

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE  
TUBÉRCULOS DE BATATA EM CENÁRIOS DE  
MUDANÇA CLIMÁTICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Joelma Dutra Fagundes**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2010**

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE TUBÉRCULOS DE BATATA  
EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

**por**

**Joelma Dutra Fagundes**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, da Universidade  
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do  
grau de **Doutor em Agronomia**

**Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**Fagundes, Joelma Dutra, 1982-**

**F156s**

Simulação da produtividade de tubérculos de batata em cenários de mudança climática / Joelma Dutra Fagundes. - 2010.

102 f. ; il.

*Solanum tuberosum* L.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2010.

“Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck”

1. Agronomia 2. Aquecimento global 3. Previsão climática 4. Segurança alimentar 5. *Solanum tuberosum* L. I. Streck, Nereu Augusto II. Título

CDU: 633.491

Ficha catalográfica elaborada por  
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia  
Departamento de Fitotecnia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE TUBÉRCULOS DE BATATA  
EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

elaborada por  
**Joelma Dutra Fagundes**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Agronomia**

**Comissão Examinadora:**

---

**Nereu Augusto Streck, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)**

---

**Sandro Luís Petter Medeiros, Dr. (IFC - Sombrio)**

---

**Luciano Streck, Dr. (UERGS)**

---

**Genei Antonio Dalmago, Dr. (EMBRAPA)**

**Santa Maria, Fevereiro 2010.**

Aos meus pais Adelino Oliveira Fagundes e Joarda Dutra Fagundes, a minha irmã Jéssica Dutra Fagundes e ao Luís Paulo Kanaan de Oliveira.

**Dedico...**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me acompanhado durante toda a minha caminhada.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do Doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, professor Nereu Augusto Streck, pela confiança, conhecimentos transmitidos, amizade e incentivo.

Aos professores Arno Bernardo Heldwein, Dilson Antonio Bisognin e Sandro Luís Peter de Medeiros pela co-orientação, ensinamentos, incentivo e amizade.

Ao professor Cleber Maus Alberto pelo grande auxílio e colaboração durante a elaboração deste trabalho.

Ao pesquisador Zilmar da Silva Souza da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) pela colaboração e ensinamentos durante este trabalho.

A professora Lia Rejane Silveira Reiniger pela grande amizade e carinho a mim dedicados.

Aos meus colegas e amigos do Instituto Biotecnológico de Reprodução Vegetal - INTEC pelos ensinamentos transmitidos e pelos exemplos de conduta pessoal e profissional.

Aos colegas e amigos Anderson, Gizelli, Hamilton, Lidiane, Joana e Isabel pela amizade, carinho e companheirismo.

Ao Alencar e Ana Paula que me ajudaram e trabalharam muito durante a elaboração deste trabalho.

A minha família, que são meus exemplos de conduta, força, amor e dignidade, por tudo que fizeram e fazem por mim.

Ao meu namorado Lipa, por todo apoio, carinho, compreensão e incentivo.

As minhas grandes amigas Clarisse, Carine, Juliara, Kátia, Prescilla, Priscila e Taiane, minha segunda família, pelos momentos de descontração e muita felicidade.

A todos os amigos do Departamento de Fitotecnia pela pelo carinho e amizade.

E a todos aqueles que uma forma ou outra contribuíram para realização desta tese de Doutorado.

## RESUMO

Tese de Doutorado

**Programa de Pós-Graduação em Agronomia**

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE TUBÉRCULOS DE BATATA EM CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

AUTORA: Joelma Dutra Fagundes

ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Local e data da defesa: Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2010.

A batata (*Solanum tuberosum* L.), família Solanaceae, ocupa o quarto lugar em quantidade de produção de alimentos, sendo superada apenas pelo trigo, arroz e milho. O Brasil possui elevado potencial edafoclimático para o cultivo da batata, mas devido às possíveis mudanças no clima global e regional esta cultura poderá ser afetada no futuro. Esta tese teve como objetivos: calibrar para Santa Maria-RS e avaliar modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria-RS (clima subtropical) e São Joaquim-SC (clima temperado) e avaliar a produtividade de tubérculos de batata em cenários com aumento da concentração de dióxido de carbono e da temperatura em Santa Maria, RS, em diferentes datas de plantio, considerando aumento simétrico e assimétrico na temperatura mínima e máxima diária do ar. Foram avaliados seis modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata e a estatística utilizada para avaliar o desempenho dos modelos foi a da raiz do quadrado médio do erro (RQME). Para verificar o efeito da mudança climática na produtividade de tubérculos de batata foi utilizado um dos modelos avaliados (SPITTERS, 1987). Sete cenários climáticos (0°C, 1°C, 2°C, 3°C, 4°C, 5°C e 6°C) para os próximos 100 anos foram gerados com o aplicativo computacional Weather Generator LARS-WG usando-se como base a série de dados meteorológicos observados de 1969 a 2003 em Santa Maria, RS. A produtividade de tubérculos de batata foi simulada ao longo dos 100 anos de cada cenário climático em várias datas de plantio no cultivo de primavera e no cultivo de outono. Os modelos com os coeficientes originais apresentaram desempenho semelhante na simulação da produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria e São Joaquim. Os modelos que melhor simulam a produtividade de tubérculos de batata são os modelos de Hartz; Moore, Johnson e Pereira. Após a calibração dos modelos por ajuste dos coeficientes, o modelo de Sands é o que melhor prediz a produtividade de tubérculos de batata, seguido pelos modelos de Pereira e MacKerron; Waister. Para os cultivos de primavera, um aumento simétrico na temperatura do ar a partir de 4°C e assimétrico a partir de 5°C (temperatura mínima 6°C e temperatura máxima 4°C) anulou o efeito benéfico do aumento da concentração de dióxido de carbono. Para os cultivos de outono, o aumento da temperatura do ar praticamente não afeta a produtividade de tubérculos de batata. A antecipação de 14 dias na data de emergência no cultivo de primavera e o atraso de sete dias na data de emergência no cultivo de outono diminui o impacto negativo do aumento da temperatura do ar na produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria, RS.

**Palavras-chaves:** aquecimento global; previsão climática; segurança alimentar; *Solanum tuberosum* L.

**ABSTRACT**  
Doctoral Thesis  
**Graduate Program in Agronomy**  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

SIMULATING POTATO TUBER YIELD IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS

AUTHOR: Joelma Dutra Fagundes

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Location and date of presentation: Santa Maria, February 25<sup>th</sup>, 2010.

Potato (*Solanum tuberosum* L.), Solanaceae, is ranked fourth in food amount production, exceeded only by wheat, rice and corn. Brazil has potential in climate and soil for growing potatoes, but with a growing concern of society with possible changes in global and regional climate because of anthropogenic increase in greenhouse gases, this crop may be affected in the future. This study had the following objectives: to calibrate for Santa Maria and evaluate simulation models of potato tuber yield for Santa Maria (subtropical climate and São Joaquim (temperate climate), and evaluate the potato tuber yield in scenarios with increasing concentration of carbon dioxide and temperature in Santa Maria, RS, in different sowing dates, considering symmetric and asymmetric increase in minimum and maximum daily air temperature. We evaluated six simulation models of potato tuber yield and the statistics used to evaluate the performance of the models was the root mean square error (RQME). In order to evaluate the effect of climate change on potato tuber yield, one of the six evaluated models (SPITTERS, 1987) was used. Seven climate scenarios (0°C, 1°C, 2°C, 3°C, 4°C, 5°C to 6°C) for the next 100 years were generated with the Weather Generator LARS-WG using as base series observed meteorological data from 1969 to 2003 in Santa Maria, RS. Potato tuber yield was simulated throughout the 100-year period of each climate scenario in several planting dates for the Spring and Fall growing seasons. Models with the original coefficients showed similar performance in the simulation of tuber yield in Santa Maria and São Joaquim. The models of Hartz; Moore, Johnson, and Pereira simulated better the potato tuber yield. After calibration, the Sands. model was the one that best predicted the potato tuber yield, followed by the models of Pereira and MacKerron; Waister. For the Spring growing season, a symmetrical increase in temperature of 4°C and an asymmetrical increase of 5°C offset the beneficial effect of increasing concentration of carbon dioxide. For the Fall growing season, the increase in temperature affected little the potato tuber yield. An anticipation of 14 days in the emergence date in the Spring growing season and a delay of seven days in emergence date in the Fall growing season decrease the negative impact of increased air temperature on the tuber yield of potato grown in Santa Maria, RS.

**Key words:** global warming; climate prediction; food security; *Solanum tuberosum* L.

## LISTA DE TABELAS

### INTRODUÇÃO

TABELA 1 - Produção de batata por região do Globo em 2007. ....	18
TABELA 2 - Produção mundial de batata (milhões de toneladas) de 1991 a 2007.....	18
TABELA 3 - Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) de batata no Rio Grande do Sul no período de 2000 a 2007. ....	19

### CAPÍTULO I

TABELA 1- Raiz do quadrado médio do erro (RQME, $t\ ha^{-1}$ ) da produtividade de tubérculos de várias cultivares de batata nos anos agrícolas 2000-01, 2002-03, 2003-04, 2004-05 e 2005-06 em São Joaquim, SC, simulada com os coeficientes originais dos seis modelos.....	43
TABELA 2 - Coeficientes dos modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata ajustados para cultivar Asterix. ....	43

### CAPÍTULO II

TABELA 1 - Cenários de aumento na concentração de $CO_2$ e de temperatura do ar com aumento simétrico (3s a 8s) e assimétrico (3as a 8as) na temperatura mínima e máxima diária usados no estudo.....	66
---	----

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

FIGURA 1 - Produtividade de tubérculos simulada versus observada de várias cultivares de batata indicadas na legenda nos anos agrícolas 2000-01 (a, b, c, d, e, f) e 2002-03 (g, h, i, f, l, m) em São Joaquim-SC, com os coeficientes originais dos seis modelos. RQME = raiz do quadrado médio do erro. A linha diagonal é a linha 1:1.....45

FIGURA 2 - Produtividade de tubérculos simulada versus observada de várias cultivares de batata indicadas na legenda nos anos agrícolas 2003-04 (a, b, c, d, e, f), 2004-05 (g, h, i, f, l, m) e 2005-06 (n, o, p, q, r, s) em São Joaquim-SC, com os coeficientes originais dos seis modelos. RQME = raiz do quadrado médio do erro. A linha diagonal é a linha 1:1. ....46

FIGURA 3 - Produtividade de tubérculos simulada versus observada da cultivar Asterix em sete datas de plantio (21/01/2003, 12/02/03, 24/12/03, 28/01/2004, 27/02/04, 26/03/04 e 26/04/04) em Santa Maria, RS, com os coeficientes originais (a, b, c, d, e, f) e coeficientes ajustados (g, h, i, j, l, m). RQME = raiz do quadrado médio do erro. A linha diagonal é a linha 1:1. ....47

### CAPÍTULO II

FIGURA 1 - Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) e desvios da produtividade de tubérculos de batata ( $t\ ha^{-1}$ ) em relação ao cenário climático atual sem mudança climática (cenário 1 da Tabela 1) nas datas de emergência para os cultivos de primavera - 01/09 (A, B) e outono 22/02 (C, D) em cenários de mudança climática com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar, Santa Maria, RS. As barras de erro representam um desvio padrão da média de 100 anos da produtividade simulada em cada cenário descrito na Tabela 1.....67

FIGURA 2 - Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) e desvios da produtividade de tubérculos de batata ( $t\ ha^{-1}$ ) em duas datas de emergência anteriores 18/08 e 25/08 (A, B, C, D) e posteriores 08/09 e 15/09 (E, F, G, H) à data de emergência 01/09 na Figura 1A e 1B no cultivo de primavera em cenários de mudança climática com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima

e máxima diárias do ar, Santa Maria, RS. As barras de erro representam um desvio padrão da média de 100 anos da produtividade simulada em cada cenário descrito na Tabela 1..... 68

FIGURA 3 - Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) e desvios da produtividade de tubérculos de batata ( $t\ ha^{-1}$ ) em duas datas de emergência anteriores 08/02 e 15/02 (A, B, C, D) e posteriores 01/03 e 08/03 (E, F, G, H) à data de emergência 22/02 usada na Figura 1C e 1D no cultivo de outono em cenários de mudança climática com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar, Santa Maria, RS. As barras de erro representam um desvio padrão da média de 100 anos da produtividade simulada em cada cenário descrito na Tabela 1. .... 69

## APÊNDICE

FIGURA 1 - Análise de sensibilidade do modelo de Hartz; Moore (1978) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação dos coeficientes da equação linear polinomial  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \xi$ . .... 98

FIGURA 2 - Análise de sensibilidade do modelo de Sands et al. (1979) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação dos coeficientes  $k$  (escala para medir a taxa de acumulação no tempo (A)),  $P_{tg}$  (tempo da emergência até o começo do crescimento de tubérculos (B)),  $P_{mb}$  (tempo da emergência até a taxa máxima de enchimento de tubérculos (C)) e  $b_w$  (denominador no cálculo de  $w$  (déficit máximo de água no solo permitido pela irrigação durante o enchimento de tubérculos) (D)). .... 99

FIGURA 3 - Análise de sensibilidade do modelo de MacKerron; Waister (1985) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação do coeficiente  $T$  (partição de matéria seca para tubérculos). .... 100

FIGURA 4 - Análise de sensibilidade do modelo de Johnson et al. (1986) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação dos coeficientes  $K1$  (constante que assemelha-se a metade da saturação da resposta na equação de Michaelis-Menten (A)),  $k_2$  a  $k_6$  (parâmetros de partição determinados empiricamente (B a F)), STEM, ROOT e TUBER (representam os órgãos da planta (G, H e I)). .... 101

FIGURA 5 - Análise de sensibilidade do modelo de Spitters (1987) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade tubérculos de batata em função dos coeficientes  $r$  (refletividade (A)), EUR (eficiência de uso da radiação (B)),  $f_o$  (capacidade inicial de interceptação pela planta (C)),  $R_o$  (taxa de crescimento relativo inicial (D)),  $s$  (declividade inicial da curva de crescimento (E)),  $i$  (início do enchimento de tubérculos (F)) e  $m$  (caracterização do ciclo (G)). ..... 102

FIGURA 6 - Análise de sensibilidade do coeficiente do modelo de Pereira et al. (2008) com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função dos coeficientes  $CDA_{max}$  taxa máxima de assimilação de dióxido de carbono (A), IAF é o índice de área foliar (B), HI é o índice de colheita (C) e  $C(T)$  é o fator de correção da respiração de manutenção (D). ..... 103

## LISTA DE ANEXO

ANEXO A - Modelo de Hartz; Moore (1978). .....	88
ANEXO B - Modelo de Sands et al. (1979). .....	89
ANEXO C - Modelo de MacKerron; Waister (1985). .....	90
ANEXO D - Modelo de Johnson et al. (1986). .....	90
ANEXO E - Modelo de Spitters (1987). .....	93
ANEXO F - Modelo de Pereira et al. (2008).....	95

## LISTA DE APÊNDICE

APÊNDICE A - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Hartz; Moore (1978). .....	98
APÊNDICE B - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Sands et al. (1979). .	99
APÊNDICE C - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de MacKerron; Waister (1985).....	100
APÊNDICE D - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Johnson et al. (1986). .....	101
APÊNDICE E- Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Spitters (1987). .....	102
APÊNDICE F - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Pereira et al. (2008). .....	103

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>2.1 Cultura da batata</b> .....	17
<b>2.2 Modelos de simulação da produtividade de cultura agrícolas</b> .....	19
<b>2.3 Aquecimento global</b> .....	20
<b>2.4 Mudança climática e a cultura da batata</b> .....	24
<b>3 CAPÍTULO I Simulação da produtividade de tubérculos de batata em clima subtropical e temperado</b> .....	28
<b>Introdução</b> .....	30
<b>Material e Métodos</b> .....	32
<b>Resultados e Discussão</b> .....	36
<b>Conclusões</b> .....	39
<b>Referências</b> .....	40
<b>4 CAPÍTULO II Produtividade de tubérculos de batata em cenários de mudança de temperatura e CO<sub>2</sub> em Santa Maria, RS</b> .....	48
<b>Introdução</b> .....	50
<b>Material e Métodos</b> .....	52
<b>Resultados e Discussão</b> .....	56
<b>Conclusões</b> .....	61
<b>Referências</b> .....	61
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	70
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	73
<b>7 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	74
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	75
<b>ANEXO</b> .....	87
<b>APÊNDICE</b> .....	97

# 1 INTRODUÇÃO

A batata (*Solanum tuberosum* L.), família Solanaceae, ocupa o quarto lugar em quantidade de produção de alimentos, sendo superada apenas pelo trigo, arroz e milho (HAWKES, 1994; NYENDE et al., 2005). A produção mundial de batata, em 2004 atingiu o total de 328,9 milhões de toneladas em uma área de 19,1 milhões de hectares (MULLINS et al., 2006). O cultivo da batata é realizado em aproximadamente 125 países, onde mais de um bilhão de pessoas a consomem diariamente em todo o mundo (MULLINS et al., 2006). A produção da batata no Brasil concentra-se nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, que representam 87,1% da área total cultivada no Brasil (140 mil ha), porém, Goiás e Bahia destacam-se pela elevada produtividade de 40,1 t ha<sup>-1</sup> e 39,1 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, comparado com a produtividade média do Brasil na safra 2006-2007 de 23,7 t ha<sup>-1</sup> (IBGE, 2009). Como pode ser observado o Brasil possui elevado potencial edafoclimático para o cultivo da batata sendo a temperatura e o fotoperíodo os dois principais fatores abióticos que governam o seu desenvolvimento (LEVY; KEDAR, 1985).

Desenvolvimento e crescimento de plantas são processos que podem ocorrer simultaneamente ou não. Desenvolvimento refere-se à diferenciação celular e iniciação de órgãos, enquanto que crescimento refere-se ao aumento irreversível de massa, área, volume, altura, comprimento ou diâmetro de órgãos (HODGES, 1991). A produtividade é o resultado dos processos de crescimento e desenvolvimento durante o ciclo da cultura. Logo, os modelos de simulação da produtividade de uma cultura são constituídos de sub-modelos de crescimento e desenvolvimento.

Os modelos de simulação e previsão da produtividade de culturas permitem fazer simulações em longo prazo, a um baixo custo, utilizando uma série de dados de produtividade e dados meteorológicos disponíveis para um determinado local. De acordo com Thornley (1976), inúmeras vantagens podem ser conseguidas com o uso de modelos bem elaborados, considerando que os mesmos devem resumir, convenientemente, uma gama de informações, o que permite progressos no conhecimento da planta e suas interações com o ambiente, além de esclarecer pontos em que o conhecimento seja limitado. Em estudos dos efeitos de possíveis mudanças no clima global e regional sobre as atividades agrícolas, os modelos matemáticos ajudam a entender como a produtividade das culturas seria afetada por tais mudanças. Sendo assim, em estudos de impactos da mudança climática sobre os agroecossistemas, deve-se dar especial atenção ao efeito do aumento de temperatura (aquecimento global) no

desenvolvimento vegetal e assim caracterizar mudanças no desenvolvimento e, conseqüentemente, produtividade das culturas em diferentes cenários meteorológicos.

Esses estudos são difíceis de serem realizados experimentalmente, devido à limitação de mão-de-obra e recursos financeiros (ANDRESEN et al., 2001). Dessa forma, os modelos matemáticos são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta/cultura e o ambiente, e podem ser usados em estudos do impacto da mudança climática em agroecossistemas.

Em estudo numérico Streck et al. (2006) simularam o desenvolvimento da batata, cv. Asterix, em vários cenários de mudança climática para Santa Maria, RS, verificando que o aumento da temperatura do ar de 2°C é suficiente para modificar a duração de algumas fases de desenvolvimento da batata. No entanto, não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que indicasse qual o impacto da mudança climática na produtividade de tubérculos de batata nas condições brasileiras, o que constituiu o incentivo para realizar este esforço científico. Esta tese teve os seguintes objetivos:

1. Calibrar para Santa Maria, RS e avaliar modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria, RS (clima subtropical) e São Joaquim, SC (clima temperado).
2. Avaliar a produtividade de tubérculos de batata em cenários com aumento da concentração de dióxido de carbono e da temperatura em Santa Maria, RS, em diferentes datas de plantio, considerando aumento simétrico e assimétrico na temperatura mínima e máxima diária do ar.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Cultura da batata**

A história da cultura da batata começou nos Andes onde plantas silvestres, encontradas em abundância em torno do lago Titicaca, começaram a ser domesticadas por comunidades de caçadores/coletores que habitaram o continente Sul (POTATO, 2008).

Em 1532, a invasão Espanhola acabou com a civilização Inca, mas este fato não acabou com o cultivo da batata, que foi levada para Europa, de onde seguiu para Roma, Viena e há evidências de que, em 1597, havia cultivos de batata em Londres, França e Holanda; posteriormente, no início do século XVII, a batata chegou à Índia, China e Japão e no início do século XVIII se expandiu pelo o hemisfério Norte. Durante as guerras napoleônicas a batata tornou-se reserva alimentar da Europa e em 1815 já era tida como a principal fonte alimentar no norte da Europa (POTATO, 2008).

Durante a revolução industrial houve grande deslocamento da população da zona rural para a urbana, o que fez com que a cultura da batata tivesse ainda mais destaque, dada sua versatilidade gastronômica e valor nutricional (POTATO, 2008). Porém, alguns problemas com o cultivo foram encontrados. A suscetibilidade da batata a pragas e doenças fez com a busca por variedades mais resistentes, principalmente a requeima, fosse mais intensa. Os produtores da Europa e da América do Norte, com um novo germoplasma importado do Chile, produziram muitas das variedades modernas que tornaram-se as bases da grande produção de batata em ambas as regiões durante a maior parte do século XX (POTATO, 2008). A partir de 1990 houve um crescimento exponencial na produção e demanda de batata em diversos países no mundo. A produção aumentou de menos de 30 milhões de toneladas no início de 1960, nos países em desenvolvimento, para mais de 165 milhões de toneladas em 2007, tornando-se um alimento verdadeiramente global (Tabela 1) e em 2005, pela primeira vez, a produção de batata no mundo em desenvolvimento superou a do mundo desenvolvido (Tabela 2).

Tabela 1 - Produção de batata por região do Globo em 2007.

Ano	Área (ha)	Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )
África	1,5	10,8
Ásia e Oceania	8,7	15,7
Europa	7,5	17,4
América Latina	0,9	16,3
América do Norte	0,6	41,2
Mundo	19,3	16,8

Fonte: POTATO (2009).

Tabela 2 - Produção mundial de batata (milhões de toneladas) de 1991 a 2007.

