

LEYDIMERE JANNY COTA OLIVEIRA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NAS
PRODUTIVIDADES DAS CULTURAS DO FEIJÃO
E DO MILHO NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2007**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48m
2007

Oliveira, Leydimere Janny Cota, 1981-
Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades
das culturas do feijão e do milho no estado de Minas
Gerais / Leydimere Janny Cota Oliveira. – Viçosa, MG,
2007.
xvii, 67f. : il. ; 29cm.

Orientador: Luiz Cláudio Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 62-67.

1. Mudanças climáticas. 2. Clima - Modelos matemáti-
cos. 3. Aquecimento global. 4. Produtividade agrícola.
5. Feijão - Cultivo - Efeito do clima. 6. Milho - Cultivo -
Efeito do clima. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

CDD 22.ed. 630.2515

LEYDIMERE JANNY COTA OLIVEIRA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NAS
PRODUTIVIDADES DAS CULTURAS DO FEIJÃO
E DO MILHO NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.**

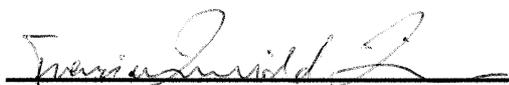
APROVADA: 27 de agosto de 2007.



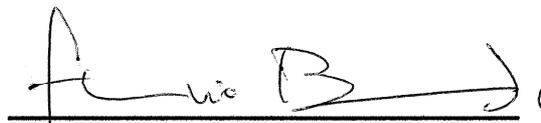
Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Co-Orientador)



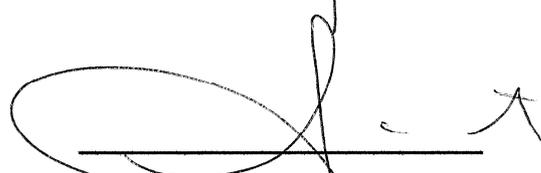
Pesq. Williams Pinto Marques Ferreira
(Co-Orientador)



Pesq. Francisca Zenaide de Lima



Prof. Flávio Barbosa Justino



Prof. Luiz Cláudio Costa
(Orientador)

A minha mãe (in memoriam)
Ao meu filho (in memoriam)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela presença em todos os momentos de minha vida.

Ao meu pai, Ledes, a minha madrasta, Rita, aos meus irmãos, Ledes Jr., Lediane e Leandro, meu sobrinho Pedro Lucas, por serem a minha maior escola, pelo apoio incondicional, pelo porto seguro, pelo estímulo, pelo amor e carinho.

Ao meu marido Marcelo, pelo apoio nas horas difíceis, pelo estímulo e pelo amor, carinho e atenção que me foram dedicados e que de forma grandiosa soube suportar as dificuldades e curtir os bons momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo.

Ao professor Luiz Cláudio Costa, pela orientação e amizade.

Aos conselheiros Gilberto Chohaku Sedyama e Williams Pinto Marques Ferreira, pelas sugestões e amizade.

À Francisca Zenaide de Lima e Flávio Barbosa Justino, pelas contribuições e amizade.

Aos meus colegas de curso, na pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola pela presteza.

Às amigas Sibeles e Amélia que sempre me deram força para todas as questões da minha vida.

À Elizete e Elenice pela convivência harmoniosa e pelo apoio durante a execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

LEYDIMERE JANNY COTA OLIVEIRA, filha de Ledes Cota e Maria das Dores Mota Cota, nasceu em 17 de fevereiro de 1981, em Alvinópolis, no Estado de Minas Gerais.

Em julho de 2005, graduou-se em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

Em agosto de 2005, iniciou o Curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola na UFV, submetendo-se à defesa de dissertação em 27 de agosto de 2007.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
	página
CAPÍTULO 1	
MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 As culturas.....	4
2.1.1 Feijão.....	4
2.1.2 Milho.....	4
2.2 Fotossíntese.....	6
2.3 Respiração.....	8
2.4 Uso eficiente da radiação.....	9
2.5 Modelagem na agricultura.....	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Área de estudo e dados utilizados.....	12
3.2 Desenvolvimento do modelo.....	13
3.2.1 Módulo climático.....	14
3.2.2 Módulo radiação.....	15
3.2.3 Módulo balanço de carbono.....	15
3.2.4 Módulo desenvolvimento e partição da matéria seca.....	18
3.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros e variáveis climáticas.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 Produtividade potencial.....	21
4.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros e das variáveis climáticas.....	31
5 CONCLUSÕES.....	38

CAPÍTULO 2	
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NAS PRODUTIVIDADES DAS CULTURAS.....	39
1 INTRODUÇÃO.....	39
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	41
2.1 As culturas.....	41
2.2 Modelagem na agricultura.....	41
2.3 Produtividade potencial, produtividade real e perda de produtividade.....	42
2.4 Possíveis efeitos das mudanças climáticas na agricultura.....	44
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.1 Área de estudo e dados utilizados.....	46
3.2 Modelo utilizado.....	46
3.3 Projeções futuras.....	47
3.3.1 Efeito das mudanças climáticas.....	47
3.3.2 Efeito da crescente concentração de CO ₂	47
3.3.3 Efeito do avanço tecnológico.....	48
3.3.4 Estimativa da perda de produtividade.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 Projeções futuras.....	52
4.1.1 Efeito das variáveis climáticas.....	52
4.1.2 Efeito das variáveis climáticas e concentração de CO ₂	54
4.1.3 Efeito das variáveis climáticas, concentração de CO ₂ e do avanço tecnológico.....	56
4.1.4 Estimativa da perda de produtividade.....	58
5 CONCLUSÕES.....	60
CONCLUSÕES GERAIS.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 –	Mapa do Estado de Minas Gerais com a localização das estações meteorológicas e mesorregiões estudadas.....	12
Figura 2 –	Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo.....	14
Figura 3 –	Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Vale do Jequitinhonha, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.....	21
Figura 4 –	Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Zona da Mata, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.....	22
Figura 5 –	Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura..	22
Figura 6 –	Figura 6 – Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Sul/Sudoeste, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.....	23
Figura 7 –	Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Campos das Vertentes, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.....	23
Figura 8 –	Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Metropolitana, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.....	24

Figura 9 –	Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Central Mineira, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.....	24
Figura 10 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Vale do Jequitinhonha, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	25
Figura 11 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Zona da Mata, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	25
Figura 12 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	26
Figura 13 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Sul/Sudoeste, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	26
Figura 14 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Campos das Vertentes, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	27
Figura 15 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Metropolitana, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	27
Figura 16 –	Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Central Mineira, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.....	28
Figura 17 –	Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método de Blackman.....	32
Figura 18 –	Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da exponencial negativa.....	32

Figura 19 –	Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole retangular.....	33
Figura 20 –	Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole não retangular.....	33
Figura 21 –	Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método do uso eficiente da radiação.....	34
Figura 22 –	Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método de Blackman.....	34
Figura 23 –	Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da exponencial negativa.....	35
Figura 24 –	Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole retangular.....	35
Figura 25 –	Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole não retangular.....	36
Figura 26 –	Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método do uso eficiente da radiação.....	36

CAPÍTULO 2

Figura 1 –	Componentes da perda de produtividade adaptado da FAO (2004).....	43
Figura 2 –	Curvas de tendência de produtividade do feijão para cada mesorregião, com base na série histórica do IBGE.....	49
Figura 3 –	Curvas de tendência de produtividade do milho para cada mesorregião, com base na série histórica do IBGE.....	49
Figura 4 –	Mudança relativa na produtividade para a cultura do feijão, calculada por meio da Equação 2, para cada mesorregião.....	50
Figura 5 –	Mudança relativa na produtividade para a cultura do milho, calculada por meio da Equação 2, para cada mesorregião.....	50

Figura 6 -	Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas a partir de dados diários para o cenário A ₂ do modelo HadCM3 (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.....	53
Figura 7 -	Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A ₂ do modelo HadCM3 (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.....	53
Figura 8 -	Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas a partir de dados diários para o cenário A ₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO ₂ (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.....	55
Figura 9 -	Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A ₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO ₂ (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.....	55
Figura 10 -	Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas a partir de dados diários para o cenário A ₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO ₂ e o avanço tecnológico (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.....	57
Figura 11 -	Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A ₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO ₂ e o avanço tecnológico (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.....	57
Figura 12 -	Estimativas da perda de produtividade para as mesorregiões, anos 2000, 2020, 2050 e 2080 para a cultura do feijão.....	58
Figura 13 -	Estimativas da perda de produtividade para as mesorregiões, anos 2000, 2020, 2050 e 2080 para a cultura do milho.....	58

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 –	Identificação das estações meteorológicas do INMET utilizadas.....	13
Tabela 2 –	Produtividade potencial média do feijão para cada mesorregião, pelos diferentes modelos em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	29
Tabela 3 –	Produtividade potencial média do milho para cada mesorregião, pelos diferentes modelos em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	30
Tabela 4 –	Desvios entre a produtividade potencial média estimada pelos cinco modelos e a produtividade potencial, obtida na literatura para as duas culturas.....	30

CAPÍTULO 2

Tabela 1 –	Projeção de variações percentuais médias na produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A_2 do modelo HadCM3.....	52
Tabela 2 –	Projeção de variações percentuais médias na produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A_2 do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO_2	54
Tabela 3 –	Projeção de variações percentuais médias na produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A_2 do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO_2 e o avanço tecnológico.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Símbolo	Unidade
temperatura máxima	T_{max}	(°C)
temperatura mínima	T_{min}	(°C)
temperatura média	T_{med}	(°C)
radiação solar	R_s	(MJ. m ⁻² . dia ⁻¹)
coeficiente empírico que depende da latitude do local	a_s	–
coeficiente empírico	b_s	–
razão de insolação	n/N	–
radiação extraterrestre	R_a	(MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
radiação fotossinteticamente ativa no topo da cultura	RFA	(MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
RFA interceptada pela cultura	I	(MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
coeficiente de extinção do dossel	k	–
índice de área foliar	IAF	(m ² _{folha} .m ⁻² _{solo})
taxa máxima de fotossíntese da cultura	F_{gmax}	(gCO ₂ .m ⁻² .dia ⁻¹)
eficiência fotossintética	ε	(gCO ₂ .MJ ⁻¹)
taxa de fotossíntese bruta	F_g	(gCO ₂ .m ⁻² .dia ⁻¹)
parâmetro de forma	θ	–
taxa de fotossíntese máxima a temperatura de referência	F_{gmaxtr}	(gCO ₂ .m ⁻² .dia ⁻¹)
temperatura base	T_b	(°C)
temperatura de referência	T_r	(°C)
coeficiente da respiração de manutenção	r_m	(gCO ₂ .gMS ⁻¹ .dia ⁻¹)
respiração de manutenção	R_M	(gCO ₂ .m ⁻² .dia ⁻¹)
fator de incremento da manutenção	Q_{10}	–
coeficiente da respiração de manutenção a	r_{mtr}	(gCO ₂ .gMS ⁻¹ .dia ⁻¹)

temperatura de referência		
eficiência de conversão de carboidrato	r_c	(gCO ₂ .gMS ⁻¹)
quantidade de matéria seca produzida pelas plantas	MS	(gMS.m ⁻²)
eficiência de conversão de I em matéria seca	UER	(gMS.MJ ⁻¹)
estádio de desenvolvimento	ED	–
graus-dias acumulado	GD	(°C)
graus-dias para o florescimento	GDF	(°C)
graus-dias total	GDT	(°C)
área foliar específica	AFE	(m ² .g ⁻¹)
partição da matéria seca para as folhas	PF	(g.m ⁻²)
efeito da concentração de CO ₂ na produtividade das culturas	P_{CO_2}	–
mudança relativa na produtividade por unidade crescente na concentração de CO ₂	f_{CO_2}	(%.ppm ⁻¹)
diferença entre a concentração de CO ₂ futura e do ano-base	ΔCO_2	(ppm)
mudança relativa na produtividade entre anos	Pr	–
produtividade estimada, para determinado ano, por meio de regressão linear simples dos dados observados para cada mesorregião	Pe	(kg.ha ⁻¹)
efeito da tecnologia na produtividade real	P_T	–
mudança relativa na produtividade para o ano-base 2000	$Pr_{(to)}$	–
representa o incremento na mudança relativa da produtividade com referência para o ano-base 2000	Pr,a	–
efeito da tecnologia na produtividade potencial	PP_T	–
progresso genético	P_g	(%/ano)
parâmetro que representa o efeito da tecnologia na produtividade potencial	F_{T,PP_T}	–

RESUMO

OLIVEIRA, Leydimere Janny Cota, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2007. **Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no Estado de Minas Gerais.** Orientador: Luiz Cláudio Costa. Co-Orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e Williams Pinto Marques Ferreira.

Modelos baseados em processos, utilizando as equações de Blackman, hipérbole retangular, exponencial negativa, hipérbole não retangular e uso eficiente da radiação, como parte central no cálculo do balanço de carbono, foram utilizados para estimar a variabilidade da produtividade das culturas de milho e feijão, em algumas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, a partir de dados diários meteorológicos históricos de 1975 a 2004. Também foram simuladas alterações na produtividade das culturas do feijão e do milho, para os anos de 2020, 2050 e 2080, comparadas com o ano-base 2000, considerando-se as condições climáticas futuras, o efeito fertilização por CO₂ e o avanço tecnológico. Para quantificar o efeito das condições climáticas na produtividade das culturas, foram utilizados dados diários projetados para o cenário A₂, pelo modelo de circulação geral da atmosfera, HadCM3. Uma relação empírica simples foi usada, para calcular o efeito da crescente concentração de CO₂ na produtividade das culturas. O efeito do avanço tecnológico na produtividade futura foi estimado, por meio da tendência da série histórica dos dados de produtividade do IBGE, considerando-se o período de 1976 a 2004. Foram objetivos deste trabalho: (a) calcular a produtividade potencial das culturas do feijão e do milho para as mesorregiões do Estado de Minas Gerais, com base nos diferentes modelos citados anteriormente; (b) comparar os resultados dos diferentes modelos; e (c) estimar a produtividade potencial e a perda de produtividade (a diferença entre as produtividades potencial e real), considerando o cenário A₂ do modelo HadCM3, o efeito fertilização por CO₂ e do avanço tecnológico. A produtividade potencial, calculada pelos diferentes modelos diferiu substancialmente. A diferença percentual entre o modelo de maior estimativa de produtividade e o de menor foi de 105% para a cultura do feijão e de 108% para a cultura do milho. As estimativas mostraram um aumento na produtividade potencial

em relação àquela no ano-base 2000, para a cultura do feijão de 35,04% a 114,66%, e de 40,76% a 92,59% para a cultura do milho, dependendo do ano estimado e da mesorregião. O efeito da tecnologia foi o mais importante para tal aumento. Os resultados da diferença entre as produtividades potencial e real apresentaram tendência decrescente para as duas culturas, em todas as mesorregiões, com destaque para a mesorregião do Triângulo/Alto Paranaíba.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Leydimere Janny Cota, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August 2007. **Climatic changes and their impacts on productivities of the beans and maize crops in Minas Gerais State.** Adviser: Luiz Cláudio Costa. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama and Williams Pinto Marques Ferreira.

Some process-based models, by using the Blackman's equation, the negative exponential, rectangular hyperbole, non-rectangular hyperbole, and the efficient use of the radiation were used as the central part in calculation of the carbon balance in order to estimate the variability of the productivity of both maize and bean crops in some mesoregions at Minas Gerais State, from the historic, meteorological and daily data relative to the period from 1975 to 2004. Some alterations in the productivity of the bean and maize crops were also simulated for the years 2020, 2050 and 2080, compared with the basis- year 2000, by considering the future climatic conditions, fertilization effect from CO₂ and the technological advance. To quantify the effect of the climatic conditions on productivity of the crops, daily data projected for the A₂ scenery based on the general atmosphere circulation model - HadCM3 were used. A simple empirical relationship was used to calculate the effect of the increasing CO₂ concentration on the productivity of the crops. The effect of the technological advance on the future productivity was estimated by the tendency of the historical series of the IBGE productivity data, by considering the period from 1976 to 2004. The objectives of this study were: to calculate the potential productivity of the bean and maize crops for the mesoregions in Minas Gerais State, based on those different models previously mentioned; (b) to compare the results from the different models; and (c) to estimate the potential productivity and the yield gap (difference between the potential and real productivities), by taking into account the scenery A₂ in the HadCM3 model, the effects from the CO₂ fertilization and the technological advance. The potential productivity calculated by those models rather substantially differed. The percent difference between the model showing the highest productivity estimate and that one showing the minor estimate was 105% for bean and 108% for maize crops. The estimates showed an increased potential productivity in relation to the

basis- year 2000, that is, from 35.04% to 114.66% for bean and 40.76% to 92.59% for maize crops, depending either on the estimated year and mesoregion. The technological advance showed to be the most important factor for such an increase. The results for the yield gap showed a decreasing tendency for both crops in all mesoregions, as distinguishing the Triângulo/Alto Paranaíba mesoregion.

INTRODUÇÃO GERAL

O crescente aumento da população, observado nos últimos anos e previsto para as próximas décadas, exerce grande pressão na agricultura mundial para o aumento da produção de alimentos (FAO, 2003). A situação torna-se mais grave, quando se consideram os cenários de mudanças climáticas.

Estudos desenvolvidos em diferentes partes do mundo têm mostrado que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas (LUO *et al.*, 2005; RICHTER; SEMENOV, 2005; ZHANG; LIU, 2005). Esses impactos referem-se às taxas fotossintéticas, e de respiração, e à redução no ciclo das culturas. A causa principal desses impactos é o aumento da temperatura do ar. No entanto, ainda existe uma série de incertezas sobre tais impactos, uma vez que a produtividade das culturas depende de uma série de fatores biofísicos e socioeconômicos, que são difíceis de quantificar (EWERT *et al.*, 2005).

Vários modelos, a maioria com fundamentação estatística, vêm sendo desenvolvidos, no sentido de definir a produtividade potencial das culturas (FAO, 2003). Todavia, considerando a não-linearidade e a complexidade da relação entre clima e cultura, modelos baseados em processos também vêm sendo utilizados, para definir a produtividade potencial das culturas sob condições de mudança climática (EASTERLING *et al.*, 2001; PARRY *et al.*, 2004). Tais modelos comumente utilizam o balanço de carbono das culturas, tendo como variável de entrada, unicamente, a radiação e a temperatura, não considerando nenhuma outra restrição ambiental. O estudo dos impactos na produtividade potencial é ferramenta importante, pois, não considera incertezas como restrição hídrica e nutricional, pragas e doenças, solo e outros.

O melhoramento genético das culturas, associado a práticas adequadas de manejo e avanços tecnológicos, foi responsável pelo aumento da produtividade, observada nas últimas décadas (EASTERLING *et al.*, 1998). O aumento na concentração de CO₂ aponta alterações na produtividade das lavouras. Segundo Lima (2005), em condições experimentais controladas, o aumento na concentração de CO₂ resultou em aumento entre 20% a 30% nas taxas de fotossíntese.

Destaca-se, assim, a importância de considerar o efeito do clima, da crescente concentração de CO₂ e do avanço tecnológico nos estudos, cujo objetivo é investigar os impactos das mudanças climáticas na produtividade das culturas.

Considerando-se a importância da disponibilidade de modelos simples e transparentes, capazes de considerar os efeitos de diversos fatores na produtividade potencial e, ainda, que os resultados dos modelos mais utilizados ainda não foram comparados em condições de mudanças climáticas, principalmente em condições tropicais, este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos: calcular a produtividade potencial das culturas do feijão e do milho, para algumas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, utilizando-se os modelos de Blackman, exponencial negativa, hipérbole retangular, hipérbole não retangular e uso eficiente da radiação; comparar os resultados dos diferentes modelos entre si; e estimar a produtividade potencial e a perda de produtividade (diferença entre as produtividades potencial e a real), considerando o cenário A₂ do modelo HadCM3, o efeito da fertilização por CO₂ e do avanço tecnológico.

É importante destacar que, neste trabalho, não se objetivou definir o melhor modelo, mas indicar a diferença entre os resultados dos mesmos, permitindo, assim, uma análise mais adequada dos resultados sobre os impactos das mudanças climáticas na agricultura.

CAPÍTULO 1

MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL

1 INTRODUÇÃO

A interação entre as plantas e o ambiente envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos. Visando obter um conhecimento mais profundo sobre as respostas da cultura ao ambiente, modelos de simulação são utilizados como ferramenta de grande potencial na área de sistemas cultivados, pois possibilitam o estudo e entendimento do conjunto, estimando o desempenho da cultura em diferentes localidades e situações (TOJO SOLER, 2004).

Modelos agrometeorológicos são representações simplificadas de um sistema, podendo ser classificados em: (a) modelos empíricos – aqueles que nada mais são, senão uma simples descrição dos dados experimentais (THORNLEY, 1976); e (b) modelos baseados em processos, os quais se fundamentam em pressuposições físicas ou fisiológicas (MONTEITH, 1996).

