunta de temperatura e precipitação (anom_T+P) dos modelos HadCM3 e MIROCmed para a cultura do café arábica, pode-se observar que houve, em ambos, uma diminuição no número de municípios classificados como baixo risco climático e aumento do número de municípios de alto risco climático, ficando a magnitude da classe de alto risco climático aumentada em 71,5% no caso do modelo MIROCmed e apenas 10,7% no caso do HadCM3. Também para a composição das duas anomalias, foi verificado que, para a classe de médio risco climático, houve aumento para o modelo HadCM3 e diminuição para o modelo MIROCmed. De acordo com a Tabela 15, a anomalia de temperatura do modelo MIROCmed provocou retração no número de municípios classificados como baixo e médio

risco climático, além de uma grande expansão na classificação de alto risco climático. Isso também ocorreu com essa anomalia no modelo HadCM3, porém com percentagens menores. Quando se analisa especificamente a anomalia de precipitação, verificam-se divergências mais significativas entre os modelos globais. Essa anomalia do modelo HadCM3 produziu valores absolutos superiores comparado aos do modelo MIROCmed, exceto a classe de alto risco climático que, praticamente, manteve-se constante. Tendo como base o período atual (1976-2005), o modelo HadCM3 gerou, para a classe de baixo risco climático, queda de 31% e, para a classe de médio risco climático, crescimento de 36,9%. Já o modelo MIROCmed, apontou para o número de municípios um aumento de 3,9% e 2,3%, respectivamente, nas classes de baixo e alto risco climático, além de uma diminuição de 6,2% na classe de médio risco.

Comparando as migrações das classes dos municípios seguindo as anomalias dos modelos HadCM3 e MIROCmed, pode-se observar, através das Tabelas 9 e 12, que quando anexada a anomalia de precipitação, para o modelo HadCM3, 30,9% dos municípios que eram classificados como sendo de baixo risco climático no período atual (1976-2005) passaram a ser de médio risco climático, diferentemente do modelo MIROCmed, onde 100% dos municípios permaneceram na classe de baixo risco climático. Dos municípios com baixo risco climático para a cultura do café arábica no período atual (1976-2005), passaram para as classes de médio e alto risco climático um número maior do modelo MIROCmed em comparação ao modelo HadCM3, quando avaliada a anomalia isolada de temperatura. Na composição das duas anomalias, pode-se inferir que a permanência na classe de baixo risco climático foi maior para o modelo MIROCmed, ao mesmo tempo que aqueles municípios que saíram dessa classe migraram 5,4% para a classe de maior risco climático. Entretanto, o modelo HadCM3 possuiu maior migração para outra classe, porém em quase sua totalidade para o médio risco.

A Figura 25 apresenta a simulação do zoneamento de risco climático para a cultura do café arábica utilizando como variável a área de baixo risco em cada uma das três composições das anomalias nos dois modelos climáticos globais. Nela fica evidente que para cada modelo uma anomalia penalizou mais a área da cultura cafeeira. O modelo HadCM3 produziu diminuição de áreas de baixo risco quando inserida a anomalia de precipitação isolada e, conseqüentemente, na somatória das duas. Já o modelo MIROCmed, apresentou diminuição de áreas de baixo risco quando inserida a anomalia isolada de temperatura e, por conseqüência, a combinação das duas.

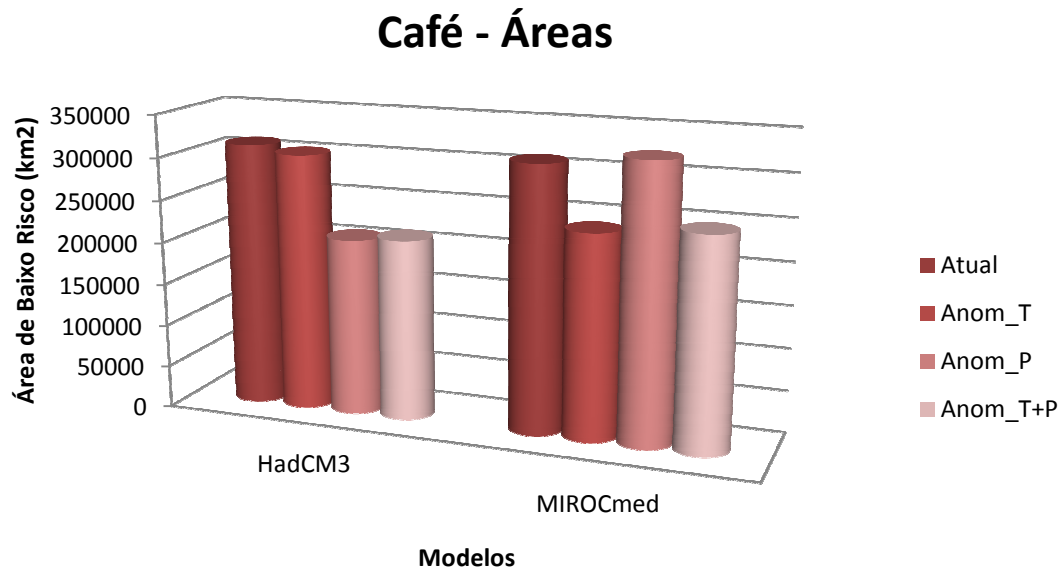


Figura 25 – Área de baixo risco climático para a cultura do café arábica, com base no cenário A2, gerada pelos modelos HadCM3 e MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

As Figuras 1 a 7 do Apêndice mostram a espacialização dos resultados dos estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo. Como já descrito, a soma da anomalia de temperatura do modelo HadCM3 não produziu grandes modificações no zoneamento para os três estados. Já, a anomalia de precipitação alterou a composição das anomalias fazendo com que parte das mesorregiões paulistas de Bauru, Campinas, Assis e Ribeirão Preto, além da Zona da Mata e oeste de Minas passasse da classe de irrigação recomendada para a classe de recomendação necessária. Fazendo uma análise isolada da anomalia de precipitação do modelo MIROCmed, não se pode observar nenhuma variação espacial significativa. Entretanto, a anomalia isolada de temperatura desse modelo gerou aumento da área de alto risco climático no Triângulo Mineiro, no norte e no centro de Minas Gerais, além das mesorregiões paulistas de Ribeirão Preto, Bauru, Araraquara e Marília e, ainda, o noroeste do Paraná. Essa anomalia também aumentou a classe de risco de temperatura elevada nas mesorregiões de Piracicaba e Assis. Devido à forte variação da anomalia de precipitação neste modelo, o resultado da composição das anomalias seguiu a tendência desta variável.

Tratando-se da estimativa de produção do café arábica feita com base nos dados do período 1990-2009, pode-se verificar uma alteração em 53,2% da classe de baixo risco climático para médio risco climático dos municípios que tiveram produção nos últimos 20 anos, quando houve simulação da anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo HadCM3. Já no caso do modelo MIROCmed, 13,5% da produção pode entrar em estado de alerta, migrando para a classe de médio risco climático, e 2% pode ficar comprometida por migrar para a classe de alto risco climático.

4.2 Cana-de-açúcar

4.2.1 HadCM3

A Tabela 14 e a Figura 26 mostram o resultado do zoneamento de riscos climáticos para a cultura da cana-de-açúcar considerando os valores de anomalia do modelo HadCM3. Nota-se que a classe de baixo risco climático apresentou uma retração no período 2010-2039, em relação ao período atual (1976-2005), assim como o aumento na classe de médio risco climático, considerando a anomalia de precipitação de forma isolada. No entanto, quando se observa a classe de alto risco climático, tanto utilizando a anomalia de temperatura quanto a anomalia de precipitação, houve expansão no número de municípios, sendo que esse número chegou a 682, 8% no caso da anomalia de precipitação.

Tabela 14 – Número de municípios em cada classe de risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura da cana-de-açúcar.

Risco Climático	Atual	Anom_T	$\Delta_{anom_T, Atual} (\%)$	Anom_P	$\Delta_{anom_P, Atual} (\%)$	Anom_P+T	$\Delta_{anom_T+P, Atual} (\%)$
Baixo	1141	1160	1,7	700	-38,7	719	-37,0
Médio	727	690	-5,1	970	33,4	936	28,7
Alto	29	47	62,1	227	682,8	242	734,5

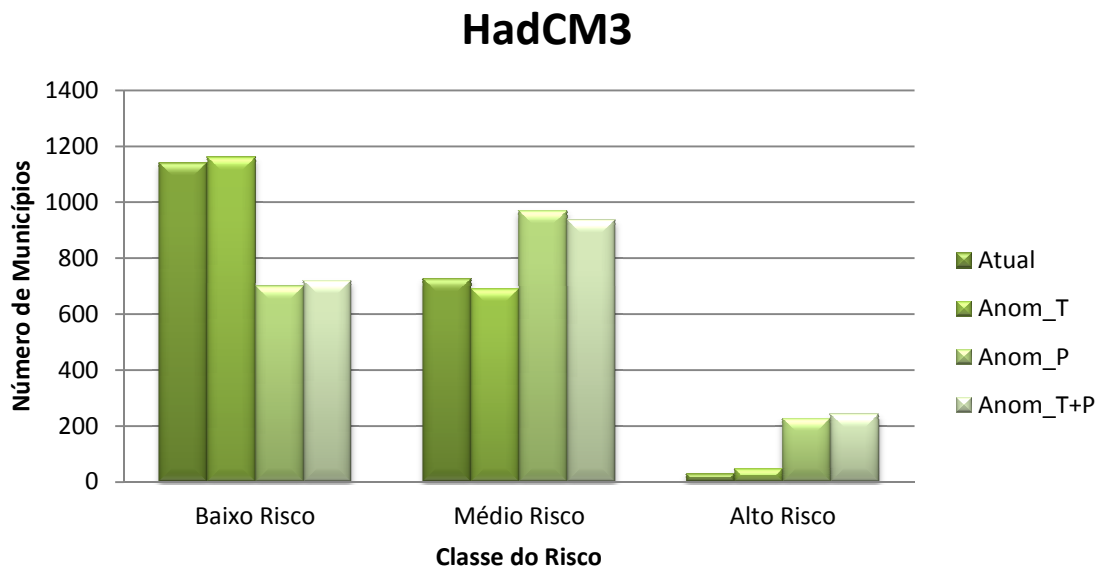


Figura 26 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar, com base no cenário A2, pelo modelo HadCM3, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

A Tabela 15 mostra a mudança de classe de risco climático dos municípios, segundo as anomalias do modelo HadCM3. Comparando-se ao período atual (1976-2005) não houve mudança de municípios que eram classificados como sendo de baixo risco climático para municípios que pudessem ser classificados como alto risco climático com a simulação das duas anomalias. Pode-se notar, através da Tabela 15, que o resultado do zoneamento com a anomalia de precipitação produziu uma maior migração de classes para médio risco climático, diferentemente da anomalia de temperatura, que mostrou a permanência de um número maior de municípios na classe de baixo risco climático.

Tabela 15 – Tabela de variação de classes de municípios de acordo com as anomalias do modelo HadCM3 para a cultura da cana-de-açúcar.

	Anom_T	%	Anom_P	%	Anom_P+T	%
BR_{MUN.}→MR	22	1,9	451	39,5	469	41,1
BR_{MUN.}→AR	0	0,0	0	0,0	0	0,0
BR_{MUN.}→BR	1119	98,1	690	60,5	672	58,9

A Tabela 16 apresenta a estimativa da produção de cana-de-açúcar com a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo HadCM3. Considerando os municípios que possuem indicação de baixo risco climático no zoneamento atual (1976-2005) e possuem produção de cana-de-açúcar nos últimos 20 anos, pode-se estimar que as 36,5% da quantidade produzida passe para a classe de médio risco climático, se a somatória das produções dos próximos 20 anos se mantiver constante.

Tabela 16 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo HadCM3, na quantidade produzida de cana-de-açúcar dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).

	Atual	Baixo Risco	%	Médio Risco	%	Alto Risco	%
Num. Municípios	1047	610	58,3	435	41,5	2	0,2
P (10⁹ t)	3,38	2,14	63,5	1,23	36,5	0,00019	0,01
$\bar{P}$ (10⁶ t)	168,80	107,19	63,5	61,61	36,5	0,0097	0,01

4.2.2 MIROCmed

Analisando a Tabela 17 e a Figura 27, tem-se que a anomalia de temperatura do modelo MIROCmed produziu uma expansão significativa de 131% no número de municípios de alto risco climático em relação ao período atual (1976-2005). Em contrapartida, a anomalia de precipitação do modelo reduziu o número de municípios de alto risco climático em 10,3%. Ainda assim, na composição das duas variáveis, houve um elevado e um reduzido aumento nas classes de alto e baixo risco climático, respectivamente, além de uma diminuição na classe de médio risco climático.

Tabela 17 – Número de municípios em cada classe de risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura da cana-de-açúcar.

Risco Climático	Atual	Anom_T	$\Delta_{anom_T, Atual} (\%)$	Anom_P	$\Delta_{anom_P, Atual} (\%)$	Anom_P+T	$\Delta_{anom_T+P, Atual} (\%)$
Baixo	1141	1160	3,5	1155	1,2	1189	4,2
Médio	727	690	-10,7	716	-1,5	655	-9,9
Alto	29	47	131,0	26	-10,3	53	82,8

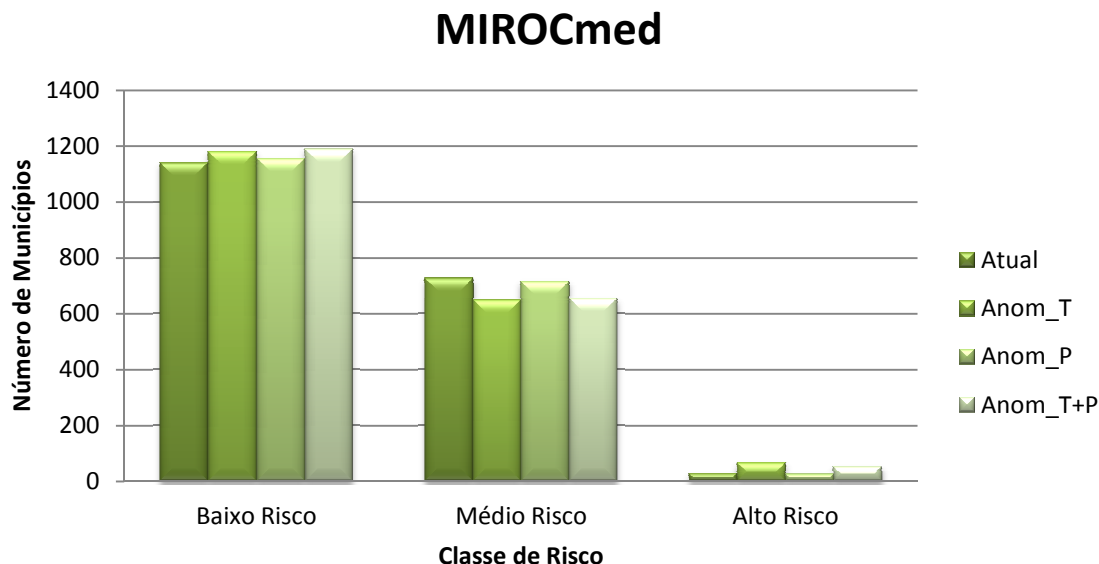


Figura 27 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar, com base no cenário A2, pelo modelo MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

A Tabela 18 mostra a migração das classes de risco climático dos municípios em cada situação de anomalia do modelo MIROCmed. Pode-se observar que não houve migração dos municípios de baixo risco climático para a classe de alto risco climático após a incorporação das anomalias climáticas. Além disso, a anomalia de temperatura produziu uma migração superior para a classe de médio risco climático, quando comparado com a ação isolada da anomalia de precipitação. Porém, nas três anomalias, a permanência na classe de baixo risco climático produziu um número de municípios significativamente superior às das demais classes.

Tabela 18 – Tabela de variação de classes de risco climáticos dos municípios de acordo com as anomalias do modelo MIROCmed para a cultura da cana-de-açúcar.

	Anom_T	%	Anom_P	%	Anom_P+T	%
BR_{MUN.} → MR	116	10,2	8	0,7	93	8,2
BR_{MUN.} → AR	0	0,0	0	0,0	0	0,0
BR_{MUN.} → BR	1025	89,8	1133	99,3	1048	91,8

Observando-se a Tabela 19, verifica-se a estimativa da produção com a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed. Considerando os municípios que possuem indicação de baixo risco climático no zoneamento atual (1976-2005) e possuem produção de cana-de-açúcar nos últimos 20 anos, pode-se estimar que 7,1% de suas produção passe para a classe de médio risco climático, caso a somatória das produções dos próximos 20 anos se mantenha constante.

Tabela 19 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo MIROCmed na quantidade produzida de cana-de-açúcar dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).

	Atual	Baixo Risco	%	Médio Risco	%	Alto Risco	%
Num. Municípios	1047	610	58,3	435	41,5	2	0,2
P (10⁹ t)	3,38	3,14	92,9	0,24	7,1	0,00012	0,0002
$\bar{P}$ (10⁶ t)	168,80	156,89	92,9	11,91	7,1	0,00607	0,0002

4.2.3 Comparação entre os modelos

Observando as Tabelas 14 e 17 pode-se comparar os modelos HadCM3 e MIROCmed para a cultura do cana-de-açúcar, onde, para as anomalias conjuntas de temperatura e precipitação (anom_T+P), houve aumento no número de municípios pertencentes à classe de alto risco climático. No entanto, em relação ao período atual (1976-2005), a classe de alto risco climático do modelo inglês aumentou significativamente em 734,5%. Já com as anomalias do modelo japonês, aumentou de 82,8%. Analisando ainda as anomalias conjuntas, foi observado que, para a classe de baixo risco climático houve diminuição mais significativa no número de municípios no caso do HadCM3 e um pequeno aumento no caso do modelo MIROCmed. Entretanto, para a classe de médio risco climático, houve acréscimo de 28,7% no modelo HadCM3 e decréscimo de 9,9% no modelo MIROCmed. Para ambos os modelos, HadCM3 e MIROCmed, quando se observa isoladamente a anomalia de temperatura, as classes de baixo, médio e alto risco climático apresentaram, respectivamente, aumento, redução e aumento do número de municípios em comparação ao período atual (1976-2005). Porém, para as três classes, o modelo japonês apresentou percentagens aproximadamente duas vezes maior que o modelo HadCM3. No caso da anomalia de precipitação, os resultados

obtidos foram bastante dispare, tanto no sinal da variação quanto da magnitude da percentagem. O modelo HadCM3 apresentou altas variações e, para as classes de baixo, médio e alto risco climático, houve, respectivamente, retração, expansão e expansão no número de municípios. No caso do modelo MIROCmed ocorreu o oposto do modelo inglês.

Através das Tabelas 15 e 18 pode-se comparar os modelos climáticos globais utilizando a migração das classes dos municípios de baixo risco climático para as classes de médio e alto risco. Para os dois modelos e as três composições de anomalias, nenhum município migrou da classe de baixo risco climático para a classe de alto risco. Quando isso ocorreu, foi somente para a classe de médio risco. Quando se inseriu a anomalia da temperatura, o modelo HadCM3 migrou para a classe de médio risco climático em 1,9% dos casos, e o modelo MIROCmed, em 10,2%. Para a anomalia de precipitação, houve inversão: o modelo japonês apresentou 0,7% e o modelo inglês, 39,5% de migração. Demonstrando, que mesmo para a classe de médio risco climático, o modelo MIROCmed apresentou valores menores de municípios que migraram para esta classe, comparado ao modelo HadCM3. Através da Figura 28 podem-se comparar as áreas de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar nos três estados estudados. O modelo MIROCmed apresentou no caso da inserção isolada da anomalia de temperatura, expansão da área de cana-de-açúcar com baixo risco climático em relação ao período atual (1976-2005). Isso também aconteceu para esta mesma anomalia no modelo HadCM3. Em contrapartida, após a simulação isolada da anomalia da variável de precipitação, houve impacto na área de baixo risco climático da cana-de-açúcar do modelo HadCM3, gerando, também, uma diminuição dessa classe em relação ao período atual (1976-2005) na composição das duas anomalias.

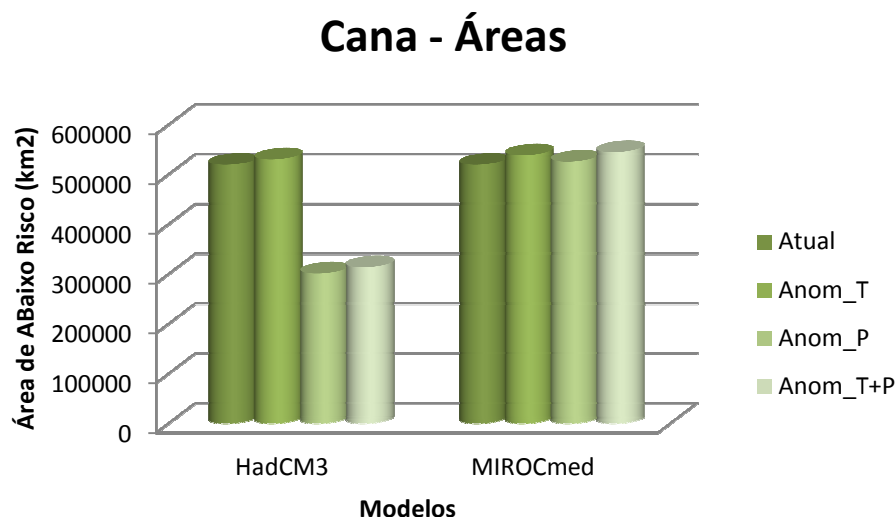


Figura 28 – Área de baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar, com base no cenário A2, pelos modelos HadCM3 e MIROCmed, no período 2010 a 2039, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

A análise espacial dos resultados do zoneamento de riscos da cana-de-açúcar acima pode ser feita através das Figuras 8 a 14 do Apêndice. Para o modelo MIROCmed, quando simulado apenas com a anomalia de precipitação, houve poucas mudanças espaciais na predição do período. Entretanto, no caso da anomalia de temperatura, houve aumento da classe de alto risco climático no centro e noroeste de Minas Gerais, Vale do Mucuri, Triângulo Mineiro e sudeste do Paraná. Além disso, a anomalia produziu a diminuição do risco por geada no sul de Minas Gerais, centro do Paraná e mesorregião de Curitiba e, também, diminuição das áreas de baixo risco climático na mesorregião paulista de São José do Rio Preto. Analisando o modelo HadCM3, este produziu, quando somada a anomalia de temperatura, resultados com poucas mudanças nas classes de riscos quando comparado ao período atual. Já, a anomalia de temperatura colocou toda a faixa que se estende do centro ao norte de Minas Gerais, além da porção leste do mesmo estado, em classificação de alto risco climático. A anomalia também produziu um aumento significativo na classe de irrigação recomendada no Triângulo Mineiro, Zona da Mata (MG), assim como as mesorregiões paulistas de São Jose do Rio Preto e Ribeirão Preto.

Comparando as estimativas de produção de cana-de-açúcar, pode-se observar uma maior diminuição na classe de baixo risco climático com a anomalia do modelo HadCM3 em comparação ao modelo MIROCmed. O modelo inglês apresentou uma redução de 36,5%

enquanto o modelo japonês, 7,1%. Além disso, em ambos os modelos, a cultura apresentou valores inferiores a 0,1% para a classe de alto risco climático.