Anos	Países		
	Desenvolvidos	Em desenvolvimento	Mundo
1991	183,1	84,7	267,9
1993	199,3	101,9	301,3
1995	177,5	108,5	285,9
1997	174,6	128,7	303,4
1999	165,9	135,2	301,1
2001	166,9	145,9	312,9
2003	160,9	152,1	313,1
2005	159,9	160,0	319,9
2007	159,9	165,4	325,3

Fonte: POTATO (2009).

No Rio Grande do Sul, existem três importantes regiões produtoras de batata concentradas nas Regiões Sul, Central e Norte/Nordeste do Estado (BISOGNIN, 1996) que mesmo com aumento na produtividade na ordem de 123%, manteve-se muito abaixo da média nacional (23,7 t ha<sup>-1</sup>), como pode ser observado na Tabela 3. Em Santa Maria, RS que apresenta clima Cfa (subtropical úmido com verão quente) pela classificação de KÖPPEN, existem duas épocas recomendadas para o cultivo da batata, o cultivo de primavera, também chamado de cultivo da “safra”, com plantios de agosto a outubro e o cultivo de outono,

também chamado de cultivo da “safrinha”, com plantios de janeiro a março (BISOGNIN, 1996) e na região de São Joaquim, SC, que apresenta clima Cfb (temperado úmido com verão temperado) é realizado apenas um cultivo anual, com plantio de outubro a abril (SOUZA, 2004).

Tabela 3 - Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) de batata no Rio Grande do Sul no período de 2000 a 2007.

Ano	Área ( $ha^{-1}$ )	Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ )
2000	39,4	9,9
2001	37,1	10,4
2002	35,9	10,7
2003	29,5	10,6
2004	25,9	11,4
2005	23,6	12,0
2006	24,1	13,8
2007	19,6	19,7

Fonte: IBGE (2009).

## 2.2 Modelos de simulação da produtividade de cultura agrícolas

A arte de simular é tão antiga quanto o homem. Desde a origem da civilização, o homem teve que lutar para sobreviver, utilizando, mesmo que inconscientemente, as simulações de processos futuros. As simulações são realizadas através da utilização de modelos matemáticos, que podem ser definidos como uma simplificação da realidade, onde as complexas interações entre e dentro dos agroecossistemas são descritas por funções matemáticas com diferentes coeficientes e complexidades (desde equações empíricas até equações diferenciais e integrais). Neste sentido, quando um agroecossistema é representado matematicamente por equações, temos um modelo matemático, que permite definir quantitativamente hipóteses sobre o sistema real, permitindo deduzir suas conseqüências (DOURADO-NETO et al., 1998). Os modelos matemáticos permitem fazer simulações que incluem processos necessários para operacionalização do modelo ou a solução do modelo visando simular o que acontece no sistema (de WIT, 1978).

Os modelos matemáticos podem ser classificados em modelos empíricos e modelos mecanísticos (ACOCK; ACOCK, 1991). Os modelos empíricos descrevem as relações entre as variáveis sem se referir ou se importar com as relações de causa/efeito entre as variáveis que compõem o sistema. Já os modelos mecanísticos descrevem as relações e as interações entre as variáveis que compõem o sistema através dos mecanismos (físicos, químicos e/ou biológicos) envolvidos nos diferentes processos. Neste sentido, em um modelo mecanístico de crescimento vegetal descreve-se a resposta da planta com base no conhecimento dos processos que estão ocorrendo em seu crescimento e desenvolvimento, enquanto que em um modelo empírico descreve-se o comportamento da planta com base em observações diretas dos processos (DOURADO-NETO et al., 1998).

A utilização de modelos matemáticos implica em algumas vantagens em relação a experimentos realizados a campo como, por exemplo, baixo custo, velocidade de obtenção dos resultados, criação e proposição de cenários ideais (PESSOA et al., 1997). Porém, também existem algumas limitações como aspectos referentes à validação dos modelos, à dificuldade de decisão do problema, quando o problema possui mais de uma solução, a confiabilidade e exatidão do modelo empregado, ao custo de obtenção dos dados e a variabilidade temporal dos dados e sua qualidade (ASSIS et al., 2006).

Os modelos podem ser utilizados para diversas finalidades como, por exemplo, simulações do desenvolvimento, crescimento e produtividade das culturas, assim como, serem utilizados em estudos de impacto da mudança climática na agricultura. Segundo Rimmington; Charles-Edwards (1987), os modelos matemáticos podem ter três usos importantes: (I) aumentar a compreensão das culturas em respostas a determinados fatores de modo a fornecer orientação para pesquisa; (II) simulação do desenvolvimento, crescimento e produtividade das culturas como um auxílio para o ensino e aprendizagem e (III) previsão da resposta das plantas a certas condições climáticas, como um instrumento de gestão e tomada de decisão.

### **2.3 Aquecimento global**

Parece haver um crescente consenso na comunidade científica que o clima terrestre está mudando e que a temperatura do ar está aumentando em muitas regiões do Planeta devido ao aumento da concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases do efeito estufa (IPCC, 2001; WEISS et al., 2003; KERR, 2005). A concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera

terrestre está aumentando a uma taxa de 0,4-0,5% ano<sup>-1</sup> (IPCC, 1995; SOMBROEK; GOMES, 1996), o que corresponde a um aumento de 1,0-1,8  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IPCC, 1995; UNSWORTH; HOGSETT, 1996). Como resultado do aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico, assume-se que está aumentando o efeito estufa da atmosfera terrestre, podendo levar ao aquecimento global (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 1995).

Estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM - General Circulation Models) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1°C a 6°C na temperatura média do ar até o final deste século em vários locais do Planeta (IPCC, 1995; MAHLMAN, 1997; IPCC, 2001), incluindo o Brasil (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001; ASSAD et al., 2004). Outros elementos meteorológicos como precipitação, nebulosidade, radiação solar incidente e evaporação apresentam tendências variáveis em função da escala (global ou regional) em que as séries meteorológicas são analisadas e os modelos são aplicados (HULME et al., 1994; THOMAS, 2000).

Sendo assim, nos últimos anos tem crescido a preocupação da sociedade e do meio científico com uma possível mudança no clima global, aumentando as incertezas com relação à produção de alimentos no mundo (REDDY; HODGES, 2000). A comunidade científica encontra-se dividida em dois grupos: o grupo que entende que a mudança climática é inevitável, e o grupo que não acredita na mudança climática devido ao aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  antropogênico. Esse último grupo baseia seus argumentos no fato de que o aumento de temperatura possa ser devido ao ciclo natural de aquecimento terrestre, sendo assim, o aumento de  $\text{CO}_2$  seria uma consequência e não a causa do aquecimento global (TABEAUD, 2007). Apesar dessa divisão da comunidade científica parece haver consenso entre os dois grupos de que o Planeta está passando por um período de aquecimento. Existem registros que mostram que durante o século XX houve um aumento da temperatura média da superfície global de  $0,6 \pm 0,2$  °C, sendo que a década de 90 foi considerada a mais quente do último milênio (KERR, 2005; IPCC, 2007).

O aumento da concentração atmosférica dos gases do efeito estufa (exceto o vapor d'água) nas últimas décadas devido, principalmente, às atividades antrópicas, tem sido apontado como a principal causa do aquecimento global. Dentre os gases responsáveis pelo efeito estufa, o  $\text{CO}_2$ , o  $\text{CH}_4$  (metano) e o  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso), recebem principal atenção devido a grande emissão pelo homem no uso de combustíveis fósseis, queimadas e agricultura (MEARNS, 2000; IPCC, 2007).

O  $\text{CO}_2$  é o mais abundante gás de efeito estufa, sendo considerado o principal responsável pelo aquecimento global. A concentração de  $\text{CO}_2$  aumentou de aproximadamente

280 partes por milhão por volume (ppmv) no período pré-industrial para a atual concentração de 380 ppmv, com uma taxa de aumento de 1,6 ppmv por ano (MEARNS, 2000; IPCC, 2007).

Existem projeções de que a concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico irá duplicar em algum momento deste século, podendo provocar um aumento na temperatura média do ar do Planeta, devido ao efeito estufa do CO<sub>2</sub> atmosférico (STRECK, 2005; IPCC, 2007). Ainda não há unanimidade no valor do aumento da temperatura global devido ao aumento da concentração do CO<sub>2</sub>. No entanto, alguns estudos indicam um provável aumento de 1,1°C a 6,4°C na temperatura média global do ar até o final do século XXI, dependendo da região do Planeta (MAHLMAN, 1997; IPCC, 2007).

Em diferentes locais do Planeta tem sido verificado que a temperatura mínima e máxima do ar não estão aumentando simetricamente, mas sim de maneira assimétrica. A assimetria no aumento da temperatura ocorre devido aos aumentos na temperatura mínima serem maiores do que os aumentos na temperatura máxima do ar (KARL, et al., 1991; IPCC, 2007). No Rio Grande do Sul, em um período de 100 anos, foram observados aumentos da temperatura mínima média trimestral variando 1,2°C a 2,8°C, conforme o trimestre (MEZZOMO, 2005). Aumento da temperatura mínima média anual de 1°C, no período de 1893 a 2004, e de 1,7°C no período de 1955 a 2004 foram observados na Região de Pelotas, RS (STEINMETZ et al., 2005), o que significa que o maior aumento ocorreu nos últimos 5 anos. Ainda no Rio Grande do Sul, Marques et al. (2005) observaram que no trimestre de outubro a dezembro, considerando o período de 1948 a 2004, houve uma tendência de aumento da temperatura mínima crescente no sentido leste-oeste, variando de 0,8°C a 1,8°C. Os menores valores de acréscimo encontram-se no Litoral e os maiores situam-se numa faixa que engloba partes das regiões Depressão Central, Missioneira de Santo Ângelo, São Luiz Gonzaga, Baixo Vale do Uruguai de São Borja, Itaqui e Campanha. As demais regiões apresentam valores intermediários. Na região de Passo Fundo, RS, o aumento observado na temperatura média foi atribuído a elevação da temperatura mínima anual (Embrapa - Trigo, 2007).

Fora do RS, em Piracicaba, SP, diferenças entre as médias mensais de temperatura mínima, do período de 1989 a 2003 e 1917 a 1988, evidenciaram aumentos de cerca de 1°C na temperatura mínima do ar (SALATI et al., 2007). Peng et al. (2004) analisando dados de temperatura do ar do período de 1979 a 2003, nas Filipinas, observaram que o aumento da temperatura máxima média anual foi de 0,35°C, enquanto que o aumento da temperatura mínima média anual foi de 1,1°C. Verificaram também que o incremento da mínima do ar foi

de 1,3°C na estação seca e de 0,8°C na estação de chuva, evidenciando efeito da nebulosidade e umidade do ar no processo. Em vários locais da China, no período de 1981 a 2000, a temperatura mínima aumentou mais do que a temperatura máxima do ar, sendo que a temperatura mínima do ar teve aumentos maiores no Norte e menores no Sul (TAO et al., 2008).

Considerando somente o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico se presume que a taxa de crescimento das plantas tende a aumentar, pois o CO<sub>2</sub> é o substrato primário para fotossíntese (ROSENBERG et al., 1983; TAIZ; ZEIGER, 2004). Plantas com metabolismo C<sub>3</sub> são mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico do que plantas com metabolismo C<sub>4</sub> (TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005), pois a atual concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente é insuficiente para saturar a enzima ribulose 1-5 bisfosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco) em plantas com tal metabolismo. Conseqüentemente, aumentando a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico ocorre uma redução na fotorrespiração das plantas C<sub>3</sub>, por promover a carboxilação e diminuir a oxigenação da enzima Rubisco (SAGE, 1994). Já as plantas C<sub>4</sub>, possuem a enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEP) que fixa o CO<sub>2</sub> nas células do mesófilo e o transporta na forma de um ácido de quatro carbonos para as células da bainha vascular, onde ocorre o Ciclo de Calvin, concentrando o CO<sub>2</sub> nesse local. Portanto as plantas C<sub>4</sub> respondem menos ao aumento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, do que as plantas C<sub>3</sub>, pois já possuem um mecanismo que aumenta a eficiência fotossintética (TAIZ; ZEIGER, 2004). Assim, em estudos de impacto de mudança climática sobre as culturas, deve-se considerar o grupo de metabolismo fotossintético a que a espécie pertence.

Em geral, estudos indicam que se a concentração de CO<sub>2</sub> dobrar em relação a concentração atual, deverá ocorrer um aumento médio de 30% e 10% na produtividade de culturas do grupo C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, respectivamente (ALLEN, 1979; CURE; ACOCK, 1986; KIMBALL, 1983a, b; IDSO et al., 1987; BAKER et al., 1989; CLIFFORD et al., 1993; RUDORFF et al., 1996; UNSWORTH; HOGSETT, 1996; USUDA; SHIMOGAWARA, 1998). No entanto, se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo (WIEGAND; CUELLAR, 1981; SIONIT et al., 1987; HUNT et al., 1991; BUTTERFIELD; MORISON, 1992; SHAYKEWICH, 1995, SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração (fotorespiração e fase escura da respiração) (ROSENBERG et al., 1983; LONG, 1991; VU et al., 1997; TAIZ; ZEIGER, 2004).

## 2.4 Mudança climática e a cultura da batata

O impacto da mudança climática sobre as culturas pode ser verificado através da realização de experimentos ou simulações matemáticas. O estudo do impacto da mudança climática através de experimentos é difícil de ser realizado devido, principalmente, a escassez de equipamentos, recursos financeiros e pessoal especializado (ANDRESEN et al., 2001). Neste sentido, os modelos matemáticos são uma alternativa viável, pois permitem fazer simulações de desenvolvimento, crescimento e produtividade das culturas com maior rapidez e a baixo custo.

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico pode influenciar o desenvolvimento, crescimento e produtividade das culturas. Assim, estudos com várias espécies mostram que uma elevada concentração de CO<sub>2</sub> pode levar ao aumento, a diminuição ou não ter efeito sobre o desenvolvimento das culturas (REEKIE; BAZZAZ, 1991). Miglietta et al.(1998), verificaram que o florescimento e a senescência das folhas é antecipado quando a concentração de CO<sub>2</sub> é elevada. Similarmente, Schapendonk et al. (2000) observaram que a senescência das folhas foi antecipada em plantas de batata quando dobrada a concentração de CO<sub>2</sub> em cultivares de batata de ciclo tardio, mas a concentração elevada de CO<sub>2</sub> não afetou a senescência das folhas em cultivares precoces.

A temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos que mais afeta a taxa de desenvolvimento da batata (HELDWEIN, et al., 2009). O efeito da temperatura nessa cultura depende da fase de desenvolvimento da planta, que nesse sentido se divide em três: o primeiro compreende o período de emergência até o início de tuberização; o segundo compreende o início da tuberização até o desenvolvimento inicial dos tubérculos; e o terceiro compreende o tempo de crescimento e amadurecimento dos tubérculos (SILVA, 2004). Para que ocorra a máxima taxa de desenvolvimento, a temperatura do ar deve estar entre 14°C e 22°C (MARINUS; BODLAENDER, 1975). Para Antunes; Fortes (1981), a temperatura média ótima para a cultura da batata está entre 10°C e 20°C, sendo que a faixa ideal para a formação de tubérculos e produção de matéria seca está entre 15°C e 20°C.

Altas temperaturas, acima da temperatura ótima, favorecem o crescimento da parte aérea em detrimento dos tubérculos, o que afeta a quantidade e qualidade da produção, devido ao atraso no início da tuberização e à manifestação de defeitos fisiológicos e deformações nos tubérculos, como embonecamento, coração oco, rachaduras e necroses (MENEZES et al.,

1999; VAN DAM et al., 1996; BISOGNIN; STRECK, 2009). A temperatura média ótima para o início da tuberização está entre 16°C e 18°C, sendo gradativamente menos favorável a medida que se aproxima dos limites de 6°C e 29°C (BISOGNIN; STRECK, 2009). Marinus; bodlaender (1975) estudaram oito cultivares de batata em três temperaturas (16°C, 22°C e 27°C) e um dos efeitos das altas temperaturas é a senescência mais rápida das folhas, com redução no enchimento de tubérculos pelo encurtamento do período de acúmulo de fotoassimilados. Temperatura do ar acima de 23°C retarda a fase de desenvolvimento da emergência ao início da tuberização devido, ao aumento da fase vegetativa o que ocasiona um atraso no início da tuberização (KOOMAN; RABBINGE, 1996).

Trabalhos de simulação através de modelos matemáticos mostraram resultados da cultura da batata diante do aumento de temperatura do ar, sendo essas projeções dependentes da fase de desenvolvimento e da época de cultivo. A fase do início da tuberização ao início da senescência é projetada aumentar com o aumento da temperatura do ar no cultivo de outono e diminuir no cultivo de primavera em cenários climáticos para Santa Maria, RS. A fase do início da senescência à colheita é projetada para diminuir em ambas as épocas de cultivo, mas no outono apenas se a temperatura do ar aumentar em 6°C (STRECK et. al., 2006).

Ocorrendo alterações na duração das fases de desenvolvimento da batata, poderá haver consequências no manejo da cultura. Por exemplo, se houver um aumento na duração do ciclo total devido ao aumento da temperatura do ar projetado para o cultivo de outono, poderá ter impacto negativo na qualidade dos tubérculos colhidos, pois a colheita sendo atrasada ocorreria em condições meteorológicas adversas, no inverno, quando a umidade do solo é elevada (STRECK et al., 2006). Se houver um alongamento, da fase emergência ao início da tuberização, mudaria a data de aplicação do nitrogênio em cobertura, a qual é recomendada no início da tuberização (LOPES; BUSO, 1997), especialmente no cultivo de outono.

Vários estudos relatam efeitos benéficos do aumento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre o crescimento das plantas, especialmente as C<sub>3</sub>, devido ao seu potencial de promover mudanças no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos das plantas. Com o aumento na concentração de CO<sub>2</sub>, ocorre um aumento significativo na taxa fotossintética e uma diminuição na taxa de transpiração por unidade de área foliar e, conseqüentemente, uma melhor eficiência de uso da água, favorecendo uma maior produção de fotoassimilados (FLEISHER et al., 2006). No entanto, se houver aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e da temperatura do ar, poderá haver redução no crescimento das culturas podendo diminuir a produtividade, devido ao encurtamento do ciclo (BUTTERFIELD; MORISON, 1992) e ao aumento da fotorrespiração (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Experimentos realizados com a cultura da batata revelaram que o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> tem pouco efeito na produção de biomassa acima do solo, porém, abaixo dele, a biomassa aumenta, consideravelmente, devido ser produzido um maior número de tubérculos e de tamanho maior (CIB, 2008). Nesse sentido, Conn; Cochran (2006), também constataram que com o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> a biomassa alocada para as hastes, folhas e flores diminuiu, enquanto que a alocada para os tubérculos aumentou. Além disso, a relação raiz/parte aérea aumentou e a porcentagem de nitrogênio nas folhas diminuiu 12,6% (CONN; COCHRAN, 2006). A elevada concentração de CO<sub>2</sub> pode diminuir a estatura de planta, o número de folhas (HACOUR et al., 2002) e o conteúdo de clorofila, o que acelera a senescência (BINDI et al., 2002). Esse efeito do CO<sub>2</sub> na redução do conteúdo da clorofila é considerado negativo e pode ser explicado pelos elevados níveis de CO<sub>2</sub>, que promovem acúmulo de amido nos cloroplastos (BINDI et al., 2002).

A batata é muito sensível a variações da temperatura do ar. A temperatura ótima para a fotossíntese é em torno de 24°C e a taxa fotossintética reduz rapidamente com a diminuição da temperatura do ar (WOLF et al., 1990; TIMLIN et al., 2006). Em altas temperaturas do ar também ocorre redução na taxa fotossintética, possivelmente, devido à redução da eficiência do fotossistema II, ao aumento na respiração de manutenção e a redução na área foliar (PRANGE et al., 1990).

Lafta; Lorenzen (1995), constataram que plantas de batata cultivadas em câmaras de crescimento sob temperaturas do ar de 31/29°C (dia/noite) apresentaram redução na produção de matéria seca de 44% a 72% depois de quatro semanas, comparado com um regime de temperatura de 19/17°C.

Temperaturas do ar acima da ótima resultam em plantas mais altas com elevado peso seco de hastes e folhas menores (LAFTA; LORENZEN, 1995; PRANGE et al., 1990), e reduzida produção de tubérculos em muitas cultivares de batata (KHEDHER; EWING, 1985). Altas temperaturas do ar aumentam o período de crescimento das folhas, o que causa redução na taxa de translocação de carboidratos para os tubérculos de batata (MARINUS; BODLAENDER, 1975). Altas temperaturas também contribuem para o aumento do número de tubérculos deformados (LOVATO, 2005) e também reduz a produtividade de tubérculos comerciais.

As culturas, tais como a batata, exibem uma resposta fotossintética positiva ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e muitas pesquisas indicam aumento na biomassa total e produtividade. Schapendonk et al. (2000) e Sicher; Bunce (1999) verificaram aumento de 27% a 49% na produtividade de tubérculos de batata quando foi dobrada a concentração de

CO<sub>2</sub> (740 mmol mol<sup>-1</sup>). No entanto se o aumentando da concentração de CO<sub>2</sub> vier acompanhado pelo aumento da temperatura, o aumento na produtividade pode não se confirmar, devido ao encurtamento do ciclo (SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração (TAIZ; ZEIGER, 2004), além do aumento de deformação de tubérculos.

O aquecimento global poderá causar redução na produção das culturas, podendo ter efeitos diferenciados entre as regiões (McCARTHY et al., 2001). Alguns pesquisadores tem estudado o efeito da mudança climática na produtividade de tubérculos de batata, verificando um possível aumento na produtividade de tubérculos na Inglaterra (DAVIES et al., 1996), Escócia (PEIRIS et al., 1996) e Finlândia (CARTER et al., 1996). As regiões onde o aquecimento global terá um efeito benéfico na produtividade de tubérculos de batata são, principalmente, locais com maiores latitudes relativamente frias, tais como as regiões do Canadá e Rússia (HIJMANS, 2003).

Entretanto, a maioria das pesquisas indica uma redução na produtividade de tubérculos de batata devido às altas temperaturas. No Peru foi observada uma redução de 65% a 80% na produção de tubérculos por planta em condições de temperaturas altas do ar em relação a condições de temperaturas mais amenas (KHEDHER; EWING, 1985). Estudos realizados em Lavras, MG, constataram atraso no início da tuberização e redução na partição dos fotoassimilados para os tubérculos devido às altas temperaturas do ar, o que reduziu a produtividade de tubérculos de batata em 25,5% (MENEZES et al., 1999). Rosenzweig et al. (1996), nos Estados Unidos, projetaram diminuição de produtividade de tubérculos de batata em 1,4%, 3,4% e 18,5% com aumentos de temperatura do ar de 1,5°C, 2,5°C e 5°C, respectivamente.