Nos modelos baseados em processos, desenvolvidos nos últimos anos, cinco equações vêm sendo utilizadas como parte central no cálculo do balanço de carbono: Blackman, hipérbole retangular, exponencial negativa, hipérbole não retangular e o uso eficiente da radiação. No entanto, é de se esperar que, devido às pressuposições básicas consideradas em seu desenvolvimento, estas equações apresentem diferenças em seus resultados.

Desta forma, considerando a importância da disponibilidade de modelos simples e confiáveis de estimativa da produtividade potencial e, ainda, que os resultados dos modelos mais utilizados ainda não foram comparados, em condições climáticas brasileiras, os objetivos deste capítulo são: calcular e comparar a produtividade potencial das culturas do feijão e do milho, para algumas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, utilizando os modelos citados anteriormente; e avaliar a influência dos parâmetros nos modelos estudados por meio da análise de sensibilidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 As culturas

2.1.1 Feijão

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos alimentos básicos do povo brasileiro e de grande parte da população americana. Este produto constitui importante fonte de proteína (15 a 33%) e apresenta elevado valor energético (345 calorias por 100g) (TISOT, 2002).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2007), o Estado de Minas Gerais apresentou-se como o segundo maior produtor de feijão na safra 2006/2007, totalizando 519,5 mil toneladas e representando uma participação de 14,3% da produção total do País.

O Estado se apresenta como um importante referencial na produção brasileira de feijão, o que poderá ser melhorado com a adoção de mais tecnologias e estudos, que contribuam para diminuição nos riscos de quebra de produtividade como consequência de fatores climáticos adversos, principalmente o estresse hídrico, o excesso de chuva e temperaturas elevadas em fases críticas do ciclo. Neste contexto, a época certa de semeadura é uma das práticas que se destaca na obtenção de altos níveis de produtividade, em razão do aumento das chances de que as fases críticas da planta não coincidam com períodos climáticos adversos (BRASIL, 2007a).

2.1.2 Milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma das mais eficientes plantas armazenadoras de energia existentes na natureza. De uma semente pesando pouco mais de 0,3g surge uma planta, geralmente, com mais de 2,0 m de altura, em um período de tempo em torno de nove semanas (ALDRICH *et al.*, 1982). A grande eficiência na conversão de carbono mineral em compostos orgânicos deve-se ao processo fotossintético de plantas tipo C₄, em que o CO₂ é continuamente concentrado nas células da bainha

vascular das folhas e, em seguida, redistribuído para posterior utilização (TAIZ; ZEIGER, 2004).

O milho representa um dos principais cereais cultivados no mundo, fornecendo produtos amplamente utilizados na alimentação humana, animal e matérias-primas para a indústria, principalmente em função da quantidade e natureza das reservas acumuladas nos grãos (ASSIS, 2004).

Devido à sua multiplicidade de aplicações, tanto na alimentação humana quanto na alimentação animal, assume relevante papel socioeconômico, além de constituir uma indispensável matéria-prima impulsionadora de diversos complexos agroindustriais (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

O mercado internacional de milho passa por uma fase de grandes transformações, promovidas em razão da decisão dos Estados Unidos da América no sentido de produzir álcool a partir do milho. O governo americano anunciou, recentemente, a intenção de aumentar para 20% a proporção de etanol na gasolina, nos próximos dez anos, o que pode vir a representar uma demanda de 132 milhões de litros em 2017, com projeção de processo de 86,6 milhões de toneladas de milho, em 2008 (EMATER, 2007).

Na safra 2006/2007, o Estado de Minas Gerais foi o segundo maior produtor de milho do Brasil, com uma produção de 6,1 milhões de toneladas (CONAB, 2007).

Sendo uma planta de origem tropical, o milho requer, durante seu ciclo vegetativo, radiação e água para se desenvolver e produzir satisfatoriamente, proporcionando produtividades compensadoras. Independente da tecnologia aplicada, o período de tempo e as condições climáticas às quais a cultura é submetida constituem preponderantes fatores de produção (FIGUEREDO JR, 2004).

É uma cultura pouco tolerante à deficiência hídrica, principalmente nos estádios de florescimento e formação dos grãos. A disponibilidade de água para a lavoura varia, segundo a distribuição da precipitação na região, a época de semeadura, a possibilidade de irrigação e do tipo de solo. A época mais crítica da falta de água para o milho situa-se próximo ao pendoamento e espigamento (EMBRAPA, 2002).

2.2 Fotossíntese

A fotossíntese foi descoberta no final do século XVIII por Priestley e Ingenhousz e, desde então, tem sido extensivamente estudada (PENNING DE VRIES *et al.*, 1989). Ela inclui complexos processos, através dos quais a planta reduz o CO₂ em moléculas orgânicas usando a energia solar.

Três grupos de plantas são distinguidos, com base nas vias metabólicas: C₃, C₄ e CAM. Neste trabalho, foram estudados o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e o milho (*Zea mays* L.), culturas do tipo C₃ e C₄, respectivamente. Embora a natureza das diferenças entre plantas C₃ e C₄ seja pouco significativa para a proposta deste trabalho, é importante esclarecer que, nos modelos, utilizou-se a fotossíntese total que inclui a fotorrespiração, um processo intensivo em plantas C₃ e quase completamente suprimido em plantas C₄.

A conversão da energia solar em energia química de compostos orgânicos é um processo complexo, que inclui transporte de elétrons e metabolismo do carbono fotossintético. Em sua realização, participam processos fotoquímicos dirigidos pela luz, processos enzimáticos não dependentes da radiação e os processos de difusão, que são as trocas de carbono e oxigênio entre o cloroplasto e a atmosfera. Cada um destes processos é influenciado por fatores internos e externos e, conseqüentemente, podem limitar o rendimento assimilatório como um todo (LARCHER, 2006).

De forma simplificada, a reação da fotossíntese pode ser escrita da seguinte forma:



As trocas de CO₂ ocorrem sob contínua mudança dos fatores externos. Os processos fotoquímicos reagem, primeiramente, em função da disponibilidade de radiação. Por outro lado, os fatores bioquímicos são influenciados pela temperatura e pela disponibilidade de água e minerais. A entrada de CO₂ na folha através dos estômatos é limitada, sobretudo em conseqüência da diminuição no potencial hídrico do solo. O principal fator ambiental, que determina a intensidade respiratória, é a temperatura (LARCHER, 2006).

No estudo da dependência ambiental da fotossíntese, Blackman formulou, em 1905, uma hipótese segundo a qual, sob algumas condições particulares, a taxa de fotossíntese é limitada pela etapa mais lenta, o chamado fator limitante. Isto implica

que, em determinado tempo, a fotossíntese pode ser limitada pela luz ou pela concentração de CO₂, mas não por ambos os fatores (TAIZ; ZEIGER, 2004).

De acordo com Blackman (1905), citado por Larcher (2006), sob a influência dos fatores climáticos e edáficos, resultam dois padrões de absorção de CO₂, conforme apresentado a seguir:

1° - Curvas de saturação – são características para as respostas aos fatores ambientais que, com o aumento da disponibilidade, promovem a fotossíntese até um limiar em que mais nenhum aumento considerável é realizado e, acima deste ponto, uma alta dose não causa efeito prejudicial imediato. O exemplo-padrão deste tipo de comportamento são as curvas de saturação da fotossíntese, em função de um aumento no suprimento de CO₂ ou da radiação. A fase de saturação pode ser reconhecida, quando o fator externo varia, mas não tem a capacidade de limitar sozinho a velocidade dos processos de assimilação.

2° - Curvas de região ótima – expressam a sensibilidade em relação a uma sub ou supradose de um fator externo. A fotossíntese reage muito caracteristicamente a diferentes temperaturas, formando uma curva de região ótima.

O cálculo da taxa de fotossíntese é uma parte essencial nos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas. Entretanto, processos bioquímicos e físicos envolvidos na fotossíntese são complexos, sendo necessárias numerosas simplificações. O procedimento usual nas simulações das taxas fotossintéticas é a seleção de uma equação, que descreva a resposta da fotossíntese da folha à radiação para, então, integrá-la no dossel e no tempo. Existem algumas funções empíricas ou semi-empíricas, que descrevem a resposta da fotossíntese foliar à luz, ou seja, a curva de Blackman, a hipérbole retangular, a exponencial negativa e a hipérbole não retangular (CHAN, 1992).

Por terem como resultado a taxa de fotossíntese bruta, isto é, taxa de assimilação acrescida da respiração, essas curvas são definidas por parâmetros similares e comuns, que descrevem dois aspectos – a inclinação inicial e a taxa de saturação da fotossíntese, tendo seu início na origem.

A inclinação inicial caracteriza os processos biofísicos, enquanto a taxa de saturação reflete processos bioquímicos e condições fisiológicas. Tanto a inclinação inicial quanto a taxa de saturação dependem fortemente das características da cultura e condições ambientais. Os valores de tais parâmetros podem ser obtidos na literatura disponível ou dados de experimento (PENNING DE VRIES *et al.*, 1989).

A curva de Blackman propõe uma resposta inicial linear à radiação (região limitada pela intensidade da luz). Posteriormente, o suprimento disponível de CO₂ não permite aumentos na taxa fotossintética com aumentos na radiação (região limitada pela concentração de CO₂), ocorrendo, portanto, uma descontinuidade acentuada entre as regiões limitada pela luz e pelo CO₂, fazendo com que a transição para a saturação seja abrupta. Na exponencial negativa, a resposta à luz tem um declive inicial mais acentuado e a transição para a saturação ocorre de forma mais gradual, em comparação com as outras curvas. A hipérbole retangular não apresenta descontinuidade, mas alcança a saturação muito lentamente. Na hipérbole não-retangular, há outro parâmetro conhecido como parâmetro de forma, que varia entre 0 e 1. Este parâmetro é definido como a razão da resistência de difusão de CO₂ pela resistência total (THORNLEY; JOHNSON, 1990).

2.3 Respiração

O termo respiração tem sido empregado como a perda de CO₂ ou de matéria seca pela planta. No entanto, a respiração é o processo pelo qual, compostos altamente energéticos são sintetizados, a partir dos carboidratos produzidos na fotossíntese. Assim, a respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção (MCCREE, 1974).

A respiração de manutenção é usada para manter a estrutura da planta. A energia de manutenção difere entre os diferentes componentes da planta, sendo controlada pela temperatura ambiente e pela senescência da planta. Geralmente, é calculada em função da matéria seca total acumulada pela planta e temperatura média do ar.

A respiração de crescimento, energia necessária para constituir o material estrutural, depende da composição química (carboidratos, proteínas, lipídeos, lignina, ácidos orgânicos e minerais) e da energia necessária, para transformar os diferentes elementos químicos nos diferentes órgãos da planta (folha, colmo, grãos e raízes) (PENNING de VRIES *et al.*, 1989).

2.4 Uso eficiente da radiação

A razão entre a produção de fitomassa e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada é denominada como uso eficiente da radiação (MONTEITH, 1977). Vários estudos confirmaram que a biomassa das culturas é, efetivamente, proporcional à quantidade de radiação interceptada pelo dossel (GALLAGHER; BISCOE, 1978; STEVEN *et al.*, 1983; PRINCE, 1991).

O uso eficiente da radiação depende da taxa de assimilação de CO₂ pelas folhas. A influência da assimilação de CO₂ no uso eficiente da radiação é resultado da ligação entre a taxa de assimilação de CO₂ e o conteúdo de nitrogênio foliar (ROMANO, 2005).

A absorção da radiação incidente pelas culturas depende de seu índice de área foliar (IAF), posição solar, geometria e tamanho da folha, ângulo de distribuição, idade, arranjo das plantas, época do ano, nebulosidade, espécie cultivada, bem como das condições meteorológicas e de práticas de manejo da cultura (RADIN *et al.*, 2003). Consequentemente, pode-se dizer que o uso eficiente da radiação varia em resposta às condições ambientais e apresenta uma grande consistência fisiológica (ARKEBAUER *et al.*, 1992).

2.5 Modelagem na agricultura

A interação entre as plantas e o ambiente envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos. Para obter melhor conhecimento das respostas da cultura ao ambiente, modelos de simulação são utilizados como ferramenta de grande potencial na área de sistemas cultivados, possibilitando o estudo e entendimento do conjunto, estimando a performance da cultura em diferentes áreas e situações (TOJO SOLER, 2004).

Um modelo é apenas uma tentativa, para representar um sistema ou subsistema do mundo real. Tal representação é caracterizada pelos termos sistema, modelo e simulação. Por sistema, entende-se que é uma parte limitada da realidade, que contém elementos inter-relacionados. Modelo é a representação simplificada de um sistema. Simulação é a arte de construir modelos matemáticos e o estudo de suas propriedades com relação às do sistema (DE WIT, 1982).

Segundo Ferreira (1997), uma grande vantagem no uso de modelos agrometeorológicos consiste em auxiliar as tomadas de decisão quanto à escolha da melhor data de plantio, melhor planejamento do uso do solo, adaptação de culturas, monitoramento e previsão de safras, controle de pragas e doenças, estratégia de pesquisa e planejamento.

Devido à expansão mundial do desenvolvimento e utilização dos modelos, tornou-se necessária a classificação dos mesmos. Na literatura científica mundial, observa-se uma ampla aceitação de uma primeira classificação dos modelos em duas categorias principais: modelos empíricos e modelos baseados em processos (COSTA, 1997).

Modelos empíricos são aqueles, que se baseiam simplesmente na interação quantitativa entre os elementos considerados no mesmo. Nesses modelos, as análises dos resultados não se baseiam na explicação dos fenômenos envolvidos, mas na relação entre os elementos. Normalmente, tais modelos fundamentam-se em relações, derivadas a partir de análise de regressões e, geralmente, necessitam de grande número de dados para seu desenvolvimento (COSTA, 1997).

Modelos baseados em processos são aqueles cuja estrutura é baseada na descrição do processo, que ocorre no sistema real considerado, ou seja, existe a tentativa de considerar os princípios físicos e biológicos que ocorrem no sistema. Na utilização desses modelos, procura-se entender o que ocorre no nível i , baseado nos processos que ocorrem no nível $i-1$ (COSTA, 1997).

Modelos de crescimento têm sido crescentemente usados na agricultura, para estimativa da produtividade potencial, tomada de decisão e pesquisa. Esses modelos simulam o aumento diário do crescimento das culturas por meio de vários processos como, a fotossíntese, partição de matéria seca, além da transpiração baseada no balanço de água no solo e nas condições de manejo. Cada um dos processos fisiológicos é caracterizado por certos parâmetros, que dependem da cultura e variedade específica. Os modelos também requerem dados das propriedades físicas do solo e fatores climáticos (AGGARWAL, 1995).

Considerando que modelos são simplificações da realidade, sempre há diferenças entre o sistema real e os modelos. Tais diferenças podem ser verificadas por meio do teste do modelo, que consiste na comparação dos resultados obtidos com o modelo e os dados observados no sistema real em uma situação semelhante. Para isso, são necessários que os dados observados sejam satisfatórios. Os dados são bons,

se forem coletados com precisão e cobrirem uma ampla gama de condições ambientais. Normalmente, esses dados não estão disponíveis (CHAN, 1992).

Conseqüentemente, a validade do modelo nunca pode ser verificada, convincentemente. Sendo o modelo uma representação da realidade, mais cedo ou tarde, será verificado se ele é ou não adequado. Assim, modelos de crescimento e desenvolvimento tornam-se um exercício interminável, pois os parâmetros e a estrutura do mesmo podem ser modificados e ajustados, continuamente, para acomodar novos resultados (CHAN, 1992).

De acordo com Hoogenboom (2000), os esforços despendidos na construção de modelos, devido a sua complexidade, justificam-se pelas seguintes razões: (i) são ferramentas importantes para sumarizar o conhecimento científico; (ii) auxiliam o agricultor na tomada de decisão quanto ao manejo; (iii) subsidiam governos na elaboração de políticas de planejamento agrícola; (iv) representam um grande potencial didático no desenvolvimento de modelos; e (v) facilitam a orientação de pesquisas e a racionalização do uso de experimentos convencionais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e dados utilizados

O Estado de Minas Gerais representa 6,9% da área total do Brasil, com limites extremos entre os paralelos 14° 13' 57'' e 22° 55' 47'' S e os meridianos de 39° 51' 27'' e 51° 02' 56'' W, estando, portanto, localizado na zona intertropical e sujeito a grande diversidade climática. Para a análise espacial dos resultados, foi considerada a divisão do Estado de Minas Gerais em doze mesorregiões geográficas. Para o presente estudo, foram utilizados dados meteorológicos diários de temperaturas do ar: máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) e média (T_{med}) e insolação (n), obtidos de 19 estações meteorológicas do 5º Distrito de Meteorologia, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), conforme Tabela 1.

Na Figura 1, pode-se identificar as mesorregiões, bem como as estações meteorológicas utilizadas.

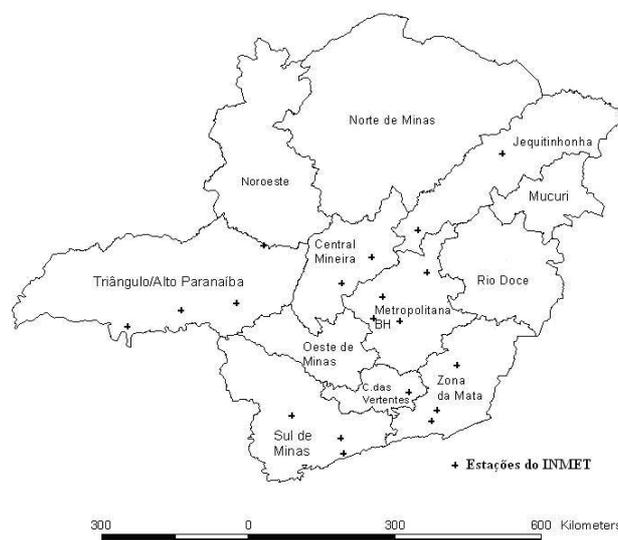


Figura 1 – Mapa do Estado de Minas Gerais com a localização das estações meteorológicas e mesorregiões estudadas.

Tabela 1 – Identificação das estações meteorológicas do INMET utilizadas

Nº da Estação	Estação	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
83037	Coronel Pacheco	-43,25	-21,58	435
83442	Araçuaí	-42,05	-16,83	289
83531	Patos de Minas	-46,43	-18,52	940
83536	Curvelo	-44,45	-18,75	672
83538	Diamantina	-43,60	-18,25	1296
83570	Pompeu	-45,00	-19,22	691
83574	Frutal	-48,93	-20,03	544
83577	Uberaba	-47,95	-19,73	737
83579	Araxá	-46,93	-19,60	1024
83581	Florestal	-44,42	-19,87	749
83586	Sete Lagoas	-44,25	-19,47	732
83587	Belo Horizonte	-43,93	-19,93	915
83589	Conceição do Mato Dentro	-43,43	-19,02	652
83683	Machado	-45,92	-21,67	873
83689	Barbacena	-43,77	-21,25	1126
83692	Juiz de Fora	-43,35	-21,77	940
83736	São Lourenço	-45,02	-22,10	953
83737	Passa Quatro	-44,97	-22,38	920
83642	Viçosa	-42,88	-20,75	672

Para as simulações da cultura do feijão, foram utilizados dados do cultivar Pérola, grupo comercial carioca que apresenta ciclo de 90 dias, aproximadamente. Para as simulações da cultura do milho, foram usados dados do cultivar AGN 2012 (Híbrido duplo), que apresenta ciclo de 116 dias, aproximadamente. A data de plantio foi 15 de outubro, para todas as simulações.

3.2 Desenvolvimento do modelo

Foi desenvolvido um modelo modular, utilizando-se o software *Model Maker 3.0* ®CSPL (*Cherwell Scientific Publishing Limited*). Tal modelo simulou a produção de matéria seca diária, determinada pela intensidade de radiação e

temperatura média. O modelo consistiu dos seguintes módulos: (a) climático; (b) radiação; (c) balanço de carbono; e (d) desenvolvimento e partição de matéria seca.

A assimilação de carbono foi calculada, utilizando-se cinco diferentes métodos. Nos quatro primeiros, a diferença consistiu nas curvas de resposta à radiação, cujos parâmetros foram a taxa de fotossíntese máxima e a eficiência fotossintética. No quinto método, o acúmulo de matéria seca das culturas foi calculado por meio do uso eficiente da radiação, proposto por Monteith (1977). O processo fisiológico foi caracterizado, baseando-se em dois parâmetros específicos para cada variedade: tempo térmico para o florescimento e para a maturação. O total assimilado foi alocado às diferentes partes da planta, dependendo da fase de desenvolvimento. A estimativa do rendimento de grãos baseou-se na percentagem de matéria seca alocada para os órgãos reprodutivos em função da fase fenológica. A simulação foi concluída, quando a cultura atingiu a maturidade fisiológica. Na Figura 2, apresenta-se o fluxograma da estrutura básica do modelo desenvolvido.