4.3 Milho

4.3.1 HadCM3

Os resultados do zoneamento de riscos climáticos da cultura do milho podem ser vistos na Tabela 20 e na Figura 29, com base nas anomalias do modelo HadCM3. Fica evidente, através da Tabela 24, que houve retração nos municípios de baixo risco climático apenas quando se inseriu a anomalia de precipitação, em praticamente todos os decêndios avaliados, gerando um resultado similar no número de municípios das anomalias conjuntas. No caso da utilização estrita da anomalia de temperatura, a variação praticamente não ocorre, com exceção dos quatro últimos decêndios, onde ocorre diminuição no número de municípios que pertenciam a classe de baixo risco. A Figura 29 demonstra a variação por decêndio do número de municípios de baixo risco climático. Observando a anomalia de precipitação, houve variação no decorrer do ciclo com pico no segundo decêndio de outubro (OUT_2), diferentemente da ação isolada da anomalia de temperatura que demonstrou ser constante durante o decorrer do ciclo e começou a apresentar queda no número de municípios de baixo risco climático a partir do segundo decêndio de novembro (NOV_2).

Tabela 20 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura do milho.

Data	Atual	Anom_T	Δ_{anom_T} , Atual (%)	Anom_P	Δ_{anom_P} , Atual (%)	Anom_P+T	Δ_{anom_T+P} , Atual (%)
SET_1	1773	1777	0,2	1313	-25,9	1313	-25,9
SET_2	1803	1803	0,0	1428	-20,8	1431	-20,6
SET_3	1803	1803	0,0	1492	-17,2	1500	-16,8
OUT_1	1803	1803	0,0	1624	-9,9	1626	-9,8
OUT_2	1803	1803	0,0	1662	-7,8	1660	-7,9
OUT_3	1803	1803	0,0	1583	-12,2	1575	-12,6
NOV_1	1795	1793	-0,1	1550	-13,6	1538	-14,3
NOV_2	1773	1764	-0,5	1584	-10,7	1577	-11,1
NOV_3	1674	1645	-1,7	1534	-8,4	1513	-9,6
DEZ_1	1657	1620	-2,2	1603	-3,3	1578	-4,8
DEZ_2	1657	1620	-2,2	1617	-2,4	1608	-3,0
DEZ_3	1644	1590	-3,3	1617	-1,6	1608	-2,2
Média	1749,0	1735,3	-0,8	1550,6	-11,2	1543,9	-11,6

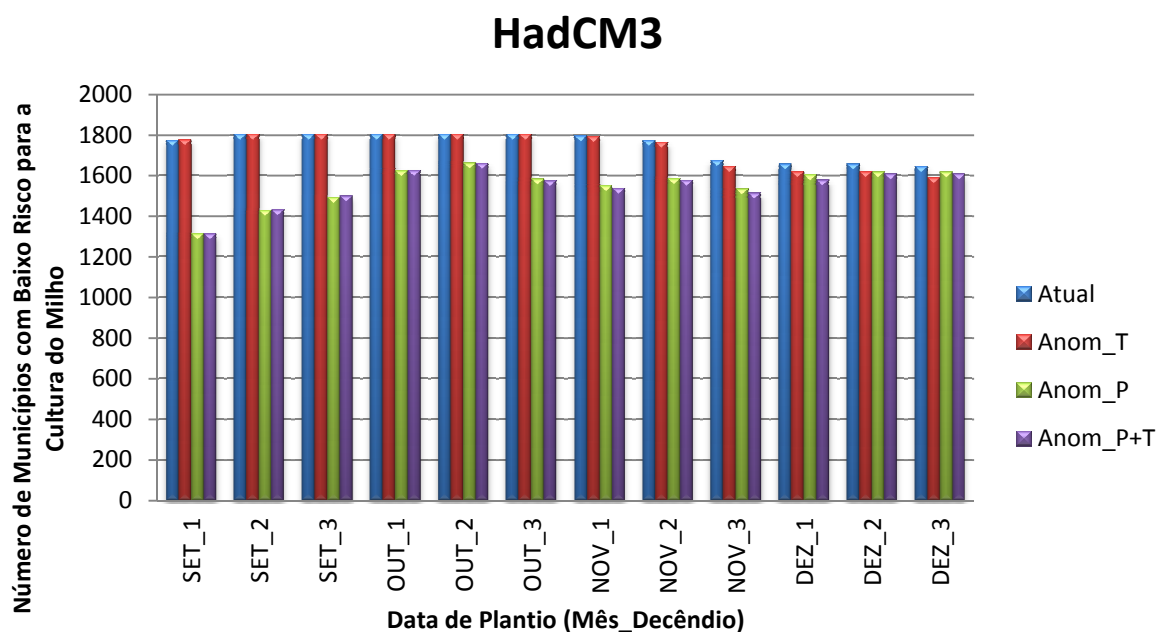


Figura 29 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo HadCM3, no período 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

Observa-se, na Tabela 21, o crescimento no número de municípios com alto risco climático na maior parte das datas do ciclo da cultura do milho. Os aumentos mais significativos ocorreram com a utilização isolada da anomalia de temperatura quando comparado aos resultados da anomalia de precipitação. Pode-se observar também que, para o modelo inglês, os decêndios SET_1 e NOV_1 foram aqueles que apresentaram o maior número de municípios nessa classe.

Tabela 21 – Número de municípios com alto risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global HadCM3 para a cultura do milho.

Data	Atual	Anom_T	Δ_{anom_T} Atual (%)	Anom_P	Δ_{anom_P} Atual (%)	Anom_P+T	Δ_{anom_T+P} Atual (%)
SET_1	30	26	-13,3	490	1533,3	490	1533,3
SET_2	0	0	-	375	-	372	-
SET_3	0	0	-	311	-	303	-
OUT_1	0	0	-	179	-	177	-
OUT_2	0	0	-	141	-	143	-
OUT_3	0	0	-	220	-	228	-
NOV_1	8	10	25,0	253	3062,5	265	3212,5
NOV_2	30	39	30,0	219	630,0	226	653,3
NOV_3	129	158	22,5	269	108,5	290	124,8
DEZ_1	146	183	25,3	200	37,0	225	54,1
DEZ_2	146	183	25,3	186	27,4	195	33,6
DEZ_3	159	213	34,0	186	17,0	195	22,6
Média	54,0	67,7	21,3	252,4	773,7	259,1	804,9

A Tabela 22 mostra o número de datas e municípios gerados pelo zoneamento agrícola de riscos climáticos para a cultura do milho com as anomalias do modelo HadCM3. Ao comparar com o período atual (1976-2005), a anomalia da precipitação produziu uma maior retração no número de datas e municípios de baixo risco climático. Isso também pode ser constatado na média de redução de datas quando se comparam as ações isoladas das anomalias de temperatura e precipitação, que demonstra que a anomalia de precipitação reduziu duas vezes mais as datas do que a anomalia de temperatura. Entretanto, em todos os municípios

envolvidos, pelo menos uma das 12 datas do ciclo ainda possui classificação de baixo risco climático.

Tabela 22 – Tabela estatística de datas e municípios de acordo com as anomalias do modelo HadCM3 para a cultura do milho.

	Atual	Anom_T	Anom_P	Anom_P+T
Número total de datas de baixo risco	20988	20824	18607	18527
Média Total	11,6	11,6	10,3	10,3
Número de redução de datas	-	170	2381	2461
Número de municípios com redução de datas	-	90	614	624
Média de Redução de datas	-	1,9	3,9	3,9
Número de municípios que não possuem mais data de baixo risco	-	0	0	0
Número de municípios sem redução de datas	-	1707	1189	1179
Número de municípios que tiveram aumento de datas de baixo risco após as anomalias	-	6	0	0
Número de municípios que tiveram aumento de datas e que não tinham nenhuma data antes da anomalia	-	0	0	0

Analizando a quantidade produzida de milho dos municípios de baixo risco climático do cenário atual (1976-2005), e que atualmente são produtores, pode-se observar uma possível diminuição de 27,3% da produção quando inserida a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo HadCM3. Este valor é sugerido caso a soma da produção dos próximos 20 anos mantenha-se constante em relação ao período 1990-2009.

Tabela 23 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo HadCM3 na quantidade produzida de milho dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual.

	Atual	Baixo Risco	%	Alto Risco	%
Num. Municípios	1640	1172	71,5	468	28,5
P (10⁶ t)	351,14	255,30	72,7	95,84	27,3
$\bar{P}$ (10⁶ t)	17,56	12,77	72,7	4,79	27,3

4.3.2 MIROCmed

Para os resultados gerados pelas anomalias do modelo MIROCmed, a Tabela 24 e a Figura 30 indicam uma retração quando inserida a anomalia de temperatura em todas as 12 datas de plantio do milho. Diferentemente, no caso da inserção exclusiva da anomalia de precipitação, a variação permanece praticamente constante, exceto os quatro últimos decêndios, onde ocorre retração. Fazendo uma análise por decêndio, pode-se observar, através da Figura 30, que, com a presença isolada da anomalia de temperatura existe, uma pequena variação entre valores altos e baixos de municípios com baixo risco climático, ocorrendo picos nos primeiro e segundo decêndios de outubro (OUT_1 e OUT_2), finalizando com uma queda mais acentuada nos últimos decêndios do ciclo. Em contrapartida, a simulação com a anomalia de precipitação produziu uma constante na maior parte dos decêndios e uma queda a partir do segundo decêndio de novembro (NOV_2).

Tabela 24 – Número de municípios com baixo risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura do milho.

Data	Atual	Anom_T	$\Delta_{anom_T,}$ Atual (%)	Anom_P	$\Delta_{anom_P,}$ Atual (%)	Anom_P+T	$\Delta_{anom_T+P,}$ Atual (%)
SET_1	1773	1584	-10,7	1784	0,6	1663	-6,2
SET_2	1803	1678	-6,9	1803	0,0	1741	-3,4
SET_3	1803	1703	-5,5	1803	0,0	1741	-3,4
OUT_1	1803	1733	-3,9	1803	0,0	1761	-2,3
OUT_2	1803	1742	-3,4	1803	0,0	1761	-2,3
OUT_3	1803	1716	-4,8	1803	0,0	1738	-3,6
NOV_1	1795	1672	-6,9	1803	0,4	1690	-5,8
NOV_2	1773	1664	-6,1	1777	0,2	1664	-6,1
NOV_3	1674	1529	-8,7	1650	-1,4	1520	-9,2
DEZ_1	1657	1502	-9,4	1613	-2,7	1470	-11,3
DEZ_2	1657	1502	-9,4	1613	-2,7	1470	-11,3
DEZ_3	1644	1465	-10,9	1606	-2,3	1455	-11,5
Média	1749,0	1624,2	-7,2	1738,4	-0,7	1639,5	-6,4

A Tabela 25 aponta o crescimento da classe de alto risco climático na maior parte das datas de plantio do milho. Em comparação com a anomalia de precipitação, os aumentos mais

significativos ocorreram com a utilização isolada da anomalia de temperatura. Pode-se observar, também que, assim como o modelo HadCM3, o modelo MIROCmed apontou os decêndios SET_1 e NOV_1 como aqueles de maior número de municípios de alto risco climático.

Tabela 25 – Número de municípios com alto risco climático para as anomalias de temperatura e precipitação e suas percentagens em relação ao período atual (1976-2005), gerados pelo modelo climático global MIROCmed para a cultura do milho.

Data	Atual	Anom_T	Δ_{anom_T} , Atual (%)	Anom_P	Δ_{anom_P} , Atual (%)	Anom_P+T	Δ_{anom_T+P} , Atual (%)
SET_1	30	219	630,0	19	-36,7	140	366,7
SET_2	0	125	-	0	-	62	-
SET_3	0	100	-	0	-	62	-
OUT_1	0	70	-	0	-	42	-
OUT_2	0	61	-	0	-	42	-
OUT_3	0	87	-	0	-	65	-
NOV_1	8	131	1537,5	0	-100,0	113	1312,5
NOV_2	30	139	363,3	26	-13,3	139	363,3
NOV_3	129	274	112,4	153	18,6	283	119,4
DEZ_1	146	301	106,2	190	30,1	333	128,1
DEZ_2	146	301	106,2	190	30,1	333	128,1
DEZ_3	159	338	112,6	197	23,9	348	118,9
Média	54,0	178,8	424,0	64,6	-6,8	163,5	362,4

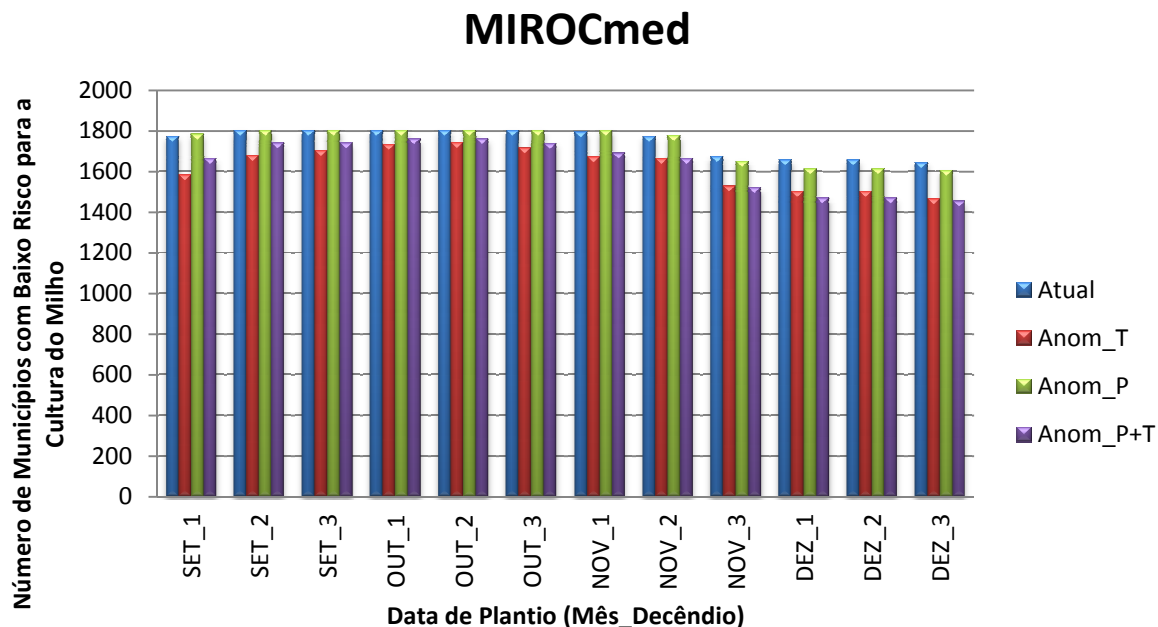


Figura 30 – Número de municípios classificados como sendo de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo MIROCmed, no período 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

A Tabela 26 mostra o número de datas e municípios gerados pelo zoneamento agrícola de riscos para a cultura do milho com as anomalias do modelo MIROCmed. Para esse modelo, houve maior retração de datas e número de municípios de baixo risco climático com inserção da anomalia de temperatura, quando comparada ao período atual(1976-2005). Na média de redução de datas, a anomalia de temperatura retraiu praticamente duas vezes mais que a anomalia de precipitação. Além disso, dos municípios avaliados, 17 deles não apresentaram mais nenhuma data de baixo risco climático em todo o ciclo com a anomalia de temperatura. Entretanto, 30 municípios tiveram aumento de datas de baixo risco climático com a anomalia de precipitação.

Tabela 26 – Tabela estatística de datas e municípios de acordo com as anomalias do modelo MIROCmed para a cultura do milho.

	Atual	Anom_T	Anom_P	Anom_P+T
Número total de datas de baixo risco	20988	19490	20861	19674
Média Total	11,6	10,9	11,6	11,0
Número de redução de datas	-	1498	157	1314
Número de municípios com redução de datas	-	336	60	329
Média de Redução de datas	-	4,5	2,6	4,0
Número de municípios que não possuem mais data de baixo risco	-	17	0	13
Número de municípios sem redução de datas	-	1467	1713	1474
Número de municípios que tiveram aumento de datas de baixo risco após as anomalias	-	0	30	0
Número de municípios que tiveram aumento de datas e que não tinham nenhuma data antes da anomalia	-	0	0	0

Através da Tabela 27 pode-se verificar a quantidade produzida de milho dos municípios de baixo risco climático do cenário atual (1976-2005) e que, atualmente, são produtores. Poderá ocorrer uma diminuição de 7,8% da produção quando inserida a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed, mantendo-se constante a somatória dos últimos 20 anos de produção.

Tabela 27 – Estimativa dos impactos da ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação geradas pelo modelo MIROCmed na quantidade produzida de milho dos municípios produtores no período 1990-2009 e constituintes da classe de baixo risco climático no cenário atual (1976-2005).

	Atual	Baixo Risco	%	Alto Risco	%
Num. Municípios	1640	1426	87,0	214	13,0
P (10⁶ t)	351,14	323,92	92,2	27,22	7,8
$\bar{P}$ (10⁶ t)	17,56	16,2	92,2	1,36	7,8

4.3.3 Comparação entre os modelos

Comparando os modelos HadCM3 e MIROCmed para a cultura do milho, pode-se observar que para ambos, de maneira geral, a simulação apresentou redução do número de municípios produtores com baixo risco climático no período 2010-2039, nas 12 datas de plantio consideradas.

Observa-se que, nas Tabelas 20 e 24, a variação em relação ao período atual ($\Delta_{anom_x, Atual}$) mostra, em percentagem, se houve expansão/retração no número de municípios que possuíam classe de baixo risco. Desta forma, a Tabela 20 aponta que o modelo HadCM3 apresentou uma baixa retração quando ocorre o incremento da anomalia de temperatura comparado ao modelo MIROCmed (Tabela 24). Essa situação de inverteu quando se incrementou a anomalia de precipitação. Na composição das duas anomalias, o modelo HadCM3 possuiu um efeito de maior retração no número de municípios com baixo risco climático para a cultura do milho nos estados Minas Gerais, Paraná e São Paulo. No que se diz respeito ao aumento do número de municípios na classe de alto risco climático, verifica-se, pelas Tabelas 21 e 25, que a penalização da cultura pelas anomalias do modelo HadCM3 foi, na média das 12 datas de plantio utilizadas, consideravelmente superior quando comparado ao modelo MIROCmed.

Através das Figuras 29 e 30, pode-se verificar o comportamento das anomalias no decorrer do tempo que é representado pelas 12 datas de plantio da cultura do milho, geradas, respectivamente, pelos modelos HadCM3 e MIROCmed. Os decêndios das Figuras podem ser resumidos em: SET_2, SET_3, OUT_1, OUT_2 e OUT_3. Os modelos HadCM3 e MIROCmed mostraram que, para o período 2010-2039 do cenário SA2, os decêndios OUT_1 e OUT_2 possuem o maior número de municípios com baixo risco climático, assim como a maior área. No entanto, houve divergência com relação aos decêndios do mês de dezembro. Para o MIROCmed, esses decêndios são de menor número de municípios, contrapondo com o HadCM3, que possui valores elevados.

Através de uma comparação das Tabelas 22 e 26 pode-se inferir que, quando inserida a anomalia de temperatura separadamente, o modelo MIROCmed apresentou um número maior de redução de datas e de número de municípios de baixo risco climático. Em contrapartida, quando se inseriu separadamente a anomalia de precipitação, a situação inverteu-se. Também se pode compreender que o modelo japonês penalizou mais a cultura do milho que o modelo global HadCM3.

As Figuras 31 e 32 mostram, respectivamente, os resultados das simulações do zoneamento para as três composições de anomalias dos modelos HadCM3 e MIROCmed, utilizando como parâmetro a área de baixo risco climático e as datas de plantio da cultura do milho. Pode-se observar que em ambos os modelos climáticos, quando inseridas as anomalias

de temperatura, o comportamento da área de baixo risco nos decêndios do ciclo foram semelhantes. Percebe-se que a área começou a diminuir a partir dos primeiros decêndios de novembro, ficando, anteriormente a essa data e nos últimos meses do ciclo, praticamente constante. Esse comportamento acabou por se repetir para a anomalia de precipitação do modelo MIROCmed, diferentemente do modelo HadCM3, que apresentou um crescente nas áreas de baixo risco climático, atingindo um pico no segundo mês de outubro, e uma segunda crescente após o terceiro decêndio de novembro. Deve-se ressaltar que a anomalia de precipitação produziu a maior diferença em relação ao período atual.

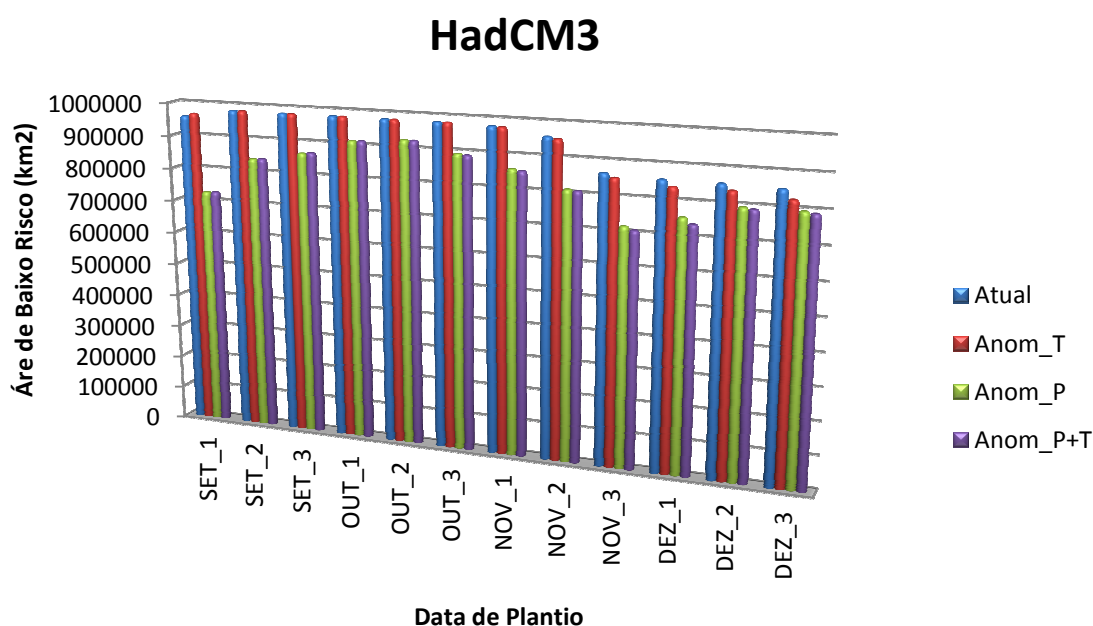


Figura 31 – Área de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo HadCM3, no período de 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

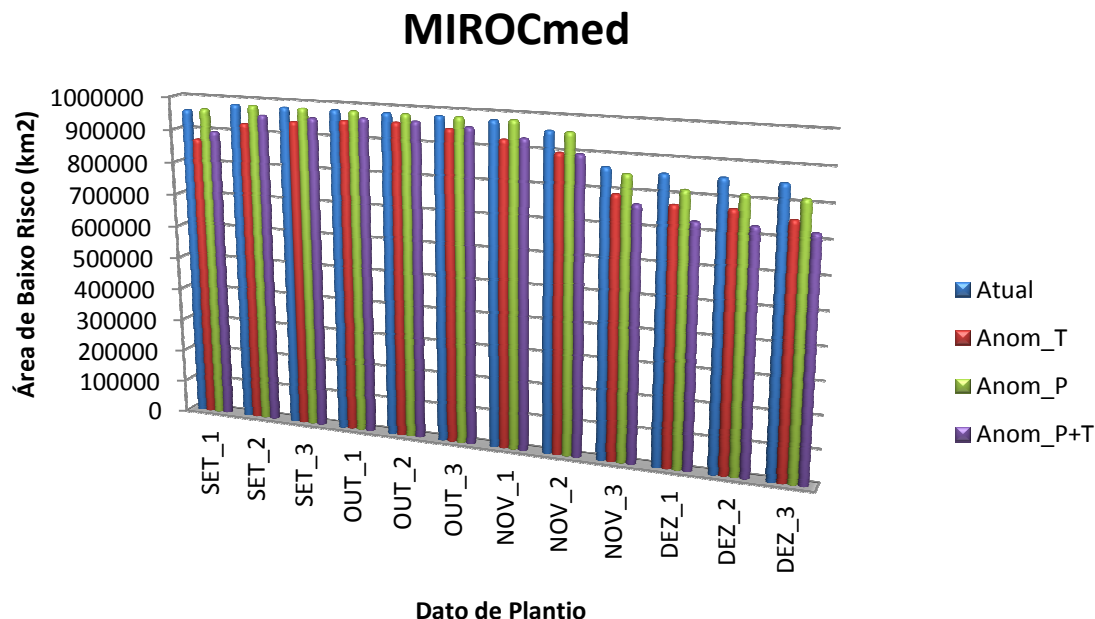


Figura 32 – Área de baixo risco climático para a cultura do milho de ciclo médio, com base no cenário A2 pelo modelo MIROCmed, no período de 2010 a 2039, nos decêndios de setembro a dezembro, para as variáveis de temperatura, precipitação e as duas em conjunto.