Uma possível alternativa de manejo para diminuir a exposição às altas temperaturas durante o crescimento de tubérculo e obter uma duração mais longa da área foliar seria modificar a data de plantio (HIJMANS, 2003). Segundo Rosenzweig et al. (1996), a mudança na data de plantio diminui os efeitos negativos na produtividade de tubérculos de batata devido às altas temperaturas do ar. Outra possível alternativa, seria utilizar cultivares de ciclo tardio para manter a área foliar verde por um período mais longo, como mostram os resultados obtidos por Hijmans (2003), onde as cultivares que permaneceram por mais tempo com a área foliar verde resultaram em aumento de produtividade. Outra alternativa possível, seria transferir a produção de batata para regiões de maior altitude, mediante ajustes no zoneamento agroclimático para essa cultura.

### **3 CAPÍTULO I**

TRABALHO ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO:

Revista Ciência Rural enviado: 03 de novembro de 2009.

**Simulação da produtividade de tubérculos de batata em clima subtropical e  
temperado**

**Revista Ciência Rural, 2009**

## **Simulação da produtividade de tubérculos de batata em clima subtropical e temperado**

### **Simulating potato tuber yield in a subtropical and in a temperate climate**

#### **RESUMO**

O objetivo foi calibrar para Santa Maria, RS e avaliar modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata para Santa Maria, RS (clima subtropical) e São Joaquim, SC (clima temperado). Foram avaliados seis modelos selecionados na literatura. Para Santa Maria foram usadas as datas de plantio 28/02, 27/03, 12/08, 15/09, 15/10, 20/11/2003 para calibrar os modelos e as datas 21/01, 12/02, 24/12/2003 e 28/01, 27/02, 26/03, 26/04/2004 para testá-los. Foram utilizados também dados de produtividade de 35 cultivares de São Joaquim, onde não foi realizada a calibração dos modelos por haver apenas um cultivo ao ano. A estatística utilizada para seleção dos modelos foi a raiz do quadrado médio do erro. Os modelos com os coeficientes originais apresentaram desempenho semelhante na simulação da produtividade em Santa Maria e São Joaquim. Os modelos que melhor simulam a produtividade de tubérculos de batata são os modelos de HARTZ & MOORE, JOHNSON et al. e PERREIRA et al. Após o ajuste dos modelos por calibração dos coeficientes, o modelo de SANDS et al. é o que melhor prediz a produtividade de tubérculos de batata, seguido pelos modelos de PEREIRA et al. e MacKERRON & WAISTER.

**Palavras-chave:** *Solanum tuberosum*, modelagem, modelos matemáticos, capacidade produtiva.

## ABSTRACT

This objective was to calibrate for Santa Maria and evaluate models for simulating potato tuber yield in the Santa Maria, RS (subtropical climate) and São Joaquim, SC (temperate climate). Six mathematical models selected from the literature were evaluated. For Santa Maria, the planting dates of 28/02, 27/03, 12/08, 15/09, 15/10, 20/11/2003 were used to calibrate the models and the planting dates of 21/01, 12/02, 24 / 12/2003 and 28/01, 27/02, 26/03, 26/04 /2004 were used to evaluate them. Yield data of 35 cultivars grown during five years in São Joaquim were also used without calibration because there was only one cropping each year. The statistics used for selection of models was the root mean square error. Models with the original coefficients had similar performance in simulating potato yield in Santa Maria and São Joaquim. The models that had the best performance were HARTZ & MOORE, JOHNSON et al.,and PEREIRA et al.. After calibration, the SANDS et al. model had the best performance followed by the models of PEREIRA et al., and MacKERRON & WAISTER.

**Key words:** *Solanum tuberosum*, modeling, mathematical models, forecast capacity.

## INTRODUÇÃO

A batata (*Solanum tuberosum* L.) é originária da Cordilheira dos Andes e ocupa o quarto lugar em volume de produção mundial de alimentos, sendo superada apenas pelo trigo, arroz e milho (NYENDE et al., 2005; FAO, 2009). É um dos alimentos mais consumidos no mundo, em função da sua composição nutricional, versatilidade gastronômica e baixo preço de comercialização de seus tubérculos (ABBA, 2008). É cultivada em praticamente todo o Brasil, em regiões de clima tropical, subtropical e temperado. Com mais 87% da produção

nacional, destacando-se os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul como os principais produtores (HELDWEIN et al., 2009). Em 2007 a região Sul representou 41% da produção nacional (IBGE, 2009).

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que nos permitem descrever a dinâmica das culturas agrícolas cultivadas em diferentes condições ambientais e de manejo. Os modelos de simulação das culturas são constituídos por funções matemáticas, cujos coeficientes representam numericamente os principais processos fisiológicos envolvidos na produção agrícola (MONTEITH, 1996) como o desenvolvimento e o crescimento de plantas de interesse agrícola. O desenvolvimento e crescimento de plantas são processos que podem ocorrer simultaneamente ou não. O desenvolvimento refere-se a eventos que envolvem desde a diferenciação celular até a senescência da cultura, enquanto que o crescimento refere-se ao aumento irreversível de uma grandeza física, tal como a massa ou volume de um órgão vegetal (HODGES, 1991). Assim, a produtividade pode ser entendida como o resultado dos processos de desenvolvimento e crescimento durante o ciclo da cultura e, portanto, muitos modelos de simulação da produtividade das culturas são constituídos de sub-modelos de desenvolvimento e crescimento.

Esta abordagem que considera processos de desenvolvimento e crescimento dá um caráter mais mecânico à simulação, permitindo não apenas a análise do resultado final, mas também o aprendizado com os processos que levam a produtividade final da cultura. Com modelos calibrados e testados podem-se fazer simulações em longo prazo e a um baixo custo. Com modelos pode-se progredir no conhecimento da planta e suas interações com o ambiente e esclarecer aspectos em que o conhecimento ainda é limitado ou apresenta lacunas (THORNLEY, 1976), como para a cultura da batata que dispõe-se fazer uma ligação de diferentes modelos na bibliografia, os quais precisam ser testados no Sul do Brasil.

Tendo em vista a importância sócio-econômica da cultura da batata é de grande importância a calibração e avaliação de modelos de simulação da produtividade, visto que para as condições de Santa Maria não haviam modelos calibrados para estimar a produtividade dessa cultura de grande expressão econômica e também porque na bibliografia são escassos estes tipos de trabalhos nas condições de Brasil. O objetivo deste estudo foi calibrar para Santa Maria, RS e avaliar modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata para Santa Maria, RS (clima subtropical) e São Joaquim, SC (clima temperado).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Foram selecionados da bibliografia, devido principalmente a simplicidade e fácil obtenção dos coeficientes, e usados neste estudo seis modelos matemáticos de simulação da produtividade de tubérculos de batata, descritos de forma simplificada a seguir. O detalhamento completo dos modelos está descrito no item ANEXO. O modelo de HARTZ & MOORE (1978) é empírico e simples, com poucos coeficientes e simula a produtividade de tubérculos de batata através de um modelo linear polinomial (ANEXO A):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \xi \quad (1)$$

em que: Y é a produtividade de tubérculos de batata (g planta<sup>-1</sup>),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são os coeficientes estimados,  $X_1$  é a soma térmica (°C dia),  $X_2$  é densidade de fluxo de radiação solar incidente (cal cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>),  $X_3$  é a amplitude térmica diária (°C) e  $\xi$  é o erro.

O modelo de SANDS et al. (1979) simula a produtividade de tubérculos de batata por (ANEXO B):

$$Y(P) = 0 \quad P < P_{tg} \quad (2)$$

$$Y(P) = B (P_{mb} - P_{tg}) (1 - p/3) p^2 \quad P_{tg} \leq P < P_{mb} \quad (3)$$

$$Y(P) = (2B / 3) (P_{mb} - P_{tg}) + B(P_{cb} - P_{mb}) (1 - p^2) / 3)p \quad P_{mb} \leq P < P_{cb} \quad (4)$$

$$Y(P) = (2B / 3) (P_{cb} - P_{tg}) \quad P_{cb} \leq P \quad (5)$$

em que: Y é a produtividade de tubérculos de batata ( $t \text{ ha}^{-1}$ ), P é o tempo (dias), B é a taxa máxima de crescimento de tubérculos,  $P_{mb}$ ,  $P_{tg}$  e  $P_{cb}$  são as idades (dias) em que ocorreu o máximo crescimento, início do crescimento e término do crescimento de tubérculos, respectivamente e p é a medida de como a cultura avançou uma fase de desenvolvimento.

O modelo de MacKERRON & WAISTER (1985) simula a produtividade de tubérculos de batata em função da radiação solar interceptada e a partição de matéria seca entre parte aérea e os tubérculos (ANEXO C):

$$Y = 5 \times T \quad (6)$$

em que: Y é a produtividade de tubérculos de batata ( $t \text{ ha}^{-1}$ ) e T partição de matéria seca.

O modelo de JOHNSON et al. (1986) leva em consideração a força de dreno do tubérculo (ANEXO D):

$$dT = k5 \times (\text{TUBER} / (\text{TUBER} + k1)) \quad (7)$$

em que: dT é a variável que calcula a força de dreno do tubérculo, TUBER representa a parte da planta, k1 é a constante que assemelha-se a metade da saturação da resposta na equação de Michaelis-Menten e k5 é o parâmetro de partição.

O modelo de SPITTERS (1987) simula a produtividade de tubérculos de batata em função da biomassa total e a fração de matéria seca alocada para os tubérculos (ANEXO E):

$$Y_t = HI_t \times W_t \quad (8)$$

em que:  $Y_t$  é a produtividade de tubérculos de batata ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $HI_t$  é o índice de colheita (fração total da matéria seca alocada para os tubérculos) e  $W_t$  é a biomassa total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

O modelo de PEREIRA et al. (2008) é baseado na taxa máxima de assimilação de dióxido de carbono, radiação fotossinteticamente ativa e parâmetros fitotécnicos, como índice de área foliar, índice de colheita e duração do ciclo fenológico (ANEXO F):

$$EPY = 1,27 \times 10^{-6} \times CDA \times LAI \times GS \times N \times C(LAI) \times C(T) \times HI \times 100/DM \quad (9)$$

em que: EPY é a produtividade potencial de tubérculos de batata ( $\text{t ha}^{-1}$ ), CDA é a taxa de assimilação de dióxido de carbono ( $\mu\text{L cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), LAI é índice de área foliar máximo, GS é o número de dias do ciclo, N é fotoperíodo médio (h), C(LAI) é o fator de correção do índice de área foliar, C(T) é o fator de correção da respiração de manutenção, HI é o índice de colheita e DM é o conteúdo de matéria seca dos tubérculos.

Para uniformizar a unidade de produtividade de tubérculos de batata simulada pelos diferentes modelos, a produtividade foi expressa em  $\text{t ha}^{-1}$  permitindo, assim, a comparação dos resultados. Foram utilizados dados de produtividade de tubérculos de batata de cultivos em Santa Maria, RS ( $29^{\circ}43'S$ ,  $53^{\circ}43'W$ , 95m) e São Joaquim, SC ( $28^{\circ}17'S$ ,  $49^{\circ}55'W$ , 1353m). Esses locais foram usados por apresentarem climas diferentes e distintas épocas de cultivo da batata. Em Santa Maria, que apresenta clima Cfa (subtropical úmido com verão quente) pela classificação de KÖPPEN, são realizados dois cultivos anuais, o cultivo de primavera ou “safra” e o cultivo de outono ou “safrinha” (BISOGNIN, 1996). Em São Joaquim, que tem clima Cfb (temperado úmido com verão temperado é realizado um cultivo anual (SOUZA, 2004).

Em Santa Maria, foram utilizados dados de produtividade de 13 datas de plantio - Ano 2003: 21/01, 12/02, 28/02, 27/03, 12/08, 15/09, 15/10, 20/11 e 24/12; Ano 2004: 28/01, 27/02, 26/03 e 26/04 (PAULA, 2005) calibração e avaliação dos modelos de simulação da

produtividade de tubérculos de batata, realizados na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria para. Foi utilizada a cultivar Asterix, de ciclo médio, utilizada para consumo de mesa e processamento (NIVAA, 1997) e bastante cultivada no Rio Grande do Sul. Em São Joaquim, foram usados dados de produtividade de 35 cultivares do Programa de Melhoramento de Batata da Epagri/Estação Experimental de São Joaquim em cinco anos agrícolas 2000-01, 2002-03, 2003-04, 2004-05 e 2005-06, com cultivares de diferentes ciclos, algumas cultivadas em somente um ano e outras em mais de um ano (Tabela 1).

Foi realizada a análise de sensibilidade dos modelos em Santa Maria, aumentando-se e diminuindo-se o valor dos coeficientes dos modelos utilizados no estudo de 50% a 150% em relação ao valor original de cada coeficiente relatado nos artigos originais, com intervalo de 10%. Considerou-se que, quando a produtividade variou em menos de  $2 \text{ t ha}^{-1}$  este coeficiente não foi dependente do genótipo e portanto o valor original foi usado no modelo (APÊNDICES A, B, C, D, E e F). Para a calibração dos modelos foram utilizados dados de produtividade de seis datas de plantio em 2003 (28/02, 27/03, 12/08, 15/09, 15/10, 20/11) da cultivar Asterix em Santa Maria, RS, e consistiu da estimativa dos coeficientes com o método dos mínimos quadrados no SAS. Para São Joaquim somente havia dados de produtividade de uma data de plantio em cada ano, o que impossibilitou a calibração dos modelos.

Os modelos foram primeiramente utilizados com os coeficientes fornecidos nas publicações em que os mesmos foram descritos (coeficientes originais) para as 13 datas de plantio em Santa Maria e os cinco anos de cultivos em São Joaquim. Esta avaliação com coeficientes originais permitiu a avaliação da capacidade preditiva dos modelos para diferentes genótipos de batata cultivados em ambientes diferentes daqueles em que os modelos foram desenvolvidos, o que é importante na avaliação da robustez dos modelos matemáticos. Posteriormente, os modelos foram utilizados para Santa Maria com os

coeficientes ajustados para cultivar Asterix (Tabela 2) usando-se os dados independentes das sete datas de plantio (21/01/2003, 12/02/2003, 24/12/2003, 28/01/2004, 27/02/2004, 26/03/2004 e 26/04/2004).

A estatística utilizada para avaliar o desempenho dos modelos foi a da raiz dos quadrados médios do erro (RQME), calculado como (JANSSEN & HEUBERGER, 1995):

$$\text{RQME} = [\sum(p_i - o_i)^2 / N]^{0,5} \quad (10)$$

em que:  $p_i$  são os valores simulados,  $o_i$  são os valores observados e  $N$  é o número de observações. Quanto menor o RQME, relativamente melhor é o desempenho do modelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições climáticas de Santa Maria (temperatura mínima e máxima normal do ar de Janeiro- 6 °C a 9 °C e 28 °C a 31 °C de Julho- 3°C a 6°C e 18 °C a 21 °C, respectivamente (INMET, 2010)) e de São Joaquim (temperatura mínima e máxima normal do ar de Janeiro- 6 °C a 9 °C e 18 °C a 21 °C e de Julho-0 °C a 3 °C a 15 °C a 18 °C, respectivamente (INMET, 2010)) resultaram em diferenças nas estimativas da produtividade com os distintos modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata. Para Santa Maria, considerando as 13 datas de plantio com os coeficientes originais dos modelos, o menor valor de RQME (6,5 t ha<sup>-1</sup>) foi obtido com o modelo de JOHNSON et al. (1986). O modelo de PEREIRA et al. (2008) teve o segundo menor RQME (6,9 t ha<sup>-1</sup>). Os modelos de HARTZ & MOORE (1978) e SPITTERS (1987) apresentaram valores de RQME de 8,0 t ha<sup>-1</sup> e 9,8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Já os modelos de SANDS et al. (1979) e MacKERRON & WAISTER (1985) foram os que apresentaram os maiores valores de RQME (37,7 t ha<sup>-1</sup> e 31,5 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente). O modelo de SPITTERS (1987) apresentou um bom desempenho nos estudos realizados, na

Espanha, por WOLF (2002), sendo bastante utilizado na Europa em estudos sobre o efeito da mudança climática na cultura da batata (CARTER et al., 2000; HARRISON et al., 2000).

Para São Joaquim, conforme apresentado na Tabela 1, o valor de RQME para o modelo de HARTZ & MOORE (1978) variou entre 4,9 t ha<sup>-1</sup> (ano agrícola 2003-04) e 9,2 t ha<sup>-1</sup> (ano agrícola 2002-03) apresentando um RQME médio de 7,7 t ha<sup>-1</sup>. Por estes resultados pode-se afirmar que este modelo, apesar de ser um modelo empírico simples e ter poucos coeficientes, prediz razoavelmente à produtividade de tubérculos de batata. Com o modelo de JOHNSON et al. (1986), obteve-se valores de RQME que variaram de 5,8 t ha<sup>-1</sup> a 11,7 t ha<sup>-1</sup> (Tabela 1), com média de 8,0 t ha<sup>-1</sup>. Já o modelo de PEREIRA et al. (2008) apresentou um RQME médio de 8,4 t ha<sup>-1</sup>, destacando-se no ano agrícola 2003-04, quando o valor de RQME foi de 4,3 t ha<sup>-1</sup>, o menor valor dentre os modelos e anos agrícolas (Tabela 1). O modelo de SPITTERS (1987) apresentou valores de RQME de 5,4 t ha<sup>-1</sup> a 19,2 t ha<sup>-1</sup> (Figura 1e, 1l, 2e, 2l e 2r). Já com o modelo de MacKERRON & WAISTER (1985) os valores de RQME variaram de 11,6 t ha<sup>-1</sup> a 24,9 t ha<sup>-1</sup> (Figura 1c, 1i, 2c, 2i e 2p) e, como o modelo de SPITTERS (1987) e PEREIRA (2008), este modelo subestimou a produtividade de tubérculos de batata, diferentemente do que ocorreu para Santa Maria, onde o modelo de MacKERRON & WAISTER (1985) superestimou a produtividade (Figura 3c). O modelo de SANDS et al. (1979) em São Joaquim, assim como em Santa Maria-RS, apresentou os mais elevados valores de RQME (Tabela 1), nos cinco anos de cultivo (61,0 t ha<sup>-1</sup>, 50,8 t ha<sup>-1</sup>, 53,7 t ha<sup>-1</sup>, 53,7 t ha<sup>-1</sup> e 52,8 t ha<sup>-1</sup>), com predomínio de superestimativa da produtividade alta de tubérculos de todas as cultivares de batata (Figura 1b, 1h, 2b, 2h e 2o).

Os coeficientes dos modelos para a cultivar Asterix após a calibração estão listados na Tabela 2. Esta calibração representa um avanço para modelagem da produtividade de batata no Rio Grande do Sul, pois dos seis modelos testados apenas o modelo de PEREIRA et al. (2008) foi obtido para as condições do Brasil.

A comparação entre o desempenho dos modelos com os coeficientes originais e com coeficientes ajustados após a calibração para o conjunto de dados independentes de sete datas de plantio da cultivar Asterix em Santa Maria, indicam que alguns modelos predizem melhor a produtividade quando os coeficientes originais são mantidos (Figura 3). Esse fato pode ser evidenciado no modelo de HARTZ & MOORE (1978) que, após a calibração apresentou um valor de RQME bastante elevado ( $15,8 \text{ t ha}^{-1}$ ) se comparado aos resultados obtidos com seus coeficientes originais ( $6,6 \text{ t ha}^{-1}$ ), com uma diferença de  $9,2 \text{ t ha}^{-1}$  na estimativa da produtividade de tubérculos de batata (Figura 3a e 3g). Este resultado foi surpreendente, pois esperava-se melhor desempenho do modelo após a calibração para as condições locais. Uma possível explicação para este resultado é que, a abrangência de ambientes do conjunto de dados usados tenha sido insuficiente por ser um modelo empírico, as datas para estimativas dos coeficientes são distantes das datas de plantio usadas como dados independentes. Isso indica a importância preditiva de modelos empíricos em condições diferentes daquelas em que foram calibrados. O modelo de JOHNSON et al. (1986) após a calibração também apresentou um valor de RQME ( $6,3 \text{ t ha}^{-1}$ ) mais elevado se comparado ao modelo com os coeficientes originais ( $5,6 \text{ t ha}^{-1}$ ) (Figura 3d e 3j).

Com os outros modelos houve melhor ajuste para estimativa da produtividade de tubérculos de batata após a calibração e os valores altos de RQME foram menores do que quando usados os coeficientes originais. A melhora mais pronunciada ocorreu com os modelos de SANDS et al. (1979) e MacKERRON & WAISTER (1985) que, com os coeficientes originais tiveram RQME de  $35,1 \text{ t ha}^{-1}$  e  $24,5 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente (Figura 3b e 3c), e com os coeficientes ajustados houve uma redução no RQME para  $3,9 \text{ t ha}^{-1}$  e  $6,5 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente (Figura 3h e 3i).

Os modelos de SPITTERS (1987) e PEREIRA et al. (2008) não apresentaram diferenças significativas nos valores de RQME entre os coeficientes originais dos modelos e

os coeficientes ajustados, sendo, respectivamente,  $1,6 \text{ t ha}^{-1}$  e  $0,2 \text{ t ha}^{-1}$  (Figura 3e, 3f, 3l e 1m). O modelo de SPITTERS (1987) tanto com os coeficientes originais (RQME =  $10,4 \text{ t ha}^{-1}$ ) quanto com os ajustados (RQME  $8,8 \text{ t ha}^{-1}$ ), subestimou a produtividade de tubérculos de batata (Figura 3e e 3l). Já o modelo de PEREIRA et al. (2008) apresentou uma melhora na estimativa da produtividade com valor de RQME de  $5,4 \text{ t ha}^{-1}$ . Este último modelo é um modelo mecanístico, o que possivelmente contribuiu para a melhor predição da produtividade se comparado ao modelo de SPITTERS (1987).

Dentre os modelos avaliados e calibrados existem diferenças basicamente nas variáveis que os compõem. Esse fato é importante, pois permite a utilização de um ou outro modelo de acordo com as variáveis disponíveis no momento. Por exemplo, para simulação da produtividade de tubérculos em cenários futuros com diferentes concentrações de  $\text{CO}_2$ , o modelo de SPITTERS (1987) é bastante adequado, pois considera o efeito da concentração de  $\text{CO}_2$  através da eficiência de uso da radiação.

## CONCLUSÕES

Os modelos com os coeficientes originais apresentam desempenho semelhante na simulação da produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria e São Joaquim.

Os modelos que melhor simulam a produtividade de tubérculos de batata são os modelos de HARTZ & MOORE, JOHNSON e PEREIRA.

Após o ajuste dos modelos por calibração dos coeficientes, o modelo de SANDS é o que melhor prediz a produtividade de tubérculos de batata, seguido pelos modelos de PEREIRA e MacKERRON & WAISTER.