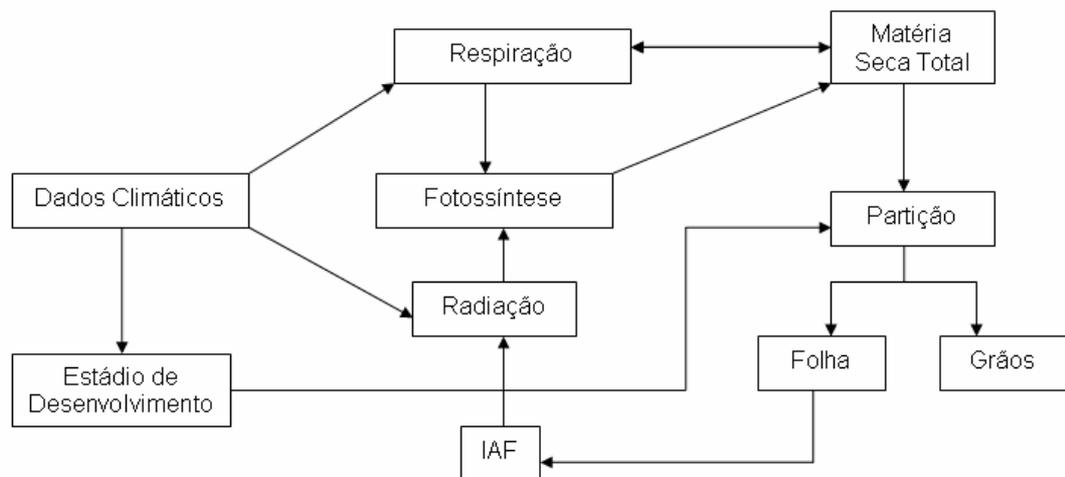


Figura 2 – Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo.

3.2.1 Módulo climático

Este módulo constou de dados meteorológicos em base diária. Foram utilizadas as variáveis: temperatura do ar (°C) máxima, mínima e média e insolação (horas).

3.2.2 Módulo radiação

As estações meteorológicas geralmente fornecem, apenas, os dados de insolação. Assim, a radiação solar global (R_s) foi estimada, empregando-se a equação proposta por Angström e modificada por Prescott (VIANELLO; ALVES, 1991).

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

em que

R_s = radiação solar ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

$a_s = 0,29 \cdot \cos \varphi$ (coeficiente empírico que depende da latitude do local);

$b_s = 0,52$ (coeficiente empírico);

n/N =razão de insolação; e

R_a = radiação extraterrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$).

A radiação fotossinteticamente ativa no topo da cultura (RFA) foi obtida de acordo com Penning de Vries *et al.* (1989).

$$RFA = 0,5 \times R_s \quad (2)$$

em que

RFA = radiação fotossinteticamente ativa no topo da cultura ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$).

A radiação interceptada pela cultura (I) foi estimada por meio do modelo, proposto por Monsi e Saeki (1953).

$$I = RFA \left(1 - \exp^{-kIAF} \right) \quad (3)$$

em que

I = RFA interceptada pela cultura ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

k = coeficiente de extinção do dossel; e

IAF = índice de área foliar ($\text{m}^2_{\text{folha}} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{solo}}$).

3.2.3 Módulo balanço de carbono

O acúmulo de biomassa da cultura foi calculado, diariamente, baseando-se na taxa de fotossíntese bruta do dossel e nas taxas de respiração de manutenção e de crescimento, exceto para o método do uso eficiente da radiação, cujas taxas de respiração são consideradas em seu parâmetro.

1º Método – Neste método, a taxa de fotossíntese bruta foi estimada por meio da curva exponencial negativa.

$$F_g = F_{g \max} \left(1 - \exp \left(- \frac{\varepsilon I}{F_{g \max}} \right) \right) \quad (4)$$

em que

$F_{g \max}$ = taxa máxima de fotossíntese da cultura ($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

ε = eficiência fotossintética ($\text{gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$); e

F_g = taxa de fotossíntese bruta ($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$).

2º Método – Neste método, a curva utilizada para estimar a fotossíntese diária bruta foi a hipérbole retangular.

$$F_g = F_{g \max} \left(\frac{\varepsilon I}{F_{g \max}} \right) / \left(1 + \left(\frac{\varepsilon I}{F_{g \max}} \right) \right) \quad (5)$$

3º Método – Empregou-se a equação apresentada por Blackman em 1905, citada por Kho (2000). Tal equação consiste em duas linhas retas que se interceptam no ponto “ $\varepsilon \times I = F_{g \max}$ ”.

$$F_g = F_{g \max} \min \left\{ \frac{\varepsilon I}{F_{g \max}}, 1 \right\} \quad (6)$$

4º Método – Neste método, a curva foi a hipérbole não retangular.

$$F_g = F_{g \max} \left(1 + \left(\frac{\varepsilon I}{F_{g \max}} \right) - \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon I}{F_{g \max}} \right) \right)^2 - 4 \left(\frac{\varepsilon I}{F_{g \max}} \right) \theta} / 2\theta \right) \quad (7)$$

em que

θ = parâmetro de forma (0 - 1).

A taxa de fotossíntese máxima ($F_{g \max}$), normalmente, é determinada em laboratório para cada cultura, sob temperatura e intensidade de radiação controladas. De acordo com Goudriaan (1977), o efeito da temperatura na fotossíntese máxima foi calculado como:

$$F_{g \max} = F_{g \max tr} \left[(T_{med} - T_b) / (T_r - T_b) \right] \quad (8)$$

em que

F_{gmaxtr} = taxa de fotossíntese máxima a temperatura de referência

($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

T_{med} = temperatura média ($^{\circ}\text{C}$);

T_b = temperatura base ($^{\circ}\text{C}$); e

T_r = temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$).

A respiração de manutenção (R_M), que constitui o consumo de energia necessário à organização estrutural da planta, foi introduzida no modelo, segundo McCree (1974), como função tanto do peso seco acumulado da cultura (MS) quanto da variação de temperatura.

$$R_M = r_m \times MS \times Q_{10}^{(T_{med}-T_b)/10} \quad (9)$$

em que

r_m = coeficiente da respiração de manutenção ($\text{gCO}_2 \cdot \text{gMS}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$);

R_M = respiração de manutenção ($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$); e

Q_{10} = fator de incremento da manutenção.

Semelhante à taxa de fotossíntese máxima (F_{gmax}), o coeficiente de respiração de manutenção pode ser obtido em laboratório e para uma temperatura de referência, previamente, fixada. Nos modelos, o valor do coeficiente de respiração de manutenção, obtido para uma temperatura de referência, foi corrigido em relação à temperatura média do ar.

$$r_m = r_{mtr} ((T_{med} - T_b) / (T_r - T_b)) \quad (10)$$

em que

r_{mtr} = coeficiente da respiração de manutenção a temperatura de referência ($\text{gCO}_2 \cdot \text{gMS}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$).

A respiração de crescimento é tratada, nos modelos, como a energia necessária para síntese de compostos (ligninas, proteínas, ácidos orgânicos, carboidratos, etc.) para a formação de diversas partes da planta, como folhas, colmo, grãos e raízes (PENNING DE VRIES *et al.*, 1989). Dessa forma, a eficiência de conversão em matéria seca é determinada em laboratório.

Para cada parte estrutural da planta, foi atribuído um valor de eficiência de conversão de carboidrato (r_c).

O balanço diário de carbono foi definido como a matéria seca resultante da diferença entre a assimilação e a respiração de manutenção diária da cultura. Em seguida, o ganho de carbono simulado foi convertido em matéria seca através da respiração de crescimento, denotada, anteriormente, como eficiência de conversão (r_c).

Portanto, o acúmulo da matéria seca, ao longo do tempo, foi estimado conforme Penning de Vries (1975).

$$\frac{dMS}{dt} = (F_g - R_m MS)r_c \quad (11)$$

em que

r_c =eficiência de conversão de carboidrato ($\text{gCO}_2 \cdot \text{gMS}^{-1}$).

5° Método – Neste método, o acúmulo de matéria seca das culturas foi calculado por meio do uso eficiente da radiação, proposto por Monteith (1977). Este método permite estimar a produtividade de uma cultura, considerando-se um único parâmetro: o uso eficiente da radiação. O modelo baseia-se na existência de uma relação linear entre o acúmulo de matéria seca total e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura.

$$\frac{dMS}{dt} = UER \times I \quad (12)$$

em que

MS = quantidade de matéria seca produzida pelas plantas ($\text{gMS} \cdot \text{m}^{-2}$); e

UER = eficiência de conversão de I em matéria seca ($\text{gMS} \cdot \text{MJ}^{-1}$).

3.2.4 Módulo desenvolvimento e partição da matéria seca

O desenvolvimento da cultura foi considerado por meio da soma térmica em um contador (ED), com uma escala variando de 0 a 2. O valor 0 foi atribuído à emergência, 1 ao florescimento e 2 quando a cultura atingiu a maturidade fisiológica.

Até o florescimento, o contador trabalhou da seguinte forma:

$$ED = \frac{GD}{GDF} \quad (13)$$

em que

ED = estágio de desenvolvimento (0-2);

GD = graus-dias acumulado ($^{\circ}\text{C}$); e

GDF = graus-dias para o florescimento ($^{\circ}\text{C}$).

Após o florescimento o contador trabalhou da seguinte forma:

$$ED = \frac{1 + (GD - GDF)}{(GDT - GDF)} \quad (14)$$

em que

GDT = graus-dias total ($^{\circ}\text{C}$).

Os graus-dias foram calculados, como:

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_{med} - T_b) \quad (15)$$

Quando o contador atingiu o valor 2, a simulação foi concluída.

À medida que se acumularam os totais de graus-dias, requeridos pela cultura para ocorrência dos eventos fenológicos, o módulo referente à partição de assimilados distribuiu a assimilação diária entre os órgãos da planta.

As áreas foliares das culturas foram acumuladas, durante o crescimento das mesmas, totalizando o IAF, considerando-se a área foliar específica (AFE) e a partição de matéria seca para as folhas (PF), que variou ao longo do estágio de desenvolvimento da planta.

$$IAF = AFE \times PF \quad (16)$$

em que

AFE = área foliar específica ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$); e

PF = partição da matéria seca para as folhas ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$).

3.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros e variáveis climáticas

A influência dos parâmetros sobre a simulação final da produtividade dos grãos foi verificada, por meio da análise de sensibilidade dos mesmos. Os valores, obtidos na literatura e utilizados nos modelos, foram acrescidos e reduzidos em 10 e 20% individualmente, enquanto os demais parâmetros foram mantidos inalterados.

As estimativas de produtividade dos grãos, obtidas nas simulações realizadas, com cada um dos valores atribuídos aos parâmetros, foram comparadas às estimativas geradas na simulação, realizada com os parâmetros originais. Desta forma, foi possível avaliar a influência desses parâmetros nas estimativas de produtividade dos grãos, geradas pelos modelos. De maneira similar, testou-se a sensibilidade dos modelos às variáveis climáticas: temperatura média do ar e radiação solar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produtividade potencial

As estimativas da produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas pelos diferentes modelos, para cada mesorregião estudada, são apresentadas nas figuras 3 a 9, para fins de comparação. Também foram plotados o potencial produtivo para o cultivar Pérola, de acordo com Embrapa (2007) e Ministério da Agricultura (BRASIL, 2007b). Nas figuras 10 a 16, são representadas as estimativas da produtividade potencial para a cultura do milho. Foram plotados também o potencial produtivo para o cultivar AGN 2012, de acordo com Ministério da Agricultura (BRASIL, 2007c) e experimento realizado na UFV por Wolschick (2004). Todas as figuras referem-se ao período de 1976 a 2004.

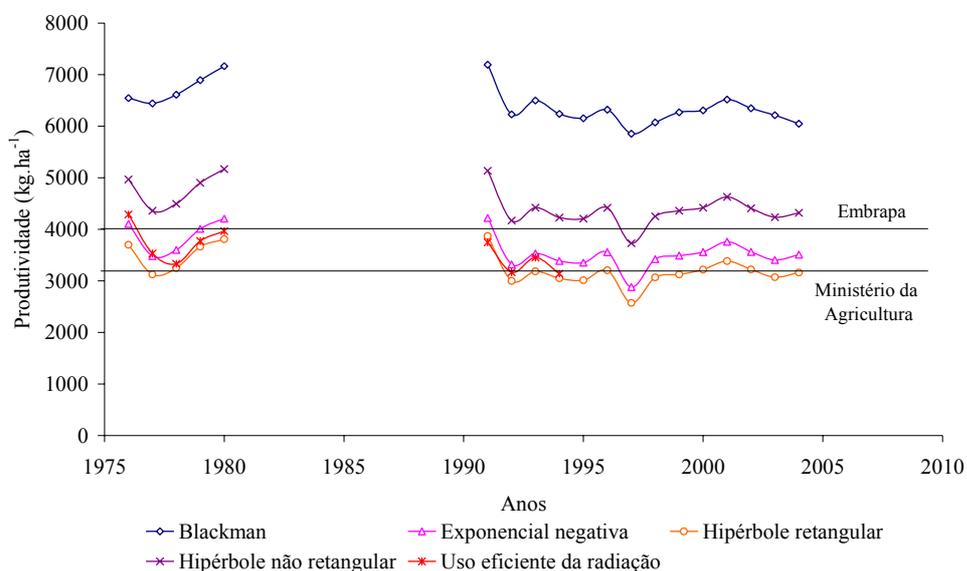


Figura 3 – Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Vale do Jequitinhonha, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

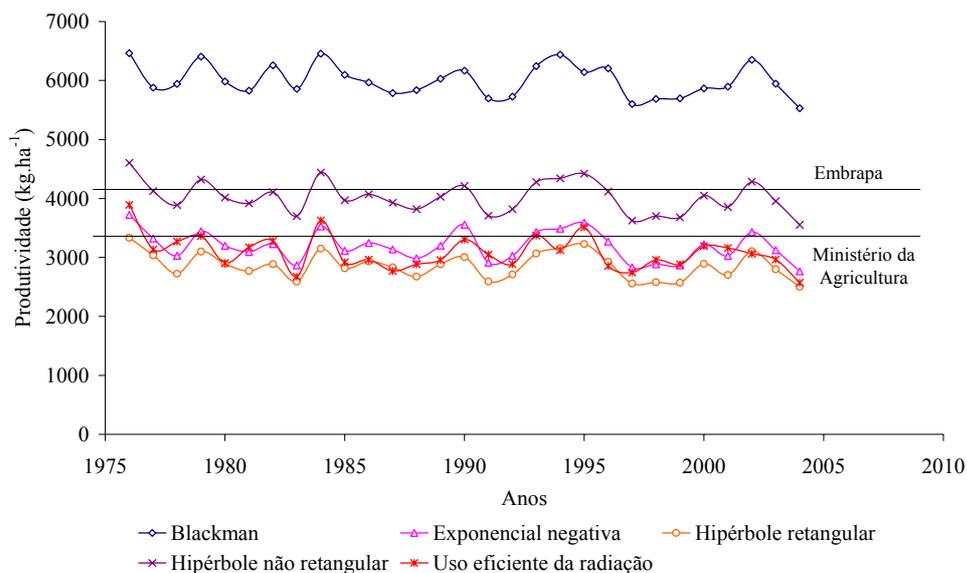


Figura 4 – Produtividade potencial média do feijão (kg.ha^{-1}), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Zona da Mata, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

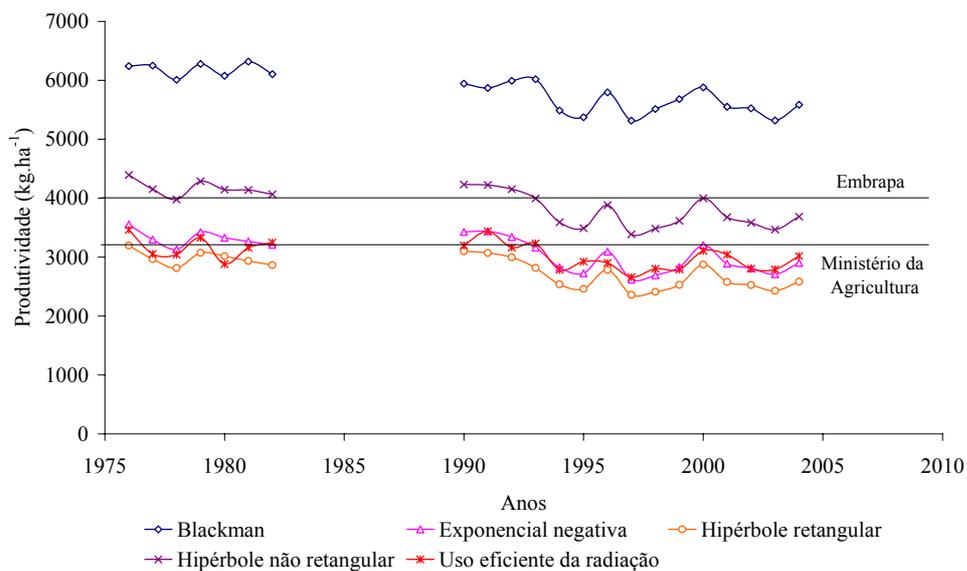


Figura 5 – Produtividade potencial média do feijão (kg.ha^{-1}), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

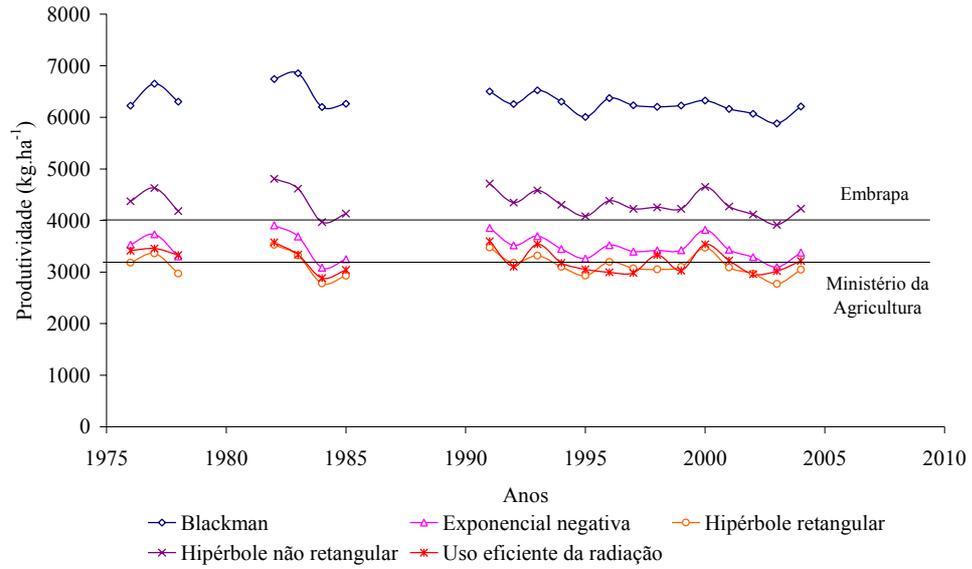


Figura 6 – Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Sul/Sudoeste, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

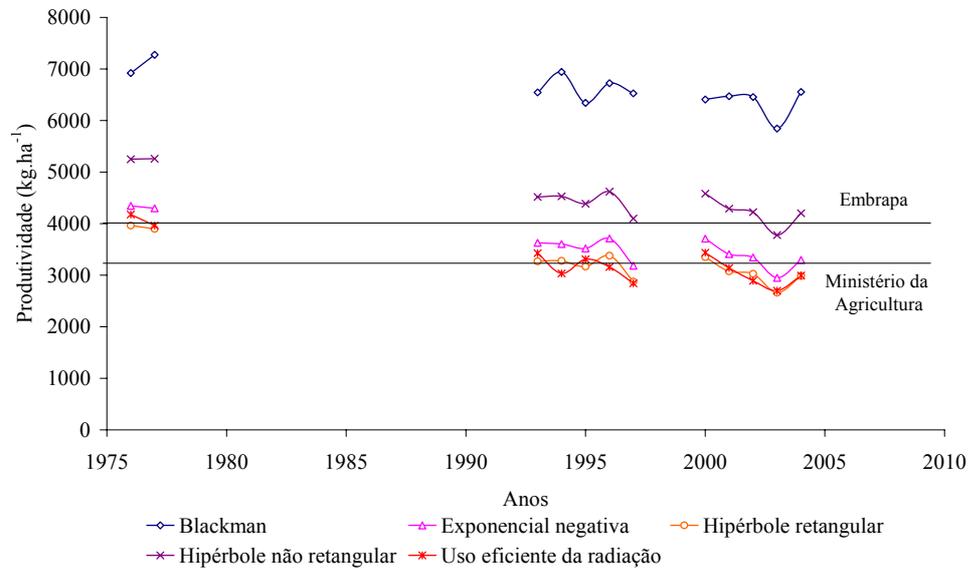


Figura 7 – Produtividade potencial média do feijão ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Campos das Vertentes, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