As Figuras que vão do número 15 ao 96 do Apêndice mostram, de forma espacial, o zoneamento de riscos climáticos para a cultura do milho em todas as suas 12 datas de plantio, para cada um dos modelos globais e as três composições de anomalias. Importante ressaltar que as áreas litorâneas dos estados de São Paulo e Paraná foram classificadas previamente como alto risco climático devidas ao excesso de umidade bastante prejudicial à cultura do milho. Analisando a soma isolada da anomalia de temperatura do modelo HadCM3, pode-se observar que existiram mudanças significativas a partir do terceiro decêndio do mês de novembro. Desse decêndio em diante ocorre aumento da área de alto risco no noroeste de São Paulo, noroeste de Minas Gerais, Triângulo Mineiro, além dos vales mineiros do Mucuri e Rio Doce. No caso da mesma anomalia inserida no modelo MIROCmed, houve aumento mais significativo das áreas de alto risco climático do primeiro decêndio de setembro, regredindo até o segundo decêndio de outubro. As áreas compreendidas nessas datas foram as mesorregiões paulistas de São José do Rio Preto e Presidente Prudente, além de porções do norte de Minas Gerais, Triângulo Mineiro, e

também, noroeste e oeste do Paraná. A partir do terceiro decêndio de outubro, inicia-se um aumento novamente da classe de alto risco climático no Triângulo Mineiro, norte de Minas Gerais, mesorregiões paulistas de São José do Rio Preto e Presidente Prudente, e um início, nos vales mineiros do Mucuri, Rio Doce e Jequitinhonha. Com a simulação inserindo isoladamente a anomalia de precipitação do modelo HadCM3 pode-se observar que as mesorregiões paulistas de Ribeirão Preto, Bauru e Ribeirão Preto, noroeste e oeste do Paraná, além do norte e noroeste de Minas Gerais, oeste do Triângulo Mineiro e os vales mineiros do Mucuri, Rio Doce e Jequitinhonha, são as áreas afetadas pela alteração de classe de baixo para alto risco climático durante o ciclo do milho. Pode-se verificar que as áreas apontadas do Paraná e a mesorregião paulista de Presidente Prudente foram prejudicadas do início do ciclo até o primeiro decêndio de novembro. Já as áreas mineiras, passam para a classe de alto risco climático no primeiro decêndio de setembro e, depois, novamente a partir do primeiro decêndio de novembro e cresce até o último decêndio do ciclo. Ainda temos a mesorregião de Ribeirão Preto que apresentou redução de área de baixo risco praticamente em todo o ciclo simulado com a anomalia de precipitação do modelo inglês. Analisando a anomalia de precipitação do modelo MIROCmed, observa-se uma pequena variação espacial em relação ao período atual (1976-2005). Na composição das anomalias de temperatura e precipitação, o modelo HadCM3 seguiu os padrões da anomalia isolada de precipitação e o modelo MIROCmed seguiu os padrões da anomalia isolada de precipitação.

Comparando as Tabelas 23 e 27 pode-se verificar uma maior retração na produção da cultura do milho quando inserida a anomalia conjunta de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 em relação ao modelo MIROCmed. A redução do modelo inglês pode chegar a 27,3% na média anual dos próximos 20 anos e o modelo MIROC, 7,1%.

4.4 Comparação entre as culturas

A fim de comparar as três culturas avaliadas foi feita uma média dos dois modelos para cada composição das anomalias, utilizando apenas os valores de baixo risco climático. A análise única dessa classe foi devida à ausência da classe de médio risco climático no zoneamento da cultura do milho. Estes valores podem ser vistos na Tabela 32.

Tabela 28 – Variações médias dos modelos climáticos HadCM3 e MIROCmed para a classe de baixo risco climático em relação ao cenário atual das culturas de café arábica, cana-de-açúcar e milho.

	$\overline{M}\Delta_{anom_T}$, Atual (%)	$\overline{M}\Delta_{anom_P}$, Atual (%)	$\overline{M}\Delta_{anom_T+P}$, Atual (%)
Café	-11,8	-13,6	-24,1
Cana	2,6	-18,8	-16,4
Milho	-4,0	-6,0	-9,0

A Tabela 28 mostra que, quando inserida isoladamente, a anomalia de temperatura, os dois apresentaram uma retração média na classe de baixo risco de 11,8% e 4,0% nas culturas do café arábica e do milho, respectivamente, e uma expansão de 2,6% na cultura da cana-de-açúcar. Para a soma isolada da anomalia de precipitação, a média dos modelos globais apresentou retração de 13,6%, 18,8% e 6,0%, respectivamente, nas culturas do café arábica, cana-de-açúcar e milho. Resumindo, para a ação conjunta das anomalias de temperatura e precipitação, a média dos modelos apresentou retração de 24,1%, 16,4% e 9,0%, respectivamente, nas culturas do café arábica, cana-de-açúcar e milho.

5 CONCLUSÕES

- Modelos de projeção climática distintos apresentaram resultados significativamente distintos no zoneamento agrícola de riscos climáticos.

- Utilizando o algoritmo *K-means* para *clusterizar* os modelos climáticos globais através de 27 atributos físico-químicos, pode-se encontrar dois *clusters* contendo sete modelos, sendo o *Cluster 0* composto pelos modelos CCSM3, CNRM-SM3.0, GFDL, GISSEH, INCM3, IPCM4 e MIROCmed, e o *Cluster 1* composto pelos modelos CSIRO, ECHAM, ECHO-G, FGOALS, HadCM3, HadGEM1 e MRICGCM. Os modelos MIROCmed e HadCM3 ocuparam as proximidades dos centros dos *clusters* 0 e 1, respectivamente. Entretanto, os modelos INCM3 e MRICGCM possuíram mais facilidade para migrarem de cluster com a alteração do valor de *seed*.

- Em Hamada *et al.* (2011), foram utilizados 11 modelos climáticos globais em comum com os apresentados neste trabalho e simuladas as precipitações médias acumuladas do período 2070-2010 para cada estação do ano. De forma a agrupar 7 *clusters* de modelos globais, gerou-se um valor de precipitação média que representasse cada um dos agrupamentos em cada estação do ano. Comparando com os *clusters* gerados nas Figuras 21 e 22, pode-se verificar para a estação de verão, que foi aquela que apresentou maior amplitude em seus valores, houve congruência na maior dos modelos apontados por Hamada *et al.* (2011). Ordenando os 7 *clusters* pelos valores de precipitação média, dos 4 *clusters* com os valores mais elevados, 85,7% de seus modelos climáticos globais são constituintes do *Cluster 1* (Figura 22). Essa percentagem para as estações de outono, inverno e primavera foi de 80%, 60% e 55,6%, respectivamente. Dos 3 *clusters* que apresentaram os menores valores de precipitação média, 100% de seus modelos climáticos globais são constituintes do *Cluster 0* (Figura 21). Essa percentagem para as estações de outono, inverno e primavera foi, respectivamente, de 50%, 50% e 75%.

- Para todas as três culturas avaliadas, quando inserida a composição das anomalias de temperatura e precipitação, o modelo HadCM3 comparado ao modelo MIROCmed, apresentou uma maior queda nas áreas e no número de municípios com baixo risco climático,

tendo por base o período atual (1976-2005). No caso da classe de alto risco climático, houve aumento em todas as culturas quando utilizada a composição das anomalias. No entanto, para a cultura do café arábica, esse aumento foi maior quando simulado no modelo MIROCmed. Já para as culturas de cana-de-açúcar e do milho, o modelo inglês apresentou valores superiores.

- Para se fazer uma análise do impacto das mudanças climáticas gerado pelos modelos climáticos globais estudados, deve-se separá-la pelas 3 combinações das anomalias. Observa-se que a Tabela 28 demonstrou que a cultura apresentou diferenças nas suas simulações em relação ao cenário atual seguindo a composição da anomalia executada. Pode-se notar que a cultura do café arábica apresentou-se como a mais penalizada quando as composições das anomalias foram Anom_T e Anom_T+P. Entretanto, quando se utilizou a anomalia de precipitação de forma isolada, a cultura da cana-de-açúcar foi a que apresentou a maior redução na classe de baixo risco climático, principalmente porque essa anomalia do modelo HadCM3 foi rigorosa para esta cultura.

- O modelo HadCM3 produz maior variação percentual em módulo do número de municípios em suas respectivas classes quando foi utilizada, no zoneamento de riscos, sua anomalia isolada de precipitação, em todas as três culturas avaliadas. Em contrapartida, para o modelo MIROCmed, a utilização de sua anomalia isolada de temperatura gerou, no zoneamento de riscos, uma maior variação percentual em módulo. Resumindo, para as condições da metodologia descrita, a anomalia de temperatura do modelo MIROCmed e a anomalia de precipitação do modelo HadCM3 possuem maior impacto negativo para o zoneamento de riscos. Esse resultado se confirma o de estudos já feitos em Macedo *et al.* (2009) e Zullo Junior *et al.* (2011) que demonstram uma maior penalização de outras culturas agrícolas como soja, arroz, feijão, sorgo e cevada irrigada quando inserida isoladamente a anomalia de precipitação do modelo HadCM3. Essa comparação foi feita em relação ao modelo IPCM4, que apresentou a anomalia de temperatura como maior redutora dos números de municípios de baixo risco para as culturas. Como um significativo indício da assertividade da metodologia de agrupamento dos modelos, pode-se observar que o modelo IPCM4, assim como o modelo MIROCmed, ocupa uma posição bem definida do *Cluster 0* (ver Figura 21).

- Comparando os resultados com os obtidos por Pinto *et al.* (2008), pode-se notar algumas semelhanças e diferenças para as culturas do café arábica, cana-de-açúcar e milho. Através das Figuras 2 do Anexo e Figuras 2 e 3 do Apêndice, verifica-se uma similaridade entre os resultados das anomalias isoladas de temperatura dos modelos HadCM3 e MIROCmed em relação ao sugerido em Pinto *et al.* (2008), que representa a anomalia de temperatura do modelo PRECIS da cultura do café no cenário de A2-2020. Entretanto, existiu uma divergência no leste de Minas Gerais onde os dois modelos climáticos globais apresentaram-se mais penalizadores da cultura, além do modelo japonês possuir mais áreas de alto risco no oeste de São Paulo. No caso da cultura da cana-de-açúcar, os modelos globais apresentaram resultados mais excludentes no norte de Minas Gerais, principalmente no caso do MIROCmed. Também, nesse modelo, percebeu-se uma divergência no Triângulo Mineiro e noroeste de São Paulo, onde os modelos globais não apresentaram como classe de baixo risco climático, como ocorreu em Pinto *et al.* (2008). Finalizando, a cultura do milho apresentou a maior divergência dentre as demais. Em Pinto *et al.* (2008), não houve áreas de riscos no Triângulo Mineiro, oeste de São Paulo e Paraná, como aconteceu com a simulação das anomalias dos modelos HadCM3 e MIROCmed. Porém houve convergência de riscos no norte de Minas e Vale do Jequitinhonha (MG).

- Admitindo que a somatória das quantidades produzidas nos próximos 20 anos mantenha-se constante em relação à soma dos últimos 20 anos, após a inserção da anomalia conjunta de temperatura e precipitação dos dois modelos, houve redução da produção nas três culturas avaliadas, sendo que para o modelo HadCM3 essa diminuição foi consideravelmente mais rigorosa.

REFERÊNCIAS

AGRIANUAL, 2005. **Anuário da Agricultura Brasileira**. São Paulo, 2005. p. 241-256.

ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S. *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin, v.43, n.2, 93p., 1994.

ASSAD, E.D.; MACEDO, M.A. de; CÂMARA, G.; OLIVEIRA, J.C. de; BARBOSA, A.M. Avaliação de métodos para espacialização de índices de necessidade hídrica das culturas e sua aplicação em zoneamento agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, p.581-587, 2001.

ASSAD, E. D. O Zoneamento Agrícola e os Riscos Climáticos. **Revista Agroanalysis**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, nº 4, pp. E17-E18, abril de 2004.

ASSAD, E. D. *Simulation de irrigation et du drainage pour les pluviales de riz de maiz en soils de bas-fonds a Brasília*. Memories et Travaux, 13. Montpellier: IRAT, 1986. 10p.

BARBIERI, V.; BACCHI, O. O. S.; VILLA NOVA, N. A. Análise do fator de temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1979, Mossoró. **Anais...**, 1979.

BERTHAULD, J. CHARRIER, A. Genetic resources of Coffea. In: Clarke, R.; Macrae, R. **Coffee: Agronomy**. London: Elsevier Applied Science, v. 4, p. 1-42, 1988.

BOER, G. J.; FLATO, G.; RAMSDEN, D. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. **Clim. Dyn.** v.16, p. 427-450. 2000.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial. **Bragantia**, Campinas, v.50, 2 ed., p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P. de, PEREIRA, A. R. Agrometeorology of the coffee crop. **CagM Report**, n.58, **WMO/TD**, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, n.615, p.42. 1994.

CAMARGO, A. P. C. Clima e a cafeicultura no Brasil. **Informe Agropecuário**, n.126, p.13-26, 1985.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. de. Teste de Uma Equação Simples Para Estimativa da Evapotranspiração Potencial Baseada na Radiação Sola Extraterrestre e na Temperatura do Ar. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 3, Campinas, 1983. **Anais...**, Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1983. p.229-244.

COSTA, A. F. S. da. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.), avaliadas em diferentes épocas de plantio**. 1994. 109p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

CUNHA, G.R.da, ASSAD, E.D. Uma visão do número especial da RBA sobre zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.377-385, 2001.

DOORENBOS, J. ; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. 306 p., Campina Grande: UFPB, 1994.

DRINNAN, J. E.; MENZEL, C. M. Temperature affects vegetative growth and flowering of coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, v.70, p.25-34, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de Produção, 2**. Embrapa Milho e Sorgo. ISSN 1679-012X. Versão Eletrônica, 5 ed. 2009. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_5_ed/imanejo.htm> Acesso em: 24/10/2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2006. **Solo**. Agência de Informação da Embrapa. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html> Acesso: 13/11/2010.

FANCELLI, A. L. **Plantas alimentícias**: guia para aula, estudos e discussão. Piracicaba: ESALQ, 131 p., 1986.

FOREST, C. E.; STONE, P. H.; SOKOLOV, A. P.; ALLEN, M. R.; WEBSTER, M. D. Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observations, **Science**, v. 295, p. 113–117, 2002.

FOREST, F. **Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP**. Montpellier: IRAT-CIRAD, 1984. 63p

FORNASIERI FILHO, D. **A cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 273p., 1992.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, p.59-66, 1999.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GHINI, R.; HAMADA, E.; GONÇALVES, R.R.V., GASPAROTTO, L. & PEREIRA, J.C.R. Análise de risco das mudanças climáticas globais sobre a sigatoka-negra da bananeira no Brasil. **Fitopatologia Brasileira**, v. 32, p.197-204, 2007.

GÖPFERT, H.; ROSSETTI, L.A.; SOUZA, J. **Eventos generalizados e seguridade agrícola**. Brasília: IPEA, 65p., 1993.

GRODZKI, L. *et al.* Risco de ocorrência de geada no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 93-99, 1996.

HALLAUER, A.R.; MIRANDA FILHO, J.B. **Quantitative genetics in maize breeding**. Ames: Iowa University Press, 468p., 1988.

HAMADA, E.; MAIA, A. H. N.; GHINI, R.; THOMAZ, M. C.; GONÇALVES, R. R. V.; LANA, J. T. O.; ALMEIDA, E. G. Avaliação da precipitação projetada pelos modelos climáticos globais para o Sudeste do Brasil utilizando SIG. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba, PR, Brasil. **Anais...** INPE, p.4047, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2009. **Agricultura**. Banco de Dados Agregados. Disponível em < <http://www.sidra.ibge.gov.br/> >. Acesso em : 12/01/2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2008. **Agricultura**. Banco de Dados Agregados. Disponível em < <http://www.sidra.ibge.gov.br/> >. Acesso em : 04/12/2009.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001:** working group II: Impacts, adaptations and vulnerability. 2001. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index> Acesso em: 15/04/2008.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, **AR4: WGI Report**. Cambridge Univ. Press. 2007.

IOWA STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. How a Corn Plant Develops. **Special Report**, Ames, Iowa, 1993, n. 48.

IRVINE, J. E.; BENDA, G. T. A. A Sugar Cane Spacing II. Effects of Spacing on Plant. In: Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, 17., 1980. Manila. **Proceedings...** Manila: ISSCT., 1980, p. 357-367.

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of Atmospheric Modeling**. Cambridge University Press. 2. ed., ISBN 0-521-83970-X, 2005.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOSLOWSKI, T.T. (ed.). **Water Deficits and Plant Growth**, 2a ed. New York, Academic Press, 1969. v.2, p.1-22.

KERR, R. A. Global Warming: Rising Global Temperature, Rising Uncertainty. **Science**, v.292, n.5515, p. 192-194, 2001.

KITTEL, C; KROEMER, H. **Thermal physics**, Freeman, 2. ed, 1980.

MACEDO JUNIOR, C.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. Avaliação do Desempenho de Modelos Globais na Simulação de Cenários de Impactos das Mudanças Climáticas na Cultura da Soja. In: III Simpósio Internacional de Climatologia, 2009, Canelas, Rio Grande do Sul. **Anais...** Sociedade Brasileira Meteorologia, p.2, 2009.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C., FERREIRA, S.O., YAMADA, T. (ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p. 113-118.

MARENGO, J.; VALVERDE, M.C. Desempenho dos modelos climáticos do IPCC em simular a precipitação presente e futura sobre o território brasileiro. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 2006, Florianópolis. **Anais...**, 2006, Florianópolis.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SALATI, E.; AMBRIZZI, T. **Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 50 p. Sumário Técnico. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/>. Acesso em: 20/09/2008.

MARIN, F. R. ; ASSAD, E.D. ; BARBARISI, B.F. ; PILAU, F. G. ; PACHECO, L. R. F. ; ZULLO Jr., J. ; PINTO, H.S. . Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. **Anais...**, 2007, Aracaju.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320p.

Met Office Hadley Centre. **Types of climate models**. 2008 Disponível em: <<file:///I:/Plano%20de%20Trabalho%20-%20Bolsa/modeltypes.html>>. Acesso em: 09/12/2008.

MONTEIRO, L. ; Saldanha, C. B. ; ALVES, R. C. M. . Avaliação da climatologia provisória do modelo BRAMS. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém - PA. **Anais...**, 2010, Belém.

NASS, L.L.; PATERNIANI, E. Pre-breeding: a link between genetic resources and maize breeding. **Scientia Agricola**, v.57, p.581-587, 2000.

PEREIRA-COLTRI, P.; PINTO, H.S.; CECCARELLI, M.B.; CORAL, G. Sistema de Monitoramento e Previsão Agrometeorológica: AGRITEMPO. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. **Anais...**, 2007, Aracaju.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR, J.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, A. F.; AVILA, A. M. H. de; EVANGELISTA, B. A.; MARIN, F. R.; MACEDO JUNIOR, C. M.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. Aquecimento Global e a Nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil. In: DECONTO, J. G (Org.). São Paulo: Embrapa, Unicamp, 83 p., 2008.

PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E.D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CORAL, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, p.495-500, 2001. Número especial Zoneamento Agrícola.

PINTO, H.S., ORTOLANI, A.A., ALFONSI, R.R. **Estimativa das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo em função de altitude e latitude**. São Paulo: IG/USP, 1972. 20p. (Ciências da Terra, Caderno 23).

PITOL, C.; SIEDE, P.K.; ANDRADE, P.J.M. *Campo demonstrativo de cultivares de soja em plantio antecipado e milho safrinha, safra 93/94*. Maracajú: Fundação MS, 1995. 6p. (Fundação MS. Resultados de Pesquisa e experimentação, 1/95).

POPE, V.D.; GALLANI, M.L.; ROWNTREE, P.R.; STRATTON, R.A. 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model — HadAM3. *Climate Dynamics* v. **16**, p. 123–146, 2000. doi:10.1007/s003820050009

RAMANATHAN, V., CRUTZEN, P. J., KIEHL, J. T. , ROSENFELD, D.: *Atmosphere - Aerosols, climate, and the hydrological cycle*. **Science**, v. 294, p. 2119-2124, 2001.

RODRIGUES, F. **Arquitetura Heterogênea para Extração de Conhecimento a partir de Dados**. Dezembro, 2000. Phd Thesis – Universidade do Minho.

ROSSETTI, L.A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.386-399, 2001.

SEDIYAMA, G.C.; MELO JUNIOR, J.C.; SANTOS, A.R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N.; COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, p.501-509, 2001.

SILVA, P.R.F. da. Crescimento e desenvolvimento. In:_____. **Indicações técnicas para a cultura de milho no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, Embrapa Trigo, Emater/RS, Fecoagro/RS, 2001, n.7, 135p.

TAUNAY, A. de E. **História do café no Brasil**: no Brasil Imperial 1822-1872. Rio de Janeiro, Departamento Nacional do Café, 1939.

THORNTHWAITE, C. W., MATTER, J. R. The Water Balance. **Publications in Climatology**, Vol. 8, n.1, The Laboratory of Climatology, Centerton, NJ, USA, 104p, 1955.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Rev**, v.38, p.55-94, 1948.

VAKSMANN, M. **Le Modèle BIPODE**:Logiciel. Bamako: IRAT, 1990.

WREGE, M.S; CARAMORI, P.H.; GONÇALVES, A.C.A.; BERTONHA, A.; FERREIRA, R.C; CAVIGLIONE, J. H.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, S.L. Regiões Potenciais Para Cultivo da Cana-de-açúcar no Paraná, com Base na Análise do Risco de Geadas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 113-122, 2005.

WRIGHT, L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage**, New York, v.108, p.57-75, 1982.

ZHAI, F.; ZHUANG, J. 2009. **Agricultural Impact of Climate Change**: A General Equilibrium Analysis with Special Reference to Southeast Asia. ADBI Working Paper 131. Tokyo: Asian Development Bank Institute. Disponível em: <<http://www.adbi.org/workingpaper/2009/02/23/2887.agricultural.impact.climate.change/>> Acesso em: 03/05/2009.