## REFERÊNCIAS

ABBA. Associação Brasileira da Batata. **A batata como alimento**. Disponível em: <http://www.abbabatatabrasileira.com.br>. Acesso em: 21 abr. 2008.

BISOGNIN, D.A. **Recomendações técnicas para o cultivo da batata no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Santa Maria: UFSM, 1996. 64p.

CARTER, T.R. et al. Modelling climate change impacts on wheat and potato in Finland. In: DOWNING, T.E. et al. **Climate change, climatic variability and agriculture in Europe: an integrated assessment**. Oxford: Environmental Change Institute, 2000. p.289-312. (Research report n. 21).

PAULA, F.L.M. **Modelagem do desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.) à campo**. 2005. 42f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. - disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Acesso em: 15 mai. 2009.

HARRISON, P.A. et al. Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe. In: DOWNING, T.E. et al. **Climate change, climatic variability and agriculture in Europe: an integrated assessment**. Oxford: Environmental Change Institute, 2000. p.367-390. (Research report n. 21).

HARTZ, T.K.; MOORE, F.D. Prediction of potato yield using temperature and insolation data. **American Potato Journal**, v.55, p.431-436, 1978.

HELDWEIN, A.B. et al. Batata. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. 1 ed. Cap. 6, p.93-108.

HODGES, T. **Predicting crop phenology**. Boca Raton: CRC, 1991. 233p.

- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 07 out. 2009.
- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas>. Acesso em: 12 abr. 2010.
- JANSSEN, P.H.M.; HEUBERGER, P.S.C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v.83, n.1, p.55-56, 1995.
- JOHNSON, K.B. et al. Development of a simple potato growth model for use in crop-pest management. **Agricultural Systems**, v.19, n.3, p.189-209, 1986.
- MacKERRON, D.K.L.; WAISTER, P.D. A simple model of potato growth and yield. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.34, p.241-252, 1985.
- MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, v.88, p.695-697, 1996.
- NIVAA. **Catálogo holandês de variedades de batata**. Haarlem: Boom-Planeta, 1997. 270p.
- NYENDE, A.B. et al. Yield and canopy development of field grown potato plants derived from synthetic seeds. **European Journal of Agronomy**, v.22, p.175-184, 2005.
- PEREIRA, et al. Potato potential yield based on climatic elements and cultivar characteristics. **Bragantia**, v.67, n.2, p.327-334, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v67n2/a08v67n2.pdf>. Acesso em 15 jul. 2009
- SANDS, P.J. et al. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). I. Derivation from well-managed field crops. **Field Crops Research**, v.2, p.309-331, 1979.
- SOUZA, Z.S. Cultura da Batata na EPAGRI em Santa Catarina. **Revista Batata Show**, n.4, 2004. Disponível em: [http://www.abbatatabrasileira.com.br/revista10\\_016.htm](http://www.abbatatabrasileira.com.br/revista10_016.htm). Acesso em: 8 jul. 2009.

SPITTERS, C.J.T. An analysis of variation in yield among potato cultivars in terms of light absorption, light utilization and dry matter partitioning. **Acta Horticulturae**, v. 214, p.71-84, 1987.

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

WOLF, J. Comparison of two potato simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. **Climate research**, v.21, p.173-186, 2002. Disponível em: < <http://www.int-res.com/articles/cr2002/21/c021p173.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2008.

Tabela 1- Raiz do quadrado médio do erro (RQME, t ha<sup>-1</sup>) da produtividade de tubérculos de várias cultivares de batata nos anos agrícolas 2000-01, 2002-03, 2003-04, 2004-05 e 2005-06 em São Joaquim, SC, simulada com os coeficientes originais dos seis modelos.

Ano agrícola	Modelos de simulação da produtividade (RQME, t ha <sup>-1</sup> )					
	HARTZ & MOORE (1978)	SANDS et al. (1979)	MacKERRON & WAISTER (1985)	JOHNSON et al. (1986)	SPITTERS (1987)	PEREIRA et al. (2008)
2000-01 <sup>1</sup>	6,9	61,0	17,7	5,8	12,8	6,6
2002-03 <sup>2</sup>	9,2	50,8	21,9	8,5	16,9	10,9
2003-04 <sup>3</sup>	4,9	53,7	18,4	7,8	11,9	6,6
2004-05 <sup>4</sup>	8,2	53,7	11,6	6,5	5,4	4,3
2005-06 <sup>5</sup>	9,1	52,8	24,9	11,7	19,2	13,5
Média	7,7	54,4	18,9	8,1	13,2	8,4

<sup>1</sup>Cultivares Amorosa, Araucária, Bolesta, Estima, Eliza, Markies, Recent, Sinora, Monalisa, Asterix, Junior, Kuroda, Romano, EESJ 89229, EESJ 90428, SW 1037, SW 1140, Synfonia, Velox, Catucha; <sup>2</sup>Cultivares Agata, Asterix, Baronesa, Brador, Caesar, Cicklamen, EESJ 90439, Cota, Eliza, EESJ 99729, EESJ 89239, EESJ 86575, Synfonia, Velox, Vivaldi, White Lady, Baraka, Monalisa; <sup>3</sup>Cultivares Agata, Asterix, Caesar, Cicklamen, Elisa, EESJ 99729, Synfonia, Velox, Vivaldi, White Lady, Baraka, Monalisa; <sup>4</sup>Cultivares Achat, Agata, Asterix, Caesar, Cupido, Monalisa, Synfonia, Velox, Vivaldi, White Lady; <sup>5</sup>Cultivares Agata, Asterix, Caesar, Cupido, Melody, Monalisa, Mondial, Velox, Vivaldi.

Tabela 2 - Coeficientes dos modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata ajustados para cultivar Asterix.

Modelos	Descrição dos coeficientes	Coeficientes ajustados
HARTZ & MOORE (1978)	Coeficientes da equação linear polinomial (a, b, c e d)	a = -3889,73, b = 3,58, c = -0,05 e d = 249,15
SANDS et al. (1979)	Escala para medir a taxa de acumulação do tempo (k)	k = 4,67
MackERRON & WAISTER (1985)	Temperatura base (Tb)	Tb = 7°C
	Partição de matéria seca para tubérculos	0,31
JOHNSON et al. (1986)	Constante que assemelha-se a metade de saturação na equação de Michaelis-Menten (k1)	k1 = 45,5
	Constante utilizada no cálculo de partição de matéria seca para os tubérculos (k5)	k5 = 7,87
	Força dreno do tubérculo (TUBER)	TUBER = 0,46
SPITTERS (1987)	Uso eficiente da radiação (UER)	UER = 4,72
	Duração do ciclo (m)	m = 9,5
PEREIRA et al. (2008)	Taxa máxima de assimilação de dióxido de carbono (CDA <sub>Max</sub> )	CDA <sub>Max</sub> = 45,85
	Índice de área foliar (IAF <sub>Max</sub> )	IAF <sub>Max</sub> = 4,26
	Índice de colheita (HI)	HI = 0,58
	Fator de correção da respiração de manutenção (C(T))	C(T) = 0,58

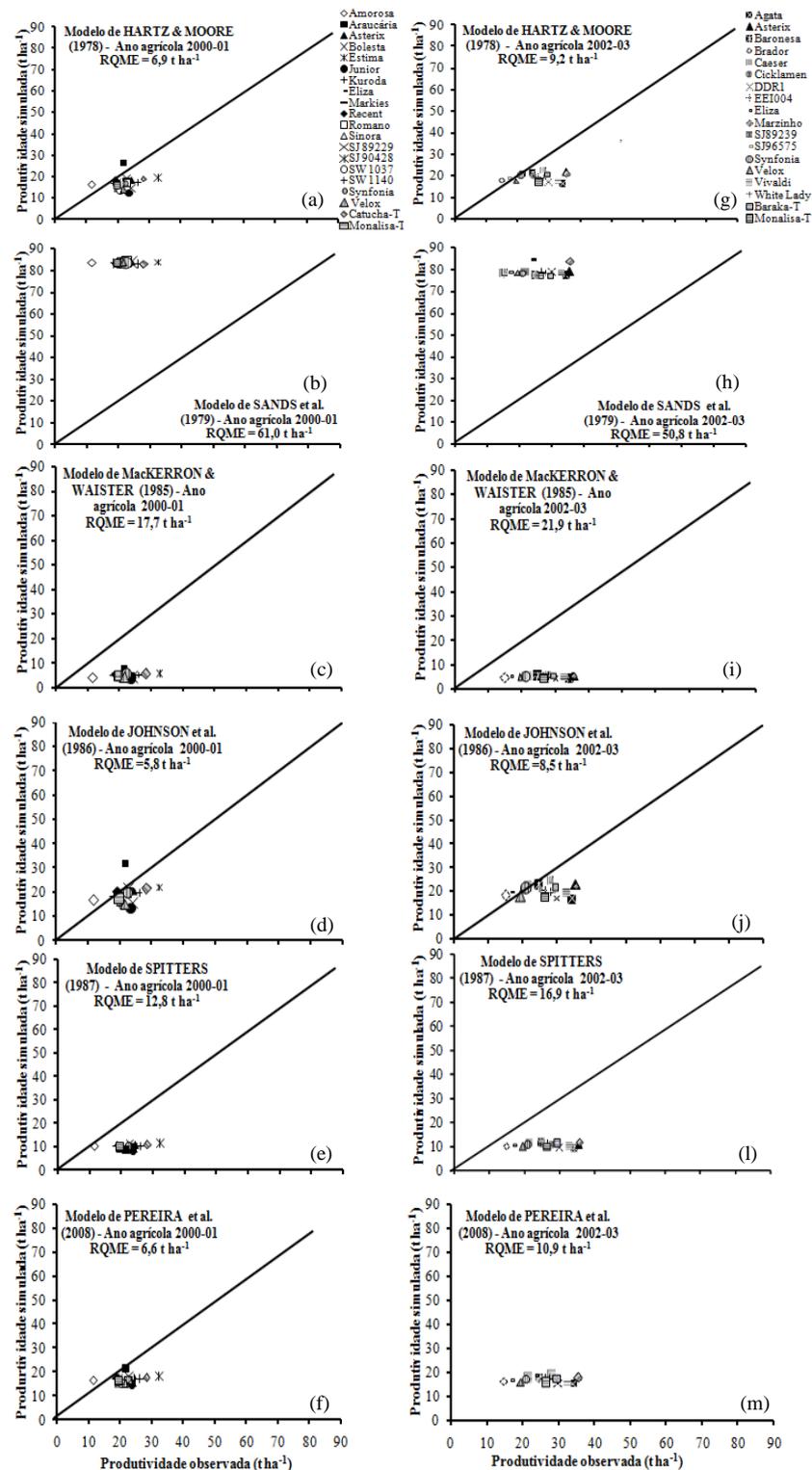


Figura 1 - Produtividade de tubérculos simulada versus observada de várias cultivares de batata indicadas na legenda nos anos agrícolas 2000-01(a, b, c, d, e, f) e 2002-03 (g, h, i, j, l, m) em São Joaquim-SC, com os coeficientes originais dos seis modelos. RQME = raiz do quadrado médio do erro. A linha diagonal é a linha 1:1.

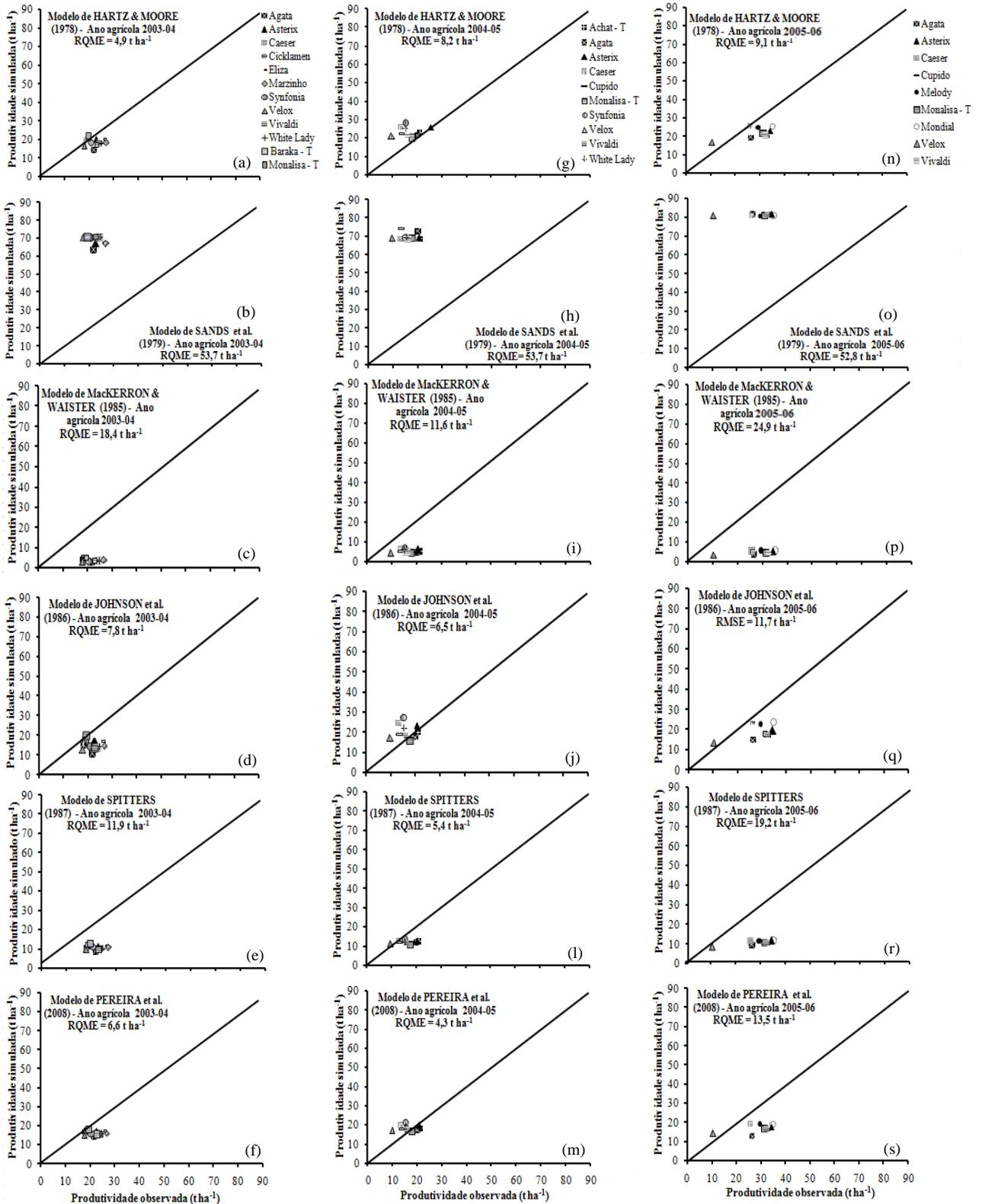


Figura 2 - Produtividade de tubérculos simulada versus observada de várias cultivares de batata indicadas na legenda nos anos agrícolas 2003-04 (a, b, c, d, e, f), 2004-05 (g, h, i, j, l, m) e 2005-06 (n, o, p, q, r, s) em São Joaquim-SC, com os coeficientes originais dos seis modelos. RQME = raiz do quadrado médio do erro. A linha diagonal é a linha 1:1.

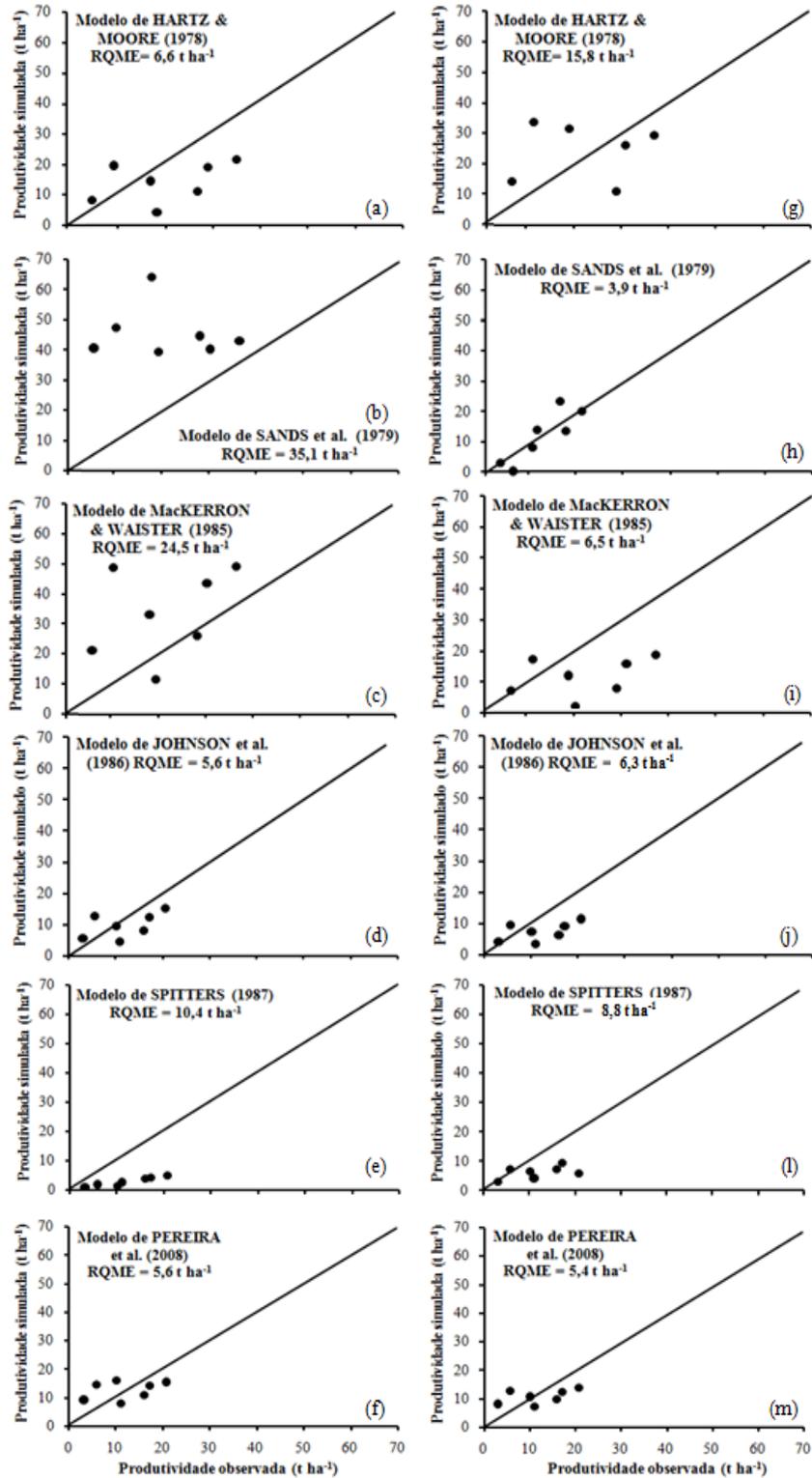


Figura 3 - Produtividade de tubérculos simulada versus observada da cultivar Asterix em sete datas de plantio (21/01/2003, 12/02/03, 24/12/03, 28/01/2004, 27/02/04, 26/03/04 e 26/04/04) em Santa Maria, RS, com os coeficientes originais (a, b, c, d, e, f) e coeficientes ajustados (g, h, i, j, l, m). RQME = raiz do quadrado médio do erro. A linha diagonal é a linha 1:1.

## **4 CAPÍTULO II**

TRABALHO A SER ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO:

Pesquisa Agropecuária Brasileira.

**Produtividade de tubérculos de batata em cenários de mudança de  
temperatura e CO<sub>2</sub> em Santa Maria, RS**

## **Produtividade de tubérculos de batata em cenários de mudança de temperatura e CO<sub>2</sub> em Santa Maria, RS.**

Resumo - O objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade de tubérculos de batata em cenários com aumento da concentração de dióxido de carbono e da temperatura do ar em Santa Maria, RS, em diferentes datas de plantio, considerando aumento simétrico e assimétrico na temperatura mínima e máxima diária do ar. Simulou-se a produtividade de tubérculos da cultivar Asterix em duas épocas de cultivo (primavera e outono) e cinco datas de plantio em cada época em cenários climáticos de cem anos sem aumento de CO<sub>2</sub> e de temperatura do ar (cenário atual) e com aumento de CO<sub>2</sub> (dobro da concentração atual) e aumento de 0°C, 1°C, 2°C, 3°C, 4°C, 5°C e 6°C, com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínimas e máximas diárias do ar. Para os cultivos de primavera, um aumento simétrico na temperatura do ar a partir de 4°C e assimétrico a partir de 5°C (temperatura mínima 6°C e temperatura máxima 4°C) anulou o efeito benéfico do aumento da concentração de dióxido de carbono. Para os cultivos de outono, o aumento da temperatura do ar exerceu pouco efeito na produtividade de tubérculos de batata. A antecipação de 14 dias na data de plantio no cultivo de primavera e o atraso de sete dias na data de plantio no cultivo de outono diminuem o impacto negativo do aumento da temperatura do ar na produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria, RS.

Termos para indexação: *Solanum tuberosum* L., aquecimento global, concentração de dióxido de carbono, impacto da mudança climática, agricultura.

### **Potato tuber yield in climate change scenarios in Santa Maria, RS.**

Abstract - The objective of this study was to evaluate the potato tuber yield in increased carbon dioxide concentration and temperature scenarios in Santa Maria, RS, Brazil, in different planting dates, considering symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum daily air temperatures. Tuber yield of the cultivar Asterix was simulated considering two growing seasons (Fall and Spring) and five planting dates in climate scenarios with hundred years with no increase in CO<sub>2</sub> concentration and temperature (current scenarios), and with doubling CO<sub>2</sub> and temperature increase of 0°C, 1°C, 2°C, 3°C, 4°C, 5°C and 6°C, with different increases in minimum and maximum daily air temperature. A symmetrical increase of 4°C and an asymmetric increase of 5°C in air temperature offset the beneficial effect of increasing carbon dioxide concentration during the Spring season, whereas increase in air temperature hardly affects potato tuber yield during Fall season. Anticipating planting date in the Spring season and delaying planting date in the Fall season decreases the negative impact of the increasing air temperature on potato tuber yield grown in Santa Maria, RS.

Index terms: *Solanum tuberosum* L., global warming, carbon dioxide concentration, climatic change impact, agriculture.