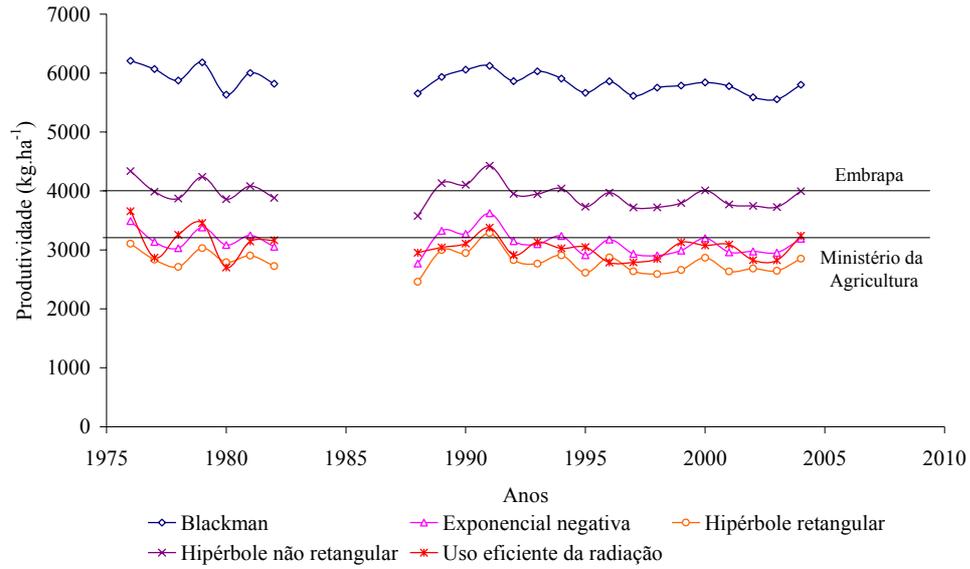


Figura 8 – Produtividade potencial média do feijão (kg.ha^{-1}), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Metropolitana, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

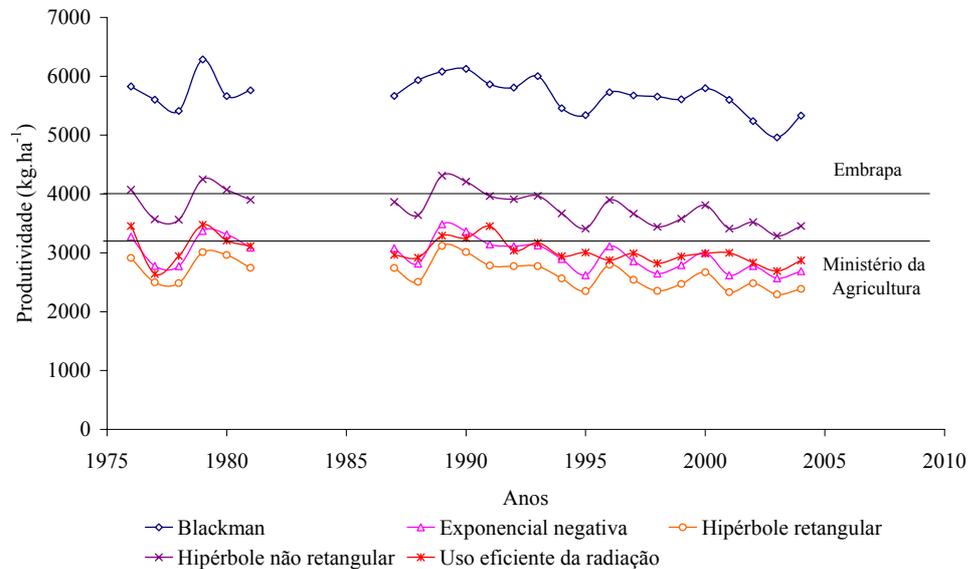


Figura 9 – Produtividade potencial média do feijão (kg.ha^{-1}), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Central Mineira, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com Embrapa e Ministério da Agricultura.

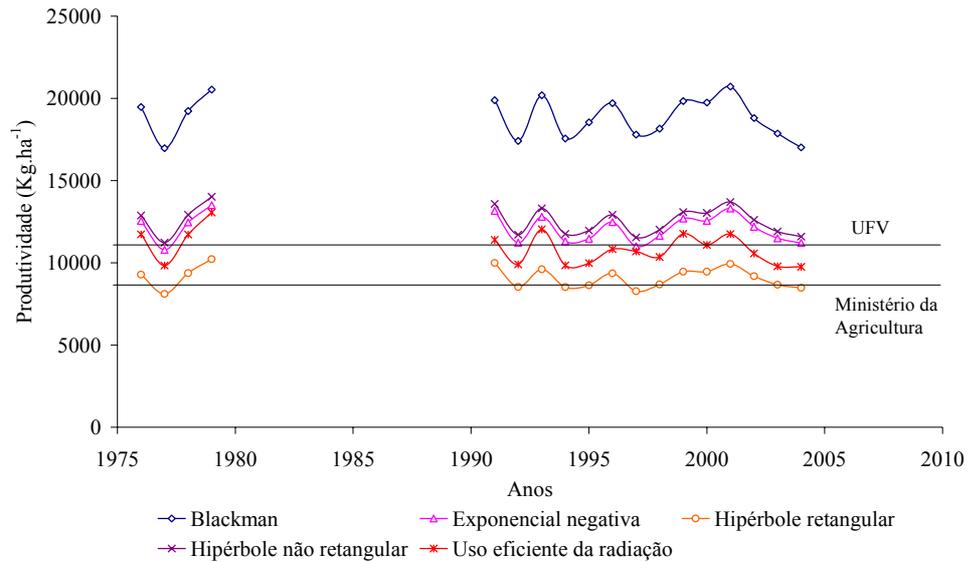


Figura 10 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Vale do Jequitinhonha, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

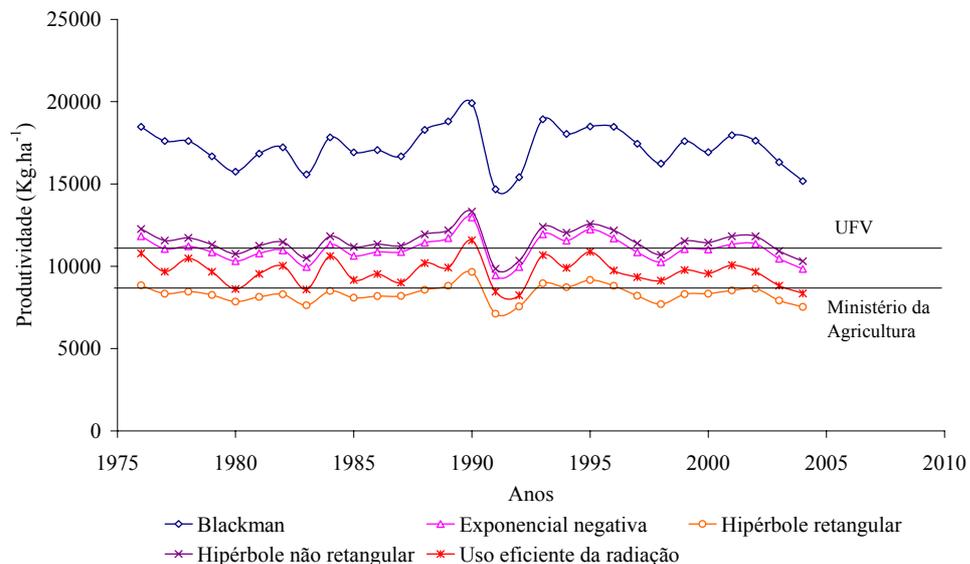


Figura 11 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Zona da Mata, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

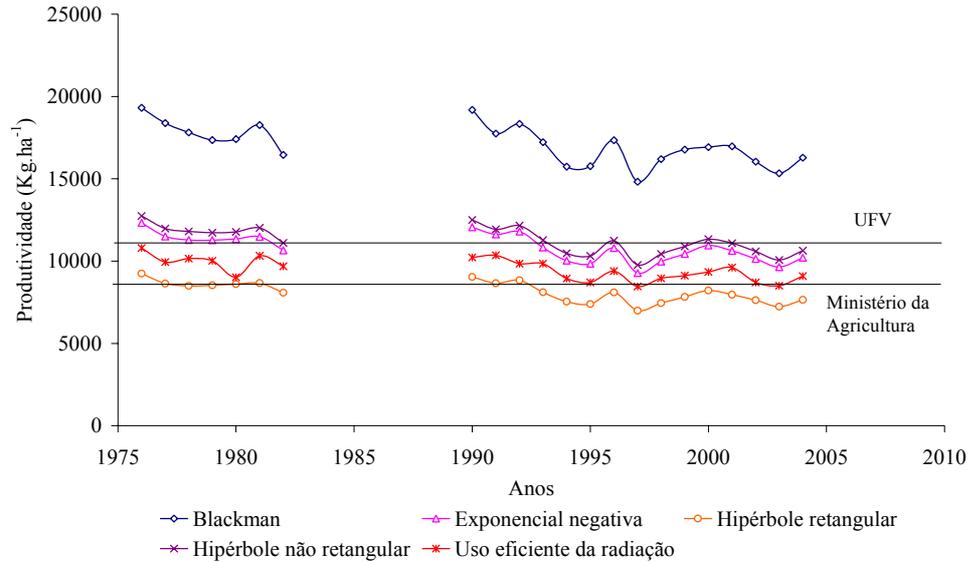


Figura 12 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Triângulo/Alto Paranaíba, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

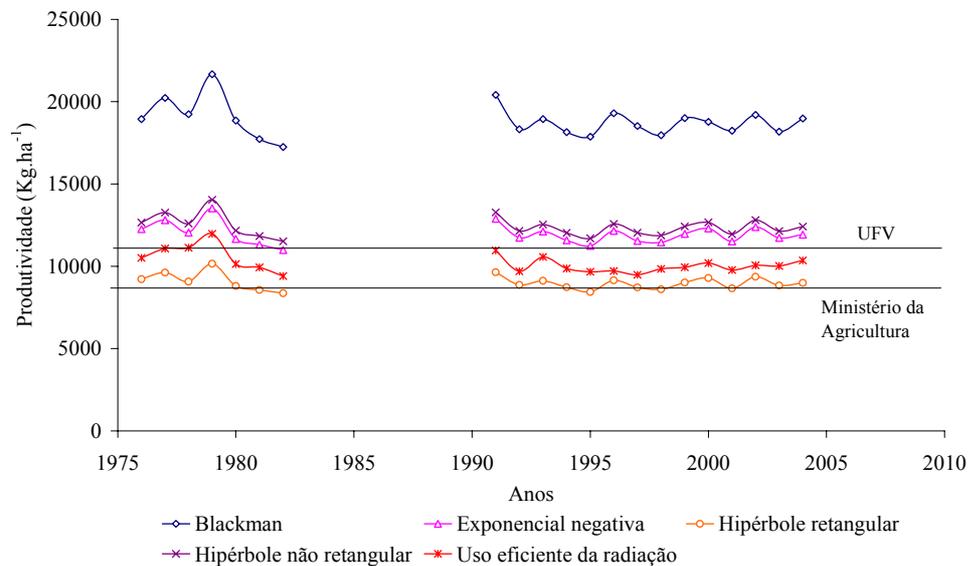


Figura 13 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Sul/Sudoeste, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

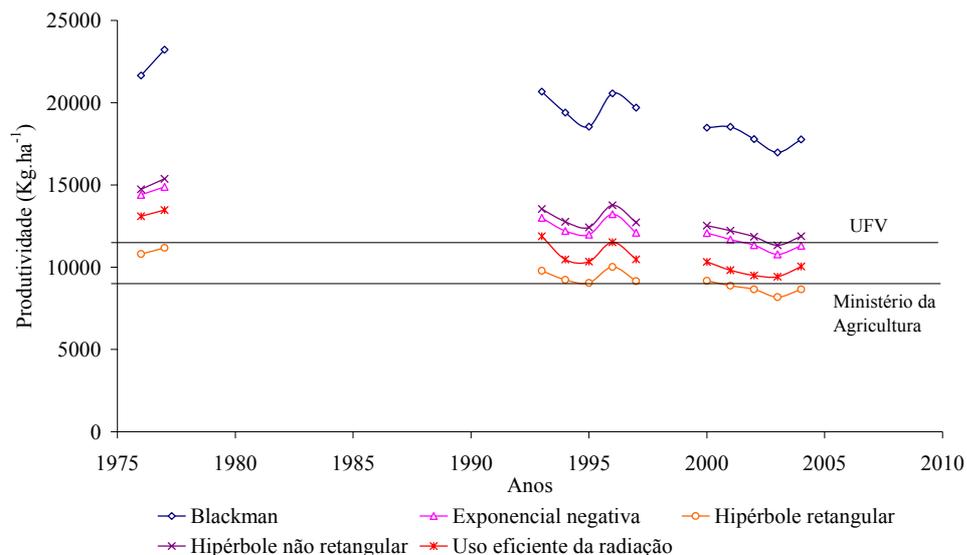


Figura 14 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Campos das Vertentes, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

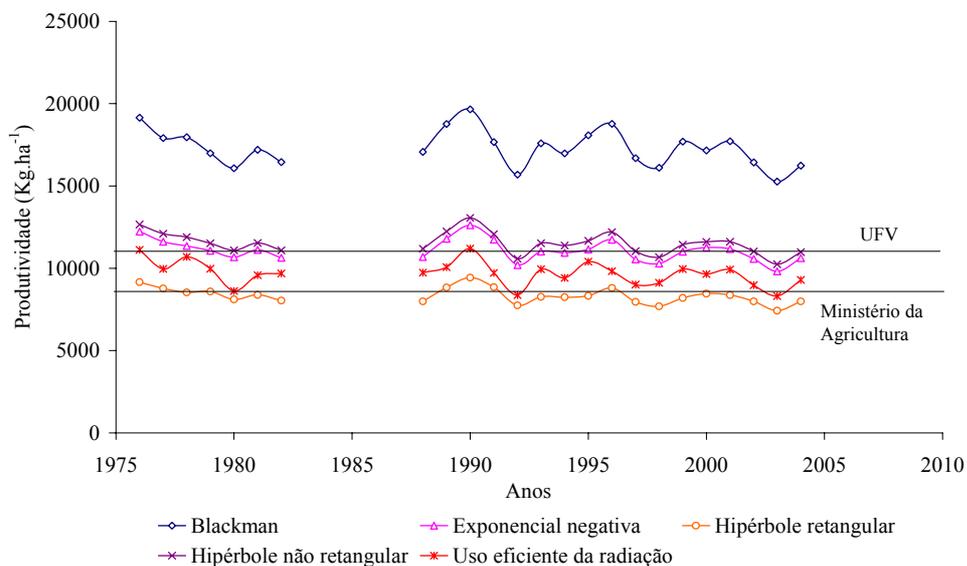


Figura 15 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Metropolitana, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

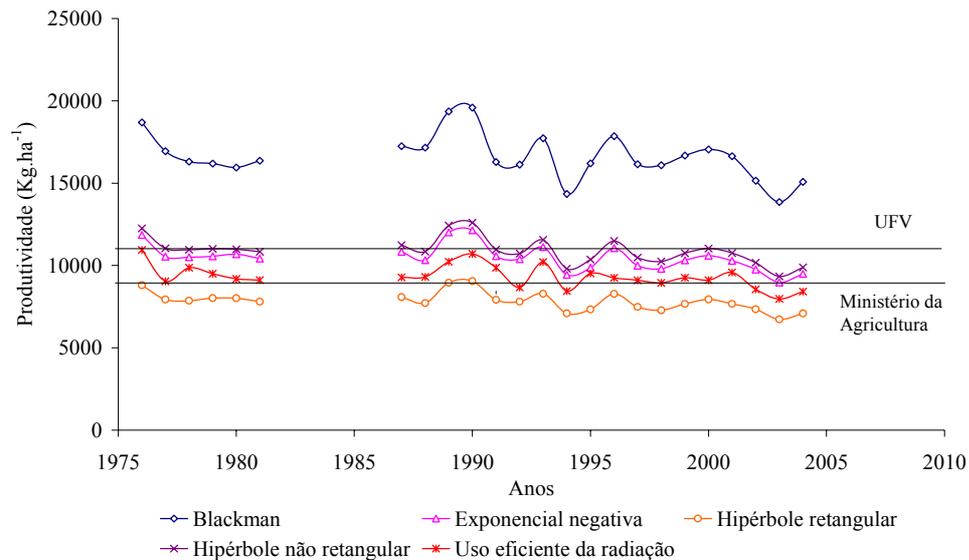


Figura 16 – Produtividade potencial média do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), simulada pelos cinco modelos para a mesorregião Central Mineira, com plantio em 15 de outubro e o potencial produtivo de acordo com UFV e Ministério da Agricultura.

Nas figuras 3 a 16, observa-se a variabilidade anual na produtividade potencial estimada, influenciada pelas diferentes condições climáticas ocorridas a cada ano. Vale ressaltar que as cinco metodologias apresentaram respostas similares às condições climáticas, experimentadas para as duas culturas em todas as mesorregiões do Estado. Tal comportamento já era esperado, pois, as simulações do crescimento e desenvolvimento das culturas em todos os modelos foram realizadas, utilizando-se os mesmos dados climáticos.

Quanto à variabilidade anual da produtividade, destaca-se o ano de 1997, na mesorregião Vale do Jequitinhonha (Figura 3), para a cultura do feijão. Para esse ano, o ciclo da cultura foi de 85 dias, apresentando, portanto, a menor produtividade em todos os modelos para esta mesorregião. Resultado similar foi observado na mesorregião Zona da Mata (Figura 11), em 1991 e 1992, anos em que foram observados os menores valores de produtividade potencial por todos os modelos, para a cultura do milho nesta mesorregião, conseqüência também da diminuição do ciclo da cultura os quais foram, respectivamente, de 108 dias e 112 dias. Na mesorregião Vale do Jequitinhonha (Figura 10), a menor produtividade para todos os modelos foi observada em 1977 e a maior em 2001, para a cultura do milho nesta mesorregião, sendo que os ciclos para os respectivos anos foram 130 dias e 118 dias. Como o ciclo referente ao ano de 1977 foi muito superior ao padrão (116 dias),

houve muita perda devido à respiração de manutenção, totalizando 53% da fotossíntese bruta, enquanto no ano de 2001 essa perda foi de 50%.

Os resultados mostraram que as diferenças na produtividade potencial, estimadas por meio das cinco equações, foram amplas. Para as duas culturas, as estimativas da produtividade potencial pela curva de Blackman foram as mais altas, seguindo-se a hipérbole não retangular, exponencial negativa e uso eficiente da radiação, sendo que as menores foram apresentadas pela hipérbole retangular.

Usando a produtividade potencial média, obtida pela hipérbole não retangular, como base para comparação, as magnitudes das diferenças em termos percentuais foram da ordem de 47%, -20%, -28% e -23% para a cultura do feijão e de 51%, -4%, -28% e -16% para a cultura do milho, para o modelo de Blackman, exponencial negativa, hipérbole retangular e uso eficiente da radiação, respectivamente.

Nas simulações da produtividade potencial, notam-se diferenças nos valores das mesmas (Tabelas 2 e 3) devido, provavelmente, às diferentes condições climáticas de cada mesorregião. Para a cultura do feijão, a mesorregião Vale do Jequitinhonha apresentou os maiores valores de produtividade potencial média, para todos os modelos e a mesorregião Central Mineira os menores.

Para a cultura do milho, os maiores valores de produtividade potencial média para todos os modelos foram observados na mesorregião Campos das Vertentes e os menores na mesorregião Central Mineira. Tais diferenças foram causadas, principalmente, pelas diferenças na temperatura do ar, pois, quando mais altas têm, como consequência, menor assimilação de carbono pela planta, decorrente do encurtamento das fases fenológicas e aumento na taxa de respiração de manutenção.

Tabela 2 – Produtividade potencial média do feijão para cada mesorregião, pelos diferentes modelos em kg.ha⁻¹

Mesorregiões	Blackman	Exponencial negativa	Hipérbole retangular	Hipérbole não retangular	Uso eficiente da radiação
Zona da Mata	6000	3190	2862	4019	3084
Vale do Jequitinhonha	6416	3597	3246	4464	3475
Triângulo/Alto Paranaíba	5824	3084	2768	3891	3037
Sul/Sudoeste	6310	3476	3134	4331	3214
Campos das Vertentes	6160	3406	3083	4240	3127
Metropolitana	5859	3129	2806	3944	3061
Central Mineira	5683	2970	2648	3768	3036

Tabela 3 – Produtividade potencial média do milho para cada mesorregião, pelos diferentes modelos em kg.ha⁻¹

Mesorregiões	Blackman	Exponencial negativa	Hipérbole retangular	Hipérbole não retangular	Uso eficiente da radiação
Zona da Mata	17260	11029	8321	11490	9656
Vale do Jequitinhonha	17938	11434	8607	11887	10045
Triângulo/Alto Paranaíba	17076	10823	8130	11267	9500
Sul/Sudoeste	18792	11934	8994	12387	10174
Campos das Vertentes	19581	12528	9476	13035	10995
Metropolitana	17304	11076	8340	11517	9688
Central Mineira	16624	10478	7837	10903	9333

Na Tabela 4, encontram-se os desvios entre a produtividade potencial média estimada pelos cinco modelos e a produtividade potencial, obtida na literatura. De acordo com os valores dos desvios, a produtividade potencial estimada pelo modelo de Blackman foi muito superior aos valores obtidos na literatura para as duas culturas. Por outro lado, os modelos da exponencial negativa, da hipérbole retangular, da hipérbole não retangular e do uso eficiente da radiação apresentaram estimativas de produtividade potencial próximas aos valores obtidos na literatura.