ZULLO JUNIOR, J.; MACEDO JUNIOR, C.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no zoneamento agrícola utilizando anomalias de temperatura e precipitação dos modelos HadCM3 e IPCM4. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011, Guarapari, Espírito Santo. **Anais...** Sociedade Brasileira Agrometeorologia, 2011.

APÊNDICE

Mapas representando os cenários agrícolas para a ausência (atual) e presença das anomalias médias do período 2010-2039 e as variáveis temperatura e precipitação, de acordo com simulações feitas pelos modelos climáticos globais HadCM3 e MIROCmed para o cenário climático A2 do IPCC. As culturas avaliadas foram: café, cana-de-açúcar e milho.

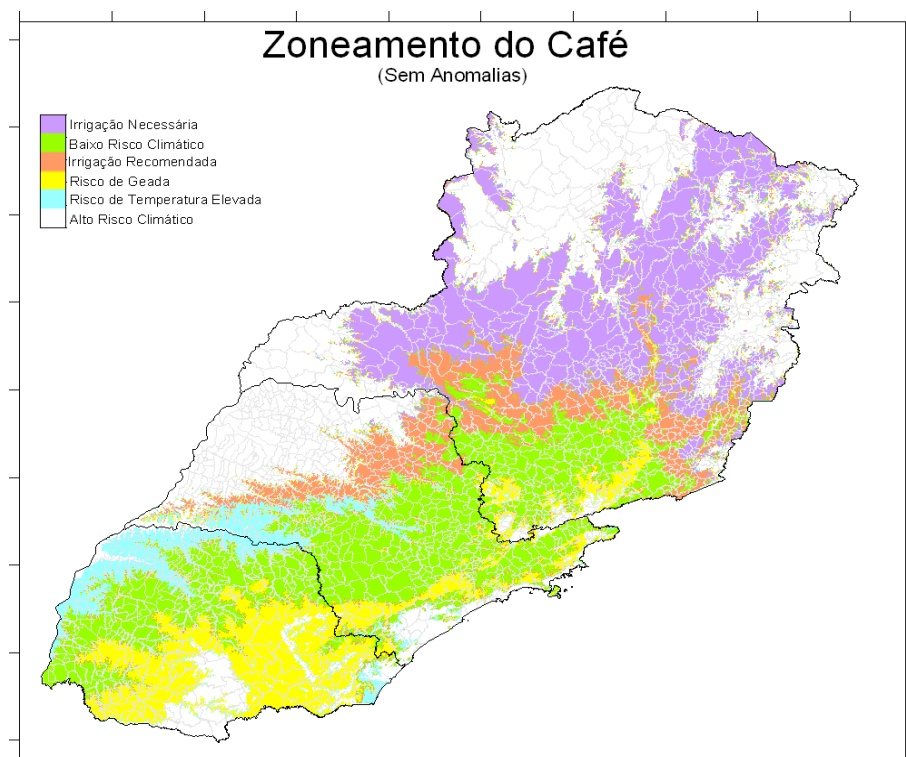


Figura 1 – Zoneamento do Café para o período 1976-2005

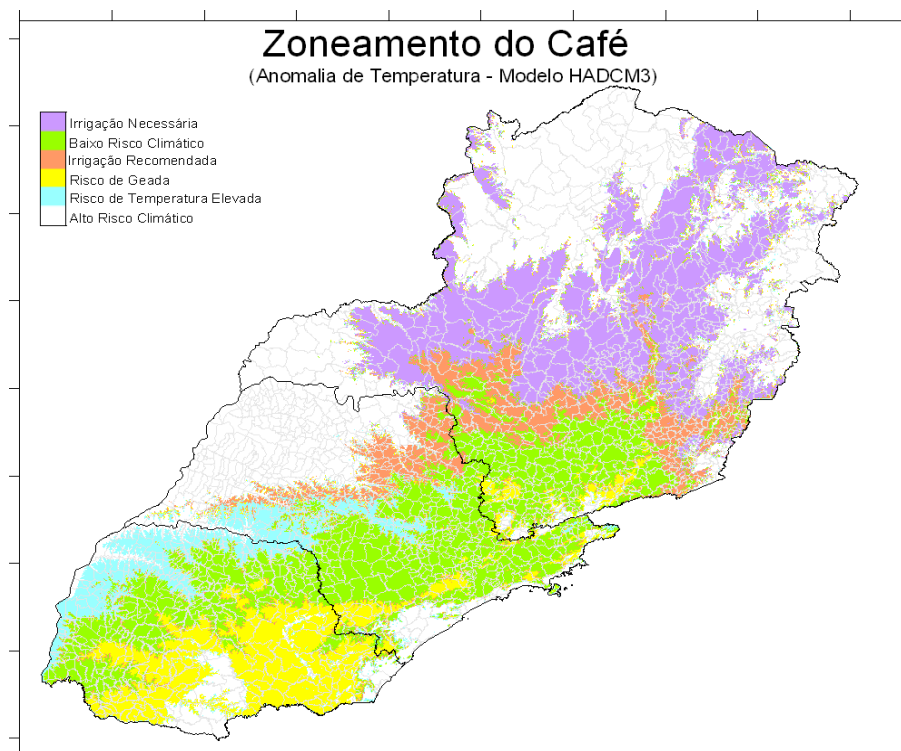


Figura 2 – Zoneamento do Café com anomalia de temperatura do modelo HadCM3.

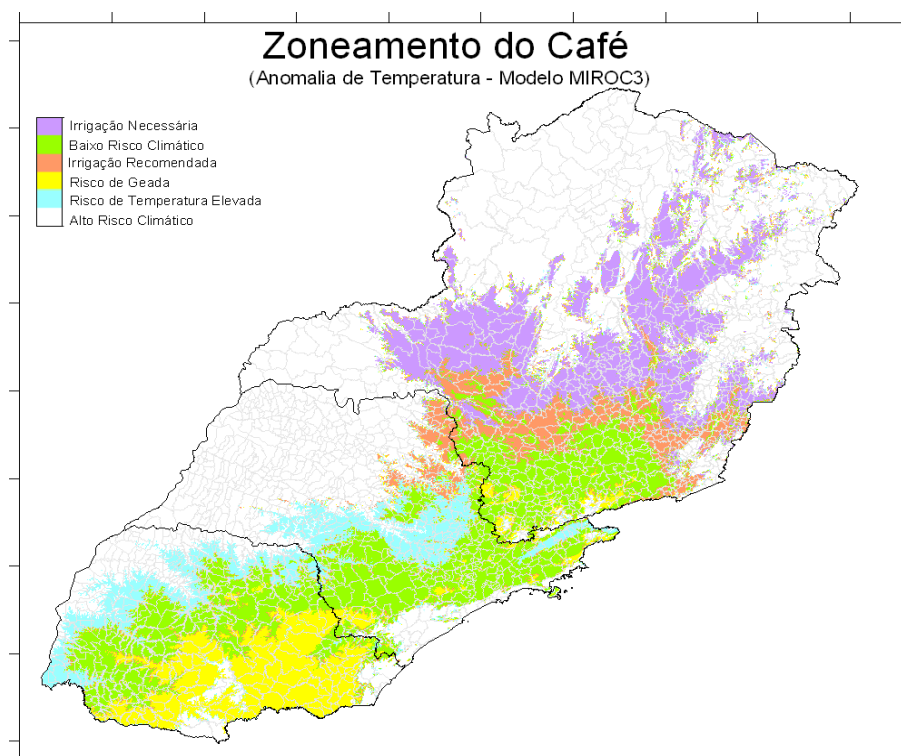


Figura 3 – Zoneamento do Café com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed.

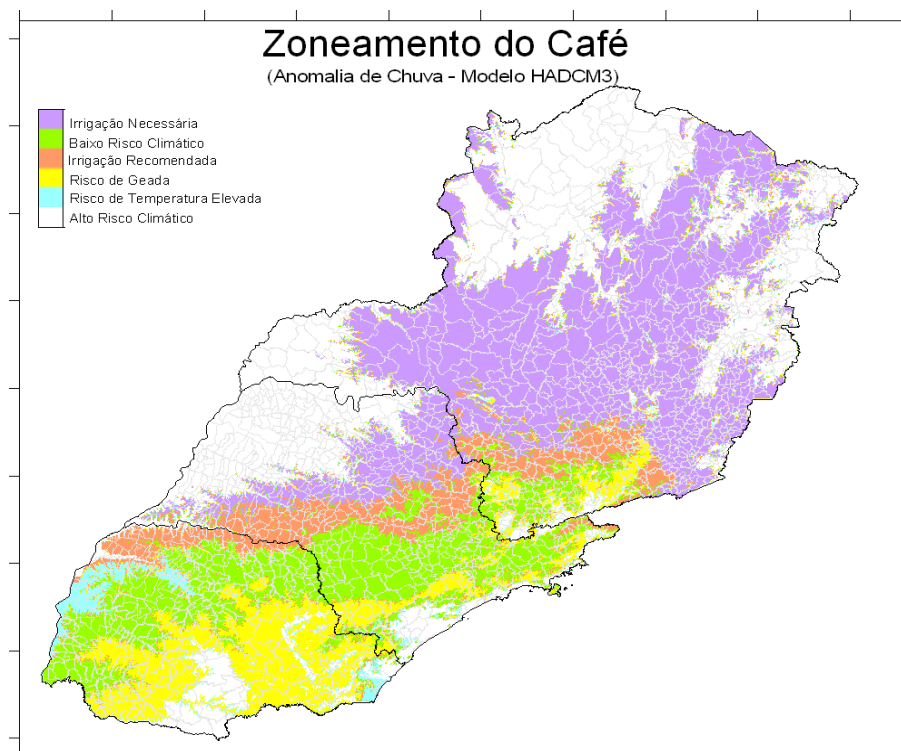


Figura 4 – Zoneamento do Café com anomalia de precipitação do modelo HadCM3

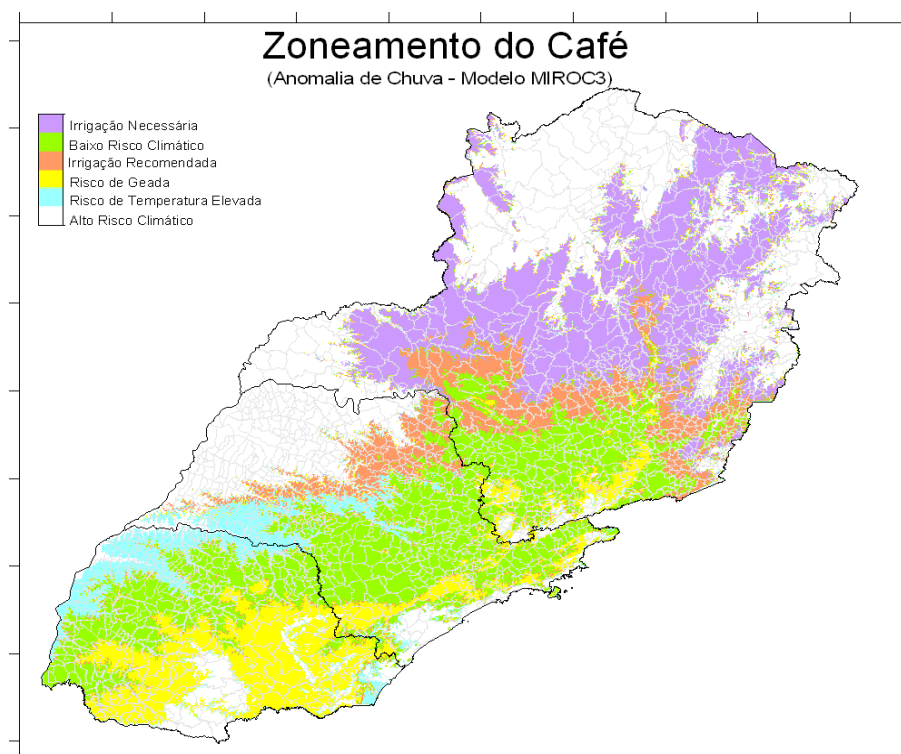


Figura 5 – Zoneamento do Café com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed.

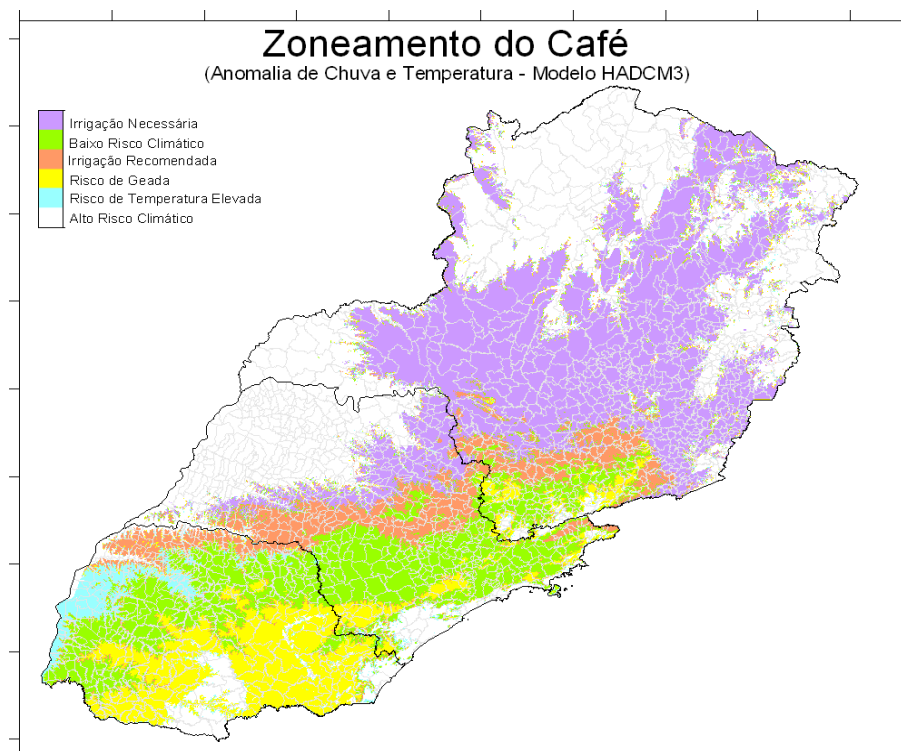


Figura 6 – Zoneamento do Café com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3.

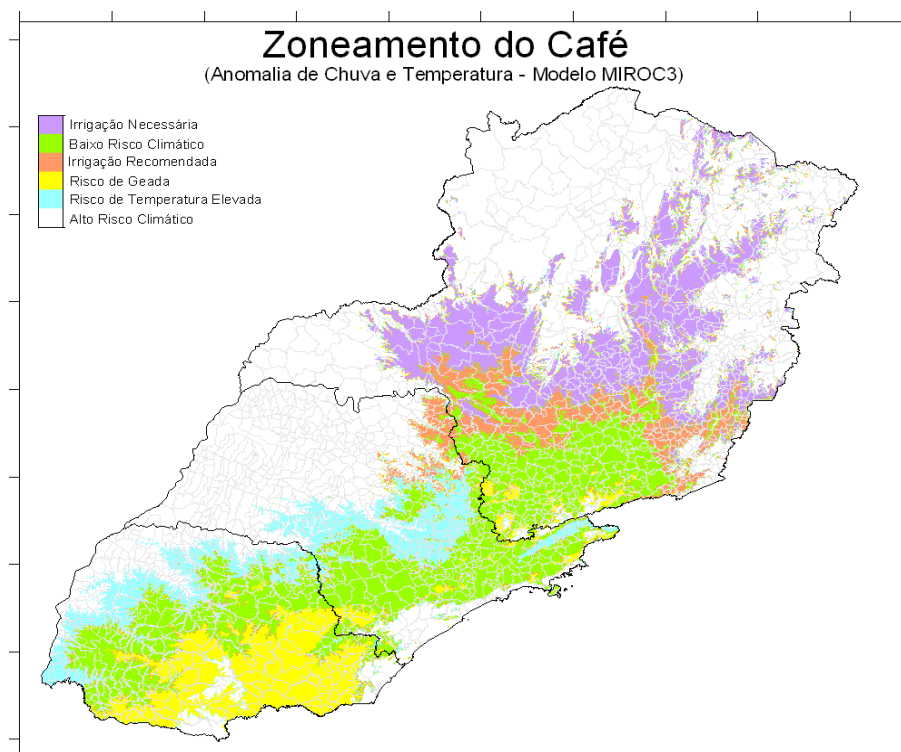


Figura 7 – Zoneamento do Café com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed.

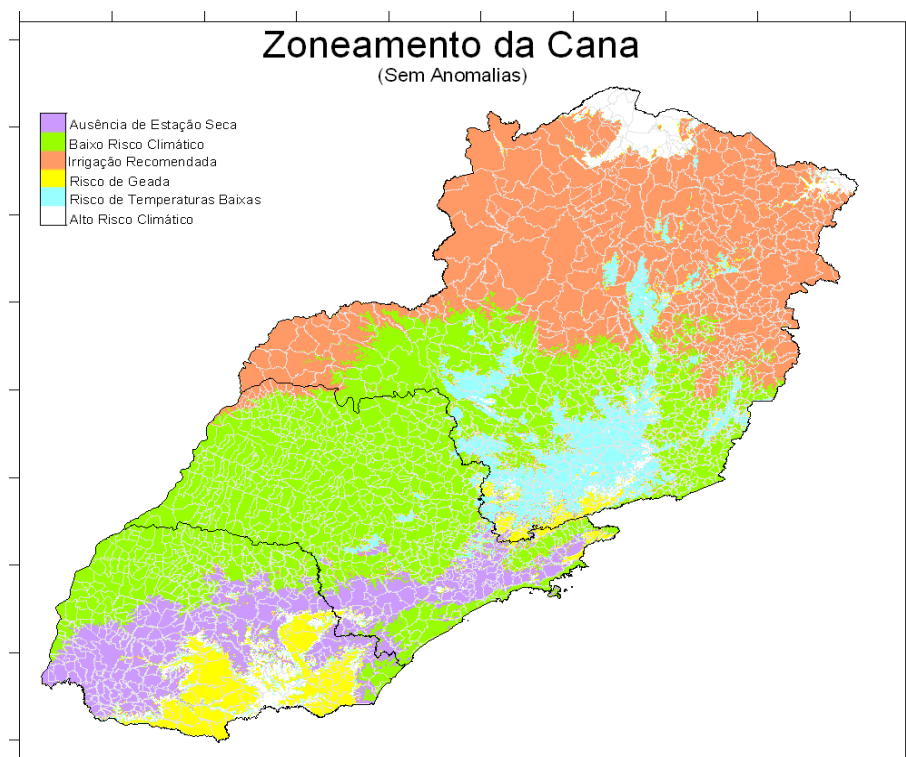


Figura 8 – Zoneamento da Cana para o período 1976-2005.

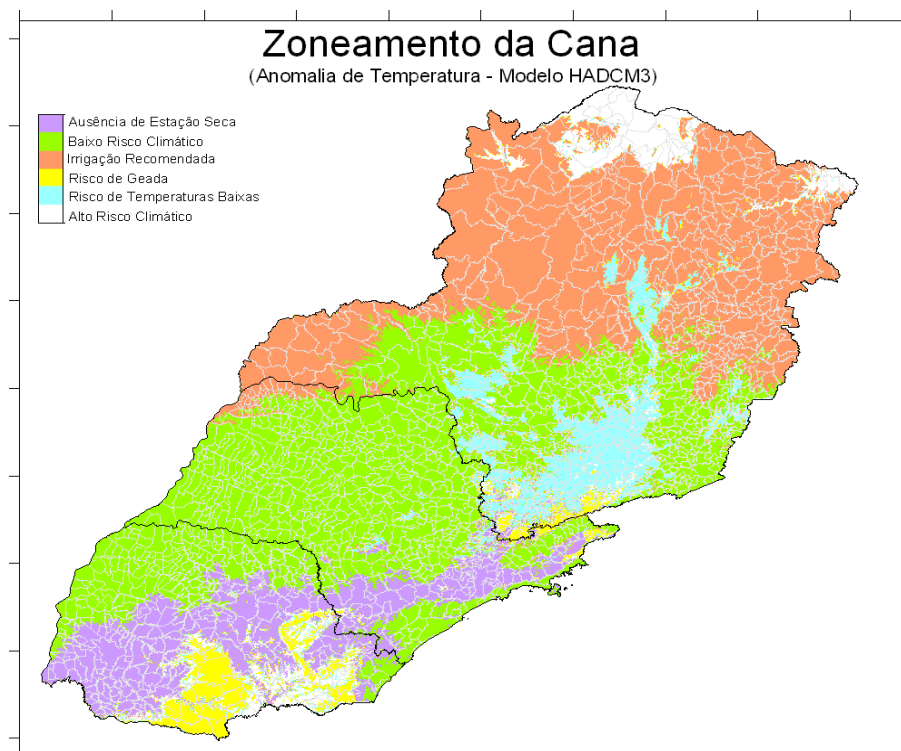


Figura 9 – Zoneamento da Cana com anomalia de temperatura do modelo HadCM3.

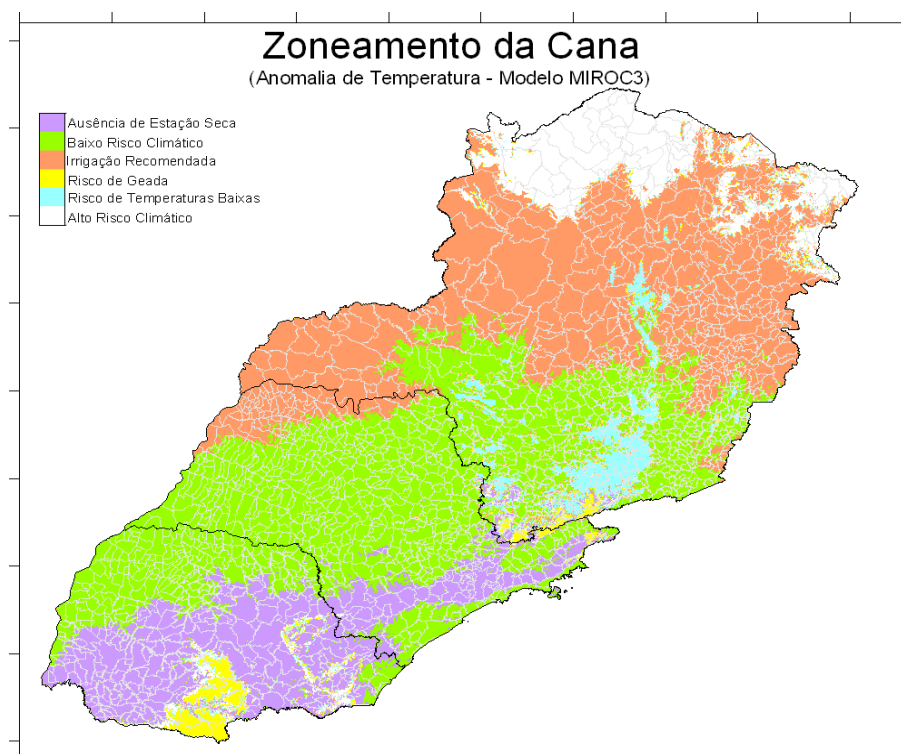


Figura 10 – Zoneamento da Cana com anomalia de temperatura modelo MIROCmed.