### **Introdução**

Estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM - General Circulation Models) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1,1°C a 6,4°C na temperatura média do ar até o final deste século em vários locais do Planeta (IPCC, 2007), inclusive no Brasil (Siqueira et al., 2001; Assad et al., 2004; IPCC, 2007). Esse aumento na temperatura do ar deve ocorrer devido ao aumento na concentração de dióxido de

carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico, que deverá duplicar em algum momento deste século (Streck, 2005; IPCC, 2007). Registros indicam que durante o século XX houve um aumento da temperatura média da superfície global de  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , sendo que a década de 90 foi considerada a mais quente do último milênio (Kerr, 2005; IPCC, 2007). Ainda, segundo Karl et al. (1991), o aquecimento global pode se caracterizar por um aumento assimétrico na temperatura mínima e máxima do ar, com maior aumento na temperatura mínima do que na temperatura máxima diária do ar.

A concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico tem influência no desenvolvimento, crescimento e produtividade dos cultivos agrícolas. Se a concentração desse gás aumentar, a taxa de crescimento das plantas poderá aumentar devido ao CO<sub>2</sub> ser o substrato primário para a fotossíntese (Taiz & Zeiger, 2004). A expectativa é que as plantas com metabolismo C<sub>3</sub>, devido à morfofisiologia, serão mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico do que plantas com metabolismo C<sub>4</sub> (Tubiello et al., 2000; Siqueira et al., 2001; Streck, 2005). Streck (2005) relata que, se a concentração de CO<sub>2</sub> dobrar em relação a concentração atual (380 ppmv), deverá ocorrer um aumento médio de 30% na produtividade de culturas C<sub>3</sub> e 10% na produtividade de culturas C<sub>4</sub>. No entanto, se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> for acompanhado do aumento da temperatura do ar, o maior crescimento e produtividade das culturas poderá ser anulado devido ao encurtamento do ciclo (Siqueira et al., 2001) e aumento da respiração (Taiz & Zeiger, 2004).

Os agroecossistemas são suscetíveis à mudança climática (IPCC, 2007) e por isso estudos do impacto da mudança climática sobre os agroecossistemas são importantes para a tomada de decisões na agricultura. Porém, esses estudos são difíceis de serem realizados experimentalmente, devido à limitação em recursos humanos e financeiros (Andresen et al., 2001). Uma alternativa aos experimentos em estudos do impacto da mudança climática sobre

as culturas agrícolas são os modelos matemáticos, os quais são uma simplificação da realidade que descrevem as interações nos agroecossistemas (Streck & Alberto, 2006a).

Rosenzweig et al. (1996) nos Estados Unidos relataram uma provável redução na produtividade de tubérculos de batata devido às altas temperaturas, verificando que os aumentos de temperatura de 1,5°C, 2,5°C e 5°C ocasionou uma redução de 1,4%, 3,4% e 18,5%, respectivamente. Uma das alternativas para evitar o efeito negativo das altas temperaturas, e por consequência, da mudança climática, seria modificar a data de plantio da batata (Hijmans, 2003). A mudança na data de plantio neste caso visa diminuir a exposição às altas temperaturas durante o crescimento dos tubérculos e aumentar a duração da área foliar verde (Hijmans, 2003), o que diminuiria os efeitos negativos das altas temperaturas na produtividade dos tubérculos de batata (Rosenzweig et al., 1996).

No Brasil, alguns estudos do impacto da mudança climática sobre a agricultura já foram realizados com várias culturas em diversas regiões brasileiras como, por exemplo, no sudeste e sul (Siqueira et al., 2000, 2001; Assad et al., 2004). No entanto, para a cultura da batata, que ocupa o quarto lugar em volume de produção mundial de alimentos, sendo superada apenas pelo trigo, arroz e milho (Nyende et al., 2005), não foi encontrado nenhum trabalho na literatura sobre o impacto da mudança climática nas condições brasileiras.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade de tubérculos de batata em cenários com aumento da concentração de dióxido de carbono e da temperatura do ar em Santa Maria, RS, em diferentes datas de plantio, considerando aumento simétrico e assimétrico na temperatura mínima e máxima diárias do ar.

### **Material e Métodos**

Este estudo numérico foi realizado para as condições de Santa Maria, RS (29°43'S, 53°43'W, e altitude: 95m). O clima da região, segundo a classificação de KÖPPEN, é Cfa

subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes. A amplitude térmica anual da região é de 10,5 °C e a precipitação normal anual é de 1,7 mm bem distribuídas no ano inteiro (Santa Maria, 2009).

Os cenários de mudanças climáticas foram criados com o auxílio do LARS-WG Weather Generator (Semenov et al., 1998). O LARS-WG é um modelo estocástico frequentemente usado em estudos de impacto de cenários de mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas (Weiss et al., 2003; Richter & Semenov, 2005; Streck & Alberto 2006a, b). Este modelo gera séries de dados sintéticos usando funções semi-empíricas de distribuição de probabilidade, que mantêm as estatísticas da série original de dados observados (Semenov et al., 1998).

Na construção dos cenários com o LARS-WG (Semenov et al., 1998), utilizaram-se de dados meteorológicos de temperatura mínima e temperatura máxima diárias do ar durante o período de 1969 a 2003 coletados na Estação Meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (8º Distrito de Meteorologia), localizada no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. A geração de uma série de dados para 100 anos. A comparação dos dados, da série gerada pelo LARS-WG e a série de dados observados de 1969 a 2003, foi realizada anteriormente por Streck & Alberto (2006a,b), que constaram não haver diferença entre as estatísticas das séries de dados geradas pelo LARS-WG e a série de dados observados, e assim, os cenários sintéticos podem ser utilizados neste estudo.

Os cenários climáticos de 100 anos, usados no estudo, com dados meteorológicos diários de temperatura mínima e máxima do ar, desde o cenário sem mudança de CO<sub>2</sub> e temperatura (clima atual sem mudança climática - cenário 1 da Tabela 1) até 6°C (climas futuros - cenários 2 a 8a e 8as da Tabela 1) e o dobro de CO<sub>2</sub> considerando aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínimas e máximas do ar estão na Tabela 1. Nos cenários com aumento simétrico na temperatura foi considerado um aumento de 1°C a 6°C na temperatura

mínima e máxima diárias do ar, já nos cenários com aumento assimétrico foi considerado um aumento de 20% nos valores da temperatura do ar. A densidade de fluxo de radiação solar global incidente diária atual foi considerada a mesma em todos os cenários.

Para simular o impacto da possível mudança climática na produtividade de tubérculos de batata foi utilizado o modelo de simulação da produtividade proposto por Spitters (1987) calibrado e avaliado para a cultivar Asterix (amplamente cultivada no Rio Grande do Sul, apresentando alta produtividade, tubérculos numerosos, moderada resistência as principais doenças e podendo ser utilizada tanto no consumo de mesa quanto no processamento industrial (ABBA, 2010)) nas condições de Santa Maria, RS, (Capítulo I) considerando 13 datas de plantio durante os anos 2003 e 2004 (Streck et al., 2006). Esse modelo permite considerar o efeito do CO<sub>2</sub> sobre a fotossíntese, através de EUR, o que, portanto permite a sua utilização nos cenários de mudança climática (Anexo E). O modelo de Spitters (1987) simula a produtividade de tubérculos considerando que não há efeito de fatores bióticos como pragas, doenças e plantas daninhas e nem limitação hídrica e nutricional sobre a cultura da batata. Assim, o modelo simula a produtividade potencial de tubérculos de batata, que é uma função da disponibilidade de radiação solar e temperatura do ar. De modo geral, o modelo de Spitters (1987) simula a produtividade de tubérculos de batata a partir da biomassa total e a fração de matéria seca alocada para os tubérculos (Anexo E):

$$Y_t = HI_t \times W_t \quad (1)$$

em que  $Y_t$  é a produtividade dos tubérculos de batata (kg ha<sup>-1</sup>),  $HI_t$  é o índice de colheita (fração da matéria seca total alocada para os tubérculos) e  $W_t$  é a biomassa total (kg ha<sup>-1</sup>).  $W_t$  foi obtido pela relação entre a taxa de crescimento relativo e a absorção de luz.

O efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> sobre o desenvolvimento e crescimento da planta de batata foi considerado no modelo através do aumento na eficiência de uso da

radiação (EUR). Considerou-se um aumento de 26% na EUR quando a concentração de CO<sub>2</sub> é o dobro da concentração atual, conforme relatado por Schapendonk et al. (1995) para cultivares de batata de ciclo médio, como o é o caso da cultivar Asterix. Assim, no cenário atual sem mudança climática (cenário 1, Tabela 1) a EUR foi de 4,7 g MJ<sup>-1</sup> (Spitters, 1987) e nos cenários futuros com mudança climática (cenários 2 a 8as, Tabela 1) a EUR estimada foi de 5,9 g MJ<sup>-1</sup>. No modelo de Spitters (1987) foi ainda adicionada uma função de penalização da fotossíntese em resposta à temperatura máxima do ar, pois a EUR diminui linearmente com a temperatura na faixa entre 25°C e 35°C (Kooman & Haverkort, 1995). Assim, a resposta à EUR em função da temperatura máxima diária na faixa de 25°C e 35°C, para o cenário atual sem mudança climática e cenários futuros com mudança climática, respectivamente, foi calculada por:

$$\text{EUR} = 4,72 \times [(-0,1 \times T_{\text{max}}) + 3,5] \quad (2)$$

$$\text{EUR} = 5,95 \times [(-0,1 \times T_{\text{max}}) + 3,5] \quad (3)$$

em que EUR é a eficiência de uso da radiação e T<sub>max</sub> é a temperatura máxima diária.

Foram consideradas duas épocas de cultivo em cada ano dos cenários: cultivo de primavera ou “safra” (com plantio em 12 de agosto) e cultivo de outono ou “safrinha” (com plantio em 12 de fevereiro). Estas datas de plantio estão dentro das épocas recomendadas atualmente para os cultivos de primavera e de outono, respectivamente, na região de Santa Maria, RS, que são de agosto a outubro e de janeiro a março (Bisognin, 1996). O dia da emergência, considerado como o primeiro dia da simulação, foi considerado 20 dias após o plantio de primavera (01/09) e 10 dias do plantio de outono (22/02) (Streck et al., 2006). Além dessas duas datas nas épocas de cultivo recomendadas, também foram consideradas duas datas de plantio anteriores e posteriores em cada época de cultivo, de modo que as datas de emergência das plantas ficassem distanciadas sete dias entre si, pois o modelo de Spitters

(1987) inicia os cálculos na emergência da cultura. Assim, o total das datas de emergência usadas na simulação foram 18/08, 25/08, 01/09, 08/09 e 15/09 para o cultivo de primavera e 08/02, 15/02, 22/02, 01/03 e 08/03 para o cultivo de outono.

A análise dos dados foi realizada pelo cálculo dos desvios (diferença entre os cenários futuros com mudança climática e o cenário atual sem mudança climática - cenário 1 da Tabela 1) da produtividade de tubérculos de batata ( $t\ ha^{-1}$ ) em todos os anos em cada cenário climático em todas as datas de plantio e em ambos os cultivos de primavera e outono. Desvio positivo significa que a produtividade de tubérculos de batata aumenta em cenários de mudança climática, enquanto desvio negativo significa que a produtividade de tubérculos de batata diminui em cenários de mudança climática (Lago et al., 2008; Streck et al., 2006).

### **Resultados e Discussão**

A produtividade de tubérculos de batata estimada para as datas de plantio indicadas para o cultivo de primavera simulada no cenário atual sem mudança de  $CO_2$  e temperatura (cenário 1) foi superior à produtividade estimada no cultivo de outono (Figura 1A e 1C), o que concorda com resultados observados a campo de que a produtividade de batata é maior no cultivo de primavera do que no cultivo de outono (Bisognin et al., 2008), indicando que o modelo de Spitters (1987) reproduz o que acontece atualmente com a cultura da batata na região de estudo. No cenário 2 (apenas com aumento de  $CO_2$ ), tanto no cultivo de primavera quanto no de outono, observou-se um efeito positivo do  $CO_2$  na produtividade de tubérculos de batata em relação ao cenário 1. Esse aumento ocorreu devido a maior taxa de crescimento das plantas proporcionada pela maior EUR (26%), o fato fisiologicamente esperado pelo  $CO_2$  ser o substrato primário da fotossíntese (Taiz & Zeiger, 2004).

Quando o aumento na concentração de  $CO_2$  foi acompanhado pelo aumento da temperatura do ar, o efeito benéfico da maior concentração de  $CO_2$  foi potencializado nos

cenários 3s, 3as, 4s, 4as, 5a e 5as no cultivo de primavera. Porém, nos outros cenários do cultivo de primavera em todos os cenários com aumento de temperatura no cultivo de outono o efeito benéfico do aumento do CO<sub>2</sub> foi anulado (Figura 1A e 1C). Esse fato se explica pelo aumento da respiração do tecido vegetal e o encurtamento do ciclo (Siqueira et al., 2001; Taiz & Zeiger, 2004; Streck, 2005).

Tanto no cultivo de primavera quanto de outono, as simulações com aumento simétrico nas temperaturas mínima e máxima diária do ar resultaram em menores valores de produtividade de tubérculos de batata se comparados as simulações considerando aumentos assimétricos nas temperaturas (Figura 1A e 1C). Essa diferença entre os resultados das simulações nos cenários com aumento simétrico e assimétrico ocorreu em função de penalização da fotossíntese, pois nos cenários com aumento simétrico os valores de temperatura máxima foram mais elevados se comparado aos cenários com aumento assimétrico.

No modelo de Spitters (1987), o coeficiente utilizado para descrever a resposta da cultura ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> é a EUR. Assim, considerou-se que as temperaturas diurnas do ar são mais limitantes na fotossíntese líquida e, portanto, essa variável é a que mais interfere nos resultados das simulações. Como as temperaturas máximas são menos elevadas nos cenários de aumento assimétrico do que nos cenários com aumento simétrico, a fotossíntese líquida foi maior nos cenários 3as, 4as, 5as, 6as, 7as e 8as. Um dos efeitos das altas temperaturas acima da ótima para fotossíntese, que é de 24°C para a cultura da batata (Timlin et al., 2006), em condições de clima subtropical, é a passagem rápida pela fase de tuberização, o que resulta em menor produtividade, pois quanto menor a fase de tuberização, nas condições de cultivo do Brasil, menor a produtividade de tubérculos (Bisognin & Streck, 2009).

No cultivo de primavera (Figura 1A) nos cenários com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diária do ar, a produtividade de tubérculos de batata começou a diminuir a partir do cenário com aumento de 3°C (cenários 5s e 5as). No entanto, isso ocorreu já a partir do aumento de 1°C no cultivo de outono (Figura 1C) apesar de seus menores valores de diminuição da produtividade. Analisando-se os desvios de produtividade (Figura 1B e 1D), no cultivo de primavera em cenários de mudança climática, as reduções na produtividade de tubérculos de batata em relação ao cenário 1 da Tabela 1 foram maiores do que no cultivo de outono.

No cultivo de primavera, nos cenários com aumento simétrico de 4°C, 5°C e 6°C nas temperaturas mínima e máxima diária do ar, os desvios indicam uma redução de cerca de 7%, 33% e 58%, respectivamente, se comparado ao cenário 2 (Figura 1B), que anularam o efeito benéfico do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> (desvios negativos). Já nos cenários com aumento assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diária do ar, os desvios negativos corresponderam à redução na produtividade de tubérculos de batata em torno de 20% e 46%, respectivamente nos cenários com aumento de 5°C e 6°C na temperatura média do ar (Figura 1B). No cultivo de outono, houve desvio negativo, ou seja, o efeito benéfico do aumento de CO<sub>2</sub> foi anulado, somente no cenário com aumento simétrico nas temperaturas mínima e máxima diária do ar de 6°C, representando uma redução de 2% na produtividade de tubérculos de batata, redução não muito grande considerando os erros existentes nas estimativas. Para a cultura da soja em Santa Maria, RS, desvios negativos também ocorreram somente para o cenário com aumento 6°C (Streck & Alberto, 2006a). Nos demais cenários de aumento com temperatura simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima do ar o efeito benéfico do aumento de CO<sub>2</sub> não foi anulado pelo aumento da temperatura (Figura 1B).

Segundo Hijmans (2003), resultados com simulações em diferentes locais do Planeta indicam que a cultura da batata, assim como outras culturas, seja bastante afetada pelo

aumento na temperatura do ar. Estudos em locais de elevada latitude e clima temperado como, por exemplo, a Inglaterra (Davies et al., 1996), indicam um possível aumento na produtividade de tubérculos de batata frente à mudança climática. Porém, em muitos países, de latitudes baixas e médias que inclui o Brasil, o efeito de temperaturas do ar mais elevadas poderá ocasionar a diminuição na produtividade de tubérculos de batata, de acordo com Hijmans (2003). Uma estratégia para minimizar o efeito negativo das altas temperaturas nestes locais, seria alterar as datas de plantio. Esta hipótese foi testada para Santa Maria (Figura 2 e 3) e foi observado que, tanto no cultivo de primavera quanto de outono, as produtividades simuladas nos cenários, com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima do ar, tiveram a mesma tendência em relação às datas de emergência usadas na Figura 1. Esse fato foi observado tanto para as datas de emergência antecipadas quanto para aquelas atrasadas.

Nas duas datas de emergência antecipadas (18/08 e 25/08) para o cultivo de primavera da cultura da batata, a produtividade simulada em média foi superior ao cultivo com data de emergência de 01/09, enquanto que, nas datas de emergência posteriores (08/09 e 15/09), principalmente nos cenários com os maiores aumentos na temperatura do ar, a produtividade simulada foi muito afetada (Figura 1A, 2A e 2C). Nas duas datas de emergência antecipadas, os desvios na produtividade foram menores se comparados aos desvios na data de 01/09. Na data de emergência 18/08 ocorreu desvio negativo somente para o cenário com aumento de 6°C, ou seja, somente diante do aumento de 6°C na temperatura do ar o efeito benéfico do aumento de CO<sub>2</sub> seria anulado (Figura 2B). O desvio negativo neste cenário (6°C) provocou uma redução na produtividade de tubérculos de batata de 26%, no cenário com aumento simétrico nas temperaturas do ar, e 7%, no cenário com aumento assimétrico nas temperaturas do ar (Figura 2B). Na data de emergência 25/08, o efeito benéfico do aumento do CO<sub>2</sub> foi anulado pelo aumento de 5°C e 6°C na temperatura do ar, com redução na produtividade de

16% e 43% em cenários de aumento simétrico na temperatura do ar e em 27% com aumento de 6°C na temperatura do ar no cenário assimétrico (Figura 2D). Nas duas datas de emergência mais tardias o efeito benéfico do aumento de CO<sub>2</sub> foi anulado com 3°C (Figura 2F e 2H).

Nas duas datas antecipadas (08/02 e 15/02) do cultivo de outono, as produtividades simuladas foram menores, comparadas à produtividade da data de emergência 22/02 (Figura 1C, 3A e 3C). Os desvios na produtividade nas duas datas de emergência antecipadas, assim como na época recomendada, mostram que o efeito do aumento de CO<sub>2</sub> praticamente não é anulado pelo aumento da temperatura do ar. Os desvios são negativos somente nos cenários com aumentos simétrico de 5°C e 6°C na temperatura mínima e máxima diária do ar (Figura 1D, 3B e 3D). Na data de emergência de 08/02, onde a temperatura do ar foi mais elevada, ocorreram maiores valores de desvios negativos na produtividade (Figura 3B). O efeito do CO<sub>2</sub> na data de emergência 08/02 foi anulado com aumentos de 5°C e 6°C, o que representou uma redução na produtividade de 5% e 9%, respectivamente (Figura 1B), na data de emergência 22/02 o efeito das altas temperaturas foi menor (Figura 1D), ocasionando uma redução na produtividade de apenas 2% diante ao aumento de 6°C na temperatura do ar. Já o atraso na data de emergência no cultivo de outono proporcionou aumento na produtividade de tubérculos de batata, ou seja, ocorreram somente desvios positivos (Figura 3F e 3H) indicando que o efeito do aumento de CO<sub>2</sub> não é anulado pelos aumentos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar. Streck et al. (2006) simularam aumento na duração da fase EM-CO com o aumento da temperatura no cultivo de outono, o que colabora para explicar os desvios positivos nas datas mais tardias (Figura 3F e 3H), já que a cultura permanece mais tempo na fase de enchimento de tubérculos.

Diante destes resultados pode-se inferir que a estratégia de antecipar ou atrasar a data de plantio, no cultivo de primavera e no de outono, respectivamente, é válida por minimizar

os efeitos negativos da mudança climática por aumento da temperatura do ar, na produtividade de tubérculos de batata na região de Santa Maria, RS.

### Conclusões

1. Para os cultivos de primavera, um aumento simétrico na temperatura do ar a partir de 4°C e assimétrico a partir de 5°C (temperatura mínima 6°C e temperatura máxima 4°C) anularam o efeito benéfico do aumento da concentração de dióxido de carbono.

2. Para os cultivos de outono, o aumento da temperatura do ar exerceu pouco efeito na produtividade de tubérculos de batata.

3. A antecipação de 14 dias na data de plantio no cultivo de primavera e o atraso de sete dias na data de plantio no cultivo de outono diminuem o impacto negativo do aumento da temperatura do ar na produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria, RS.

### Referências

- ABBA [Associação Brasileira da Batata]. **Variedades – Asterix**. Acesso em 08 jan. 2010. Disponível em: <http://www.abbabatatabrasileira.com.br/images/variedades/asterix.pdf>
- ANDRESEN, J.A.; ALAGARSWAMY, G.; ROTZ, C.A.; RITCHIE, J.T.; LeBARON, A.W. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, v.93, p.1059-1070, 2001.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; JUNIOR, J.Z.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1057-1064, 2004.
- BISOGNIN, D.A. **Recomendações técnicas para o cultivo da batata no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Santa Maria: UFSM, 1996. 64p.

BISOGNIN, D.A.; MULLER, D.R.; STRECK, N.A.; ANDRIOLO, J.L.; SAUSEN, D. Desenvolvimento e rendimento de clones de batata na primavera e no outono. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.699-705, 2008.

BISOGNIN, D.A.; STRECK, N.A. **Desenvolvimento e manejo das plantas para alta produtividade e qualidade da batata**. Itapetininga: Associação Brasileira da Batata, 2009. 30p.

DAVIES, A.; JENKINS, T.; PIKE, A.; SHAO, J.; CARSON, I.; POLLOCK, C.J.; PARRY, M. L. Modelling the predicted geographic and economic response of UK cropping systems to climate change scenarios: the case of potatoes. **Aspects of Applied Biology**, v.45, p.63-69, 1996.

HIJMANS, R.J. The Effect of climate change on global potato production. **American Journal of Potato Research**, v.80, p.271-280, 2003.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Climate change 2007: The physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: University, 2007. 989p.

KARL, T.R.; KUKLA, G.; RAZUVAYEV, V.N.; CHANGERY, M.J.; QUAYLE, R.G.; HEIM JR., R.R.; EASTERLING, D.R.; BIN FU, C. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change. **Geophysical Research Letters**, v.18, p.2253-56, 1991.