Tabela 4 – Desvios entre a produtividade potencial média estimada pelos cinco modelos e a produtividade potencial, obtida na literatura para as duas culturas

MODELOS	Feijão		Milho	
	EMBRAPA	Ministério da Agricultura	UFV	Ministério da Agricultura
Blackman	51%	89%	62%	109%
Exponencial Negativa	-18%	2%	3%	33%
Hipérbole Retangular	-27%	8%	-22%	0%
Hipérbole Não Retangular	2%	28%	7%	39%
Uso Eficiente da Radiação	-21%	2%	-10%	17%

O modelo do uso eficiente da radiação é o mais simples, entre os modelos testados. O uso eficiente da radiação incorpora processos fisiológicos, que são sensíveis às condições ambientais e ao estado da cultura (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994; LOOMIS; AMTHOR, 1999). No entanto, o uso de um valor fixo de UER vem sendo questionado, pois, modelos que contam com um valor fixo de UER podem ser menos sensíveis a variações nas condições climáticas e no estado fisiológico das plantas (YANG *et al.*, 2004).

Dentre as curvas de fotossíntese, a hipérbole retangular tem sido a mais usada em modelagem de culturas, pois, quando utilizada em conjunto com o modelo de

interceptação da radiação de Monsi-Saeky, é possível obter soluções analíticas para sua integração no dossel e no tempo (CHAN, 1992). No entanto, em comparação com as outras curvas, suas taxas de fotossíntese são sempre menores em todos os níveis de radiação.

Segundo Chan (1992), a curva exponencial negativa apresenta estimativas mais próximas aos dados observados. Entretanto, a curva da hipérbole não retangular, com um parâmetro adicional em relação às curvas exponencial negativa e hipérbole retangular, é mais versátil (THORNLEY; JOHNSON, 1990). O parâmetro extra θ na hipérbole não retangular faz com que esta curva tenha mais controle na resposta à luz. Em geral, ao observar as curvas de fotossíntese, constatam-se três características básicas. A primeira é a inclinação inicial, a segunda é a assíntota e a terceira é a agudez da resposta, isto é, a rapidez com que chega à assíntota. Com os dois primeiros parâmetros, a hipérbole retangular e a exponencial negativa controlam apenas duas destas três características. No entanto, a hipérbole não retangular, com o parâmetro extra, controla os três aspectos da curva (THORNLEY; JOHNSON, 1990).

4.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros e das variáveis climáticas

Na análise de sensibilidade, foram testados os parâmetros F_{gmax} e ε , para o modelo de Blackman, exponencial negativa e hipérbole retangular. Para o modelo da hipérbole não retangular, também foi testado o parâmetro θ , enquanto para o modelo do uso eficiente da radiação, foi testado apenas o parâmetro UER . Para todos os modelos, foram realizadas análise de sensibilidade da temperatura média do ar e da radiação solar. Nas figuras 17 a 21, encontram-se os resultados da análise de sensibilidade de cada modelo para a cultura do feijão e, nas figuras 22 a 26, para a cultura do milho.

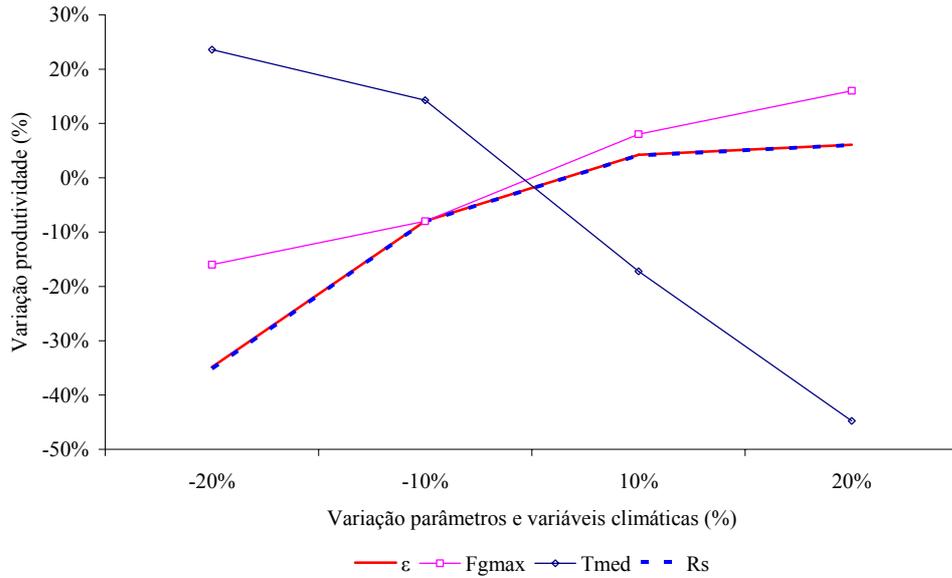


Figura 17 – Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método de Blackman.

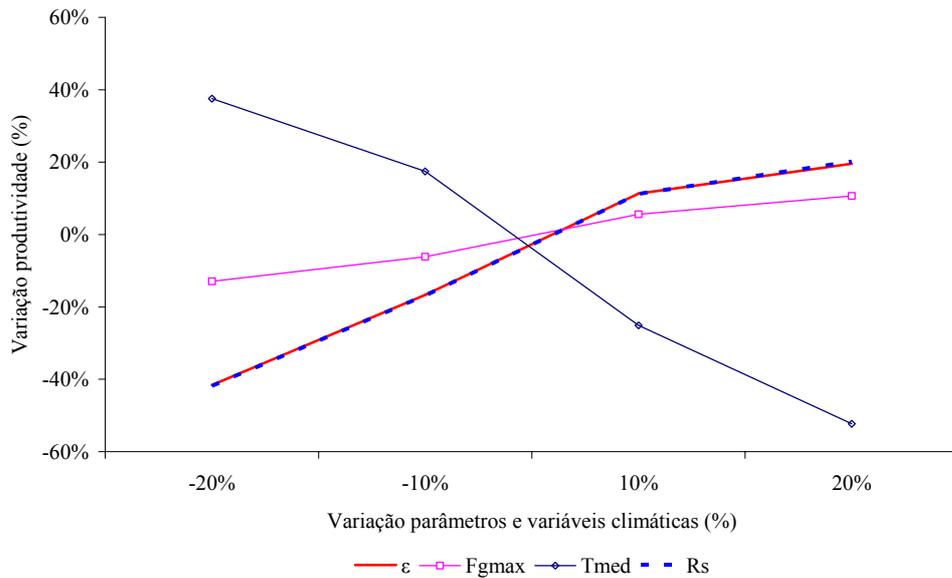


Figura 18 – Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da exponencial negativa.

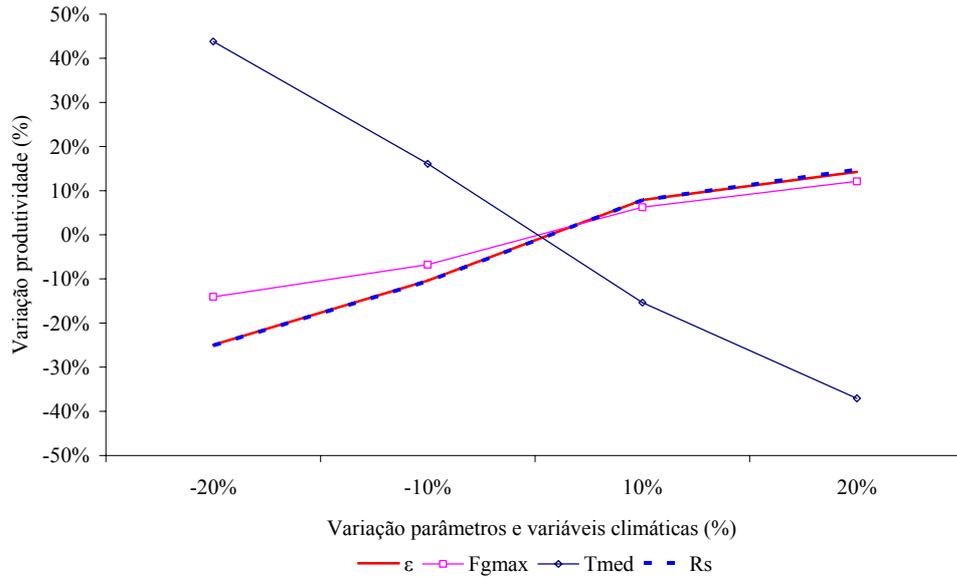


Figura 19 – Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole retangular.

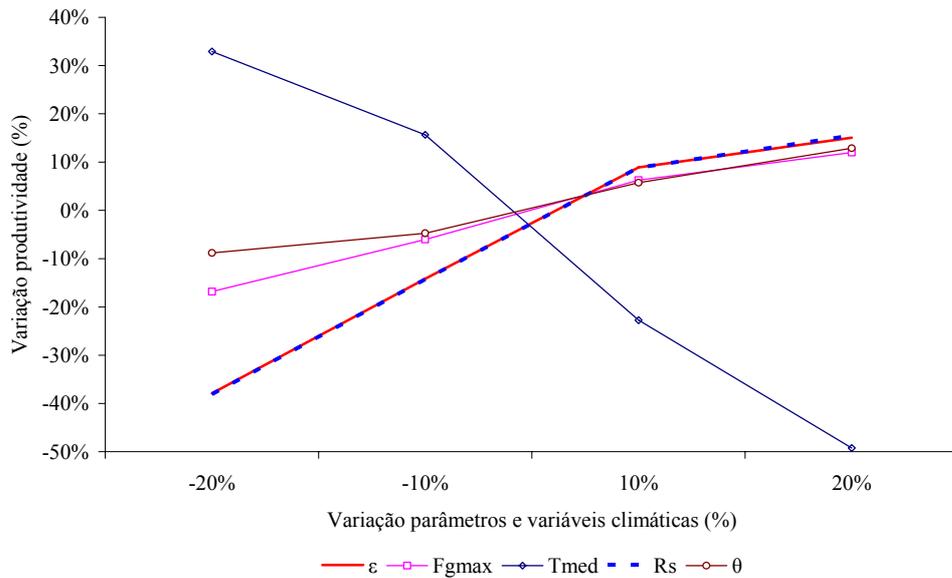


Figura 20 – Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole não retangular.

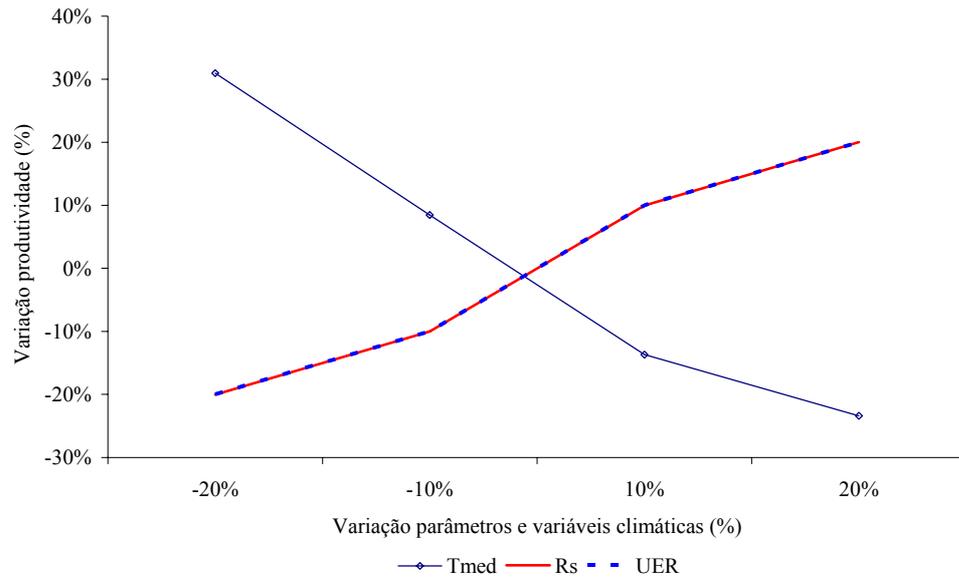


Figura 21 – Análise de sensibilidade da produtividade do feijão, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método do uso eficiente da radiação.

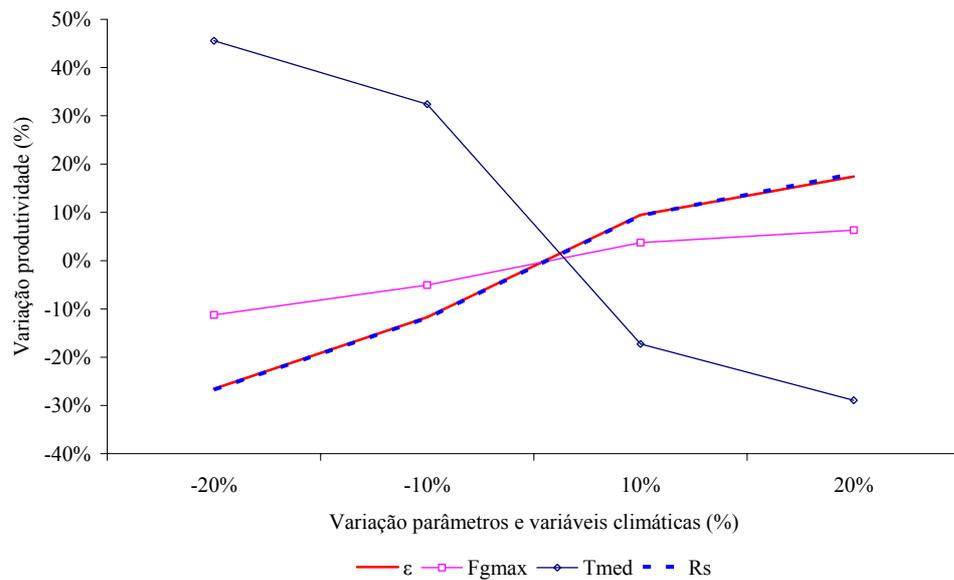


Figura 22 – Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método de Blackman.

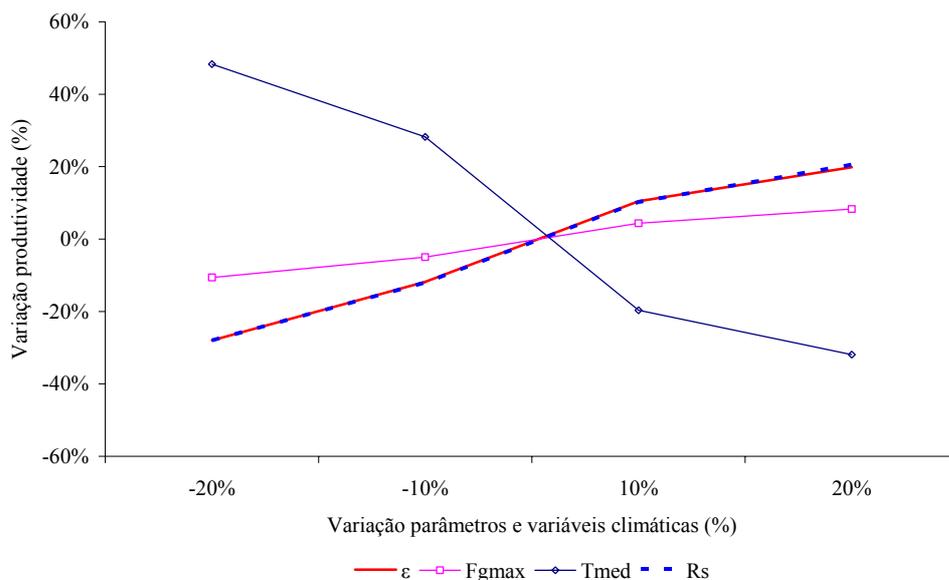


Figura 23 – Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da exponencial negativa.

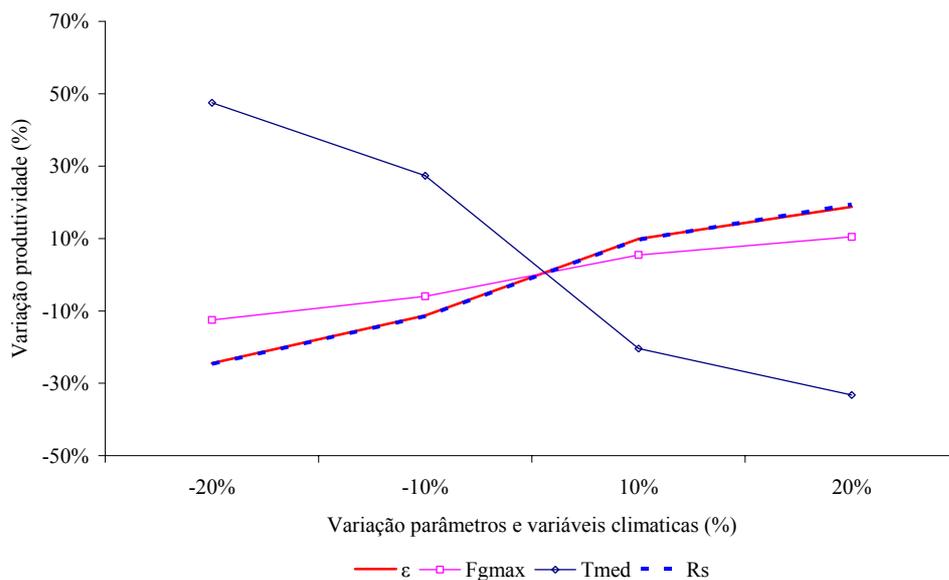


Figura 24 – Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole retangular.

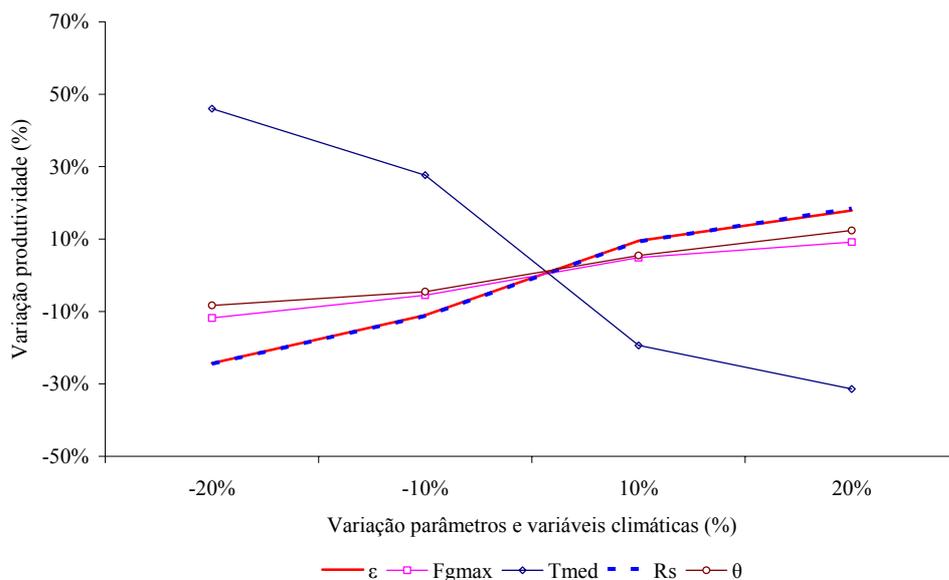


Figura 25 – Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método da hipérbole não retangular.

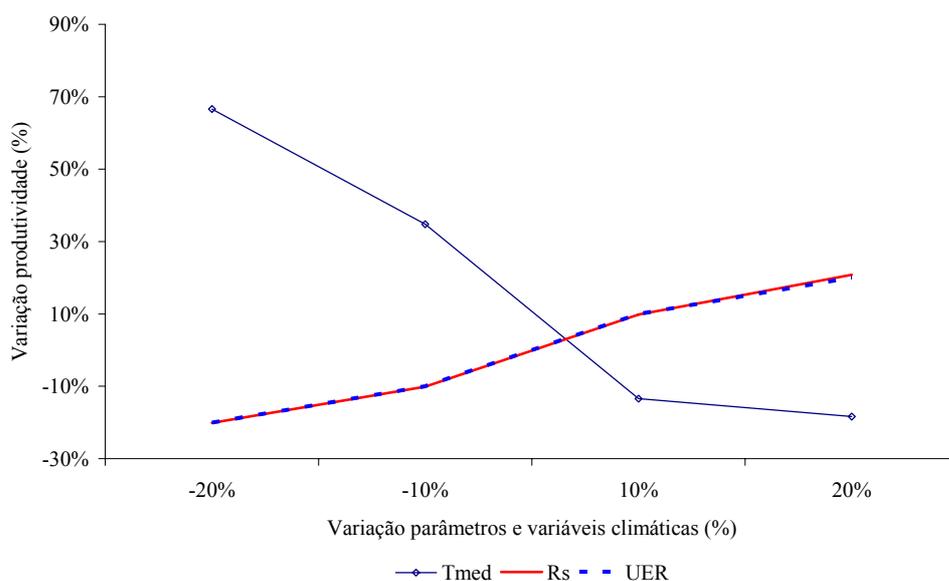


Figura 26 – Análise de sensibilidade da produtividade do milho, relativa aos parâmetros do modelo e às variáveis climáticas, para o método do uso eficiente da radiação.