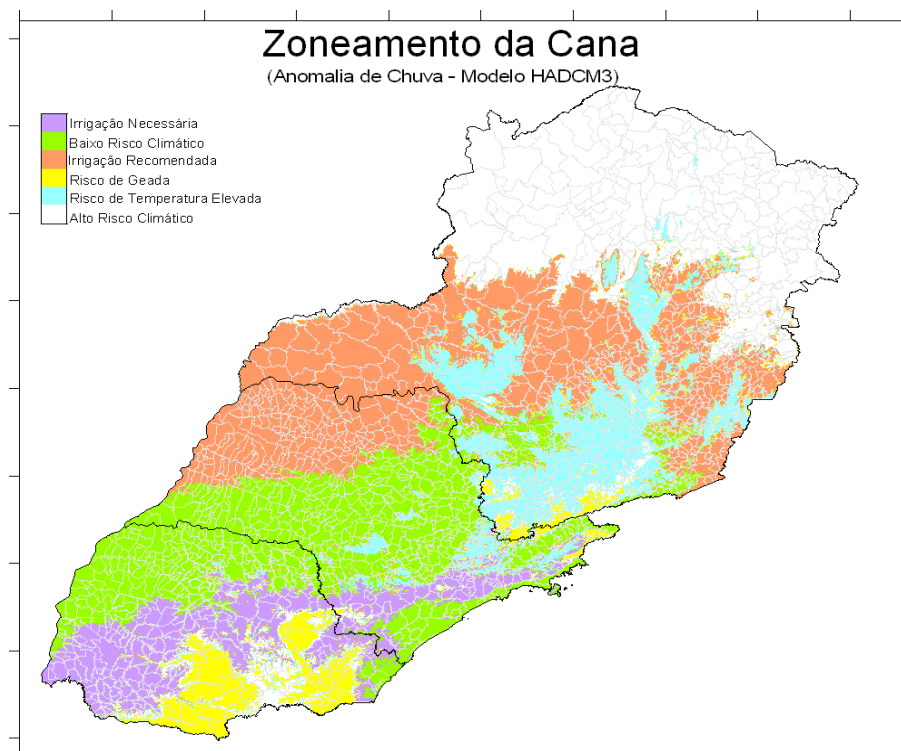


Figura 11 – Zoneamento da Cana com anomalia de precipitação do modelo HadCM3.

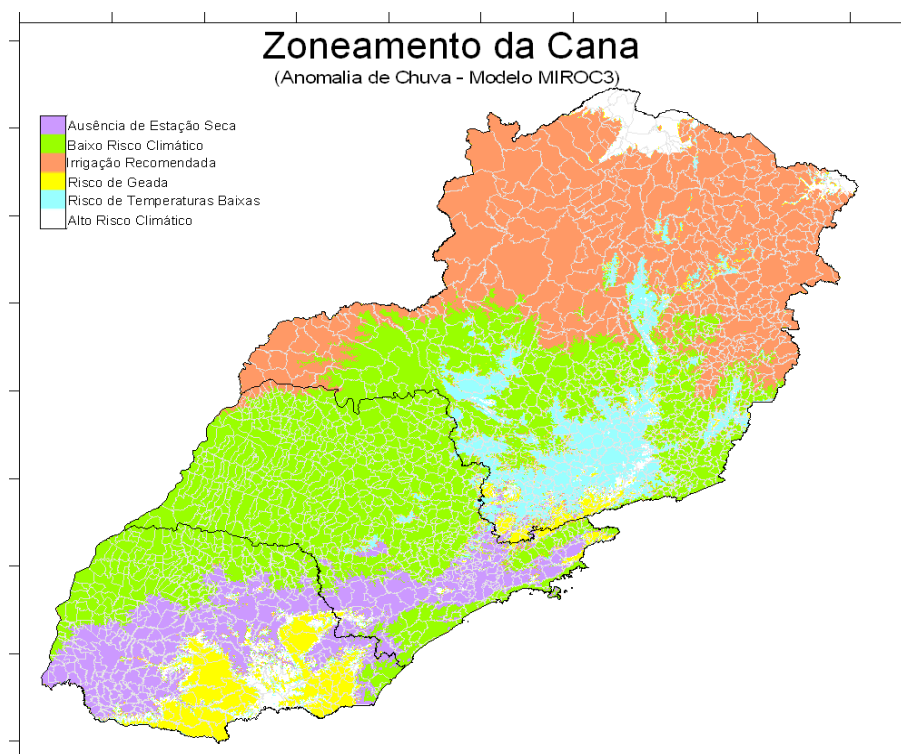


Figura 12 – Zoneamento da Cana com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed.

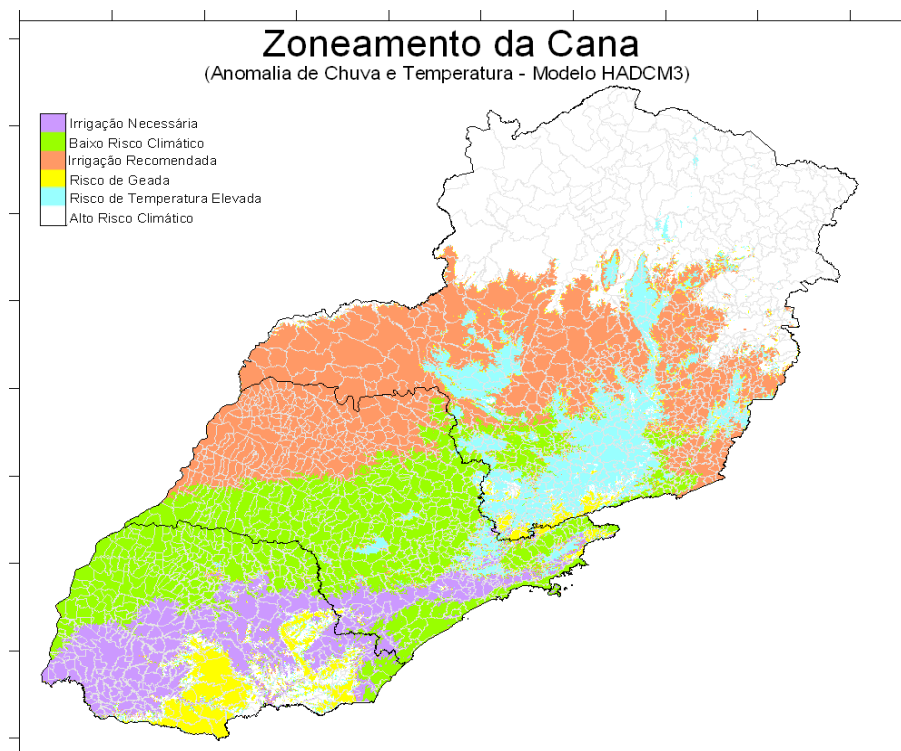


Figura 13 – Zoneamento da Cana com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3.

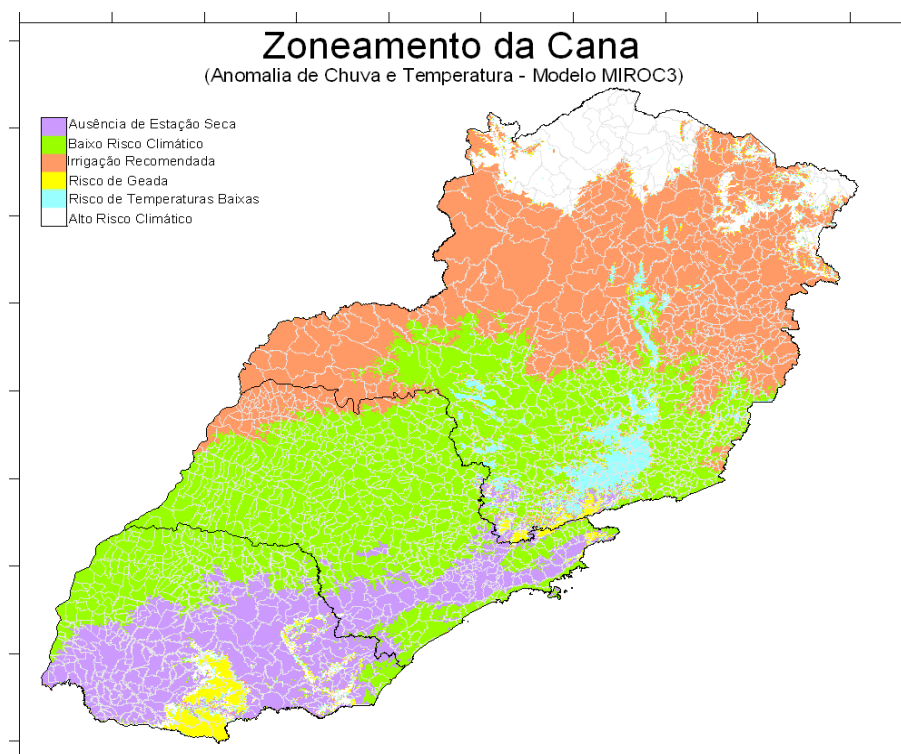


Figura 14 – Zoneamento da Cana com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed.

Obs: As áreas acinzentadas nos mapas seguintes representam a classe de baixo risco climático, enquanto as áreas claras correspondem à classe de alto risco climático.

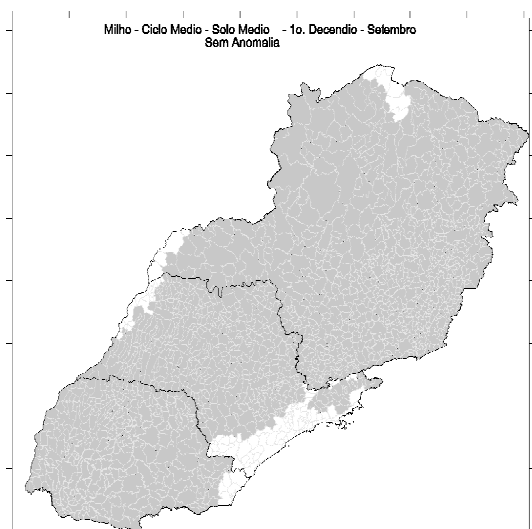


Figura 15 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio SET_1.

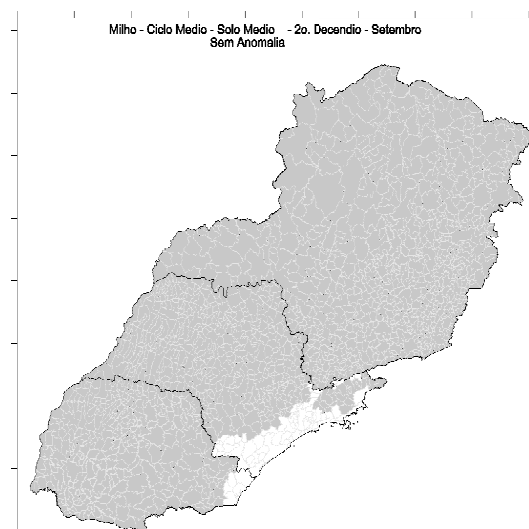


Figura 16 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio SET_2.

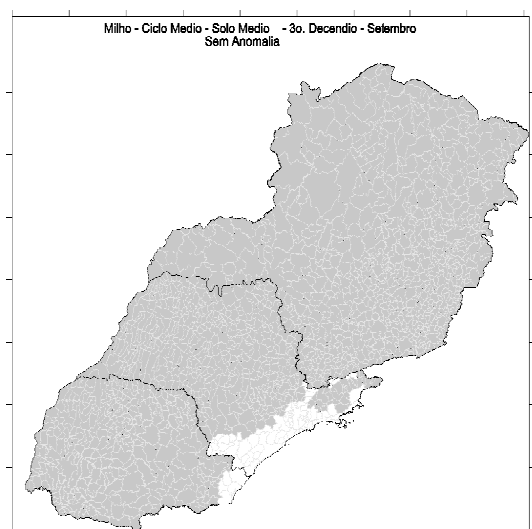


Figura 17 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio SET_3.

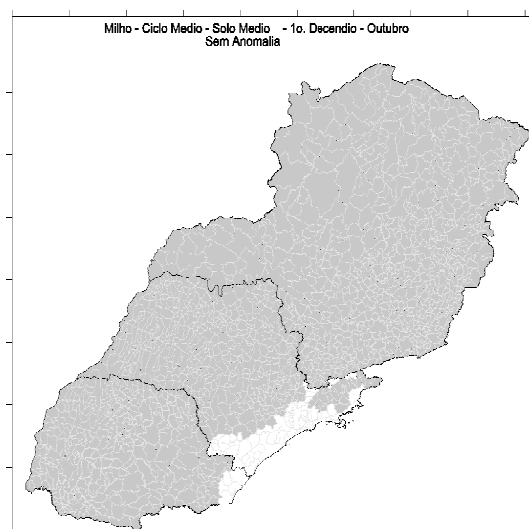


Figura 18 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio OUT_1.

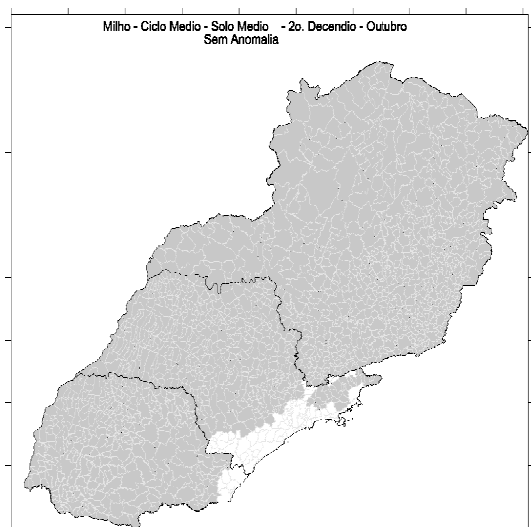


Figura 19 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio OUT_2.

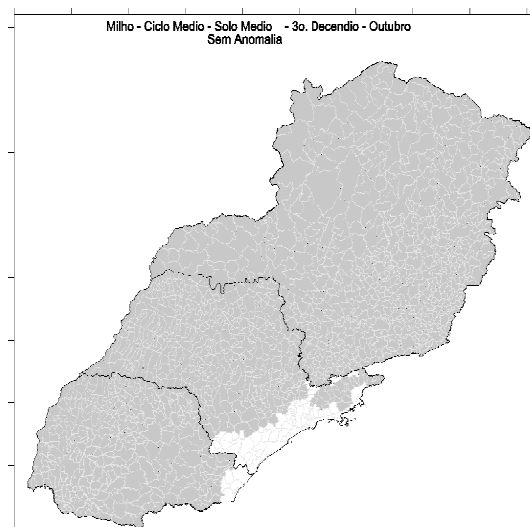


Figura 20 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio OUT_3.

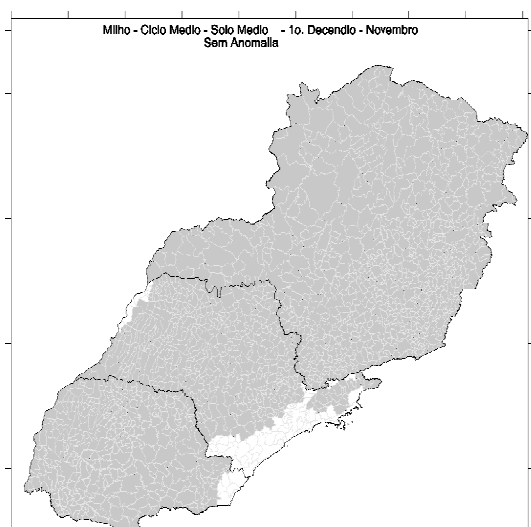


Figura 21 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio NOV_1.

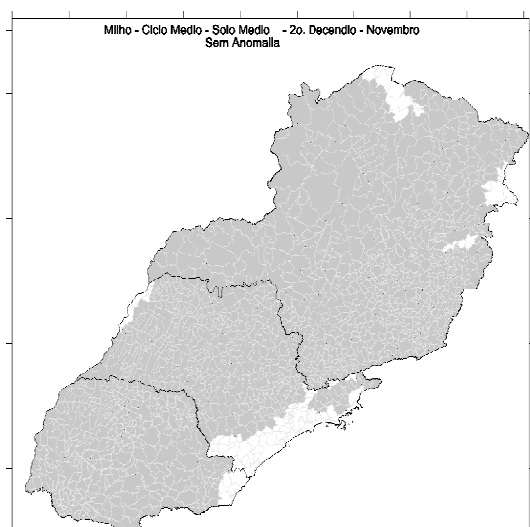


Figura 22 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio NOV_2.

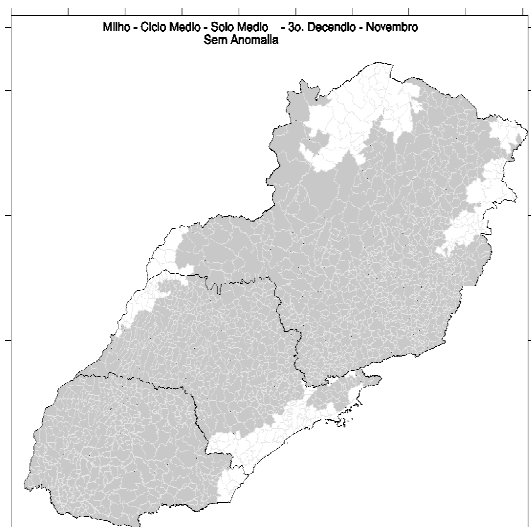


Figura 23 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio NOV_3.

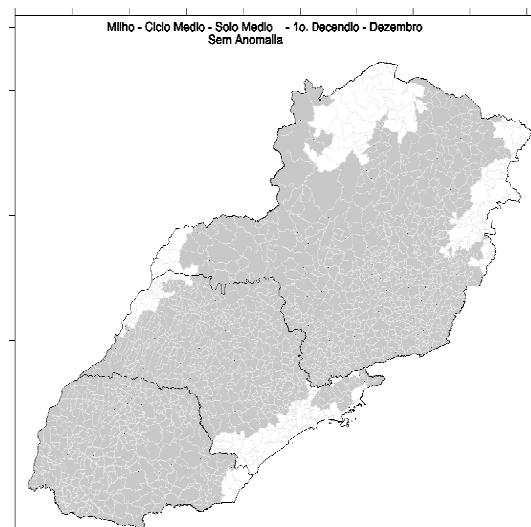


Figura 24 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio DEZ_1.

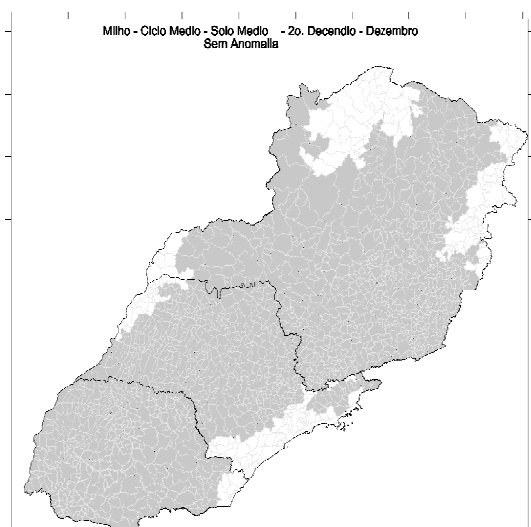


Figura 25 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio DEZ_2.

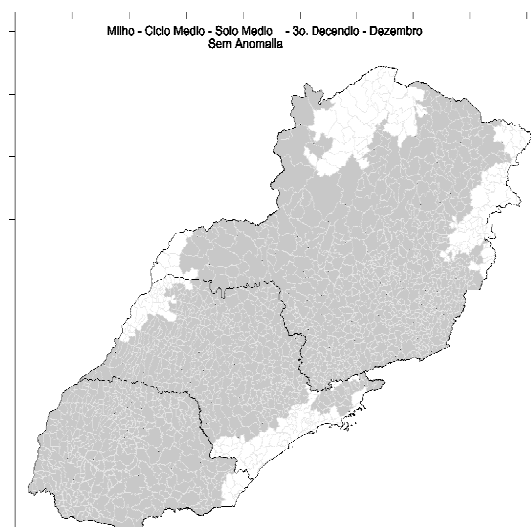


Figura 26 – Zoneamento do Milho para o período Atual no decêndio DEZ_3.

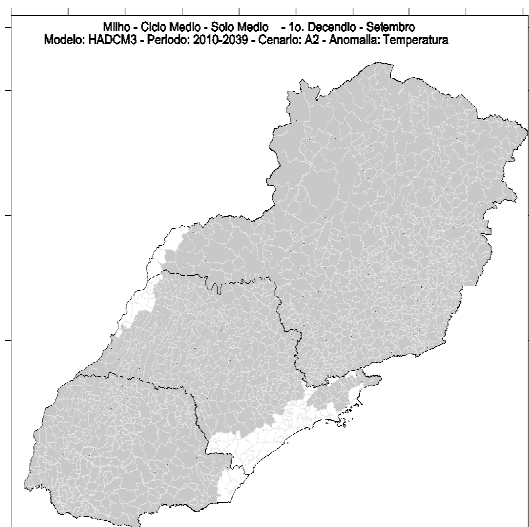


Figura 27 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio SET_1.

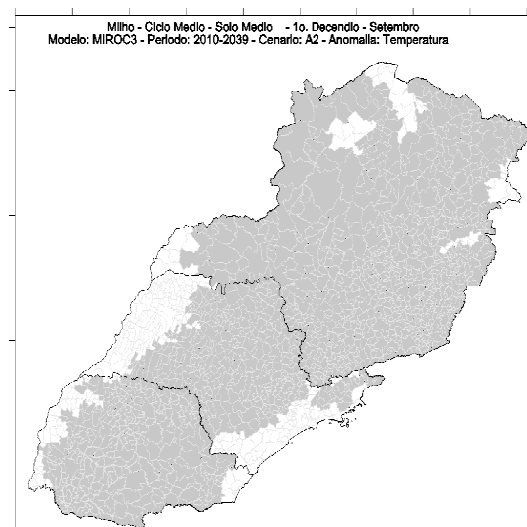


Figura 28 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio SET_1.

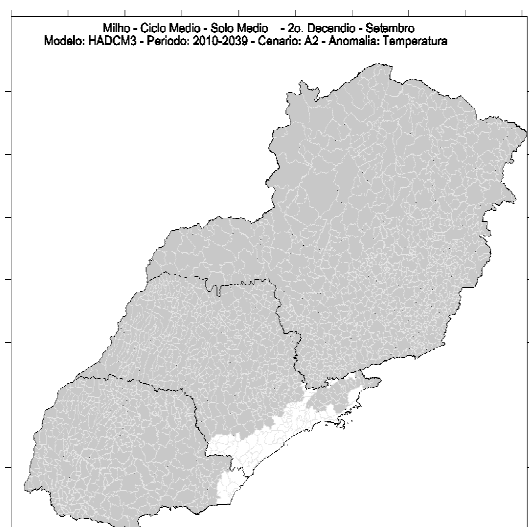


Figura 29 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio SET_2.

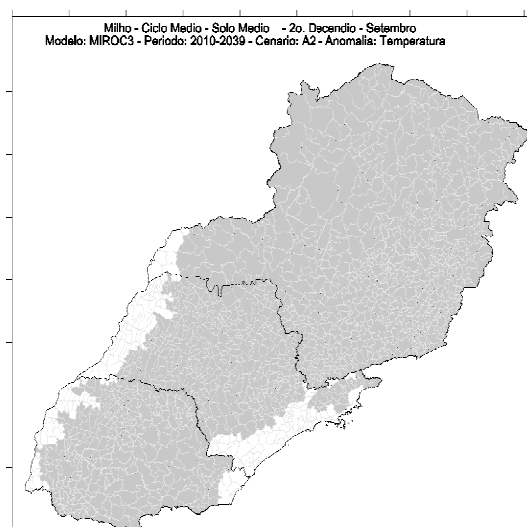


Figura 30 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio SET_2.