KERR, R. A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, v.307, p.828-829, 2005.

KOOMAN, P.L.; HAVERKORT, A.J. Modeling development and growth of potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: HAVERKORT, A.J.; MacKERRON, D.K.L. **Potato ecology and modeling of crops under conditions of limiting growth**. V. 3. Hageningen: Kluwer Academic Publishers, 1995. p.41-60.

LAGO, I.; STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M.; OLIVEIRA, F.B.; de PAULA, G.M. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1441-1448, 2008.

NYENDE, A.B.; SCHITTENHELM, S.; MIX-WAGNER, G.; GREEF, J.M. Yield and canopy development of field grown potato plants derived from synthetic seeds. **European Journal of Agronomy**, v.22, p.175-184, 2005.

ROSENZWEIG, C.J.; PHILLIPS, J.; GOLDBERG, R.; CARROLL, J.; HODGES, T. Potential impacts of climate change on citrus and potato production in the US. **Agricultural Systems**, v.52, p.455-479, 1996.

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.

SCHAPENDONK, A.H.C.M.; POT, C.S.; GOUDRIAAN, J. Simulated effects of elevated carbon dioxide concentration and temperature on the productivity of potato. In: HAVERKORT, A.J.; MacKERRON, D.K.L. **Potato ecology and modeling of crops under conditions of limiting growth**. V.3. Hageningen: Kluwer Academic Publishers, 1995. p.101-114.

SANTA MARIA – Prefeitura Municipal de Santa Maria (RS), 2008. Dados Geopolíticos. Disponível em: <<http://santamaria.gov.br>>. Acesso em: 12 abr. 2009.

SEMENOV, M.A.; BROOKS, R.J.; BARROW, E.M.; RICHARDSON, C.W. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, v.10, p.95-107, 1998.

SPITTERS, C.J.T. An analysis of variation in yield among potato cultivars in terms of light absorption, light utilization and dry matter partitioning. **Acta Horticulturae**, v. 214, p.71-84, 1987.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M.F.; COSTA, A.C.; WOZNIAK, M.A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, p.311-320, 2000.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa, 2001. p.33-63.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.730-740, 2005.

STRECK, N.A.; LAGO, I.; ALBERTO, C.M.; BISOGNIN, D.A. simulação do desenvolvimento de batata cultivar asterix em cinco cenários de mudança climática em Santa Maria, RS. **Bragantia**, v.65, p.693-702, 2006.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1351-1359, 2006a.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v.36, p.424-433, 2006b.

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

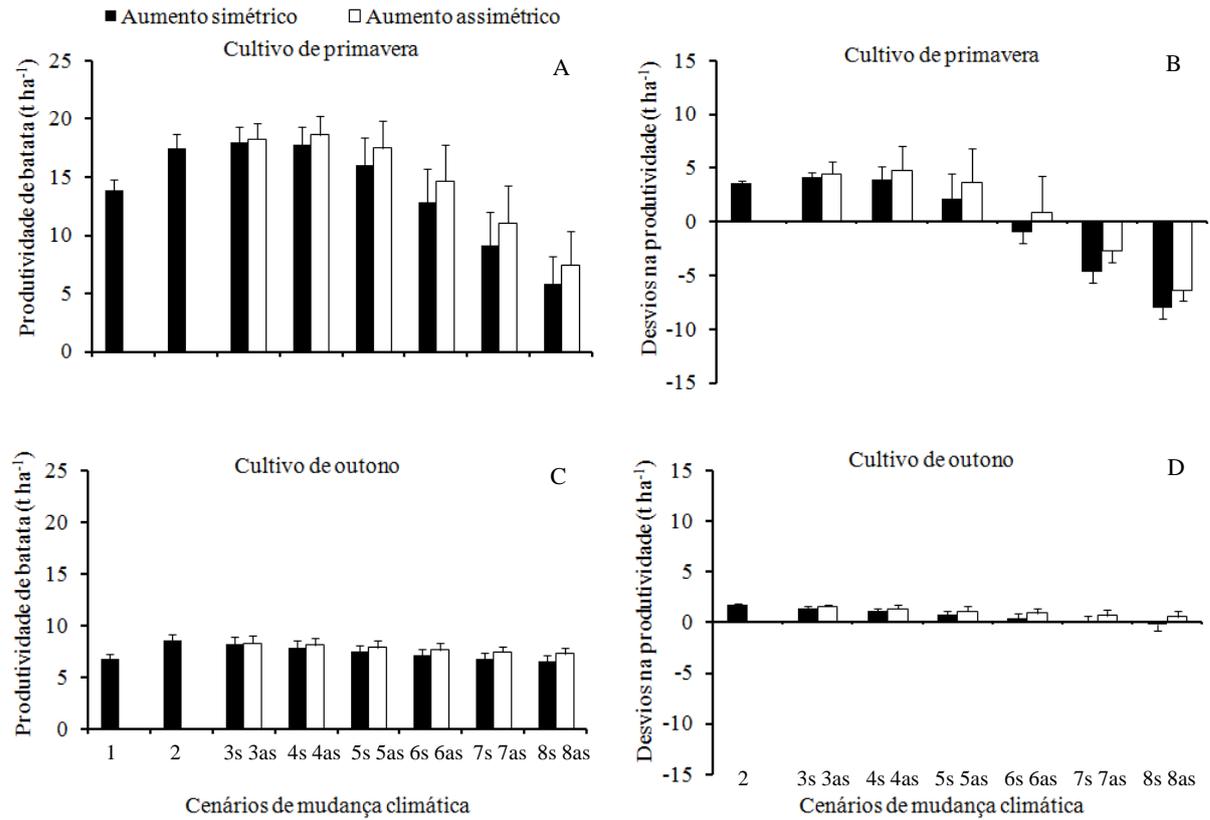
TIMLIN, D.; LUTFOR RAHMAN, S. M.; BAKER, J.; REDDY, V. R.; FLEISHER, D.; QUEBEDEAUX, B. Whole plant photosynthesis, development, and carbon partitioning in potato as a function of temperature. **Agronomy Journal**, v.98, p.1195-1203, 2006.

TUBIELLO, F.N.; DANATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C.O. Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179-189, 2000.

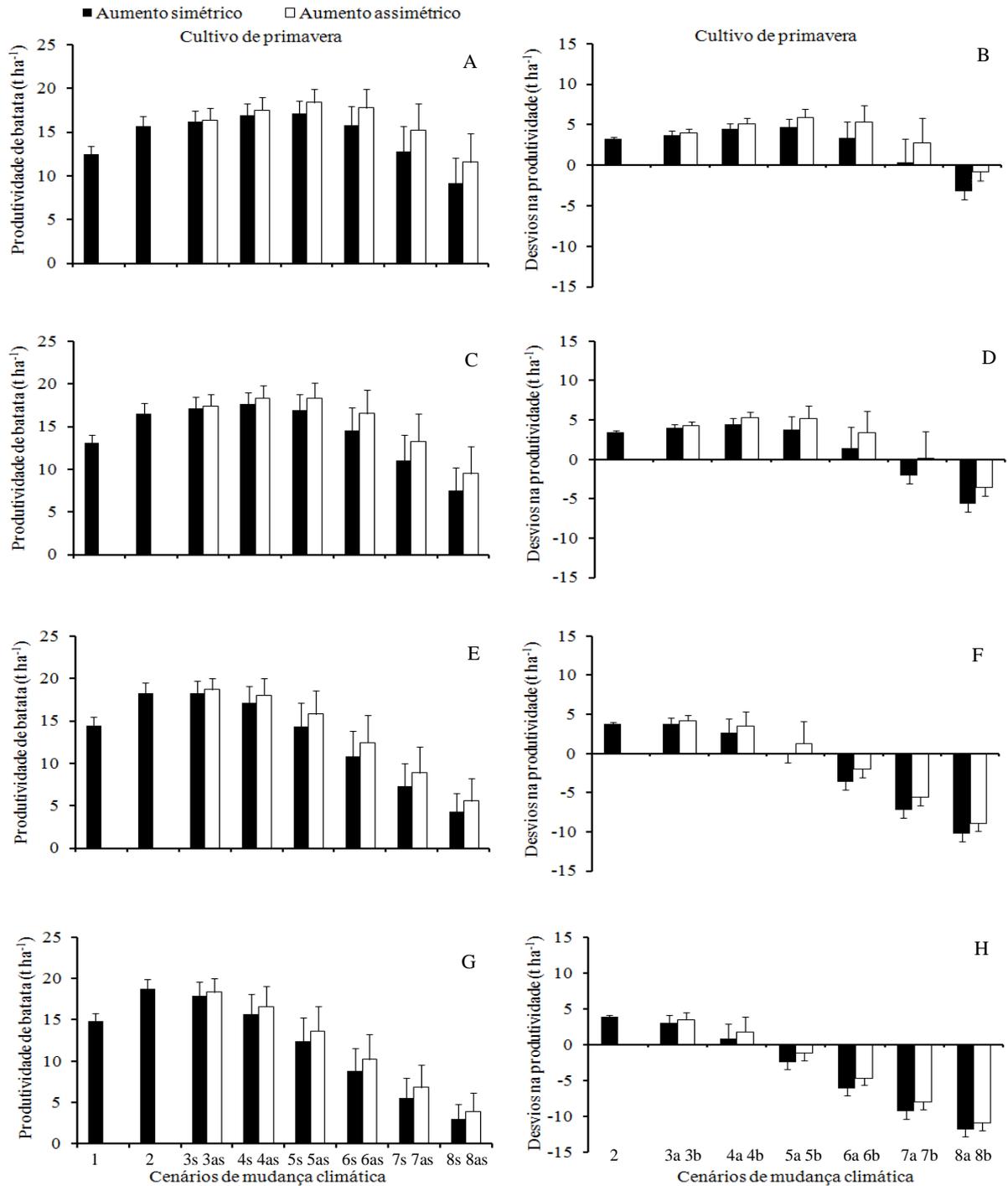
WEISS, A.; HAYS, C.J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, v.58, p.119-147, 2003.

**Tabela 1.** Cenários de aumento na concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura do ar com aumento simétrico (3s a 8s) e assimétrico (3as a 8as) na temperatura mínima e máxima diária usados no estudo.

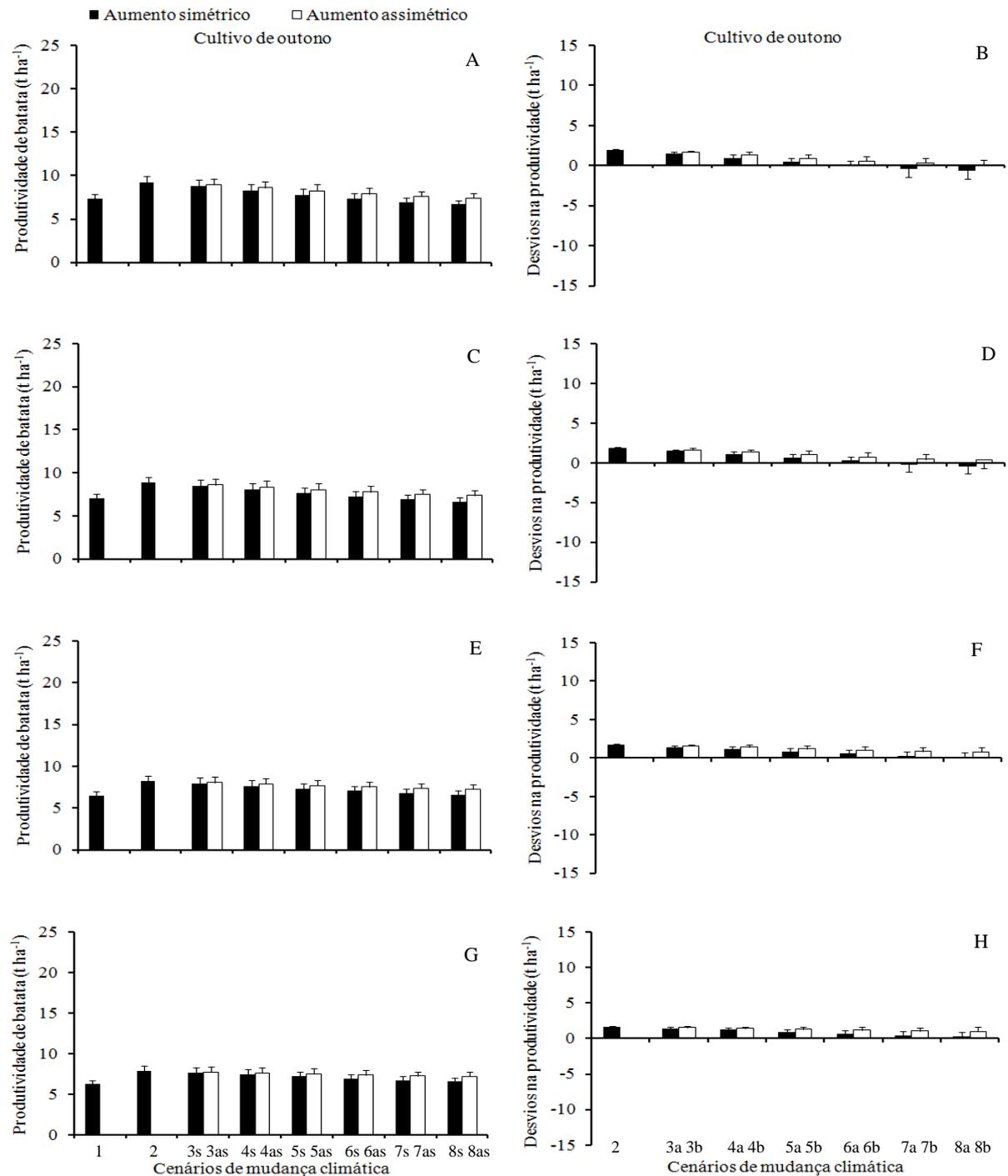
Cenários	Concentração de CO <sub>2</sub> (ppmv)	Temperatura mínima do ar (°C)	Temperatura máxima do ar (°C)	Temperatura média do ar (°C)
1	380	0	0	0
2	760	0	0	0
3s	760	+1,0	+1,0	+1,0
4s	760	+2,0	+2,0	+2,0
5s	760	+3,0	+3,0	+3,0
6s	760	+4,0	+4,0	+4,0
7s	760	+5,0	+5,0	+5,0
8s	760	+6,0	+6,0	+6,0
3as	760	+1,2	+0,8	+1,0
4as	760	+2,4	+1,6	+2,0
5as	760	+3,6	+2,4	+3,0
6as	760	+4,8	+3,2	+4,0
7as	760	+6,0	+4,0	+5,0
8as	760	+7,2	+4,8	+6,0



**Figura 1.** Produtividade (t ha<sup>-1</sup>) e desvios da produtividade de tubérculos de batata (t ha<sup>-1</sup>) em relação ao cenário climático atual sem mudança climática (cenário 1 da Tabela 1) nas datas de emergência para os cultivos de primavera - 01/09 (A, B) e outono 22/02 (C, D) em cenários de mudança climática com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar, Santa Maria, RS. As barras de erro representam um desvio padrão da média de 100 anos da produtividade simulada em cada cenário descrito na Tabela 1.



**Figura 2.** Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) e desvios da produtividade de tubérculos de batata ( $t\ ha^{-1}$ ) em duas datas de emergência anteriores 18/08 e 25/08 (A, B, C, D) e posteriores 08/09 e 15/09 (E, F, G, H) à data de emergência 01/09 na Figura 1A e 1B no cultivo de primavera em cenários de mudança climática com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar, Santa Maria, RS. As barras de erro representam um desvio padrão da média de 100 anos da produtividade simulada em cada cenário descrito na Tabela 1.



**Figura 3.** Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) e desvios da produtividade de tubérculos de batata ( $t\ ha^{-1}$ ) em duas datas de emergência anteriores 08/02 e 15/02 (A, B, C, D) e posteriores 01/03 e 08/03 (E, F, G, H) à data de emergência 22/02 usada na Figura 1C e 1D no cultivo de outono em cenários de mudança climática com aumento simétrico e assimétrico nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar, Santa Maria, RS. As barras de erro representam um desvio padrão da média de 100 anos da produtividade simulada em cada cenário descrito na Tabela 1.

## 5 DISCUSSÃO

Os modelos de simulação da produtividade das culturas são ferramentas que têm várias aplicações, sendo amplamente utilizados em estudos de impacto da mudança climática sobre as culturas. Para que os modelos possam ser utilizados em diferentes locais, uma das condições prévias importantes são a avaliação e calibração do modelo possibilitando, assim, uma maior confiabilidade na reprodução dos processos em estudo, ou seja, nos resultados das simulações (THORNTON et al., 1991; ADDISCOT et al., 1995).

No Capítulo I, desta tese, a avaliação e calibração dos seis modelos de simulação da produtividade de tubérculos de batata possibilitaram fazer uma distinção entre eles, sendo possível identificar qual o modelo mais apropriado para simulação da produtividade nas condições de São Joaquim, SC e Santa Maria, RS. Os modelos de simulação da produtividade quando foram utilizados os coeficientes originais apresentaram melhores resultados nas simulações, isto é, os menores valores de RQME, para São Joaquim, SC, em comparação à Santa Maria, RS. A melhor predição da produtividade para São Joaquim, SC, certamente, é devido, principalmente, às condições climáticas. São Joaquim possui clima mais ameno e uma única época de cultivo, o que se assemelha mais aos locais onde os seis modelos foram desenvolvidos, avaliados e calibrados.

Os modelos de simulação da produtividade foram calibrados somente para Santa Maria, RS (Capítulo I), pois para essa localidade havia diferentes épocas de plantio, fato que propiciou que a cultura da batata se desenvolvesse, crescesse e produzisse em distintas condições ambientais, sendo isso necessário para se poder calibrar modelos matemáticos para locais diferentes dos quais foram desenvolvidos. Os resultados das simulações da produtividade de tubérculos de batata foram bastante distintos dos resultados das simulações com os coeficientes originais dos seis modelos em estudo, embora alguns modelos tenham apresentado melhor desempenho quando os coeficientes originais foram utilizados (Figura 3 - Capítulo I). Por exemplo, os modelos de Hartz; Moore (1978) e Johnson et al. (1986) apresentaram melhores desempenhos quando os coeficientes originais foram mantidos, mostrando a natureza empírica desses modelos. Os modelos empíricos têm uma utilização muito restrita, pois são dependentes das condições locais onde foram desenvolvidos e calibrados. Já para os demais modelos avaliados e calibrados houve melhor predição da

produtividade de tubérculos de batata com os coeficientes ajustados (Capítulo I), visto que a calibração incorpora e atualiza coeficientes genótipo-específico nos modelos.

Após a calibração, o modelo de Sands et al. (1979), Pereira et al. (2008) e MacKerron; Waister (1985), apresentaram a melhor performance de simulação da produtividade de tubérculos de batata. No entanto, nenhum desses três modelos foi utilizado no Capítulo II para a simulação da produtividade de tubérculos de batata em cenários de mudança climática. Nesses três modelos, não havia a possibilidade de considerar o efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, pois em nenhuma das sub-rotinas o coeficiente de eficiência de uso da radiação (EUR) é utilizado. O EUR permite considerar o efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na produtividade das culturas, devido à relação entre a produção de matéria seca e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada ou absorvida pelas culturas (SIVAKUMAR; VIRMANI, 1984; COSTA et al., 1996). O modelo o que permite considerar o efeito do CO<sub>2</sub> sobre a fotossíntese, através de EUR, e que, portanto pode ser utilizado nos cenários de mudança climática (Capítulo II) foi o modelo de Spitters (1987) (Anexo E).

No cenário 1 (Tabela 1) os valores de produtividade de tubérculos de batata foram menores se comparados valores dos cenários com o dobro da concentração de CO<sub>2</sub> atual, tanto para o cultivo de primavera quanto para o cultivo de outono. Esse fato, pelas estimativas, confirma o efeito positivo do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na produtividade da cultura da batata, sendo explicado pela maior taxa de crescimento das plantas proporcionada pela maior EUR. O aumento na produtividade de tubérculos de batata diante do aumento de CO<sub>2</sub> é devido ao CO<sub>2</sub> ser o substrato primário da fotossíntese e, assim, quanto maior for sua disponibilidade maior será o crescimento e produtividade das culturas (TAIZ; ZEIGER, 2004). Se o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> e outros gases do efeito estufa não resultassem em aumento da temperatura do ar, a agricultura certamente seria amplamente beneficiada, porém sabe-se que à medida que a concentração destes gases aumenta, o aumento da temperatura do ar é muito provável (IPCC, 2007). Assim, quando o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> foi acompanhado pelo aumento da temperatura do ar, o efeito benéfico do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na produtividade de tubérculos de batata foi anulado (Capítulo II) o que tem respaldo fisiológico no aumento da respiração do tecido vegetal e o encurtamento do ciclo da cultura com o aumento da temperatura (SIQUEIRA et al., 2001; TAIZ; ZEIGER, 2004; STRECK, 2005).

O efeito da mudança climática, considerando aumento simétrico e assimétrico na temperatura mínima e máxima do ar, na produtividade de tubérculos de batata, permite inferir que o aumento simétrico nas temperaturas mínima e máxima diária do ar resulta em menores

produtividades de tubérculos de batata se comparado aos valores que levaram em consideração aumentos assimétricos nas temperaturas. No aumento simétrico, as temperaturas máximas são mais elevadas do que no aumento assimétrico, pois neste último é considerado um maior aumento nas temperaturas mínimas. É visto que os registros da literatura apresentam um maior aumento nas temperaturas mínimas do que nas máximas em diversos locais do Globo (PENG et al. 2004; MEZZOMO, 2005; MARQUES et al., 2005; STEINMETZ et al., 2005; TAO et al., 2008; SALATI et al., 2007).

As diferenças nas simulações considerando aumentos simétricos e assimétricos na temperatura do ar ocorreram, devido a uma função adicional de penalização da fotossíntese utilizada no algoritmo de Spitters (1987) através do coeficiente EUR. O efeito das altas temperaturas, acima da temperatura ótima para fotossíntese de 24°C (WOLF et al., 1990; TIMLIN et al., 2006) são prejudiciais ao desenvolvimento e crescimento provocando, conseqüentemente, redução na produtividade de tubérculos de batata (MARINUS; BODLAENDER, 1975). Sendo assim, nos cenários com aumento simétrico na temperatura do ar, as temperaturas máximas diárias frequentemente alcançaram valores acima da temperatura ótima para EUR (25°C) em batata (KOOMAN; HAVERKORT, 1995).

No cultivo de primavera, o efeito da mudança climática nos distintos cenários provocou maiores efeitos na produtividade de tubérculos de batata se comparada ao cultivo de outono (Capítulo II). Nesses cultivos futuros na primavera o efeito da mudança climática provocou redução na produtividade a partir do aumento de 4°C nos cenários (6a) com aumento simétrico na temperatura e, a partir de 5°C nos cenários (7as) com aumento assimétrico nas temperaturas mínima e máxima do ar.