Nas figuras 17 a 26, para ambas as culturas, observa-se que os modelos apresentaram sensibilidade a todos os parâmetros e variáveis climáticas testadas, especialmente quando estes foram diminuídos em 20%. É importante ressaltar a necessidade de verificação de valores específicos para os parâmetros, por meio de

experimentos, uma vez que a produtividade foi alterada, significativamente, com a mudança nos valores dos mesmos.

Todos os modelos foram mais sensíveis às variações de temperatura, variando de +44% no método da hipérbole retangular (Figura 19) quando variou de -20% até -52% no método da exponencial negativa (Figura 18) e, quando variou de +20%, para o feijão. Para o milho, variações na produtividade foram de +67% no método do uso eficiente da radiação (Figura 26) até -33% no método da hipérbole retangular (Figura 24), quando a temperatura variou -20% e +20%, respectivamente.

Nas figuras 17 a 20 e 22 a 25, percebe-se que a sensibilidade dos modelos ao parâmetro ε é equivalente a sensibilidade a radiação solar (R_s), o que pode ser explicado pelo fato de esses dois elementos serem diretamente proporcionais à assimilação de carbono (Equações 4 a 7).

Para a cultura do feijão, o modelo exponencial negativa (Figura 18) mostrou sensibilidade maior ao parâmetro ε , em comparação com os outros modelos que têm este parâmetro, sendo que as variações na produtividade foram de -42% e 20%, quando este parâmetro variou -20% e 20%. Para a cultura do milho, a sensibilidade ao parâmetro ε foi praticamente igual em todos os modelos, que possuem este parâmetro, sendo que as variações na produtividade foram de -27% e 18%, para variações de -20% e 20% neste parâmetro.

Para a cultura do feijão, o modelo mais sensível ao parâmetro F_{gmax} foi o de Blackman (Figura 17). A produtividade variou de -16% e 16%, quando este parâmetro variou de -20% e 20%. Para a cultura do milho, o modelo mais sensível ao parâmetro F_{gmax} foi o da hipérbole retangular (Figura 24); a produtividade variou de -12% e 10% para variações neste parâmetro de -20% e 20%.

No modelo da hipérbole não retangular (Figura 20) para a cultura do feijão e, para a cultura do milho (Figura 25), as variações no parâmetro θ de -20% e 20%, resultaram em variações na produtividade de -9% e 13% e, -8% e 12%, respectivamente.

Na análise de sensibilidade para o método do uso eficiente da radiação (Figuras 21 e 26), observa-se que variações percentuais no parâmetro UER e na radiação solar resultaram na mesma variação percentual na produtividade. Tais resultados já eram esperados, pois, a matéria seca acumulada por meio deste método é resultado da multiplicação destes dois elementos.

5 CONCLUSÕES

A produtividade potencial, calculada pelos diferentes modelos, diferiu substancialmente. A diferença percentual entre o modelo de maior estimativa de produtividade e o de menor foi superior para a cultura do milho, em relação à do feijão.

Pelo método de Blackman, a produtividade potencial estimada para as duas culturas foi, sempre, muito superior àquelas reportadas na literatura. Por outro lado, os demais métodos apresentaram resultados próximos aos disponíveis na literatura.

Para a cultura do feijão, a mesorregião Vale do Jequitinhonha apresentou os maiores valores de produtividade potencial média, para todos os modelos, enquanto a mesorregião Central Mineira apresentou os menores. Para a cultura do milho, os maiores valores de produtividade potencial média, para todos os modelos, foram observados na mesorregião Campos das Vertentes e os menores na mesorregião Central Mineira.

Em geral, os modelos para a cultura do milho foram menos sensíveis aos parâmetros testados e à radiação solar, em comparação aos modelos referentes ao feijão. Os modelos de milho também foram menos sensíveis às variações positivas na temperatura, enquanto, em variações negativas na temperatura, apresentaram maior sensibilidade.

CAPÍTULO 2

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NAS

PRODUTIVIDADES DAS CULTURAS

1 INTRODUÇÃO

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007a), é evidente o aumento na temperatura média global do ar e do oceano, derretimento das geleiras e aumento no nível médio do mar. Nas escalas, continental e regional, numerosas mudanças em longo prazo no clima foram observadas. Estas incluem mudanças nas temperaturas do Ártico, nos regimes de precipitação, salinidade do oceano, padrões de vento e na ocorrência de eventos extremos com maior frequência e intensidade, incluindo secas, enchentes, ondas de calor e ciclones tropicais (IPCC, 2007 a).

Estudos desenvolvidos, em diferentes partes do mundo, têm mostrado que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas (LUO *et al.*, 2005; RICHTER; SEMENOV, 2005; ZHANG; LIU, 2005). Esses impactos referem-se às taxas fotossintéticas, às taxas de respiração e à redução no ciclo das culturas. A causa principal desses impactos é o aumento da temperatura.

No entanto, ainda existe uma série de incertezas sobre tais impactos, visto que a produtividade das culturas depende de uma série de fatores biofísicos e socioeconômicos, que são difíceis de quantificar (EWERT *et al.*, 2005).

Vários modelos, a maioria com fundamentação estatística, vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de definir a produtividade potencial das culturas (FAO, 2003). Todavia, considerando-se a não-linearidade e a complexidade da relação entre clima e cultura, modelos baseados em processos também vêm sendo utilizados, para definir a produtividade potencial das culturas sob condições de mudanças climáticas (EASTERLING *et al.*, 2001; PARRY *et al.*, 2004). Tais modelos utilizam o balanço de carbono das culturas, tendo comumente como

variável de entrada, unicamente, a radiação e a temperatura, não considerando nenhuma outra restrição ambiental.

Conforme o exposto, neste capítulo o objetivo é estimar a produtividade potencial e a perda de produtividade (diferença entre a produtividade potencial e real) das culturas do feijão (C_3) e do milho (C_4) para algumas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, considerando o cenário A_2 do modelo HadCM3, o efeito fertilização por CO_2 e o avanço tecnológico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 As culturas

As culturas do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e do milho (*Zea mays* L.) foram escolhidas, devido sua importância sócioeconômica para o Estado de Minas Gerais. Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2007) evidenciam Minas Gerais como o segundo maior produtor de feijão e de milho na safra 2006/2007.

Nos últimos anos, a cultura do feijão, no Brasil, vem passando por profundas mudanças. Até recentemente, caracterizava-se por cultivos em áreas pequenas, com pouca utilização de tecnologia, voltada para a subsistência. A possibilidade de produção de feijão em todos os Estados, em várias épocas do ano, começou a despertar o interesse de outro perfil de produtores, que entraram na atividade com um sistema produtivo mais tecnificado, atingindo, em alguns casos, a uma produtividade superior a 3000 kg.ha⁻¹ (YOKOYAMA *et al.*, 1996 ; ARAÚJO, 1998).

A produção mundial de milho compete com a de trigo pelo título de grão mais produzido no mundo. Este fato, relativamente recente, deve-se ao forte crescimento da demanda mundial. A maior parte deste crescimento é devido ao aumento de renda e, portanto, de padrão de consumo (maior consumo de proteínas) nos países asiáticos, em especial dos Tigres e da China. Vale ressaltar que a cultura do milho, ainda, conta com grandes possibilidades de aumento de produção via crescimento de produtividade (BRASIL, 2007d).

2.2 Modelagem na agricultura

A utilização de modelos, objetivando quantificar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento e desenvolvimento das culturas, vem ocorrendo há mais de 250 anos. Tal afirmação é baseada no fato que, em 1735, ao associar a temperatura (graus-dias) ao desenvolvimento de culturas, Réaumur, estava propondo

um dos modelos empíricos mais eficientes, que se conhece em agrometeorologia (COSTA, 1997).

Assis (2004) afirma que a temperatura do ar é uma das variáveis independentes mais utilizadas em modelo de previsão da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca em diversas culturas, devido tanto à facilidade de obtenção quanto a seu relacionamento com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa, necessária para a planta completar o seu ciclo.

Na definição dos modelos, podem se distinguir os parâmetros e as variáveis de estado. Os parâmetros são componentes do modelo, usualmente, constantes ou dependentes do estado do sistema, mas não necessariamente do tempo. As variáveis de estado são quantidades, que descrevem as condições dos componentes no sistema e podem mudar com o tempo, assim como os componentes do sistema interagem com o meio. Se as variáveis de estado mudam no tempo, os modelos são dinâmicos. Como exemplo, tem-se que o conteúdo de água no solo e a biomassa da cultura são duas variáveis de estado, que mudam com o tempo, na maioria dos modelos de cultura. As variáveis de estado desses modelos têm muita importância, porque são as características dinâmicas da cultura de interesse do modelador (DE WIT, 1978).

As inter-relações entre os componentes e o sistema e, algumas vezes, entre variáveis de estado no sistema ocorrem como resultado de vários processos. A exemplo disso, tem-se que a biomassa de uma cultura (variável de estado) muda como resultado dos processos de fotossíntese e respiração; o conteúdo de água no solo muda, como resultado da chuva ou da evapotranspiração. Assim, pode-se dizer que um modelo é um conjunto de relações matemáticas, que descrevem as mudanças nas variáveis de estado como resultado dos diferentes processos, que ocorrem no sistema (DE WIT, 1978).

2.3 Produtividade potencial, produtividade real e perda de produtividade

Os fatores responsáveis pela produção das plantas e que se encontram acima da superfície do solo, como luz, temperatura e dióxido de carbono não são controláveis, sob condições normais de campo. Por outro lado, fatores que se encontram abaixo da superfície do solo, como a água e nutrientes, geralmente podem ser alterados, a exemplo da irrigação e da adubação. Por isso, os fatores que estão acima do solo são considerados como os que definem a produção potencial e os

fatores dentro do solo como os fatores limitantes para a produção (WOLSCHICK, 2004).

Desse modo, a produtividade potencial pode ser definida como a produção de uma cultura, sob condições ótimas de manejo, isto é, provisão adequada de água e nutrientes, protegida de pragas e doenças, determinada apenas pela radiação fotossinteticamente ativa absorvida (BINDRABAN *et al.*, 2000).

Na prática, a perda de produtividade é definida como a diferença entre a produtividade potencial e a produtividade real, podendo ser dividida em três componentes (Figura 1) de acordo com FAO (2004).

1º Componente – A diferença entre a produtividade potencial teórica e a produtividade potencial das estações de pesquisa, nas quais cientistas criam variedades potencias.

2º Componente – A diferença entre a produtividade obtida nas estações de pesquisas e a produtividade potencial das fazendas é causada, principalmente, por fatores que geralmente não são transferíveis, como condições ambientais e algumas tecnologias, que estão disponíveis apenas nas estações de pesquisa. É um componente difícil de quantificar.

3º Componente – A diferença entre a produtividade potencial das fazendas e a produtividade real é causada, principalmente, pelas diferenças nas práticas de manejo. Este componente é manejável e pode ser limitado, aumentando esforços dentro da pesquisa e extensão, bem como da intervenção apropriada do governo.

A Figura 1 apresenta os componentes da perda de produtividade.

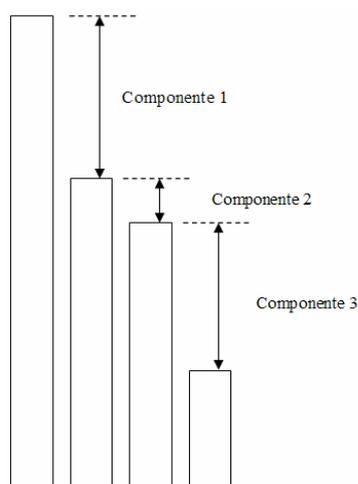


Figura 1 – Componentes da perda de produtividade adaptado da FAO (2004).

2.4 Possíveis efeitos das mudanças climáticas na agricultura

A atual concentração de CO₂ na atmosfera é um fator limitante para a fotossíntese, o crescimento e a produtividade de muitas espécies. Na folha, a taxa fotossintética é resultado direto da atividade da enzima ribulose-1-5 bisfosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco) que, por sua vez, é influenciada por vários fatores ambientais, incluindo CO₂, temperatura do ar e luz.

Muitos experimentos têm demonstrado que a fotossíntese pode aumentar, em função de um aumento na concentração de CO₂ (LIMA, 2005). Os efeitos benéficos de elevadas concentrações de CO₂ no crescimento das plantas dependem de seu estado hídrico, pois, esses efeitos podem ser diferentes em plantas, crescendo sob condições ótimas de água, em comparação com plantas crescendo em condições de deficiência hídrica (IDSO, 1998). Assim, é importante considerar tanto o incremento atmosférico de CO₂ quanto a disponibilidade de água no solo, para avaliar realmente os possíveis efeitos das mudanças do clima na produção agrícola.

Níveis elevados de CO₂ atmosférico tendem a reduzir a abertura estomática nas folhas, reduzindo a quantidade de água perdida por transpiração. Nesta situação, as plantas sob estresse hídrico são capazes de manter a absorção de CO₂ durante um tempo maior (LARCHER, 2006).

Entretanto, efeitos opostos também foram observados e os resultados podem diferir, em função da espécie. Efeitos negativos da fertilização com CO₂ incluem o carregamento excessivo dos cloroplastos com amido ou hipertrofia dos tecidos foliares. Em consequência do excesso de carboidratos, mais produtos assimilados são desviados para as raízes, com consequente aumento da respiração nas mesmas e, portanto, perdas de produtos fotossintéticos via sistema radicular (LARCHER, 2006).

A temperatura do ar afeta todas as reações bioquímicas da fotossíntese e, portanto, as respostas à temperatura do ar são complexas. É possível conhecer os mecanismos subjacentes, por meio da comparação de taxas fotossintéticas em ar com concentração normal e com concentração alta de CO₂. Sob concentração alta de CO₂, há um amplo suprimento de CO₂ nos sítios de carboxilação e a taxa de fotossíntese é limitada, sobretudo pelas reações bioquímicas conectadas com o transporte de

elétrons (TAIZ; ZEIGER, 2004). Em tais condições, as alterações de temperatura do ar têm efeitos grandes sobre as taxas de fixação.

Sob concentrações de CO₂ em atmosfera normal, a fotossíntese é limitada pela atividade da rubisco e a resposta reflete dois processos conflitantes: um aumento na taxa de carboxilação com a temperatura do ar e um decréscimo na atividade da rubisco para CO₂ com a elevação da temperatura do ar. Esses efeitos opostos enfraquecem a resposta à temperatura da fotossíntese, sob concentrações de CO₂ em atmosfera normal (TAIZ; ZEIGER, 2004).

As taxas de respiração também aumentam, em função da temperatura do ar, enquanto a interação entre fotorrespiração e fotossíntese torna-se aparente nas respostas à temperatura do ar. Na planta C₄, o rendimento quântico permanece constante com a temperatura, refletindo as típicas baixas taxas de respiração. Na planta C₃, o rendimento quântico decresce com a temperatura do ar, refletindo a estimulação da fotorrespiração pela temperatura do ar e uma decorrente demanda da energia mais alta por CO₂ líquido fixado (TAIZ; ZEIGER, 2004). Portanto, a resposta da fotossíntese à temperatura do ar é resultado da interação complexa do meio ambiente, onde a planta se desenvolve, com as características inerentes às espécies.

Considerando os efeitos das mudanças climáticas na agricultura, o IPCC (2007 b) aponta que a produtividade das culturas pode aumentar, ligeiramente, para regiões de médias a altas latitudes, com aumento da temperatura máxima do ar entre 1-3°C, dependendo da cultura, podendo decrescer para outras regiões. Para latitudes mais baixas, especialmente em regiões tropicais com estações secas e chuvosas bem definidas, é esperada a diminuição da produtividade das culturas para aumentos de temperatura do ar de 1-2°C, o que aumentaria o risco de escassez de alimentos. Globalmente, é esperado que o potencial agrícola se eleve com aumentos na temperatura média do ar em torno de 1-3°C; acima destes valores, acredita-se na diminuição. Outro agravante para a agricultura é o aumento na frequência de secas e inundações, que pode afetar a produção agrícola negativamente, especialmente em setores de subsistência em baixas latitudes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e dados utilizados

O Estado de Minas Gerais localiza-se na região Sudeste e faz divisa com os seguintes Estados: São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás, Distrito Federal, Espírito Santo, Rio de Janeiro e Bahia. Para fins da análise espacial dos resultados, foi considerada a divisão do Estado de Minas Gerais em doze mesorregiões geográficas, conforme critério do IBGE.

Os dados de produtividade das culturas foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para as simulações da cultura do feijão, foram utilizados dados do cultivar Pérola, grupo comercial Carioca que apresenta ciclo de, aproximadamente, 90 dias. Para as simulações da cultura do milho, foram utilizados dados do cultivar AGN 2012 (Híbrido duplo), que apresenta ciclo de, aproximadamente, 116 dias. A data de plantio foi 15 de outubro para todas as simulações.

3.2 Modelo utilizado

Foi utilizado um modelo modular, desenvolvido no software Model Maker 3.0 ©CSPL (*Cherwell Scientific Publishing Limited*). Esse modelo simulou a produção de matéria seca diária, determinada pela intensidade de radiação e temperatura média do ar. O modelo consistiu dos seguintes módulos: (a) climático; (b) radiação; (c) balanço de carbono; e (d) desenvolvimento e partição de matéria seca.

O acúmulo de biomassa da cultura foi calculado, diariamente, baseando-se na taxa de fotossíntese bruta do dossel, estimada pela curva da hipérbole não retangular, com os parâmetros: taxa de fotossíntese máxima, eficiência do uso de luz e parâmetro de forma. O balanço diário de carbono foi definido como a matéria seca, resultante da diferença entre a assimilação e a respiração de manutenção diária da cultura. Em seguida, o ganho de carbono simulado foi convertido em matéria seca,

através da respiração de crescimento. O processo fisiológico foi caracterizado, baseando-se em de dois parâmetros específicos para cada variedade: tempo térmico para o florescimento e para a maturação. À medida que se acumularam os totais de graus-dias, exigidos pela cultura para a ocorrência dos eventos fenológicos, o módulo referente à partição de assimilados distribuiu a assimilação diária entre os diferentes órgãos da planta. O rendimento de grão foi estimado, com base na percentagem de matéria seca alocada para os órgãos reprodutivos em função da fase fenológica. A simulação foi concluída, quando a cultura atingiu a maturidade fisiológica.

3.3 Projeções futuras

3.3.1 Efeitos das mudanças climáticas

Nas simulações, foram usadas, condições climáticas, projetadas pelo modelo de circulação geral da atmosfera HadCM3, desenvolvido no Hadley Centre, para os anos de 2020, 2050 e 2080, considerando o cenário A₂ – cenário, que descreve um mundo futuro muito heterogêneo, no qual a regionalização é dominante, com fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais, crescimento populacional alto e menor preocupação em relação ao desenvolvimento econômico. A seguir, as produtividades simuladas para os anos de 2020, 2050 e 2080 foram comparadas com a produtividade relativa ao ano-base 2000.

Posteriormente, foram gerados mapas temáticos do Estado de Minas Gerais, utilizando-se o *software ArcView 3.2* ®ESRI (*Environmental Systems Research Institute Inc*), mostrando a evolução espacial e temporal da produtividade.

3.3.2 Efeito da crescente concentração de CO₂

O efeito global da crescente concentração de CO₂ na produtividade das culturas foi simulado, conforme estabelecido por Ewert *et al.* (2005):

$$P_{CO_2} = \frac{f_{CO_2} \times \Delta CO_2}{100} + 1 \quad (1)$$

em que

P_{CO_2} = efeito da concentração de CO₂ na produtividade das culturas;

f_{CO_2} = mudança relativa na produtividade por unidade crescente na concentração de CO₂ (%.ppm⁻¹); e

ΔCO_2 = diferença entre a concentração de CO₂ futura e do ano-base (ppm) .

Tubiello *et al.* (2000) assumiram que, para um aumento de 350ppm na concentração de CO₂, haveria um incremento na produtividade das culturas C₃ e C₄ de 25% e 10%, respectivamente. Assumindo-se que esse incremento seria linear, foram utilizados valores para o parâmetro f_{CO_2} de 7,14%.ppm⁻¹ para a cultura C₃ e 2,9%.ppm⁻¹ para a cultura C₄.

Para o cenário A₂, o IPCC (2007a) estabelece as seguintes concentrações de CO₂: 440ppm, 559ppm e 721ppm para os anos de 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Para o ano-base, utilizou-se a concentração de 370 ppm.