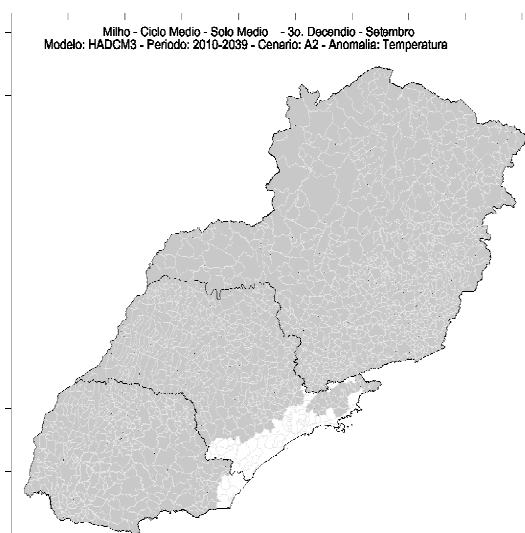


Figura 31 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decênio SET_3.

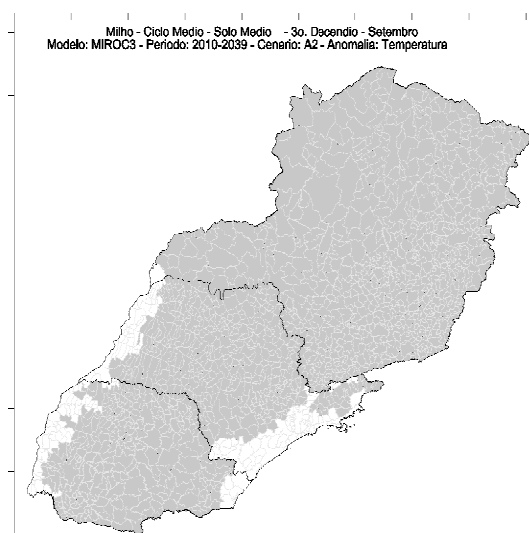


Figura 32 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decênio SET_3.

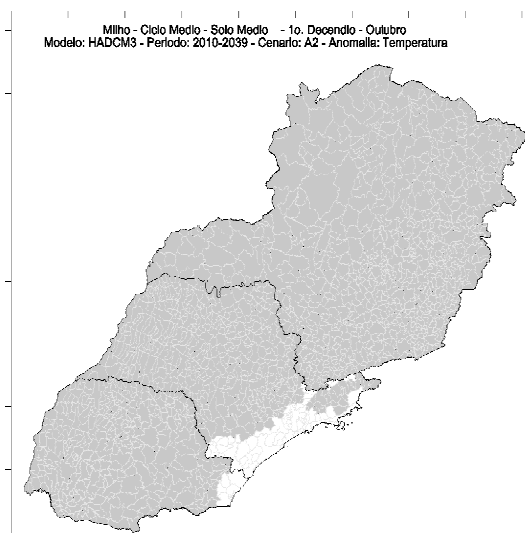


Figura 33 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decênio OUT_1.

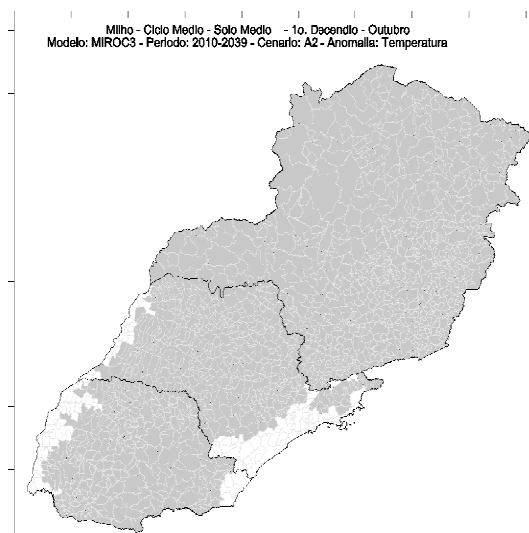


Figura 34 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decênio OUT_1.

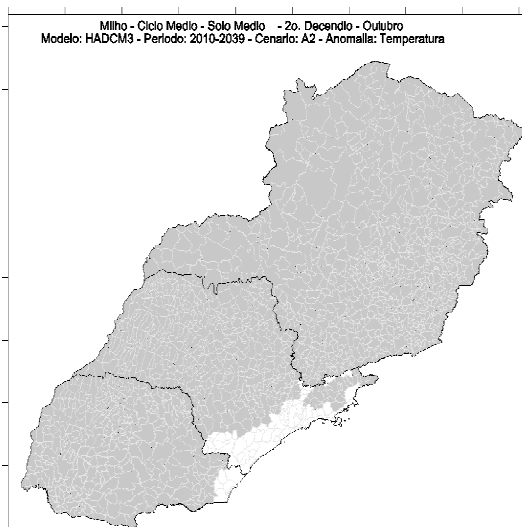


Figura 35 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio OUT_2.

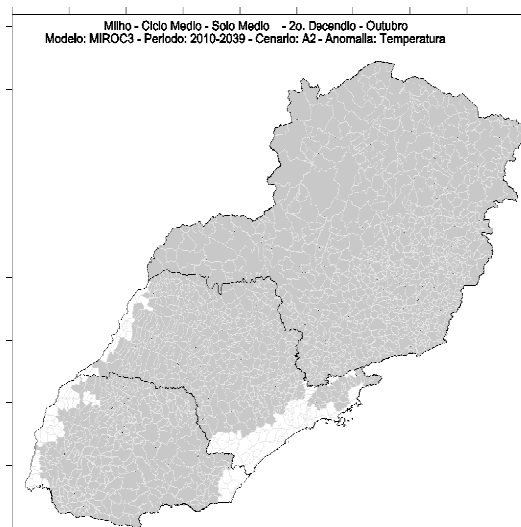


Figura 36 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio OUT_2.

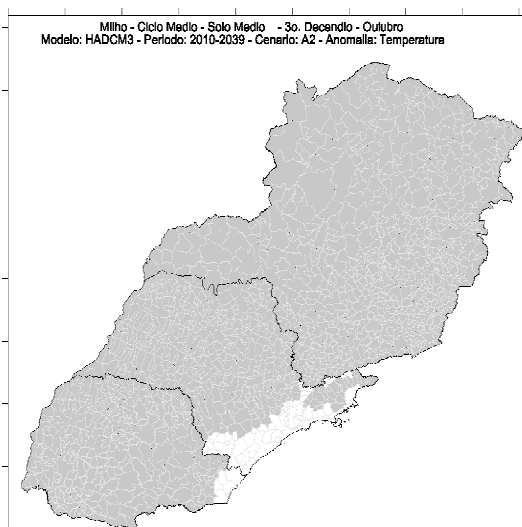


Figura 37 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio OUT_3.

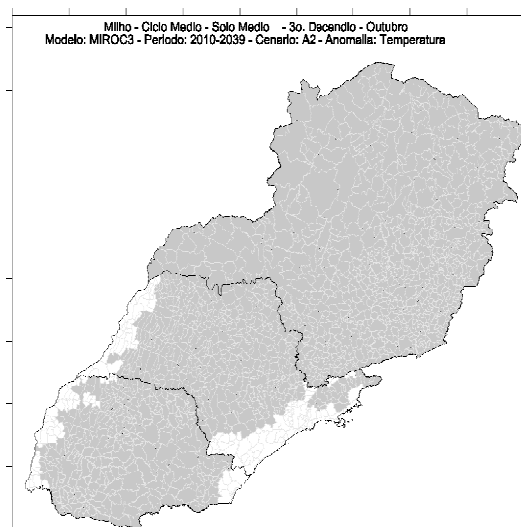


Figura 38 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio OUT_3.

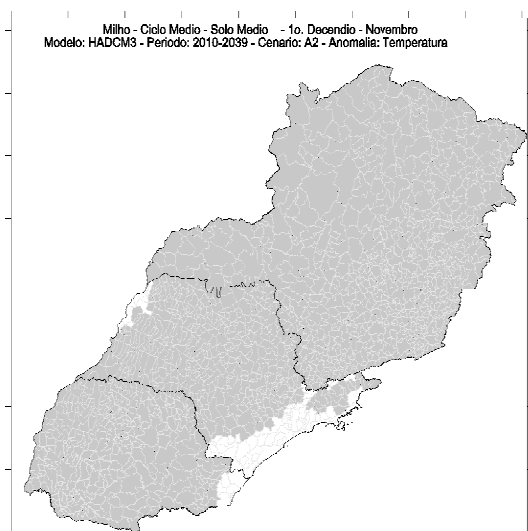


Figura 39 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decênio NOV_1.

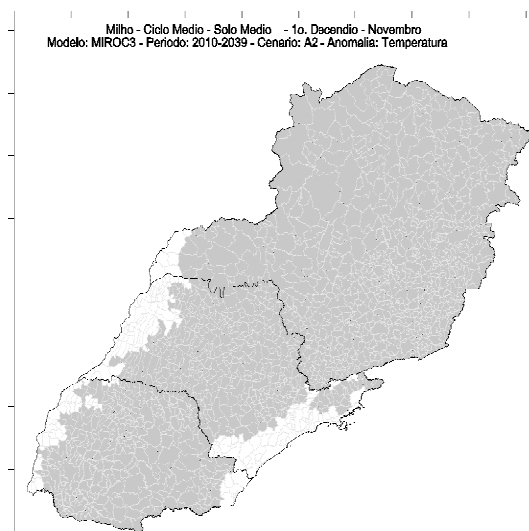


Figura 40 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decênio NOV_1.

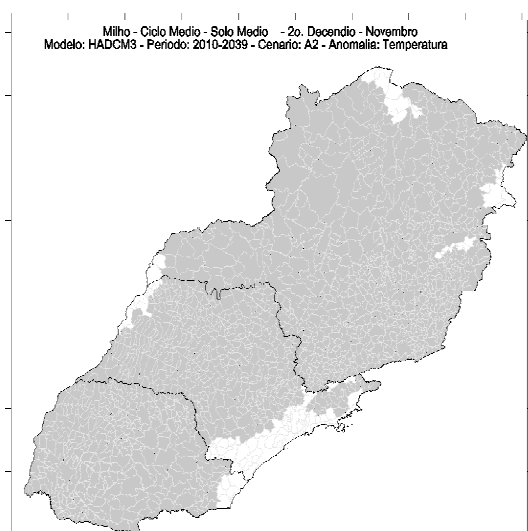


Figura 41 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decênio NOV_2.

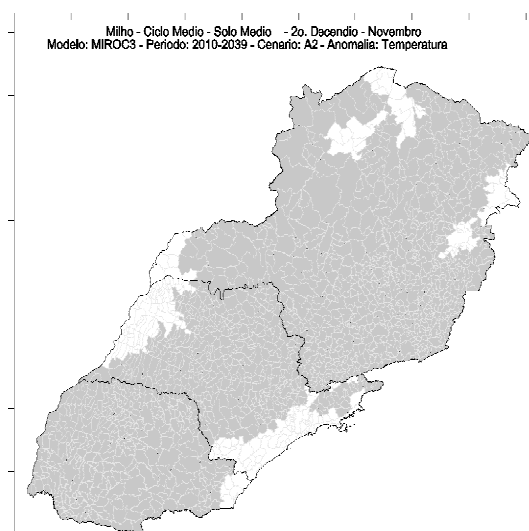


Figura 42 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decênio NOV_2.

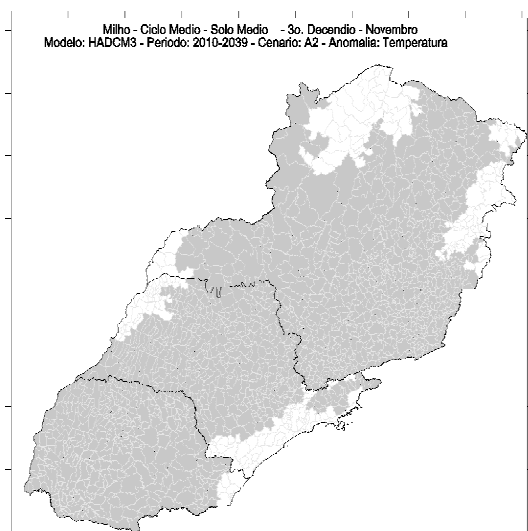


Figura 43 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio NOV_3.

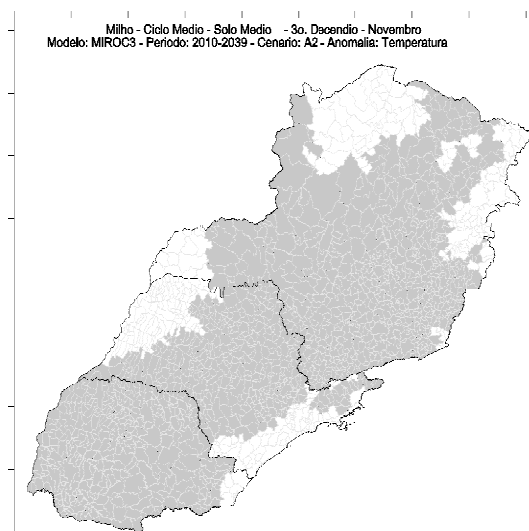


Figura 44 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio NOV_3.

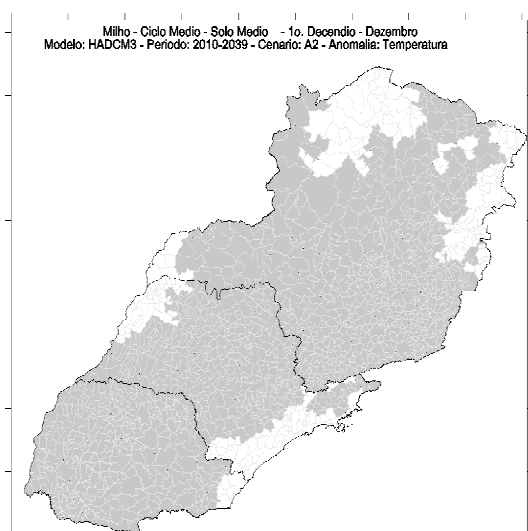


Figura 45 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio DEZ_1.

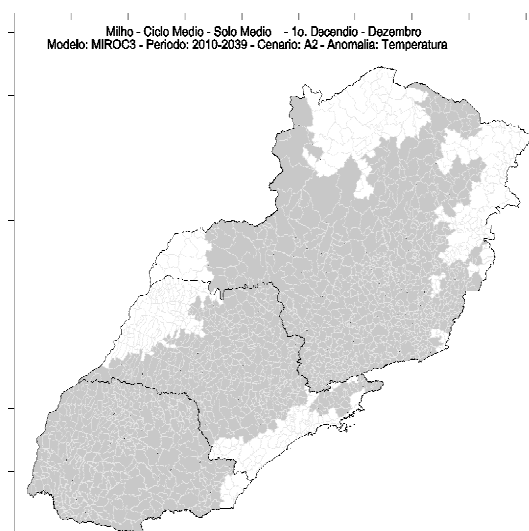


Figura 46 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio DEZ_1.

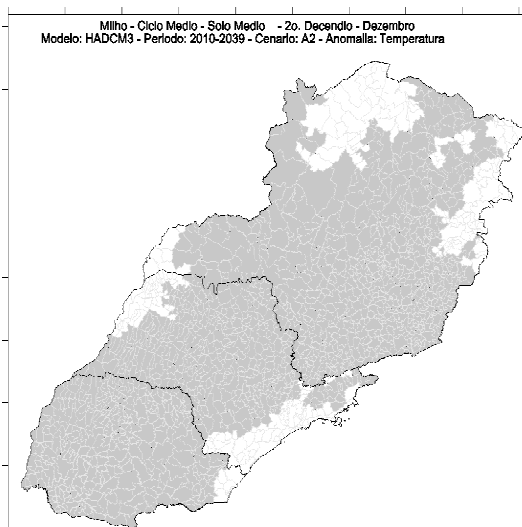


Figura 47 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio DEZ_2.

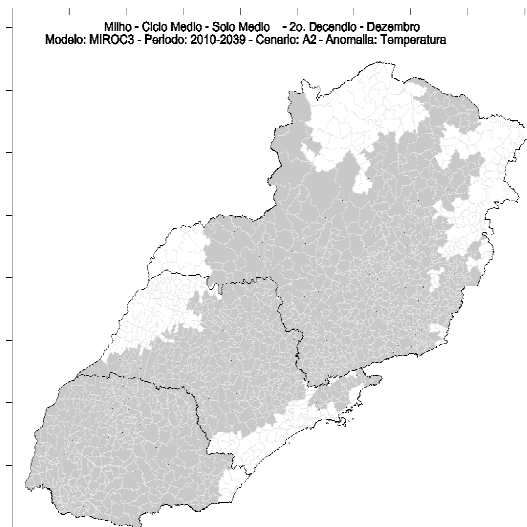


Figura 48 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio DEZ_2.

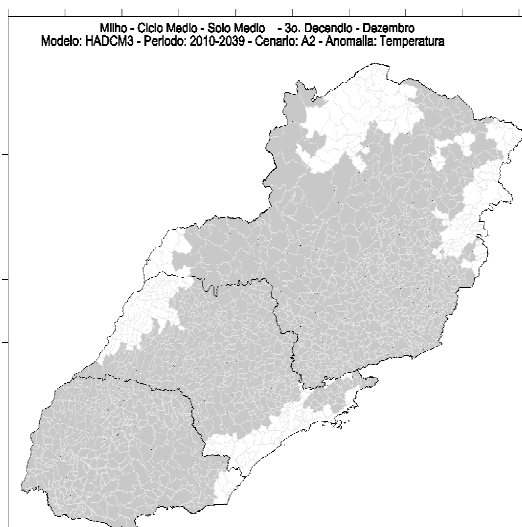


Figura 49 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo HadCM3 no decêndio DEZ_3.

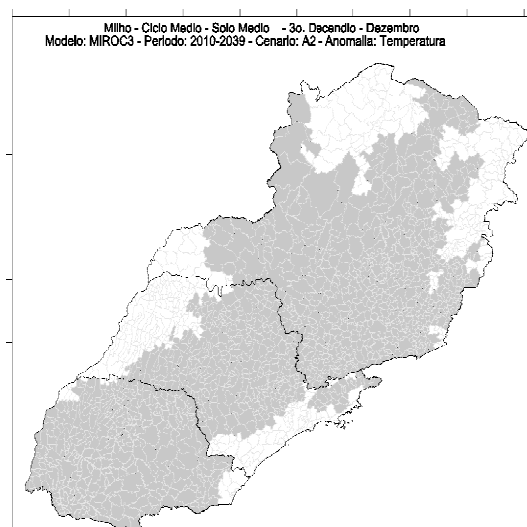


Figura 50 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura do modelo MIROCmed no decêndio DEZ_3.

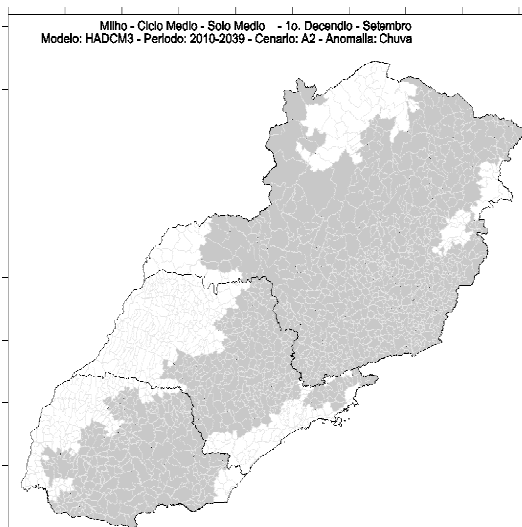


Figura 51 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decêndio SET_1.

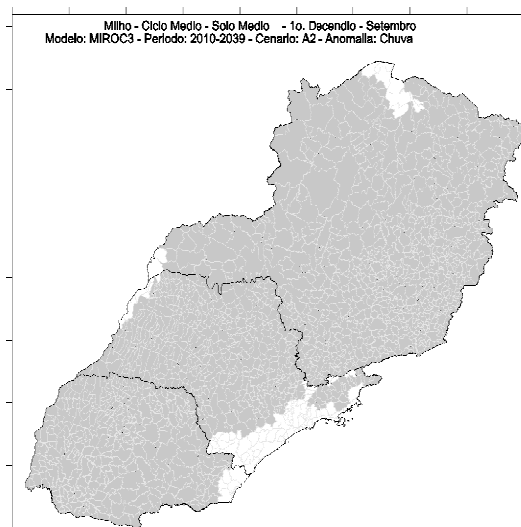


Figura 52 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decêndio SET_1.

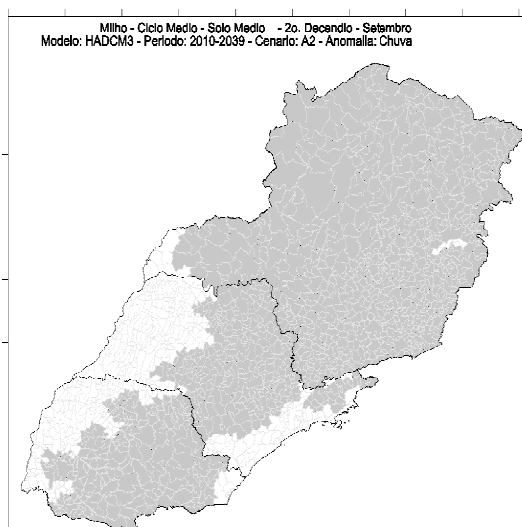


Figura 53 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decêndio SET_2.

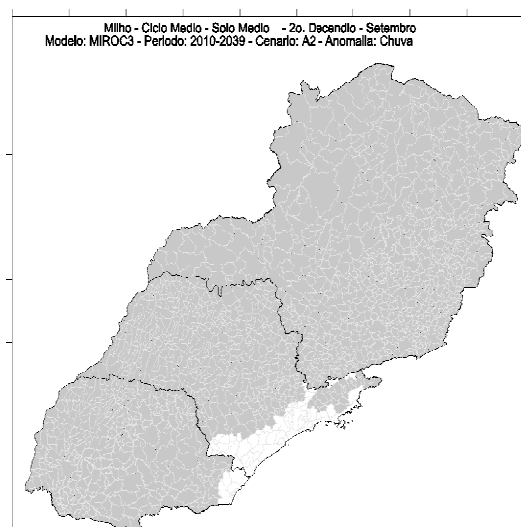


Figura 54 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decêndio SET_2.

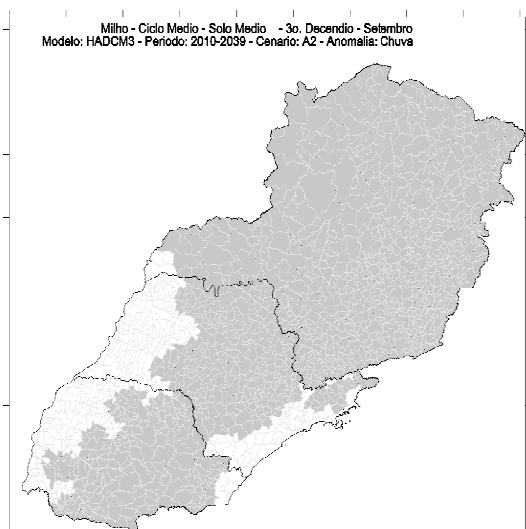


Figura 54 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decênio SET_3.