Já para o cultivo de outono só houve redução na produtividade de tubérculos de batata para o cenário com aumento simétrico de 6°C (8s) na temperatura do ar. Hijmans (2003) relata que uma estratégia para minimizar o efeito negativo das altas temperaturas seria alterar as datas de plantio, o que foi também apresentado no Capítulo II. No cultivo de primavera a antecipação e no cultivo de outono o atraso da data de plantio minimizam o efeito negativo das altas temperaturas na produtividade de tubérculos de batata, o confirmando a hipótese proposta por Hijmans (2003).

## 6 CONCLUSÕES

1. Os modelos com os coeficientes originais apresentam desempenho semelhante na simulação da produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria e São Joaquim.
2. Os modelos que melhor simulam a produtividade de tubérculos de batata são os modelos de HARTZ & MOORE, JOHNSON e PEREIRA.
3. Após o ajuste dos modelos por calibração dos coeficientes, o modelo de SANDS é o que melhor prediz a produtividade de tubérculos de batata, seguido pelos modelos de PEREIRA e MacKERRON & WAISTER.
4. Para os cultivos de primavera, um aumento simétrico na temperatura do ar a partir de 4°C e assimétrico a partir de 5°C (temperatura mínima 6°C e temperatura máxima 4°C) anularam o efeito benéfico do aumento da concentração de dióxido de carbono.
5. Para os cultivos de outono, o aumento da temperatura do ar praticamente não afeta a produtividade de tubérculos de batata.
6. A antecipação de 14 dias na data de plantio no cultivo de primavera e o atraso de sete dias na data de plantio no cultivo de outono diminuem o impacto negativo do aumento da temperatura do ar na produtividade de tubérculos de batata em Santa Maria, RS.

## **7 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

1. Simular o impacto da possível mudança climática em épocas de plantio fora da época de plantio recomendada atualmente para os cultivos de primavera e outono.
2. Desenvolver pesquisas envolvendo seleção de genótipos de batata tolerantes a altas temperaturas.

## REFERÊNCIAS

ABBA. Associação Brasileira da Batata. **A batata como alimento**. Disponível em: <<http://www.abbabatatabrasileira.com.br>>. Acesso em: 21 abr. 2008.

\_\_\_\_\_. **Variedades – Asterix**. Disponível em: <<http://www.abbabatatabrasileira.com.br/images/variedades/asterix.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2010.

ALLEN, L. H. Jr. Potentials for carbon dioxide enrichment. In: BARFIELD, B. J.; GERBER, J.F. **Modification of the Aerial Environment of Plants**. St Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1979. cap. 8, p. 500-519. (Monograph, 2).

ACOCK, B.; ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 56-61, 1991.

ADDISCOT, T.; SMITH, J.; BRADBURY, N. Critical evaluation of models and their parameters. **Journal Environmental Quality**, v. 34, p. 803-807, 1995.

ANDRESEN, J. A. et al. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 1059-1070, 2001.

ANTUNES, F. Z.; FORTES, M. Exigências climáticas da cultura da batata. **Informe Agropecuário**, v. 7, n. 76, p. 19-23, 1981.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

ASSIS, J. P. et al. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 731-737, 2006.

BAKER, J. T. et al. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. **Crop Science**, v. 29, n. 1, p. 98-105, 1989.

BINDI, M. et al. Chlorophyll concentration of potatoes grown under elevated carbon dioxide and/or ozone concentrations. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 319-335, 2002.

BISOGNIN, D. A. **Recomendações técnicas para o cultivo da batata no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Santa Maria: UFSM, 1996. 64 p.

BISOGNIN, D. A. et al. Desenvolvimento e rendimento de clones de batata na primavera e no outono. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 699-705, 2008.

BISOGNIN, D. A.; STRECK, N. A. **Desenvolvimento e manejo das plantas para alta produtividade e qualidade da batata**. Itapetininga: Associação Brasileira da Batata, 2009. 30 p.

BUTTERFIELD, R. E.; MORISON, J. I. L. Modeling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 62, n. 3, p. 241-261, 1992.

CARTER T. R.; SAARIKKO, R. A.; NIEMI, K. J. Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. **Agricultural and Food Science**, v. 5, p. 329-350, 1996.

CARTER, T. R. et al. Modelling climate change impacts on wheat and potato in Finland. In: DOWNING, T.E. et al. **Climate change, climatic variability and agriculture in Europe: an integrated assessment**. Oxford: Environmental Change Institute, 2000. p. 289-312. (Research report, n. 21).

CIB. Centro de Inteligência da Batata. **Informativo quinzenal da batata**. Lavras, 2008. 8 p. (Informativo, n. 30).

CLIFFORD, S. C. et al. The effects of elevated atmospheric carbon dioxide and water stress on light interception, dry matter production and yield in stands of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 44, n. 269, p. 1763-1770, 1993.

CONN, J. S.; COCHRAN, V. L. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> in the North American Subarctic. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 112, p. 49-57, 2006.

COSTA, L. C.; MORISON, J. I. L.; DENNETT, M. D. Carbon balance of growing faba bean and its effect on crop growth: experimental and modeling approaches. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, p. 11-17, 1996.

CURE, J. D.; ACOCK, B. Crop response to Carbon Dioxid doubling: A literature survey. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 38, n. 1-3, p. 127-145, 1986.

DAVIES, A. et al. Modelling the predicted geographic and economic response of UK cropping systems to climate change scenarios: the case of potatoes. **Aspects of Applied Biology**, v. 45, p. 63-69, 1996.

DOURADO-NETO, D. et al. Principles of crop modeling and simulation. I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 46-50, 1998.

EMBRAPA - Trigo, 2007. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p\\_bp48\\_5.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp48_5.htm)>. Acesso em: 15 maio 2009.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Acesso em: 15 maio 2009.

FLEISHER, D. H.; TIMLIN, D. Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, p. 84-93, 2006.

HACOUR, A. et al. CO<sub>2</sub> and ozone effects on canopy development of potato crops across Europe. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 257-272, 2002.

HARRISON, P. A. et al. Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe. In: DOWNING, T.E. et al. **Climate change, climatic variability and agriculture in Europe: an integrated assessment**. Oxford: Environmental Change Institute, 2000. p. 367-390. (Research report n. 21).

HARTZ, T. K.; MOORE, F. D. Prediction of potato yield using temperature and insolation data. **American Potato Journal**, v. 55, p. 431-436, 1978.

HAWKES, J. G. Origins of cultivated potatoes and species relationships. In: BRADSHAW, J. E.; MACKAY, G. R. **Potato genetics**. CAB International: Cambridge, 1994. p. 3-42.

HELDWEIN, A. B. et al. Batata. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. 1. ed. Brasília: INMET, 2009. cap. 6, p. 93-108.

HIJMANS, R. J. The Effect of climate change on global potato production. **American Journal of Potato Research**, v. 80, p. 271-280, 2003.

HODGES, T. **Predicting crop phenology**. Boca Raton: CRC, 1991. 233 p.

HULME, M.; ZHAO, Z. C.; JIANG, T. Recent and future climate change in East Asia. **International Journal of Climatology**, v. 14, n. 4, p. 637-658, 1994.

HUNT, L. A.; VAN DER POORTEN, G.; PARARAJASINGHAM, S. Postanthesis temperature effects on duration and rate of grain filling in some winter and spring wheats. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, n. 5, p. 609-617, 1991.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 07 out. 2009.

IDSO, S. B. et al. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant growth: the interactive role of air temperature. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 1-10, 1987.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas>>. Acesso em: 12 abr. 2010.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change – The IPCC Scientific Assessment**. Cambridge: University Press, 1995. 288p.

\_\_\_\_\_. **Climate change 2001: the scientific bases – The contribution of the working group I of the third assessment report**. Cambridge: University, 2001. 944 p.

\_\_\_\_\_. **Climate change 2007: the physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: University, 2007. 989 p.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v. 83, n. 1, p. 55-56, 1995.

JOHNSON, K. B.; JOHNSON, S. B.; TENG, P. S. Development of a simple potato growth model for use in crop-pest management. **Agricultural Systems**, v. 19, n. 3, p.189-209, 1986.

KARL, T. R. et al. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change. **Geophysical Research Letters**, v. 18, n. 12, p. 2253-56, 1991

KERR, R. A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, v. 307, n. 5711, p. 828-829, 2005.

KHEDHER, M. B.; EWING, E. E. Growth analysis of eleven potato cultivars grown in the greenhouse under long photoperiods with and without heat stress. **American Potato Journal**, v. 62, n. 10, p. 537-554, 1985.

KIMBALL, B. A. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. **Agronomy Journal**, v. 75, n. 5, p. 779-788, 1983a.

\_\_\_\_\_. **Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 770 prior observations**. Phoenix: US Water Conservation Laboratory, 1983b. 154 p. (Water Conservation Laboratory Report, n. 14).

KOOMAN, P. L.; HAVERKORT, A. J. Modeling development and growth of potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: HAVERKORT, A. J.; MacKERRON, D. K. L. **Potato ecology and modeling of crops under conditions of limiting growth**. Wageningen: Kluwer academic publishers, 1995. v. 3, p. 41-60.

KOOMAN, P. L.; RABBINGE, R. An analysis of the relation between dry matter allocation to the tuber and earliness of a potato crop. **Annals of Botany**, v. 77, n. 3, p. 235-242, 1996.

LAGO, I. et al. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p.1441-1448, 2008.

LAFTA, A. M.; LORENZEN, J. H. Effect of high temperature on plant growth and carbohydrate metabolism in potato. **Plant Physiology**, v.109, n. 2, p. 637-643, 1995.

LEVY, D.; KEDAR, N. *Solanum tuberosum*. In: HALEVY, A. H. (Ed.). **CRC Handbook of flowering**. Boca Raton: CRC, 1985. p. 363-366.

LONG, S. P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: Has its importance been underestimated? **Plant Cell and Environment**, v. 14, n. 6, p. 729-739, 1991.

LOPES, C. A.; BUSO, J. A. **Cultivo da batata (*Solanum tuberosum* L.)**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 1997. 36 p. (Instruções técnicas, n. 8).

LOVATO, C. Influência do ambiente no desenvolvimento da planta de batata. **Revista Batata Show**, v. 5, n. 11, 2005.

MacKERRON, D. K. L.; WAISTER, P. D. A simple model of potato growth and yield. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 34, p. 241-252, 1985.

MAHLMAN, J. D. Uncertainties in projections of human induced climate warmings. **Science**, v. 278, n. 5342, p. 1416-1417, 1997.

MARINUS, J.; BODLAENDER, K. B. A. Response of some potato varieties to temperature. **Potato Research**, v. 18, n. 2, p. 189-201, 1975.

MARQUES, J.R.Q. et al. Aumento da temperatura mínima do ar no Rio Grande do Sul, sua relação com o aquecimento global e possíveis impactos no arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. p. 224-226.

McCARTHY, J.J. et al. Climate Change 2001. **Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Cambridge: University Press, 2001. 1000 p. Disponível em: < <http://www1.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>>. Acesso em: 11 junho 2009.

MEARNS, L. O. Climate change and variability. In: REDDY, K. R.; HODGES, H. F. **Climate change and global crop productivity**. London: British Library, 2000. p. 7-35.

MENEZES, C. B. et al. Avaliação de genótipos de batata (*Solanum tuberosum* L.) nas safras das águas e inverno no sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 23, n. 4, p. 777-784, 1999.

MEZZOMO, D. **Modelos prognósticos da temperatura mínima média numa região homogênea do Rio Grande do Sul**. Pelotas, RS, 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, Pelotas, 2005.

MIGLIETTA, F. et al. Free air CO<sub>2</sub> enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): development growth and yield. **Global Change Biology**, v. 4, n. 2 p. 163-172, 1998.

MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5. p. 695-697, 1996.

MULLINS, E. et al. Potato in the age of biotechnology. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 5, p. 254-260, 2006.

NIVAA. **Catálogo holandês de variedades de batata**. Haarlem: Boom-Planeta, 1997. 270 p.

NYENDE, A. B. et al. Yield and canopy development of field grown potato plants derived from synthetic seeds. **European Journal of Agronomy**, v. 22, n. 2, p. 175-184, 2005.

PAULA, F.L.M. **Modelagem do desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.) à campo**. 2005. 42 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

PEIRIS, D. R. et al. A simulation study of crop growth and development under climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 79, n. 4, p. 271-287, 1996.

PENG, S. et al. Rice yield decline with higher night temperature from global warming. **National Academy of Sciences of the USA**, v. 101, n. 27, p. 9971-9975, 2004.

PEREIRA, et al. Potato potential yield based on climatic elements and cultivar characteristics. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 327-334, 2008.

PESSOA, M. C. P. Y. et al. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 83 p. (Embrapa-CNPMA. Documentos, 8).

PRANGE, R. K. et al. Reduction in potato growth at high temperature: Role of photosynthesis and dark respiration. **American Potato Journal**, v. 67, n. 6, p. 357-369, 1990.

POTATO. **International year of the potato 2008**. Disponível em: <[www.potato2008.org](http://www.potato2008.org)>. Acesso em: 11 abr. 2009.

REEKIE, E. G.; BAZZAZ, F. A. Phenology and growth in four annual species grown in ambient and elevated CO<sub>2</sub>. **Canadian Journal of Botany**, v. 69, p. 2475-2481, 1991.

REDDY, K. R.; HODGES, H. F. Climate Change and Global Crop Productivity: an Overview. In: REDDY, K. R.; HODGES, H. F. **Climate change and global crop productivity**. London: British Library, 2000. p. 1-5.

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, n. 1, p. 77-97, 2005.

RIMMINGTON, G. M.; CHARLES-EDWARDS, D. A. Mathematical descriptions of plant growth and development. In: WISIOL, K.; HESKETH, J. D. **Plant growth modeling for resource management: current models and methods**. Boca Raton: CRC Press, 1987. v. 1, p. 3-15.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. New York: J. Wiley & Sons, 1983. 495 p.

ROSENZWEIG, C. J. et al. Potential impacts of climate change on citrus and potato production in the US. **Agricultural Systems**, v. 52, n. 4, p. 455-479, 1996.

RUDORFF, B. F. T. et al. Growth, radiation use efficiency, and canopy reflectance of wheat and corn grown under elevated ozone and carbon dioxide atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 163-173, 1996.

SAGE, R. F. Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. The gas exchange perspective. **Photosynthesis Research**, v. 39, n. 3, p. 351-368, 1994.

SALATI, E. et al. **Impactos e Oportunidades das Mudanças Climáticas Globais para florestas (naturais e plantadas) e a Produção Agro-Pecuária**. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/>>. Acesso em: 12 junho 2009.

SANDS, P. J. HACKETT, C.; NIX, H. A. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). I. Derivation from well-managed field crops. **Field Crops Research**, v. 2, p. 309-331, 1979.

SANTA MARIA (RS). Prefeitura. **Dados geopolíticos**. 2008. Disponível em: <<http://santamaria.gov.br>>. Acesso em: 12 abr. 2009.

SCHAPENDONK, A. H. C. M.; POT, C. S.; GOUDRIAAN, J. Simulated effects of elevated carbon dioxide concentration and temperature on the productivity of potato. In: HAVERKORT, A. J.; MacKERRON, D. K. L. **Potato ecology and modeling of crops under conditions limiting growth**, v. 3, p. 101-114, 1995.

SCHAPENDONK, H. C. M. et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthetic acclimation and productivity of two potato cultivars grown in open-top chambers. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 27, p. 1119-1130, 2000.

SEMENOV, M. A. et al. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, v. 10, p. 95-107, 1998.

SICHER, R. C.; BUNCE, J. A. Photosynthetic enhancement and conductance to water vapor of field-grown *Solanum tuberosum* (L.) in response to CO<sub>2</sub> enrichment. **Photosynthesis Research**, v. 62, n. 2, p. 155-163, 1999.

SHAYKEWICH, C. F. An appraisal of cereal crop phenology modeling. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 75, n. 2, p. 329-341, 1995.

SILVA, L. A. S. **Duração do ciclo vegetativo e sua relação com o potencial produtivo de genótipos de batata**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

SIONIT, N.; STRAIN, B. R.; FLINT, E. P. Interaction of temperature and CO<sub>2</sub> enrichment on soybean: photosynthesis and seed yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 67, n. 5, p. 629-636, 1987.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, n. 1, p.115-129, 1994.

SIQUEIRA, O. J. W. et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. EMBRAPA: Jaguariúna, SP, 2001. p. 33-63.

SIVAKUMAR, M. V. K.; VIRMANI, S. M. Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 31, p. 131-141, 1984.

SOMBROEK, W. G.; GOMES, R. The climate change-Agriculture conundrum. In: BAZZAZ, F.; SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John W. & Sons, 1996. cap. 1, p. 1-14.

SOUZA, Z. S. Cultura da Batata na EPAGRI em Santa Catarina. **Revista Batata Show**, n. 4, 2004. Disponível em: <[http://www.abbabatatabrasileira.com.br/revista10\\_016.htm](http://www.abbabatatabrasileira.com.br/revista10_016.htm)>. Acesso em: 8 jul. 2009.

SPITTERS, C. J. T. An analysis of variation in yield among potato cultivars in terms of light absorption, light utilization and dry matter partitioning. **Acta Horticulturae**, v. 214, p. 71-84, 1987.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

STRECK, N. A. et al. Simulação do desenvolvimento da batata cultivar Asterix em cinco cenários de mudanças climáticas em Santa Maria, RS. **Bragantia**, v. 65, n. 4, p. 693-702, 2006.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 424-433, 2006a.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 9, p. 1351-1359, 2006b.

STEINMETZ, S. et al. Aumento da temperatura mínima do ar na região de Pelotas, sua relação com o aquecimento global e possíveis conseqüências para o arroz irrigado no Rio Grande Do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. 1 CD-ROM.

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

TAO, F. et al. Global warming, rice production, and water use in china: developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 1, p. 94-10, 2008.

TABEAUD, M. O aquecimento contemporâneo: entre certeza, controvérsia e dúvida. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 35-48, 2007.

THOMAS, A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 102, n. 2-3, p. 71-81, 2000.

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

THORNTON, P. K., DENT, B. J., BAZCI, Z. A framework for crop growth simulation model applications. **Agricultural System**, v. 37, p. 327-340, 1991.

TIMLIN, D. et al. Whole plant photosynthesis, development, and carbon partitioning in potato as a function of temperature. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 1195-1203, 2006.

TUBIELLO, F. N. et al. Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v. 13, n. 2-3, p. 179-189, 2000.

UNSWORTH, M. H.; HOGSETT, W. E. Combined effect of changing CO<sub>2</sub>, temperature, UVB radiation, and O<sub>3</sub> on crop growth. In: BAZZAZ, F.; SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: J. Wiley & Sons, 1996. cap. 8, p. 171-198.

USUDA, H.; SHIMOGAWARA, K. The effects of increased atmospheric carbon dioxide on growth, carbohydrates and photosynthesis in radish, *Raphanus sativus*. **Plant Cell and Environment**, v. 39, n. 1, p. 1-7, 1998.

VAN DAM, J.; KOOMAN, P. L.; STRUIK, P. C. Effects of temperature and photoperiod on early growth and final number of tuber in potato (*Solanum tuberosum* L.). **Potato Research**, v. 39, n. 1, p. 51-62, 1996.

VU, J. C. V. et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, n. 1, p. 68-76, 1997.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, v. 58, n. 1-2, p. 119-147, 2003.

WIEGAND, C. L.; CUELLAR, J. A. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. **Crop Science**, v. 21, n. 1, p. 95-101, 1981.

WIT, C. T. de. **Simulation of assimilation, respiration, and transpiration of crops.** Wageningen: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 141 p.

WOLF, S. et al. Effect of high temperature on photosynthesis in potatoes. **Annals of Botany**, v. 65, n. 2, p. 179-185, 1990.

WOLF, J. Comparison of two potato simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. **Climate research**, v. 21, n. 2, p. 173-186, 2002.

## **ANEXO**

**ANEXO A** - Modelo de Hartz; Moore (1978).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \xi$$

em que:  $Y$  é a produtividade de tubérculos de batata ( $\text{g planta}^{-1}$ ),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são os coeficientes estimados,  $X_1$  é a soma térmica ( $^{\circ}\text{C dia}$ ),  $X_2$  é densidade de fluxo de radiação solar incidente ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $X_3$  é a amplitude térmica diária ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $\xi$  é o erro. A soma térmica (ST) é calculada por:

$$ST = \frac{\text{temp max } (\leq 30^{\circ}\text{C}) + \text{temp min } (\geq 4,4^{\circ}\text{C}) - 4,4^{\circ}\text{C} -}{2}$$

$$\frac{\text{temp min } (> 4,4^{\circ}\text{C}) - 4,4^{\circ}\text{C}}{2}$$

**ANEXO B** - Modelo de Sands et al. (1979).

$$\begin{array}{ll}
 Y(P) = 0 & P < P_{tg} \\
 Y(P) = B (P_{mb} - P_{tg}) (1 - p/3) p^2 & P_{tg} \leq P < P_{mb} \\
 Y(P) = (2B / 3) (P_{mb} - P_{tg}) + B(P_{cb} - P_{mb}) (1 - p^2) / 3)p & P_{mb} \leq P < P_{cb} \\
 Y(P) = (2B / 3) (P_{cb} - P_{tg}) & P_{cb} \leq P
 \end{array}$$

em que: Y é a produtividade de tubérculos de batata ( $t \text{ ha}^{-1}$ ), P é referente ao tempo (dias), B é a taxa máxima de enchimento de tubérculos ( $t \text{ ha}^{-1}$ ) e  $P_{mb}$ ,  $P_{tg}$  e  $P_{cb}$  é o tempo (dias) da emergência até a taxa máxima de enchimento de tubérculos, é o tempo da emergência até o começo do crescimento de tubérculos e tempo da emergência até o término do enchimento de tubérculos, respectivamente.

$$B = B_o m \exp [ w / b_w + R / b_R ]$$

em que: B é a taxa máxima de enchimento de tubérculos ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ),  $B_o$  inclui a diferença varietal em B (0,095), m é o índice de manejo, w é o déficit máximo de água no solo permitido pela irrigação durante o enchimento de tubérculos (2 cm),  $b_w$  -15, R é a radiação média das três primeiras semanas após a emergência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e  $b_R$  19.