3.3.3 Efeito do avanço tecnológico

A análise de tendência da série histórica para as culturas de feijão e milho, para todas as mesorregiões, foi baseada em dados do IBGE, considerando-se dados de produtividade relativos ao período de 1976 a 2004. A tendência de produtividade foi calculada, por meio de regressão linear simples, utilizando-se os dados observados (Figuras 2 e 3). Nestas figuras, que os dados observados de produtividade apresentam variações substanciais entre as mesorregiões. Entretanto, quando é plotada a mudança relativa na produtividade entre anos, calculada por meio da Equação 2, percebe-se que diferenças entre as mesorregiões foram pequenas e tenderam a convergir com o tempo (Figuras 4 e 5).

$$Pr = \frac{Pe_{(t)}}{Pe_{(t-1)}} \quad (2)$$

em que

Pr = mudança relativa na produtividade entre anos; e

Pe = produtividade estimada, para determinado ano, por meio de regressão linear simples dos dados observados para cada mesorregião (kg.ha⁻¹).

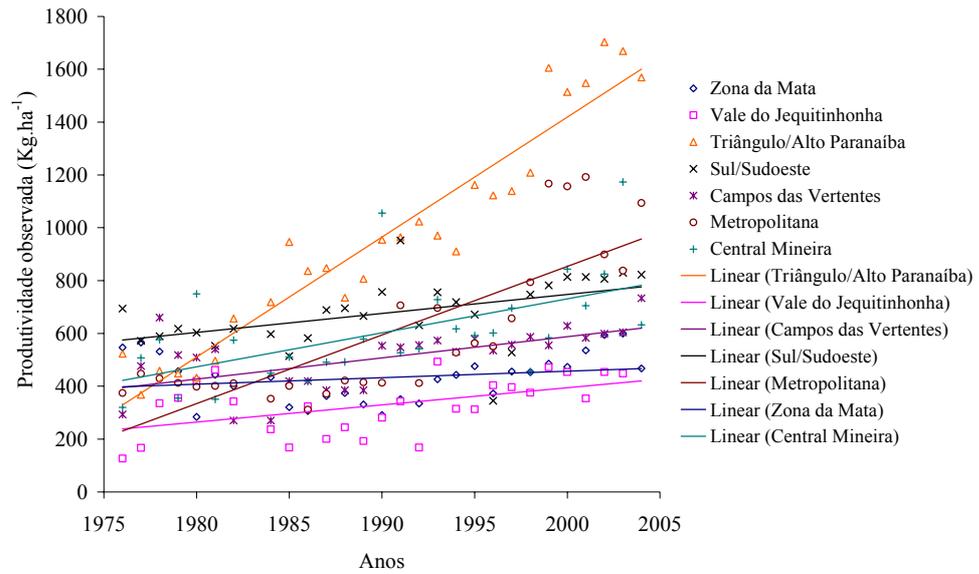


Figura 2 – Curvas de tendência de produtividade do feijão para cada mesorregião, com base na série histórica do IBGE.

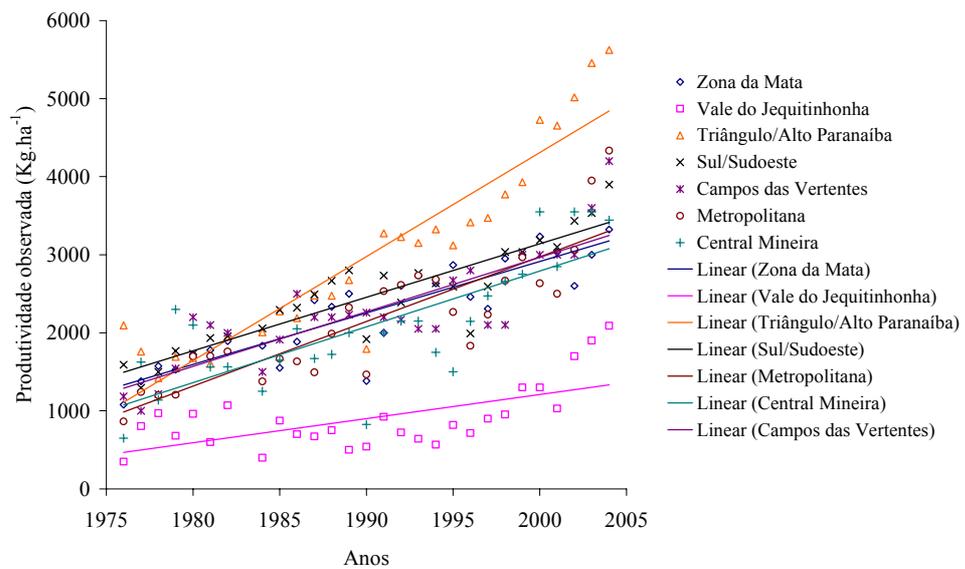


Figura 3 – Curvas de tendência de produtividade do milho para cada mesorregião, com base na série histórica do IBGE.

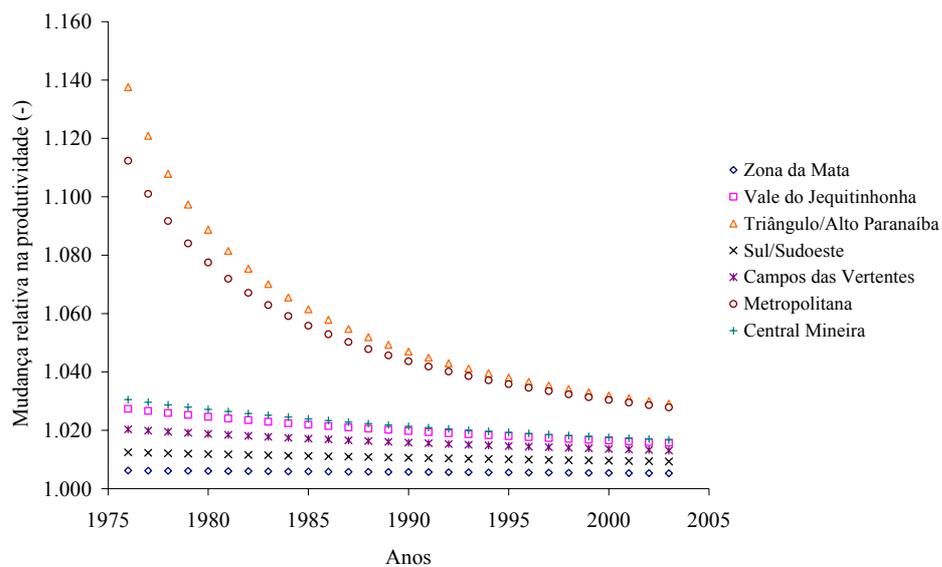


Figura 4 – Mudança relativa na produtividade para a cultura do feijão, calculada por meio da Equação 2, para cada mesorregião.

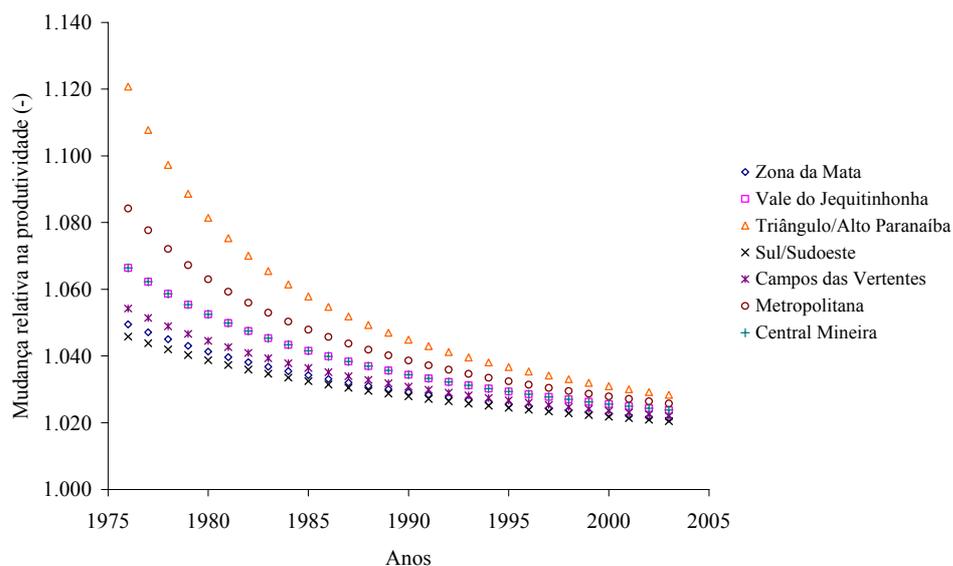


Figura 5 – Mudança relativa na produtividade para a cultura do milho, calculada por meio da Equação 2, para cada mesorregião.

O efeito da tecnologia na produtividade real foi, em seguida, calculado por:

$$P_T = Pr_{(t_0)} + \int_{t_0}^t Pr, a \tag{3}$$

em que

P_T = efeito da tecnologia na produtividade real;

$Pr_{(t_0)}$ = mudança relativa na produtividade para o ano-base 2000; e

$Pr,a=$ representa o incremento na mudança relativa da produtividade com referência para o ano-base 2000.

Posteriormente, esse fator foi multiplicado pela produtividade observada no ano-base. Para estimativa da produtividade real futura, também, foram considerados os efeitos do clima e da fertilização por CO₂.

O efeito da tecnologia na produtividade potencial foi calculado, empregando-se a equação:

$$PP_T = P_g + \int_{t_0}^t P_g \times f_{T,Pt(t)} \quad (4)$$

em que

PP_T = efeito da tecnologia na produtividade potencial;

P_g = progresso genético, para a cultura do feijão (1,6%/ano) e para a cultura do milho (1,82%/ano), conforme Matos (2005); e

f_{T,PP_T} = parâmetro que representa o efeito da tecnologia na produtividade potencial, 0,8 para 2020; 0,6 para 2050 e 0,4 para 2080 (EWERT *et al.*, 2005).

Em seguida, o fator que representa o efeito da tecnologia na produtividade potencial foi inserido no modelo na taxa de fotossíntese bruta.

3.3.4 Estimativa da perda de produtividade

Foi calculada a perda de produtividade relativa aos anos de 2000, 2020, 2050 e 2080, para todas as mesorregiões e culturas. O cálculo para o ano 2000 foi realizado, baseando-se na diferença entre a produtividade potencial, simulada pelo modelo da hipérbole não retangular para o ano-base 2000, e a produtividade fornecida pelo IBGE, para cada uma das mesorregiões, para aquele ano. Para os anos de 2020, 2050 e 2080, a perda de produtividade foi calculada por meio da diferença da produtividade potencial, simulada pelo modelo, sendo que, nas simulações foram considerados o efeito do clima, da concentração de CO₂ e do avanço tecnológico, e a produtividade real estimada conforme apresentado anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Projeções futuras

4.1.1 Efeito das variáveis climáticas

As estimativas das variações percentuais médias na produtividade potencial, por mesorregião, em resposta às condições climáticas futuras, são apresentadas na Tabela 1, para a cultura do feijão e do milho, nos anos de 2020, 2050 e 2080, comparadas ao ano-base 2000, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3.

As estimativas evidenciam variações percentuais médias na produtividade potencial, em comparação com a produtividade potencial relativa ao ano-base 2000, para a cultura do feijão de -39,46% a 8,14%, dependendo do ano e da mesorregião. Para a cultura do milho, as variações foram de -31,81% a 13,57%.

Tabela 1 – Projeção de variações percentuais médias na produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3

Mesorregiões	Feijão			Milho		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Zona da Mata	-0,32%	-7,81%	-24,63%	12,06%	-7,47%	-19,73%
Vale do Jequitinhonha	-1,42%	-13,61%	-18,26%	-3,37%	-20,97%	-21,80%
Triângulo/Alto Paranaíba	2,90%	-10,69%	-19,10%	4,85%	-5,98%	-17,72%
Sul/Sudoeste	-6,13%	-14,33%	-27,23%	4,78%	-10,37%	-25,46%
Campos das Vertentes	-2,99%	-19,36%	-39,46%	-3,42%	-15,72%	-31,81%
Metropolitana	4,07%	-10,21%	-21,47%	10,51%	-11,49%	-18,60%
Central Mineira	8,14%	-3,63%	-9,52%	13,57%	-8,32%	-12,65%

Nas figuras 6 e 7, observa-se que para as duas culturas, a partir de 2050, ocorre queda na produtividade potencial em todas as mesorregiões, sendo tal queda

mais agravada nas simulações para 2080. Acredita-se que essa queda foi devida, principalmente, às temperaturas mais altas que têm, como consequência, menor assimilação de carbono, decorrente do encurtamento das fases fenológicas e aumento da taxa de respiração de manutenção.

Mearns *et al.* (1997) verificaram que um aumento de 2°C na temperatura média reduzia a produtividade, simulada no modelo CERES-Wheat, de 1266 kg.ha⁻¹ para 966 kg.ha⁻¹.

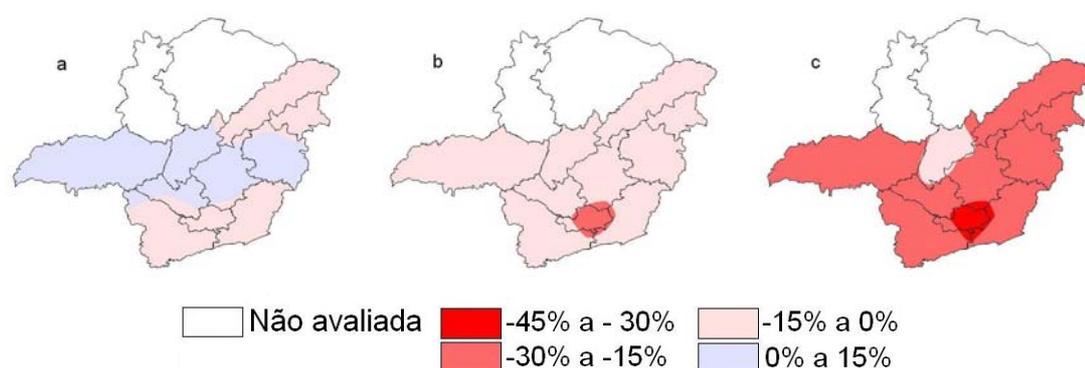


Figura 6 - Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3 (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.

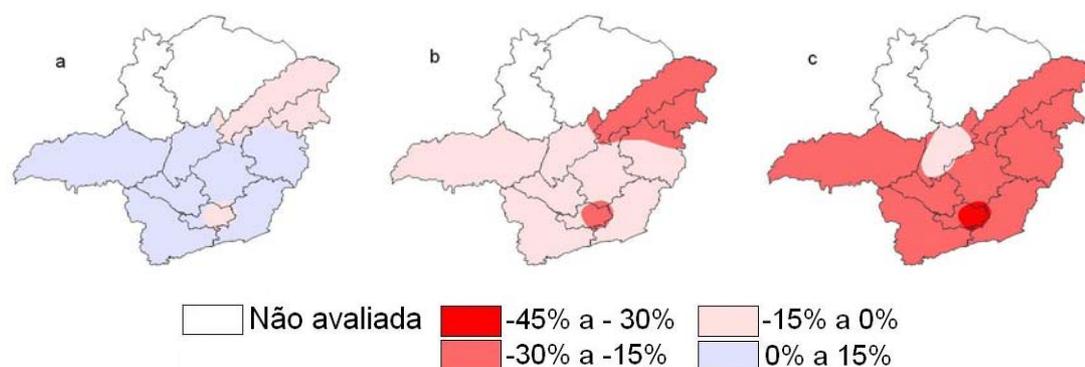


Figura 7 – Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3 (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.

4.1.2 Efeito das variáveis climáticas e concentração de CO₂

As estimativas das variações percentuais médias na produtividade potencial por mesorregião são apresentadas na Tabela 2, para a cultura do feijão e do milho, para os anos de 2020, 2050 e 2080 e comparadas com o ano-base 2000, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando-se o efeito da fertilização por CO₂.

As estimativas mostram variações percentuais médias na produtividade potencial, em comparação à produtividade potencial do ano-base 2000, para a cultura do feijão de -2,55% a 31,77%, dependendo do ano e da mesorregião. Para a cultura do milho, as variações foram de -19,23% a 16,94%.

Tubiello *et al.* (2000) constataram que os efeitos negativos de temperaturas mais altas foram mais fortes que o efeito benéfico da crescente concentração de CO₂ na produtividade das culturas, em Modena na Itália. Para a cultura do trigo e do milho, os autores encontraram queda de 5% a 15%, sendo que para a soja a queda foi superior a 20%.

Tabela 2 – Projeção de variações percentuais médias na produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO₂

Mesorregiões	Feijão			Milho		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Zona da Mata	7,84%	12,86%	15,05%	15,49%	0,73%	-5,21%
Vale do Jequitinhonha	5,52%	4,25%	15,85%	-2,19%	-15,22%	-11,26%
Triângulo/Alto Paranaíba	10,75%	7,85%	24,08%	8,06%	1,97%	-4,21%
Sul/Sudoeste	0,46%	2,63%	7,51%	7,72%	-2,92%	-13,20%
Campos das Vertentes	3,60%	-1,31%	-2,55%	-0,53%	-8,25%	-19,23%
Metropolitana	11,45%	9,22%	16,54%	13,76%	-3,81%	-4,08%
Central Mineira	15,92%	16,42%	31,77%	16,94%	-0,70%	1,83%

Na Figura 8, são representadas as estimativas de variação na produtividade potencial para o feijão. Observa-se que, ao introduzir o efeito fertilização por CO₂ nos modelos, houve incremento na produtividade potencial em todas as

mesorregiões, para o ano de 2020. Apenas a mesorregião Campos das Vertentes apresentou queda na produtividade, para os anos de 2050 e 2080. Para a cultura do milho (Figura 9), o efeito fertilização por CO₂ foi menos evidente.

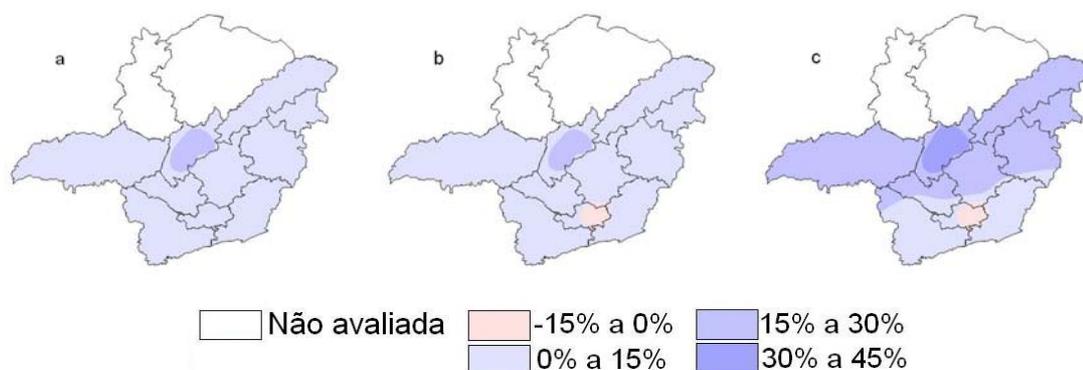


Figura 8 – Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO₂ (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.

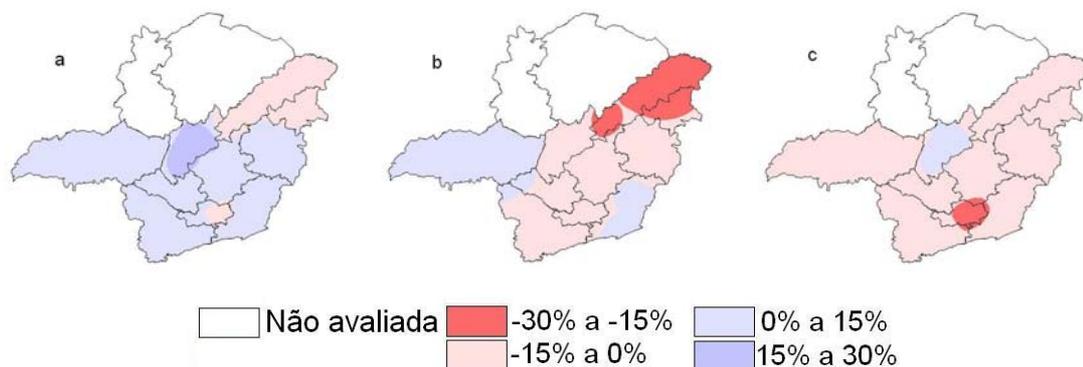


Figura 9 – Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO₂ (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.

4.1.3 Efeito das variáveis climáticas, concentração de CO₂ e do avanço tecnológico

Na Tabela 3, encontram-se as estimativas da variação percentual da produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, para os anos de 2020, 2050 e 2080, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando-se o efeito fertilização por CO₂ e o avanço tecnológico.

As simulações mostraram aumentos na produtividade potencial, em comparação com a produtividade potencial no ano-base 2000, para a cultura do feijão de 35,04% a 114,66%, dependendo do ano e da mesorregião. No entanto, para a cultura do milho, as variações foram de 40,76% a 92,59%.