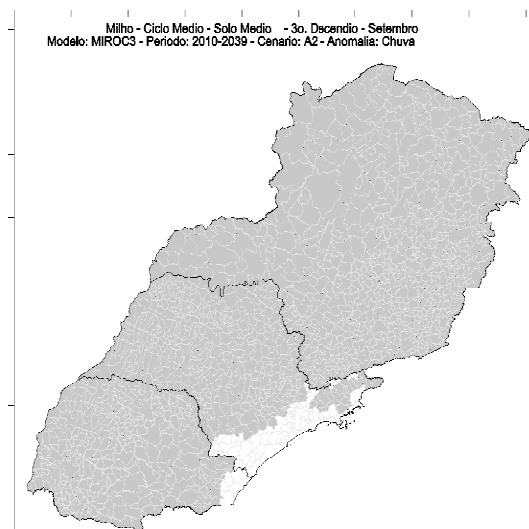


Figura 55 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decênio SET_3.

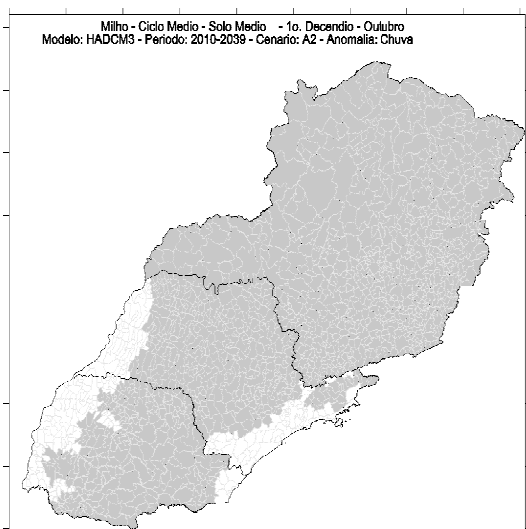


Figura 56 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decênio OUT_1.

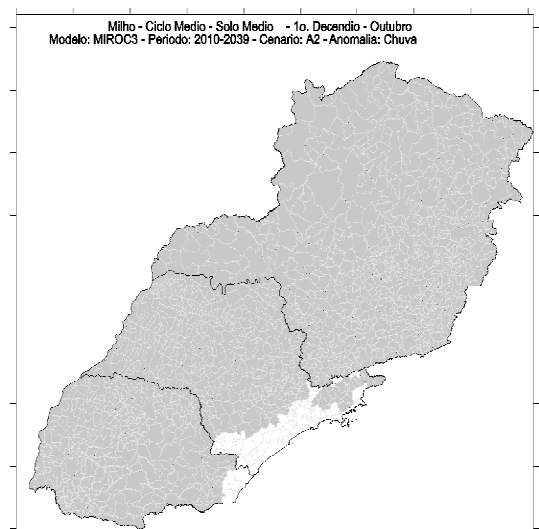


Figura 57 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decênio OUT_1.

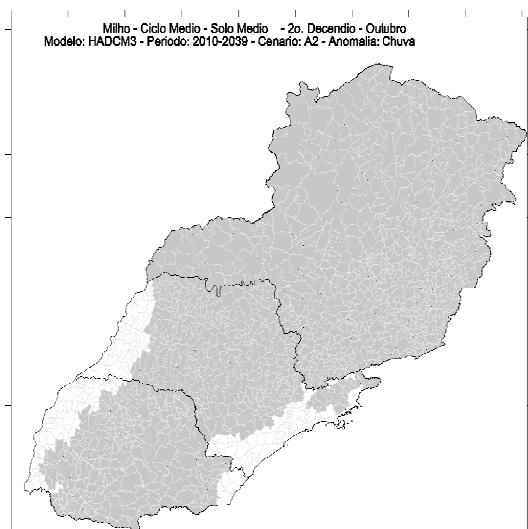


Figura 58 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decêndio OUT_2.

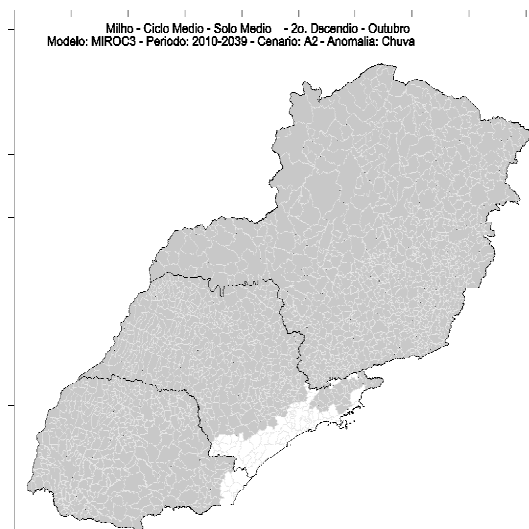


Figura 59 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decêndio OUT_2.

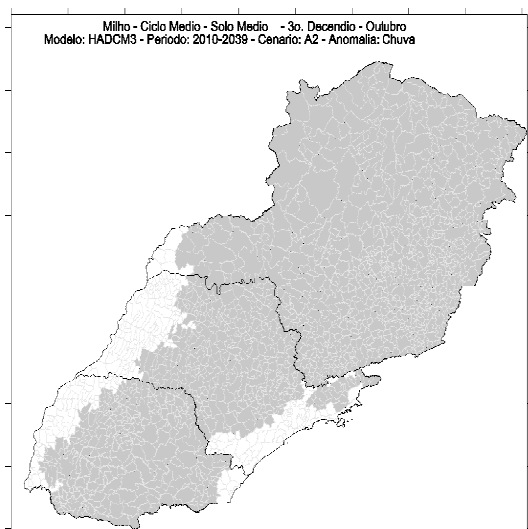


Figura 60 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decêndio OUT_3.

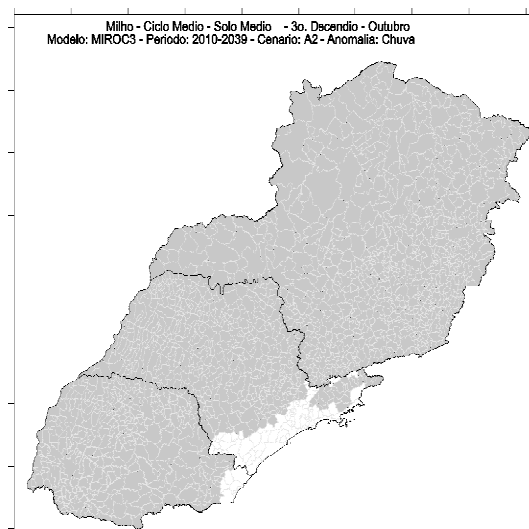


Figura 61 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decêndio OUT_3.

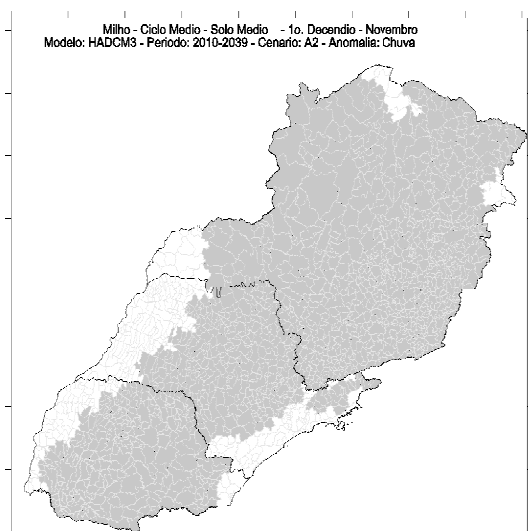


Figura 61 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decêndio NOV_1.

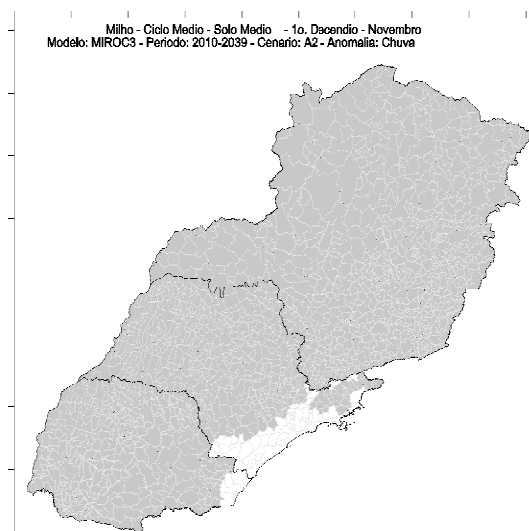


Figura 62 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decêndio NOV_1.

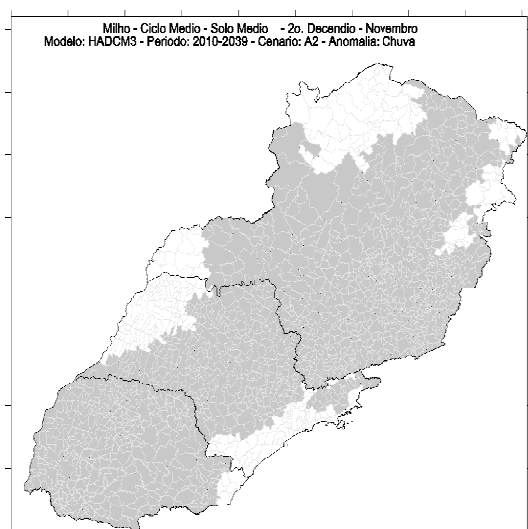


Figura 63 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decêndio NOV_2.

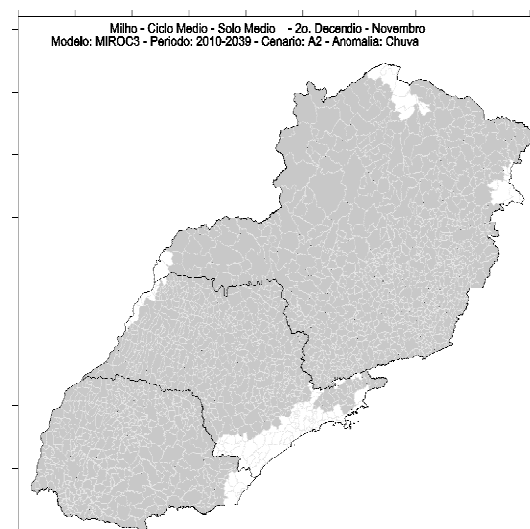


Figura 64 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decêndio NOV_2.

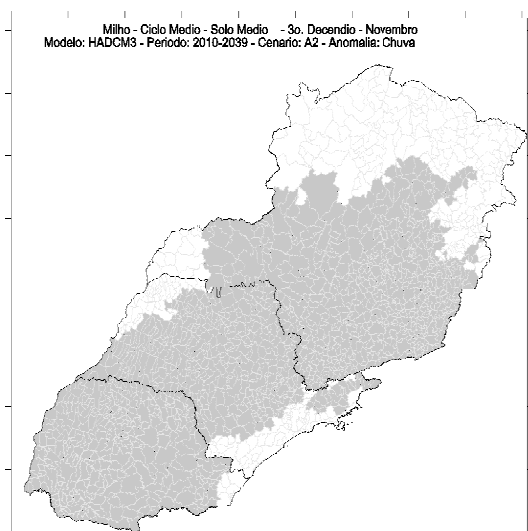


Figura 65 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decênio NOV_3.

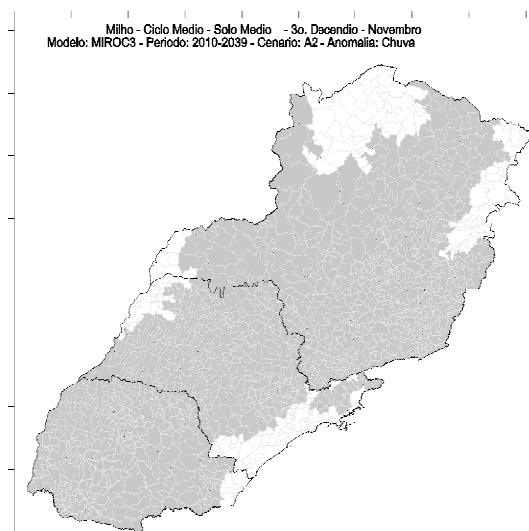


Figura 66 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decênio NOV_3.

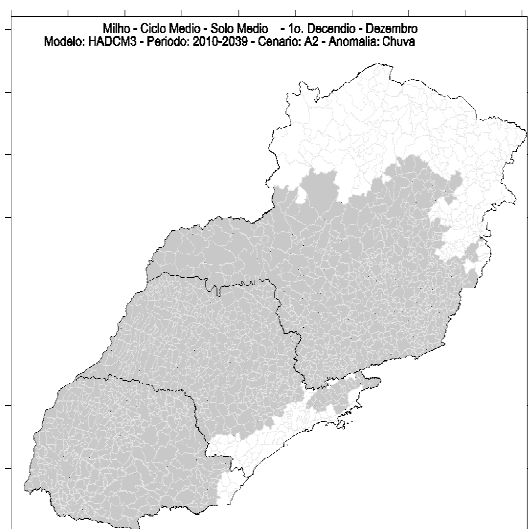


Figura 67 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decênio DEZ_1.

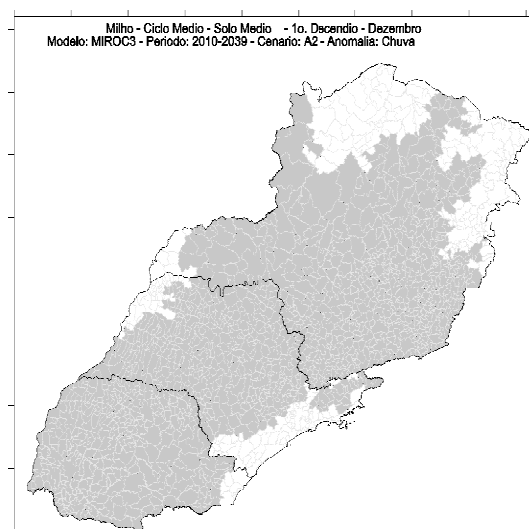


Figura 68 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decênio DEZ_1.

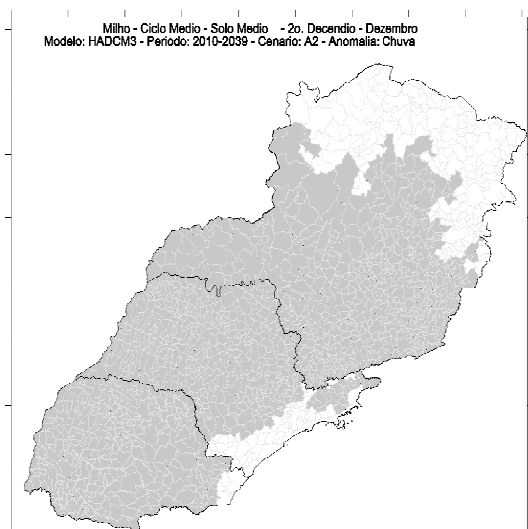


Figura 69 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decênio DEZ_2.

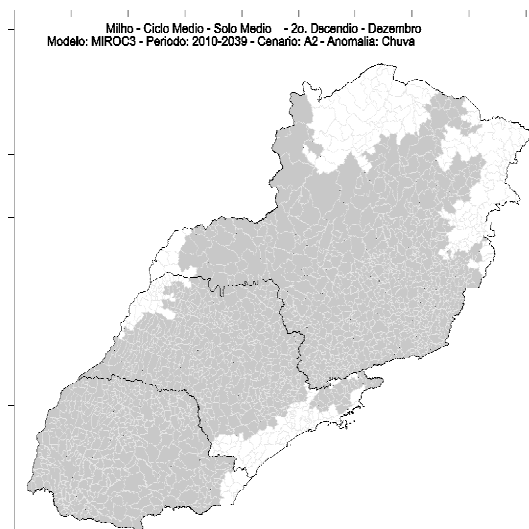


Figura 70 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decênio DEZ_2.

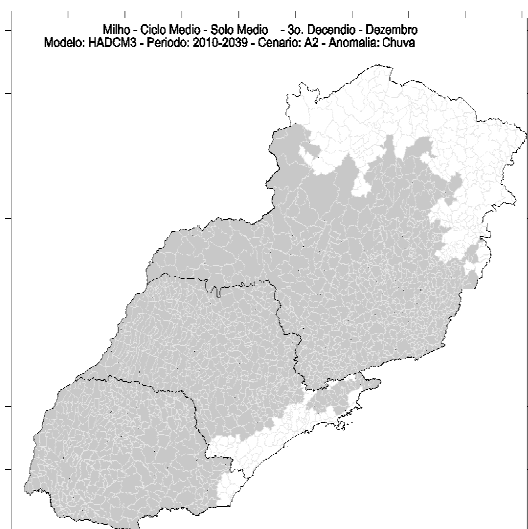


Figura 71 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo HadCM3 no decênio DEZ_3.

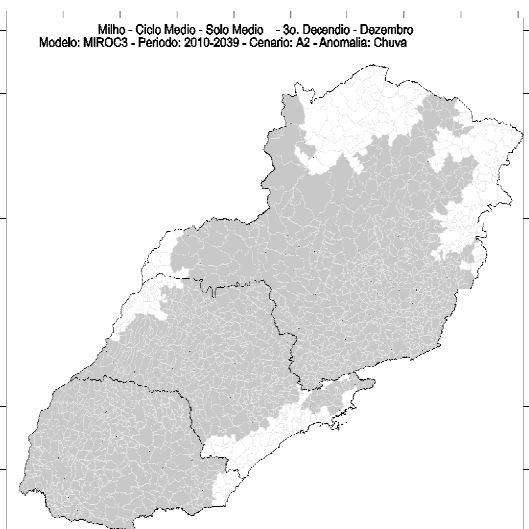


Figura 72 – Zoneamento do Milho com anomalia de precipitação do modelo MIROCmed no decênio DEZ_3.

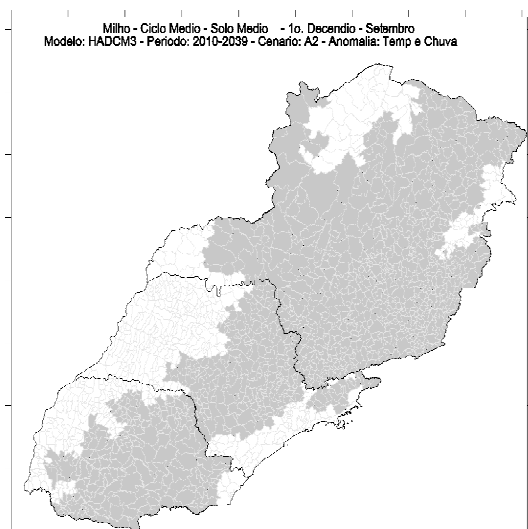


Figura 73 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decênio SET_1.

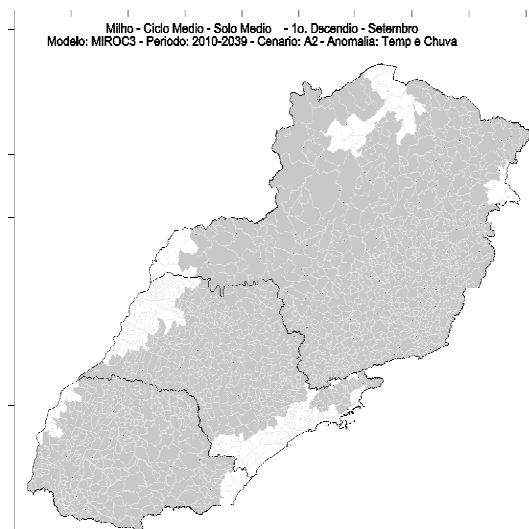


Figura 74 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decênio SET_1.

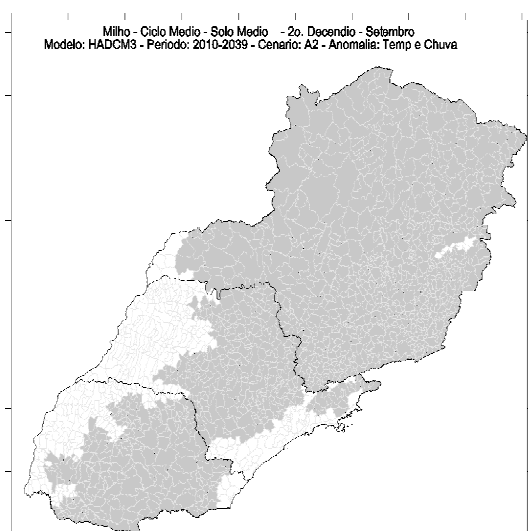


Figura 75 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decênio SET_2.

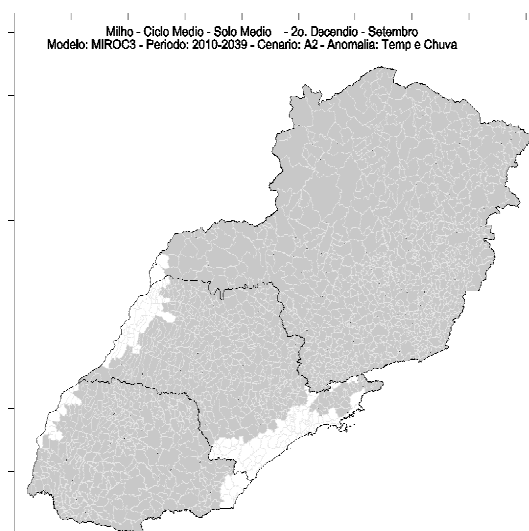


Figura 76 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decênio SET_2.

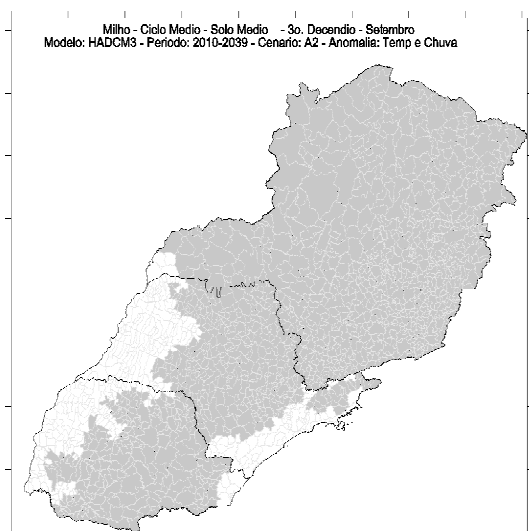


Figura 77 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio SET_3.

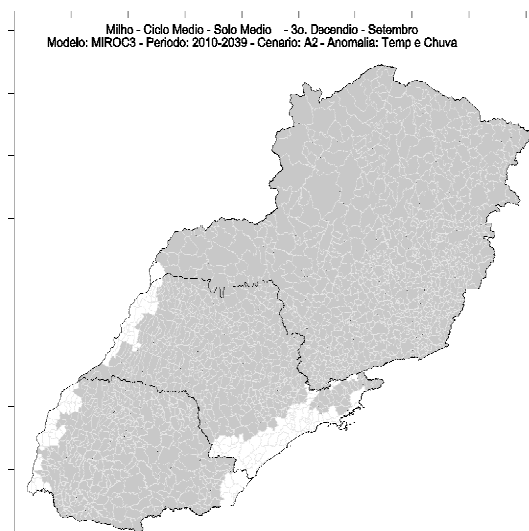


Figura 78 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio SET_3.

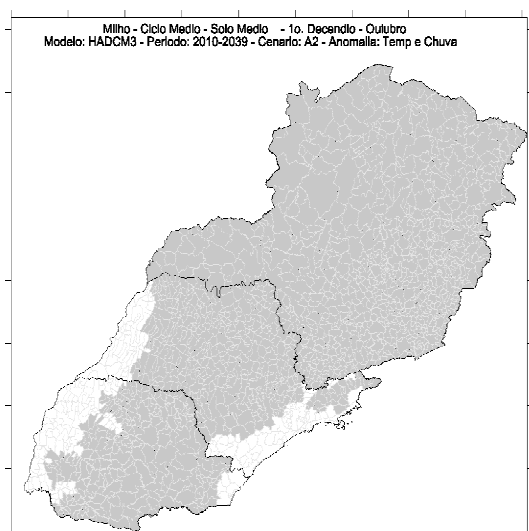


Figura 79 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio OUT_1.