Ewert *et al.* (2005) encontraram, para o cenário A₂, incrementos na produtividade do trigo para Europa, considerando o efeito fertilização por CO₂ e o tecnológico de 40% a 140%.

Tabela 3 – Projeção de variações percentuais médias na produtividade potencial, para a cultura do feijão e do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO₂ e o avanço tecnológico

Mesorregiões	Feijão			Milho		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Zona da Mata	48,52%	85,81%	90,70%	67,71%	85,73%	78,62%
Vale do Jequitinhonha	41,63%	67,42%	87,59%	40,76%	51,90%	65,28%
Triângulo/Alto Paranaíba	50,57%	73,28%	104,87%	56,83%	84,74%	84,29%
Sul/Sudoeste	35,04%	64,79%	76,47%	55,41%	75,66%	63,98%
Campos das Vertentes	38,04%	62,48%	65,43%	43,52%	69,16%	58,15%
Metropolitana	50,15%	78,47%	92,07%	63,43%	75,94%	80,81%
Central Mineira	56,69%	87,34%	114,66%	68,61%	79,13%	92,59%

Com a introdução do efeito tecnológico nas simulações, observa-se incremento na produtividade potencial em todas as mesorregiões, tanto para a cultura do feijão (Figura 10) quanto para a cultura do milho (Figura 11).

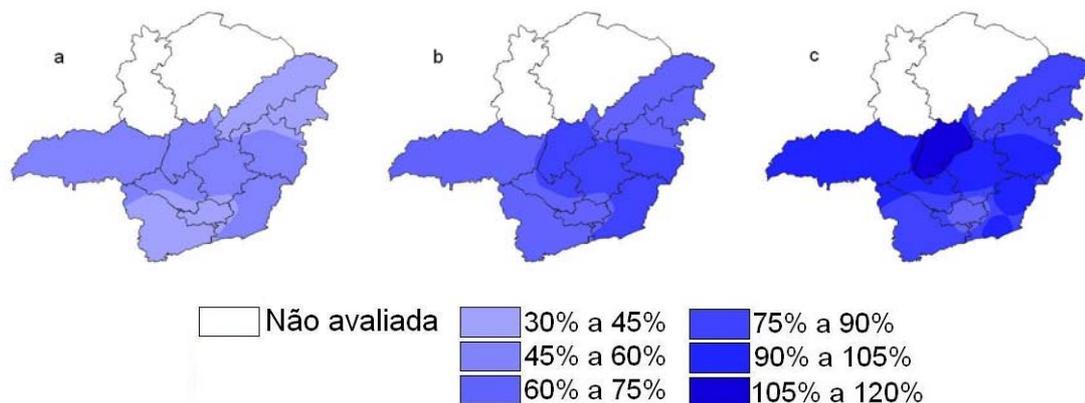


Figura 10 – Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do feijão, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO₂ e o avanço tecnológico (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.

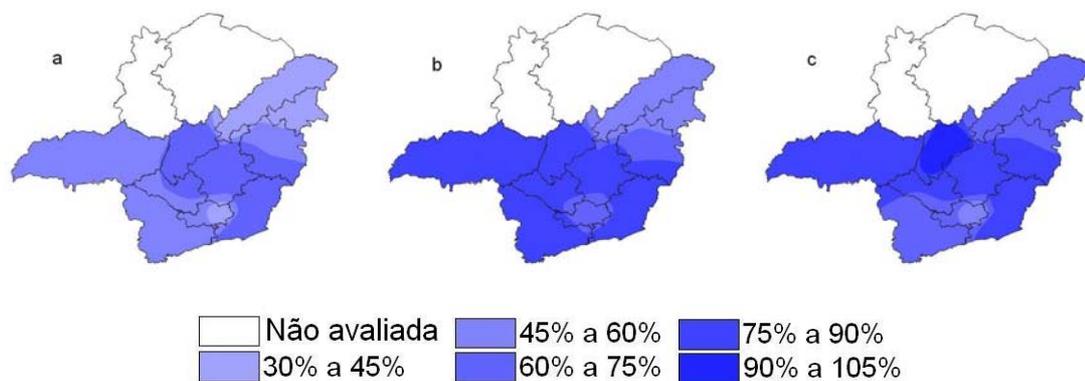


Figura 11 – Projeção de variações percentuais na produtividade potencial para a cultura do milho, simuladas a partir de dados diários para o cenário A₂ do modelo HadCM3, considerando o efeito fertilização por CO₂ e o avanço tecnológico (a) 2020; (b) 2050; e, (c) 2080.

Vale ressaltar que os resultados referem-se à produtividade potencial e que são necessários estudos específicos, uma vez que neste trabalho, as simulações não consideraram restrição hídrica e nutricional, pragas e doenças, nem a ocorrência de eventos extremos.

4.1.4 Estimativa da perda de produtividade

Nas figuras 12 e 13, encontram-se, para o feijão e o milho, respectivamente, estimativas da perda de produtividade para os anos de 2000, 2020, 2050 e 2080 em todas as mesorregiões em estudo, considerando-se dados climáticos diários do cenário A₂ do modelo HadCM3, o efeito fertilização por CO₂ e o avanço tecnológico.

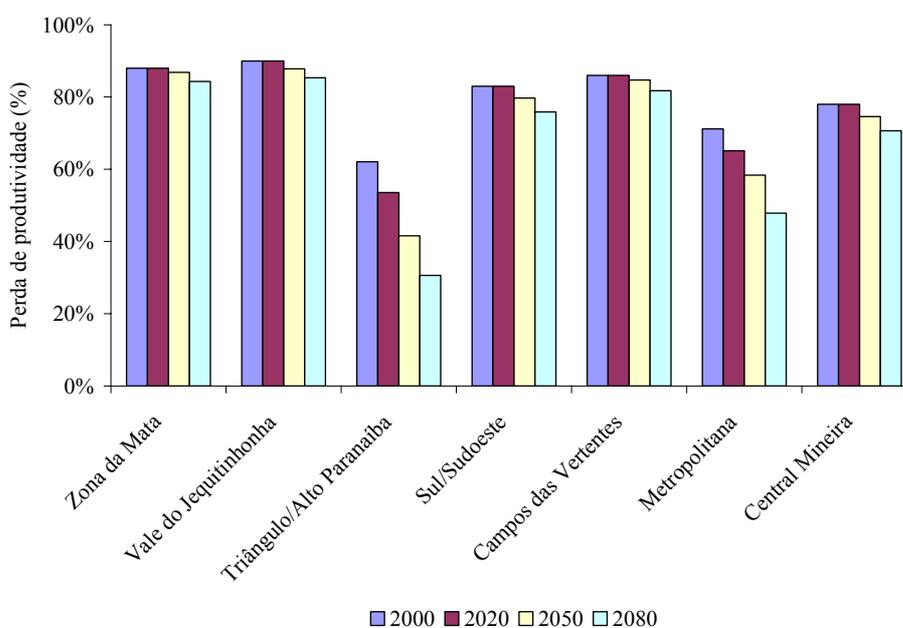


Figura 12 – Estimativas da perda de produtividade para as mesorregiões, anos 2000, 2020, 2050 e 2080 para a cultura do feijão.

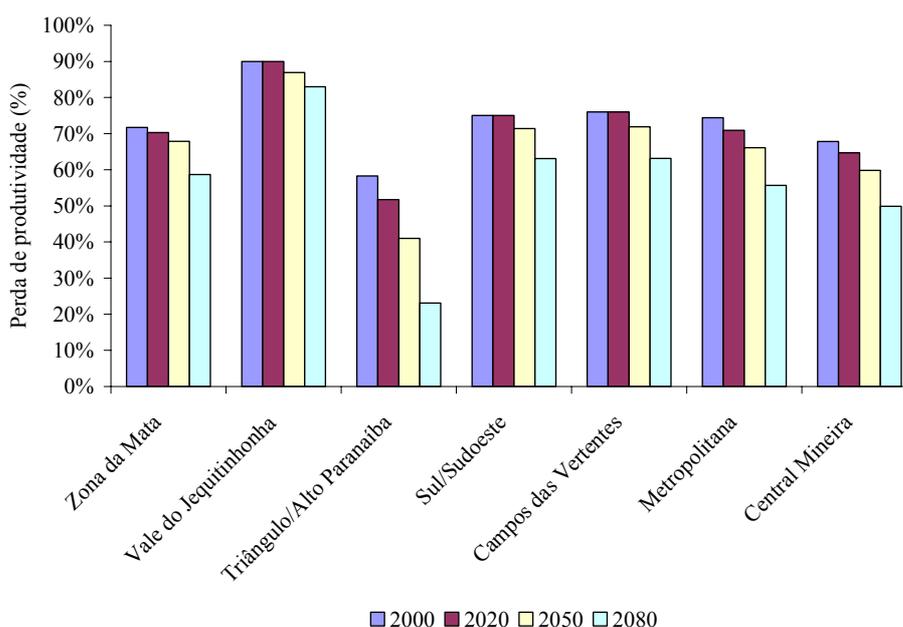


Figura 13 – Estimativas da perda de produtividade para as mesorregiões, anos 2000, 2020, 2050 e 2080 para a cultura do milho.

Em ambas as figuras, percebe-se a tendência decrescente da perda de produtividade, para todas as mesorregiões. Essa tendência foi mais acentuada para a mesorregião do Triângulo/Alto Paranaíba, para as duas culturas. Para o ano de 2020, para o feijão, nas mesorregiões Zona da Mata, Vale do Jequitinhonha, Sul/Sudoeste, Campos das Vertentes e Central Mineira (Figura 12) e para o milho, nas mesorregiões Vale do Jequitinhonha, Campos das Vertentes e Sul/Sudoeste (Figura 13), observa-se que a perda de produtividade estimada foi equivalente à do ano-base, indicando que os incrementos estimados nas produtividades, potencial e real, foram equivalentes nessas mesorregiões.

Apesar da tendência decrescente, a perda de produtividade projetada apresentou valores muito altos, pois, de acordo com Oerke e Dehne (1997), a perda de produtividade para a Europa está em torno de 20% e, ainda, segundo a FAO (2004), a perda de produtividade para o arroz irrigado se situa entre 10% e 60%.

Alguns estudos sugerem que a produtividade esteja chegando a um teto (CALDERINI; SLAFER, 1998), enquanto outros encontraram sinal de redução na velocidade da tendência de produtividade para a maioria dos países (HAFNER, 2003). É esperado que a produtividade real se aproxime da produtividade potencial, por meio de práticas adequadas de manejo, incluindo a proteção a pragas e doenças.

A aproximação da produtividade real à produtividade potencial, ou seja, uma redução da perda de produtividade, além de aumentar a produção de alimentos, também melhora a eficiência no uso do solo, reduz custos de produção e aumenta a sustentabilidade da atividade agrícola. Para tanto, são necessárias políticas governamentais, uma vez que a diminuição da perda de produtividade é dinâmica e inclui desenvolvimento tecnológico e uma efetiva integração entre pesquisa, extensão e produtores. Como esta aproximação entre as duas produtividades é um processo em constante alteração, é fundamental que as políticas públicas de investimento em desenvolvimento tecnológico, pesquisa e extensão, sejam conduzidas no sentido de levar os resultados aos produtores.

5 CONCLUSÕES

Alterações simuladas para produtividade potencial, considerando-se apenas as condições climáticas futuras, indicaram tendência de queda em todas as mesorregiões. Com a introdução do efeito fertilização por CO₂ no modelo, essa tendência foi minimizada, principalmente para a cultura do feijão. Ao considerar também o avanço tecnológico nas simulações, constatou-se aumento na produtividade potencial para as duas culturas, em todas as mesorregiões. O efeito da tecnologia foi o maior responsável por esse aumento.

Quanto à perda de produtividade, os resultados apresentaram uma tendência decrescente para as duas culturas em todas as mesorregiões, com destaque para a mesorregião do Triângulo/Alto Paranaíba.

CONCLUSÕES GERAIS

A produtividade potencial, calculada por meio dos diferentes modelos, diferiu substancialmente, indicando que a escolha do modelo, a ser usado, deve ser realizada de forma criteriosa.

As projeções de produtividade potencial variaram consideravelmente, quando o efeito fertilização do CO₂ e o avanço tecnológico foram introduzidos, o que comprova a importância de serem considerados nos modelos.

Os resultados mostraram que a diferença entre a produtividade potencial e real apresentou uma tendência decrescente para as duas culturas, em todas as mesorregiões, com destaque para a mesorregião do Triângulo/Alto Paranaíba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, P. K. Uncertainties in Crop, Soil and Weather Inputs Used in Growth Models: Implications for Simulated Outputs and Their Applications. **Agricultural Systems**, Great Britain, v.48, p.361-384, 1995.

ALDRICH, S. R.; SCOTT, W. O.; LENG, E. R. **Modern corn production**. 2. ed. Champaign: A & L Publication, 1982. 371 p.

ARAÚJO, G. A. A. Preparo do solo e plantio. In: VIEIRA, C.; PAULA JR., T. J.; BORÉM, A. (eds.) **Feijão: Aspectos gerais e cultura no estado de Minas**. Viçosa: Editora UFV, 1998, p.99-122.

ARKEBAUER, T. J.; WEISS, A.; SINCLAIR, R. T.; BLUM, A. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades. In: SHAH, T.H., FUCHS, M., KANEMASU, E.T., FLITCROFT, I. (Ed.) **Agricultural and Forest Meteorology**, v.68, p.221-227, 1992.

ASSIS, J. P. **Modelo estocástico para Estimação da Produtividade Potencial de Milho em Piracicaba-SP**. 2004. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Zoneamento Agrícola para a cultura do feijão 1ª safra no Estado de Minas Gerais, ano-safra 2006/2007**. Brasília, 2007a. 33 p. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 25 fev. 2007a.

_____. _____. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático: cultivares de feijão – ano-safra 2006/2007**. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 17 jun. 2007b.

_____. _____. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático: cultivares de milho – ano-safra 2006/2007**. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 17 jun. 2007c.

_____. Ministério das relações exteriores. **Milho**. Brasília, 2007. Disponível em: <www.mre.gov.br/CDBRASIL/ITAMARATY/WEB/port/economia/agric/producao/milho/apresent.htm>. Acesso em: 15 jul. 2007d.

CALDERINI, D. F.; SLAFER, G. A. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. **Field Crops Research**. v. 57, p. 335–347, 1998.

CHAN, A. K. **Simulation of growth and development of faba bean (*Vicia Faba L.*)** 1992. 217 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Meteorology and Department of Agricultural Botany, University of Reading, Reading, 1992.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Sétimo Levantamento de Avaliação da Safra 2006/2007. Brasília, abr. 2007. 20p. Disponível em: <www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/7levsafra.pdf>. Acesso em: 25 maio 2007.

COSTA, L. C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10. Piracicaba, 1997. **Anais**. Piracicaba: SBA, 1997. p.3-6

®CSPL. Model Maker 3 for Windows, version 3.0.2. Cherwell Scientific Publishing, Palo Alto, EUA, 1997.

DE WIT, C. T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Ed.) **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, p.3-8, 1982.

_____. **Simulation for assimilation, respiration, and transpiration of crops**. Wageningen: A Halsted Press book. John Wiley, 1978. 140p.

EASTERLING, W. E.; MEANS, L. O.; HAYS, C. J.; MARX, D. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios. Part II. Accounting for adaptation and CO₂ direct effects. **Climate Change**, v.51, p.173-197, 2001.

EASTERLING, W. E.; WEISS, A.; HAYS, C. J.; MEARNNS, L. O. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 90, p. 51–63, 1998.

EMATER. **Estudo e perspectivas para a agropecuária de Minas Gerais em 2007**. Belo Horizonte, jan. 2007. 44 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Fisiologia do milho**. Brasília, dez. 2002. 23 p. Disponível em: <www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/circul22.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2007.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivar Pérola**. Disponível em: <www.cnpaf.embrapa.br/feijao/perola.htm>. Acesso em: 15 abr. 2007.

®ESRI. ArcView for Windows, version 3.2 a. Environmental Systems Research Institute Inc, Califórnia, EUA, 2000.

EWERT, F.; ROUNSEVELL, M. D. A.; REGINSTER, I.; METZGER, M. J.; LEEMANS, R. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating

changes in crop productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.107, p.101-116, 2005.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. p. 21-54.

FAO. Food and Agriculture Organization. **Rice and narrowing the yield gap**. London, 2004. 2p. Disponível em: <www.fao.org/rice2004/en/f-sheet/factsheet5.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2007.

_____. _____. **World agriculture: towards 2015/2030**. An FAO Perspective. London: Earthscan Publications LTDA, 2003.

FERREIRA, W. P. M. **Desenvolvimento e Teste de um Modelo Agrometeorológico de Simulação para a Cultura da Soja [*Glycine max* (L.) Merrill]**. 1997. 84 f. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

FIGUEREDO JR, L. G. M. **Modelo para Estimação da Produtividade de Grãos de Milho no Estado de São Paulo**. 2004. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

GALLAGHER, H. N.; BISCOE, P. V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**, v.91, p.47-60, 1978.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H. H. **Modelling potential crop growth processes: The textbook with exercises**. Dordrecht: Kluwer, 1994. 239p.

GOUDRIAAN, J. **Crop Micrometeorology: a simulation study**. Wageningen: Academic Press, 1977. 249p

HAFNER, S. Trends in maize, rice, and wheat yields for 188 nations over the past 40 years: a prevalence of linear growth. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 97, p. 275–283, 2003.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, Davis, USA, v. 103, p. 137-157, 2000.

IDSO, S. B. Three phases of plant response to atmospheric CO₂ enrichment. **Plant Physiology**, v. 87, p. 5-7, 1998.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 18 p, 2007a.

_____. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge University Press: Cambridge, 23 p, 2007b.

KHO, R. M. On crop production and the balance of available resources. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.80 , p.71-85, 2000.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Tradução: Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: RiMa, 2006. 531p.

LIMA, M. **Impactos das mudanças climáticas na agricultura**. Cadernos NAE 3, v. 1, p. 171-174, 2005.

LOOMIS, R. S.; AMTHOR, J. S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Science**, v.39, p.1548-1596, 1999.

LUO, Q.; BELLOTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.132, p. 273-285, 2005.

MATOS, J. W. **Análise Crítica do Programa de Melhoramento Genético do Feijoeiro da UFLA no Período de 1974 a 2004**. 2005. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

MCCREE, K. J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v.14, p.509-514, 1974.

MEARNS, L. O.; ROSENZWEIG, C.; GOLDBERG, R. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. **Climate Change**, v. 35, p. 367–396, 1997.

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

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v.281, p.227-294, 1977.

MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. **Journal of Botany**, London, v.14, p.22-52, 1953.

OERKE, E. C.; DEHNE, H. W. Global crop production and the efficacy of crop protection-current situation and future trends. **European Journal of Plant Pathology**. v.103, p. 203–215, 1997.

PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISCHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v.14, p.53-67, 2004.

PENNING DE VRIES, F. T. W. ; JANSEN, D. M. ; TEN BERGE, H. F. M.; BAKEMA, A. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271p.

PENNING DE VRIES, F. T. W. The cost of maintenance processes in plant cells. **Annals of Botany**. Wageningen, v.39, p.77-92, 1975.

PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n.6, p.1313-1330, 1991.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JR, C.; BARNI, N. A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I. A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1017-1023, 2003.

RICHTER, G. M.; SEMENOV, M. A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v. 84, p. 77-97, 2005.

ROMANO, M. R. **Desempenho fisiológico da cultura de milho com plantas de arquitetura contrastante: parâmetros para modelos de crescimento**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

STEVEN, M. D.; BISCOE, P. V.; JAGGARD, K. W. Estimation of sugar beet production from reflection in the red and infrared spectral bands. **International Journal of Remote Sensing**, v.4, p.325-334, 1983.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Tradução: Romanato Santarém [*et.al*]. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 199-219.

THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. **Plant and crop modelling: A mathematical approach to plant and crop physiology**. New York: Oxford University Press, 1990. 669 p.

THORNLEY, J. H. M. **Mathematical models in plant physiology: A quantitative approach to problems in plant crop physiology**. London: Academic Press, 1976. 318 p.

TISOT, D. A. **Produtividade de grãos e variação temporal de fitomassa seca da cultura de feijão em função de doses de nitrogênio**. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

TOJO SOLER, C. M. **Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho “safrinha”**. 2004. 146 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

TUBIELLO, F. N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179–189, 2000.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. 449 p.

YANG, H. S.; DOBERMANN, A.; LINDQUIST, J. L.; WALTERS, D. T.; ARKEBAUER, T. J.; CASSMAN, K. G. Hybrid-maize – a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. **Field Crops Research**, v.87, p.131-154, 2004.

YOKOYAMA, L. P.; KOSSEP, B.; KLUTHCOUSKI, J. Aspectos socioeconômicos da cultura. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F. & ZIMMERMANN, M.J. de O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafós, 1996, p.1-21.

WOLSCHICK, D. **Modelo SIMASS-C: inclusão da modelagem do crescimento e desenvolvimento do milho**. 2004. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

ZHANG, X. C.; LIU, W. Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p.127-142, 2005.