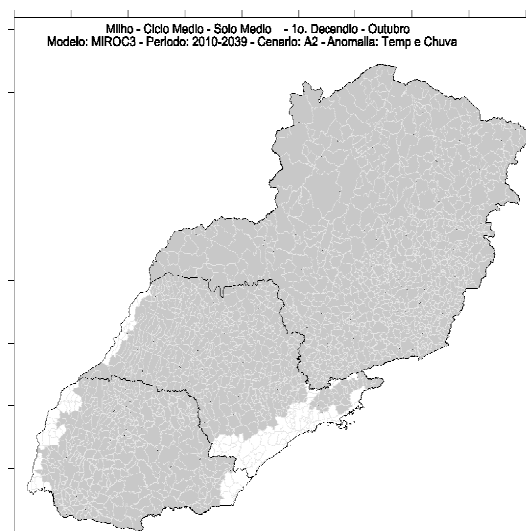


Figura 80 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio OUT_1.

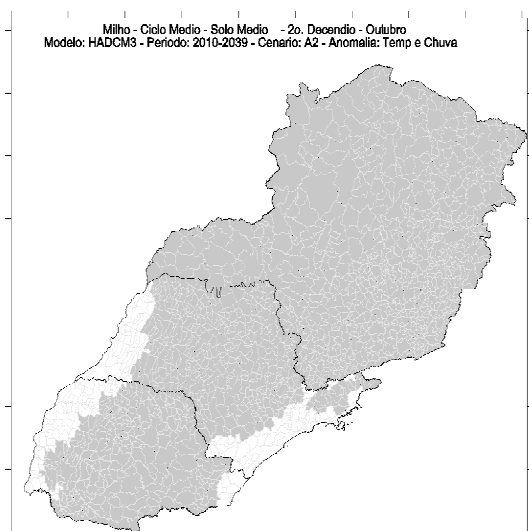


Figura 81 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio OUT_2.

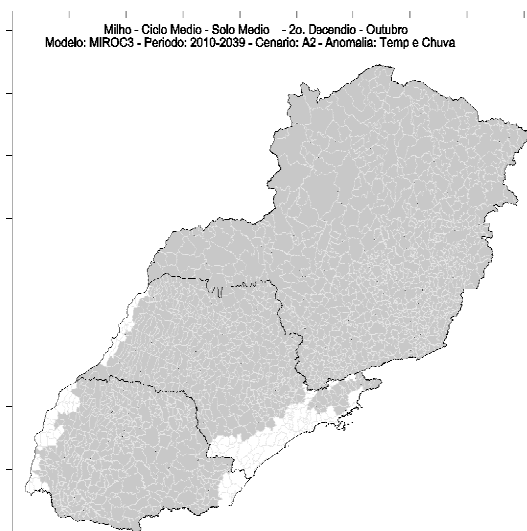


Figura 82 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio OUT_2.

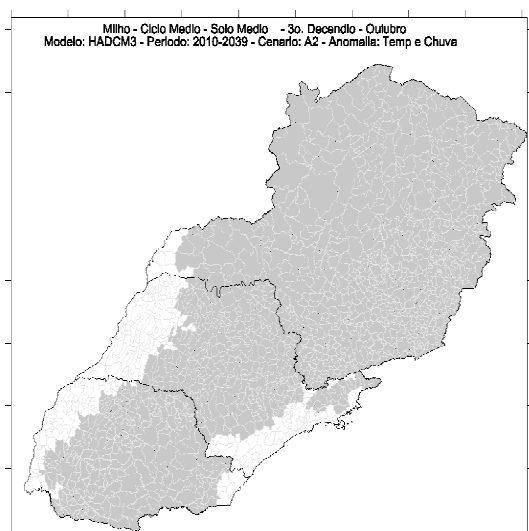


Figura 83 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio OUT_3.

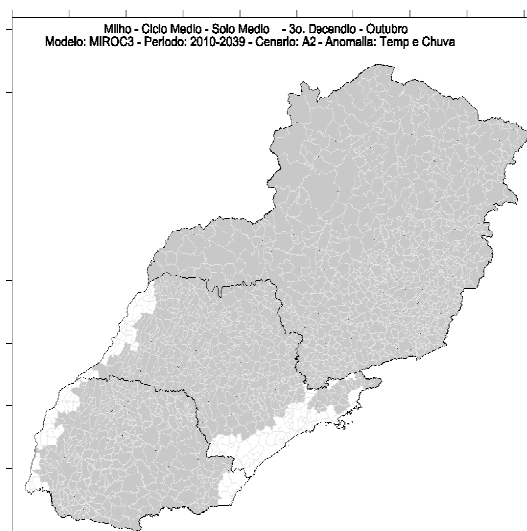


Figura 84 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio OUT_3.

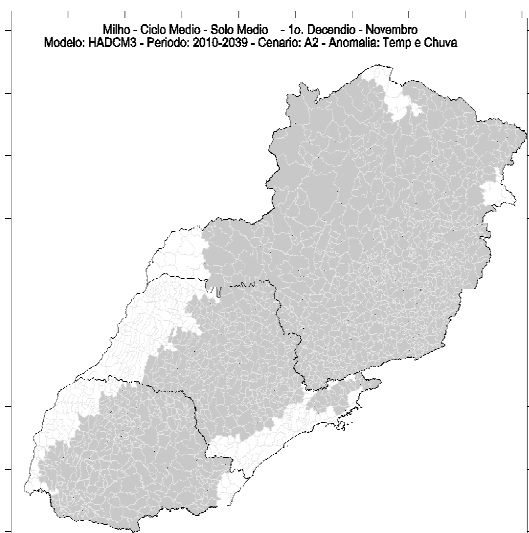


Figura 85 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio NOV_1.

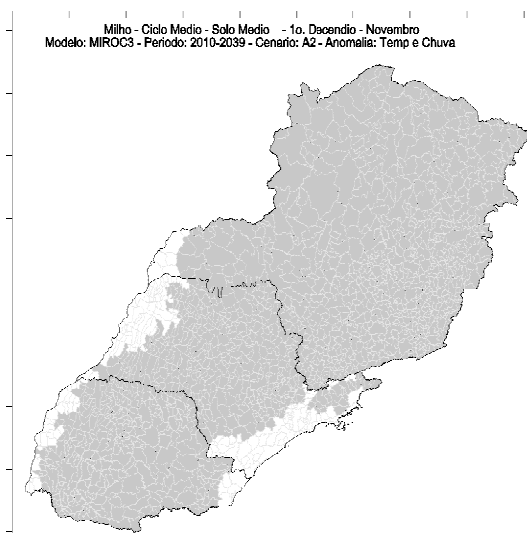


Figura 86 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio NOV_1.

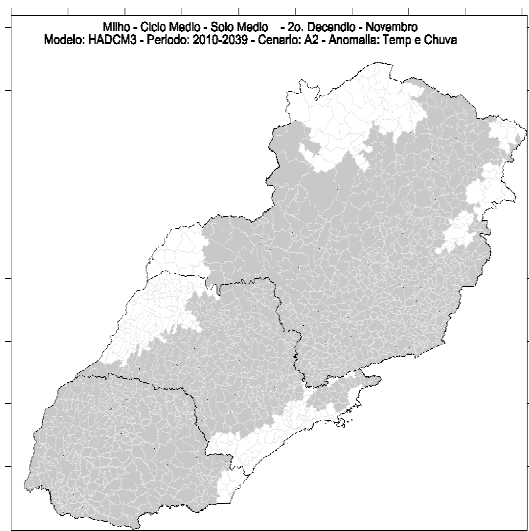


Figura 87 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio NOV_2.

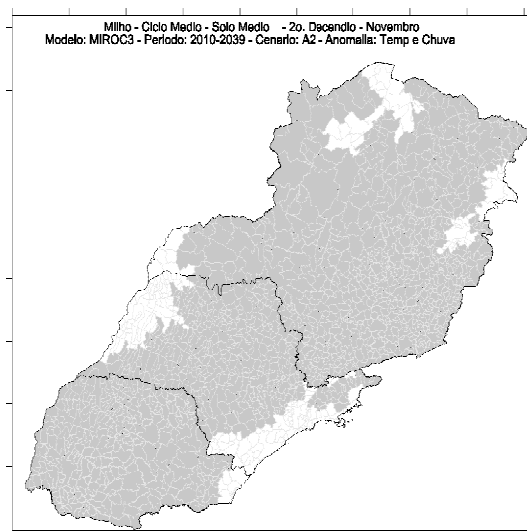


Figura 88 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio NOV_2.

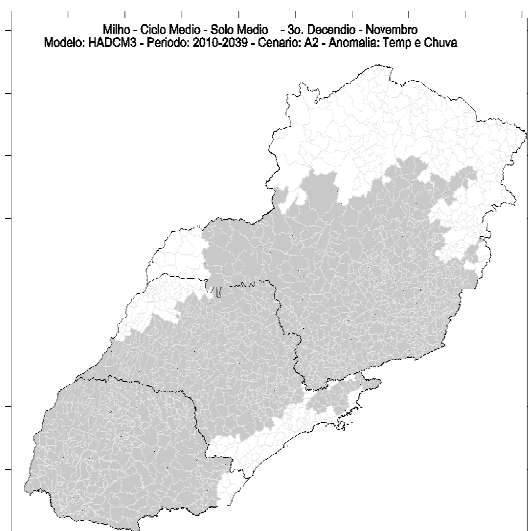


Figura 89 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio NOV_3.

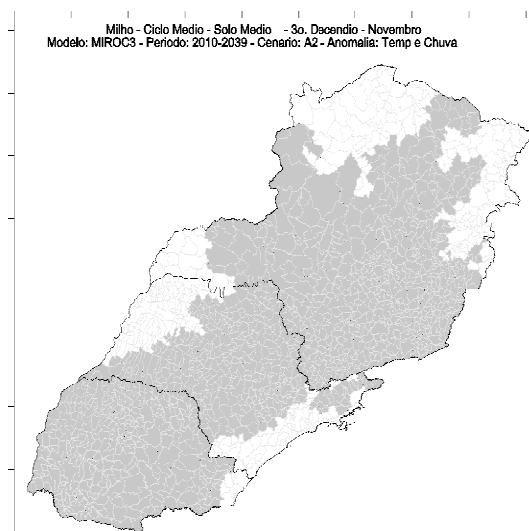


Figura 90 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio NOV_3.

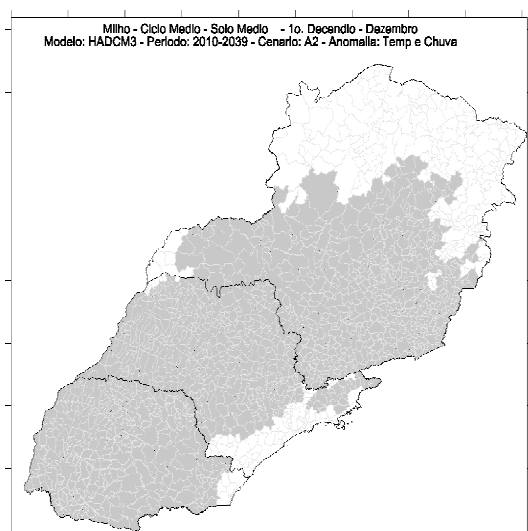


Figura 91 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio DEZ_1.

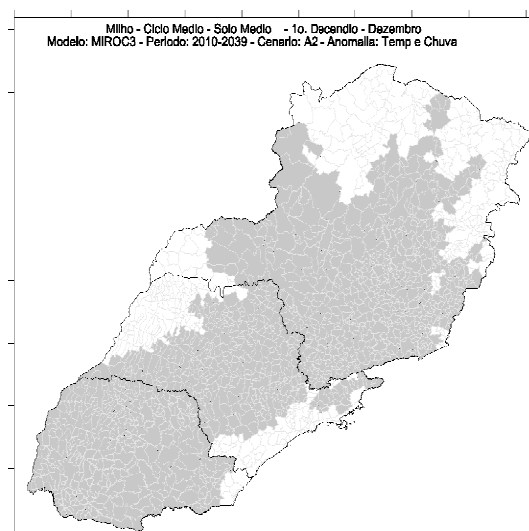


Figura 92 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio DEZ_1.

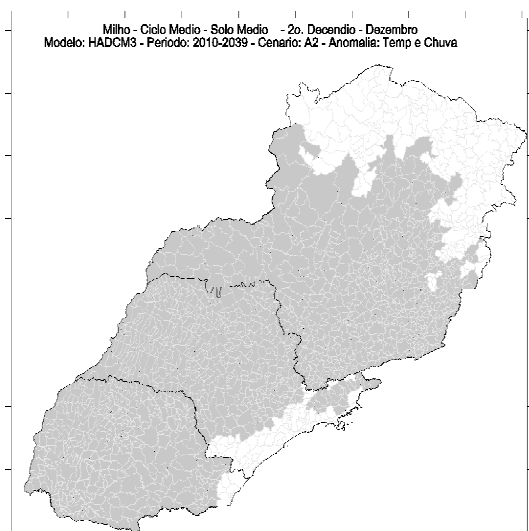


Figura 93 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio DEZ_2.

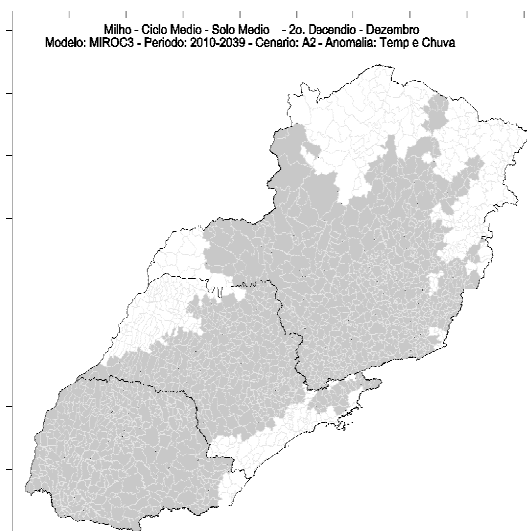


Figura 94 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio DEZ_2.

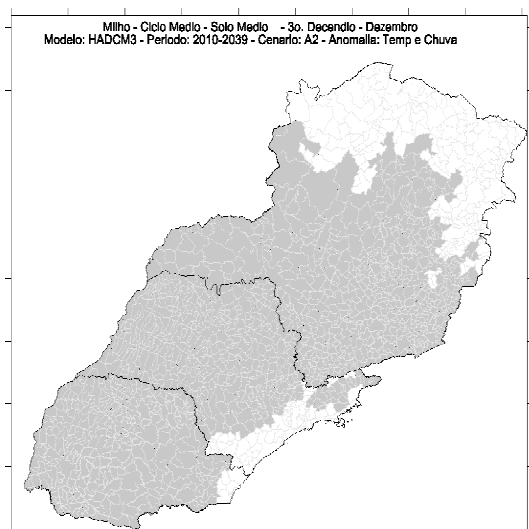


Figura 95 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 no decêndio DEZ_3.

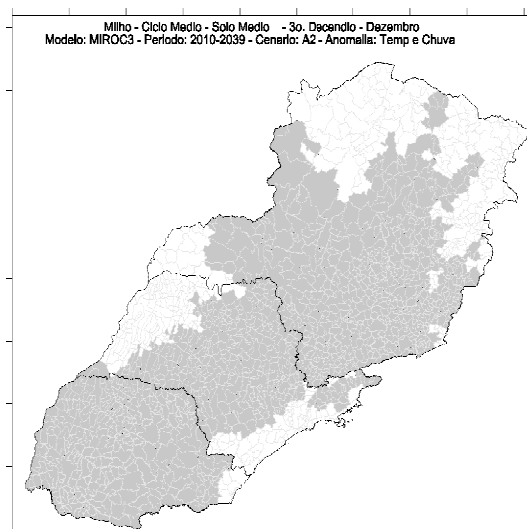


Figura 96 – Zoneamento do Milho com anomalia de temperatura e precipitação do modelo MIROCmed no decêndio DEZ_3.

Anexo

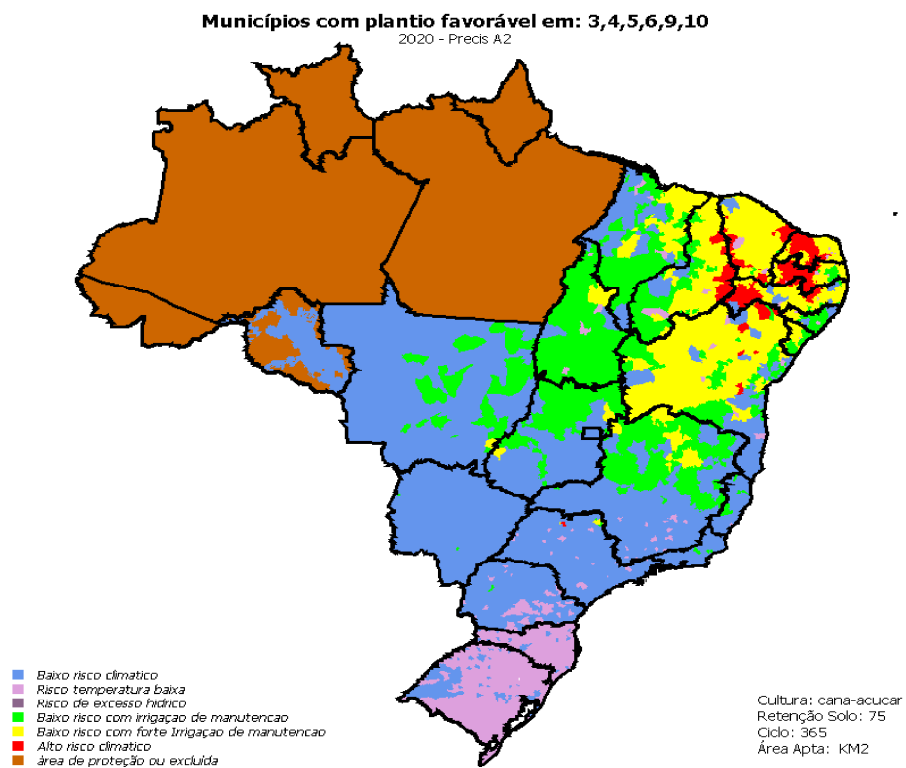


Figura 01 – Zoneamento de riscos climático para a cultura da cana para o ano de 2020 gerado pelo modelo regional *PRECIS* no cenário A2 (PINTO *et al.*, 2008).

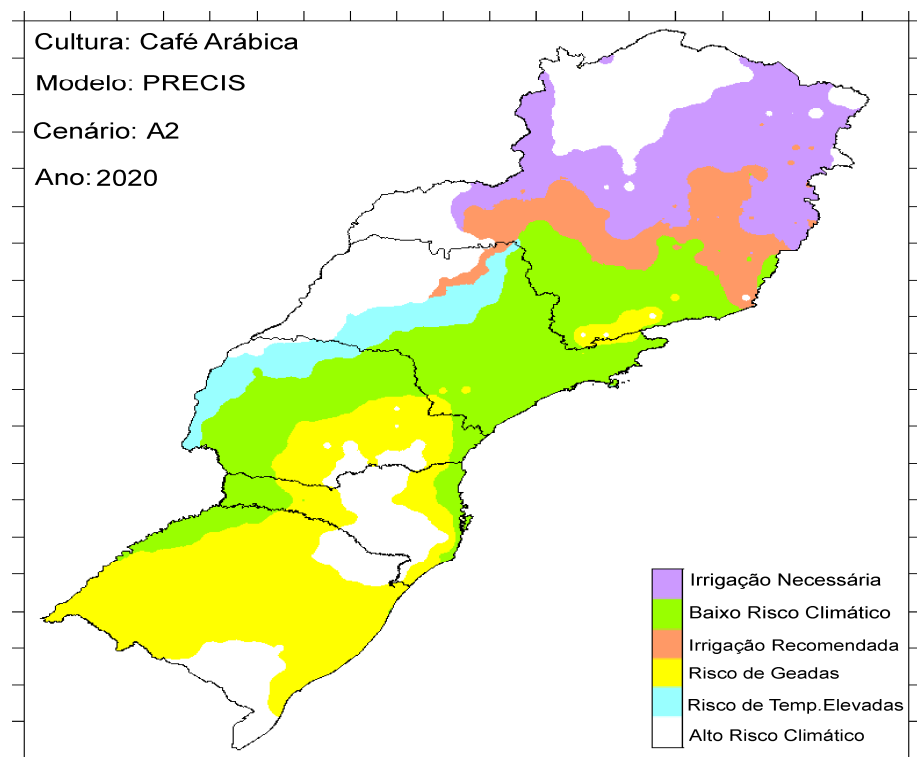


Figura 02 – Zoneamento de riscos climático para a cultura do café para o ano de 2020 gerado pelo modelo regional *PRECIS* no cenário A2 (PINTO *et al.*, 2008).

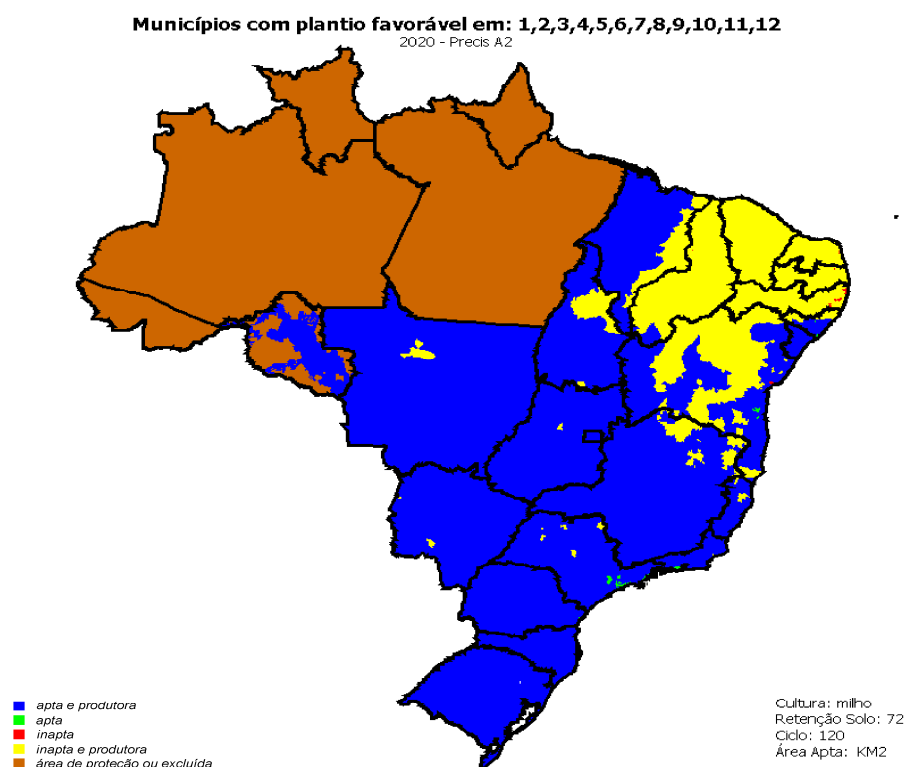


Figura 03 – Zoneamento de riscos climático para a cultura do milho para o ano de 2020 gerado pelo modelo regional *PRECIS* no cenário A2 (PINTO *et al.*, 2008).