Para obter  $P_{tg}$  foi utilizada a função:

$$P_{tg} = P_o \exp [R/\alpha_R + T/\alpha_T + (h/\alpha_h)^n]$$

em que:  $P_{tg}$  é o tempo da emergência até o começo do crescimento de tubérculos,  $P_o$  é uma escala de  $P_{tg}$  (9,5), R é a radiação média das três primeiras semanas após a emergência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $\alpha_R$  -40, T é a temperatura das três primeiras semanas após a emergência,  $\alpha_T$  10, h média do comprimento do dia das três primeiras semana após a emergência,  $\alpha_h$  12 e n 3.

$$\begin{array}{ll}
 P(T) = 0 & T > T_a \\
 P(T) = k [1 - (T - T_b)^2 / (T_b - T_a)^2] & T_a \leq T < T_b \\
 P(T) = k [1 - (T - T_b)^2 / (T_c - T_b)^2] & T_b \leq T < T_c \\
 P(T) = 0 & T_c \leq T
 \end{array}$$

em que: P(T) é o tempo fisiológico, k escala para medir a taxa de acumulação no tempo fixado em 10, T é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $T_b$ ,  $T_a$  e  $T_c$  são as temperaturas cardinais ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**ANEXO C - Modelo de MacKerron; Waister (1985).**

Produtividade de tubérculo, Y (g m<sup>-2</sup>):

$$Y = 5T$$

em que: T é a partição de matéria seca para tubérculos.

Partição de matéria seca para tubérculos:

$$T = 0,75D$$

em que: D é a produção de matéria seca.

Produção de matéria seca:

$$D = \left( \sum_{t=c}^d I + \sum_{t=c}^d I \right) 1,84$$

em que: D é a produção de matéria seca diária (g m<sup>-2</sup>) I é a radiação interceptada a cada dia, e e e c representam as datas limites da emergência e fechamento do dossel e d representa a data da senescência, 1,84 é o coeficiente de conversão da matéria seca.

Quando o índice de área foliar (L) for 3 significa o fechamento do dossel. O cálculo da radiação solar interceptada é função da área foliar calculada diariamente pela expressão descrita acima. Quando o índice área foliar (L) foi maior que 3 então L = 3, pois L = 3 é o índice de área foliar final.

A radiação solar interceptada:

$$\sum_{t=e}^c I = \sum_{t=e}^c L/3$$

em que: L é o índice de área foliar.

Área foliar é calculada diariamente em função da temperatura do ar:

$$A_d = A_{(d-t)} \exp (Rt)$$

em que: t é o intervalo de tempo.

Taxa relativa de crescimento da folha:

$$R = 0,01333 \times T_e$$

em que: T<sub>e</sub> é a temperatura média acima da temperatura base (2,4°C), usando a média da temperatura mínima e máxima do ar.

#### ANEXO D - Modelo de Johnson et al. (1986).

A produção de matéria no modelo proposto por Johnson et al. (1986) é dada pela expressão:

Matéria seca acumulada ( $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) = radiação interceptada ( $f$  (LAI)) x taxa potencial de crescimento da cultura ( $\text{g MJ } \Delta\text{Pac}$ ) x mudança na idade fisiológica ( $\Delta P$ )

Massa fresca de tubérculos ( $\text{g planta}^{-1}$ ):

$$\text{Massa fresca} = (\text{MS} / 0,17) / 100$$

em que: MS é massa seca de tubérculos ( $\text{g planta}^{-1}$ ).

Massa seca de tubérculos ( $\text{g planta}^{-1}$ ):

$$\text{MS} = dT \times \text{CPac}$$

em que: dT é a força dreno dos tubérculos e CPac é o crescimento potencial acumulado.

A partição de matéria seca assimilada das forças drenos dos órgãos é recalculada proporcionalmente e multiplicada pelo pool de assimilados:

$$dLLEAF/dt = (dL / (dL + dS + dR + dT)) \times k6 \times \text{CP}$$

em que: dL é a força dreno das folhas, dS é a força dreno do caule, dR é a força dreno das raízes, dT é a força dreno dos tubérculos,  $k6 = 0,75$  é parâmetro de partição determinado empiricamente e CP é o crescimento potencial.

Partição de matéria seca para os diferentes órgãos da planta:

$$dL = k2 \times (k1 / (k1 + \text{STEM} + \text{ROOT} + \text{TUBER}))$$

$$dS = k3 \times (\text{STEM} / (\text{STEM} + k1 \times (1,0 + (0,25 \times \text{TUBER}))))$$

$$dR = k4 \times (\text{ROOT} / (\text{ROOT} + k1 \times (1,0 + \text{TUBER})))$$

$$dT = k5 \times (\text{TUBER} / (\text{TUBER} + k1))$$

em que: dL é a força dreno das folhas, dS é a força dreno do caule, dR é a força dreno das raízes, dT é a força dreno dos tubérculos, LEAF, STEM, ROOT e TUBER representam os órgãos da planta, K1 é a constante que assemelha-se a metade da saturação da resposta na equação de Michaelis-Menten e as constantes de k2 a k5 são os parâmetros de partição determinados empiricamente.

Crescimento potencial:

$$CP = 0,156 \times \text{radiação} \times \Delta Pac$$

em que:  $\Delta Pac$  é o tempo térmico acumulado.

Radiação solar:

$$\text{Radiação} = \text{radiação solar diária} \times \text{radiação solar interceptada}$$

Índice de área foliar:

$$LAI = \text{Área foliar} / 1000$$

$$\text{Proporção de radiação solar interceptada} = 0,9 \times (1,0 - \exp(-0,667 \times LAI))$$

em que: LAI é o índice de área foliar.

Área foliar:

$$\text{Área foliar (cm}^{-2}\text{)} = 230,0 \times \text{peso seco da folha.}$$

Área foliar específica:

$$AFE (\text{g m}^{-2}) = 8,49 \times 10^{-6} \times \Delta Pac + 0,0925$$

em que:  $\Delta Pac$  é o tempo térmico acumulado.

**ANEXO E - Modelo de Spitters (1987).**

A produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) é função do total de biomassa e a fração total de matéria seca alocada para os tubérculos:

$$Y_t = HI_t \times W_t = HI_t \times \int W_t dt = HI_t \times E \times \int (f_{\text{abs}} \times PAR_t) dt$$

em que:  $HI_t$  é o índice de colheita,  $W_t$  a biomassa total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $E$  é a eficiência de uso da radiação ( $\text{g MJ}$ ),  $f_{\text{abs}}$  é a absorção da fração de radiação incidente e  $PAR_t$  é a radiação fotossinteticamente ativa.

Índice de colheita no tempo:

$$HI_t = HI_m (1 - \exp(-s(t - i) / HI_m))$$

em que:  $HI_m$  é o valor assintótico de  $HI$  (0,84),  $s$  é a declividade inicial da curva,  $t$  é a soma térmica e  $i$  é o início do enchimento de tubérculo.

Início do enchimento de tubérculos:

$$i = 380 - (26 \times m)$$

em que:  $m$  o ciclo da cultura.

Declividade inicial da curva:

$$s = 0,00046 \times m$$

em que:  $m$  é o ciclo da cultura.

Relação entre a taxa de crescimento relativo e a absorção da luz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ):

$$W_t = f_{\text{abs}} \times PAR_t \times E$$

em que:  $f_{\text{abs}}$  é a absorção da fração de radiação incidente,  $PAR_t$  é a radiação fotossinteticamente ativa diária ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) e  $E$  é a eficiência de uso da radiação ( $\text{g MJ}$ ).

Absorção da fração de radiação incidente

$$f_{\text{abs}} = (1 - r) \times f_t$$

em que:  $r$  é o coeficiente de reflexão da cultura e  $f_t$  é a fração de radiação interceptada pela cultura.

Duração da fase da senescência:

$$f_t = 0,5 - (t - t_{0,5}) / d$$

em que:  $t$  é a soma térmica,  $t_{0,5}$  é a interceptação da luz reduzida em 50% e  $d$  é a duração da fase de senescência.

Fração de radiação interceptada pela cultura:

$$f_t = \frac{N \times f_o' \times \exp(R_o \times t)}{N \times f_o' \times \exp(R_o \times t) + (1 - (N \times f_o'))}$$

em que:  $N$  é a densidade de plantas,  $f_o'$  é capacidade inicial de interceptação da luz por planta,  $R_o$  taxa de crescimento relativo inicial e  $t$  é a soma térmica.

**ANEXO F** - Modelo de Pereira et al. (2008).

Produtividade potencial ( $t\ ha^{-1}$ ):

$$EPY = 1,27 \times 10^{-6} \times CDA \times LAI \times GS \times N \times C(LAI) \times C(T) \times HI \times 100 / DM$$

em que: CDA é a taxa máxima de assimilação de dióxido de carbono ( $\mu L\ cm^{-2}\ h^{-1}$ ), LAI é o índice de área foliar, GS é a duração do ciclo, N é o fotoperíodo médio durante o ciclo da cultura (h), C(LAI) é o fator de correção da variação do índice área foliar no tempo, C(T) é o fator de correção da respiração de manutenção, HI é o índice de colheita e DM conteúdo de matéria seca dos tubérculos (%).

Porcentagem de matéria seca dos tubérculos:

$$DM = 24,184 + 211,04 \times [SG - 1,0988]$$

em que: SG é a gravidade específica dos tubérculos.

Fator de correção da variação do índice área foliar no tempo:

$$C(LAI) = 1 - e^{-0,8 \times LAI} / 2$$

em que: LAI é o índice de área foliar (4,34).

Taxa de assimilação de dióxido de carbono ( $\mu L\ cm^{-2}\ h^{-1}$ ):

$$CDA = CDA_{max} \times [1 - e^{-0,5 \times PAR / CDA_{max}}]$$

em que:  $CDA_{max}$  é a taxa máxima de assimilação de dióxido de carbono e PAR é radiação fotossinteticamente ativa.

Radiação fotossinteticamente ativa ( $J\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) calculada é função da densidade de fluxo de radiação solar global e taxa de insolação:

$$PAR = Qg / 3600 \times N \times [0,5 - 0,1 \times n / N]$$

em que:  $Qg$  é a densidade de fluxo de radiação solar global média durante o período de crescimento da cultura ( $J\ m^{-2}\ s^{-1}$ ), N é o fotoperíodo médio durante o ciclo da cultura (h) e  $n / N$  é a taxa média de insolação durante o período.

Densidade de fluxo de radiação solar global:

$$Qg = Qo [0,24 + 0,58 \times n / N]$$

em que:  $Qo$  é a radiação extra-terrestre ( $J\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ), n é a insolação ( $h\ dia^{-1}$ ) e N é a duração do período diurno ( $h\ dia^{-1}$ ).

Determinação da radiação extra-terrestre:

$$Q_0 = 38,32 \times 10^6 [H \times \text{sen } \bar{\gamma} \times \text{sen } \varphi + \cos \bar{\gamma} \times \cos \varphi \times \text{sen} H]$$

em que:  $\bar{\gamma}$  é o ângulo de declinação solar,  $\varphi$  é a latitude e H é o ângulo horário ao nascer do sol ou pôr do sol.

Ângulo de declinação solar:

$$\bar{\gamma} = 23,45 \times \text{sen} [360/365 \times (DJ - 80)]$$

em que: DJ é o número de dias desde o primeiro dia de janeiro até a data considerada.

Ângulo horário ao nascer do sol ou pôr do sol

$$H = \arccos [-\tan \bar{\gamma} \times \tan \varphi]$$

em que:  $\bar{\gamma}$  é o ângulo de declinação solar e  $\varphi$  é a latitude.

Duração astronômica do dia:

$$N = 2 \times H / 15$$

em que: H é o ângulo horário ao nascer do sol ou pôr do sol

## **APÊNDICE**

APÊNDICE A - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Hartz; Moore (1978).

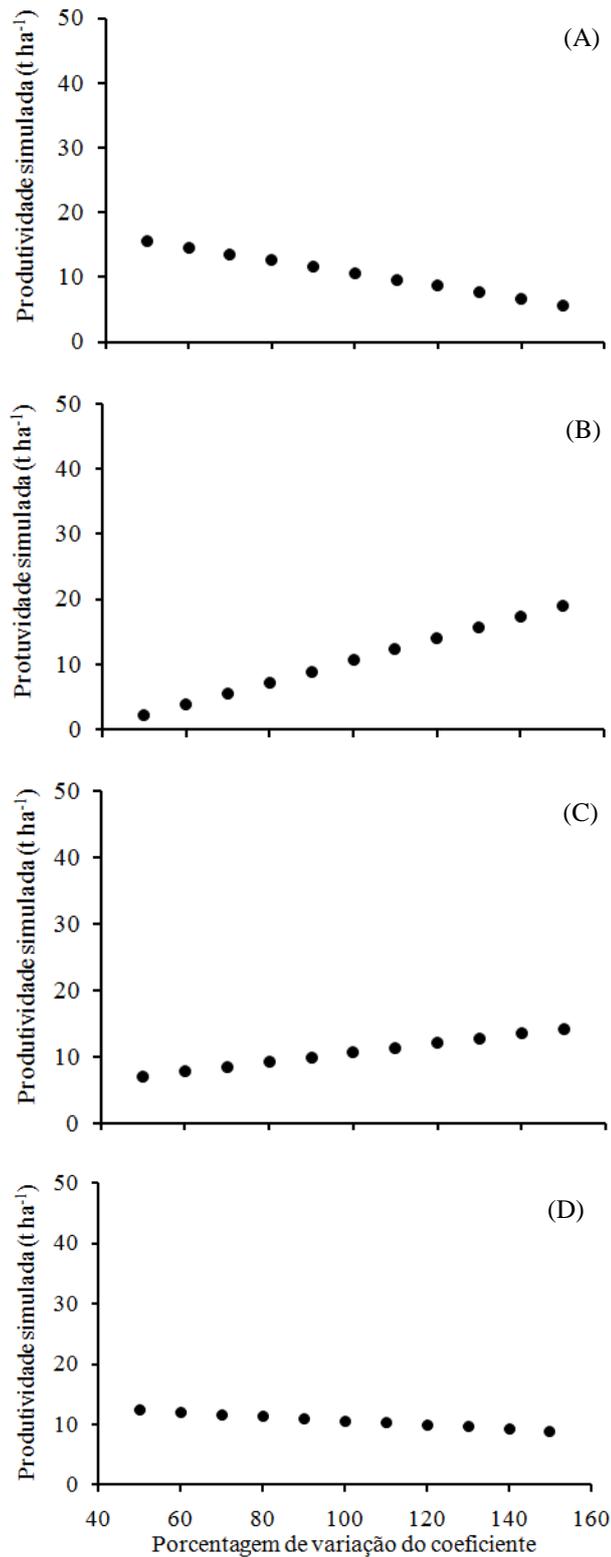


Figura 1 - Análise de sensibilidade do modelo de Hartz; Moore (1978) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação dos coeficientes da equação linear polinomial  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\xi$ .

**APÊNDICE B** - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Sands et al. (1979).

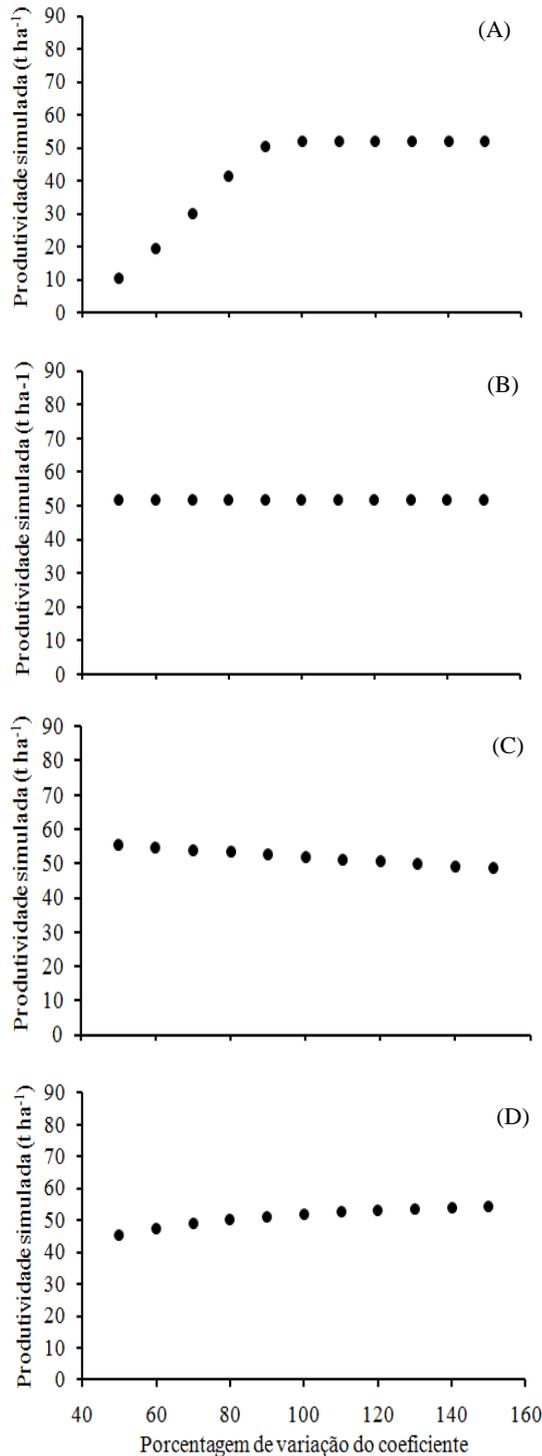


Figura 2 - Análise de sensibilidade do modelo de Sands et al. (1979) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação dos coeficientes  $k$  (escala para medir a taxa de acumulação no tempo (A)),  $P_{tg}$  (tempo da emergência até o começo do crescimento de tubérculos (B)),  $P_{mb}$  (tempo da emergência até a taxa máxima de enchimento de tubérculos (C)) e  $b_w$  (denominador no cálculo de  $w$  (déficit máximo de água no solo permitido pela irrigação durante o enchimento de tubérculos (D))).

**APÊNDICE C** - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de MacKerron; Waister (1985).

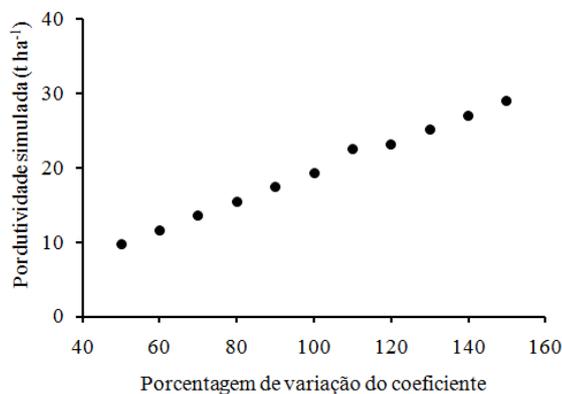


Figura 3 - Análise de sensibilidade do modelo de MacKerron; Waister (1985) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação do coeficiente T (partição de matéria seca para tubérculos).

**APÊNDICE D** - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Johnson et al. (1986).

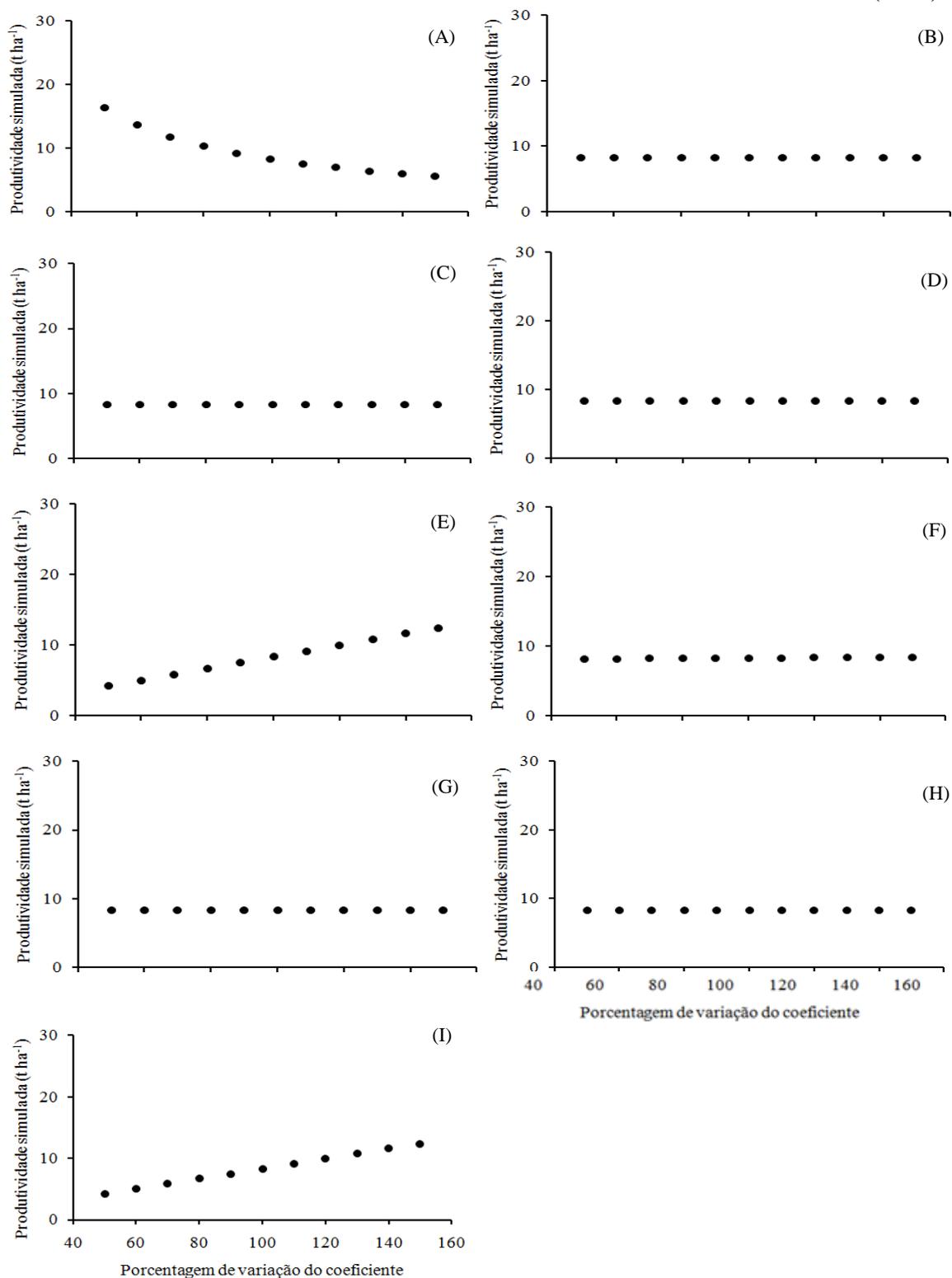


Figura 4 - Análise de sensibilidade do modelo de Johnson et al. (1986) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função da variação dos coeficientes K1 (constante que assemelha-se a metade da saturação da resposta na equação de Michaelis-Menten (A)), k2 a k6 (parâmetros de partição determinados empiricamente (B a F)), STEM, ROOT e TUBER (representam os órgãos da planta (G, H e I)).

**APÊNDICE E**- Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Spitters (1989).

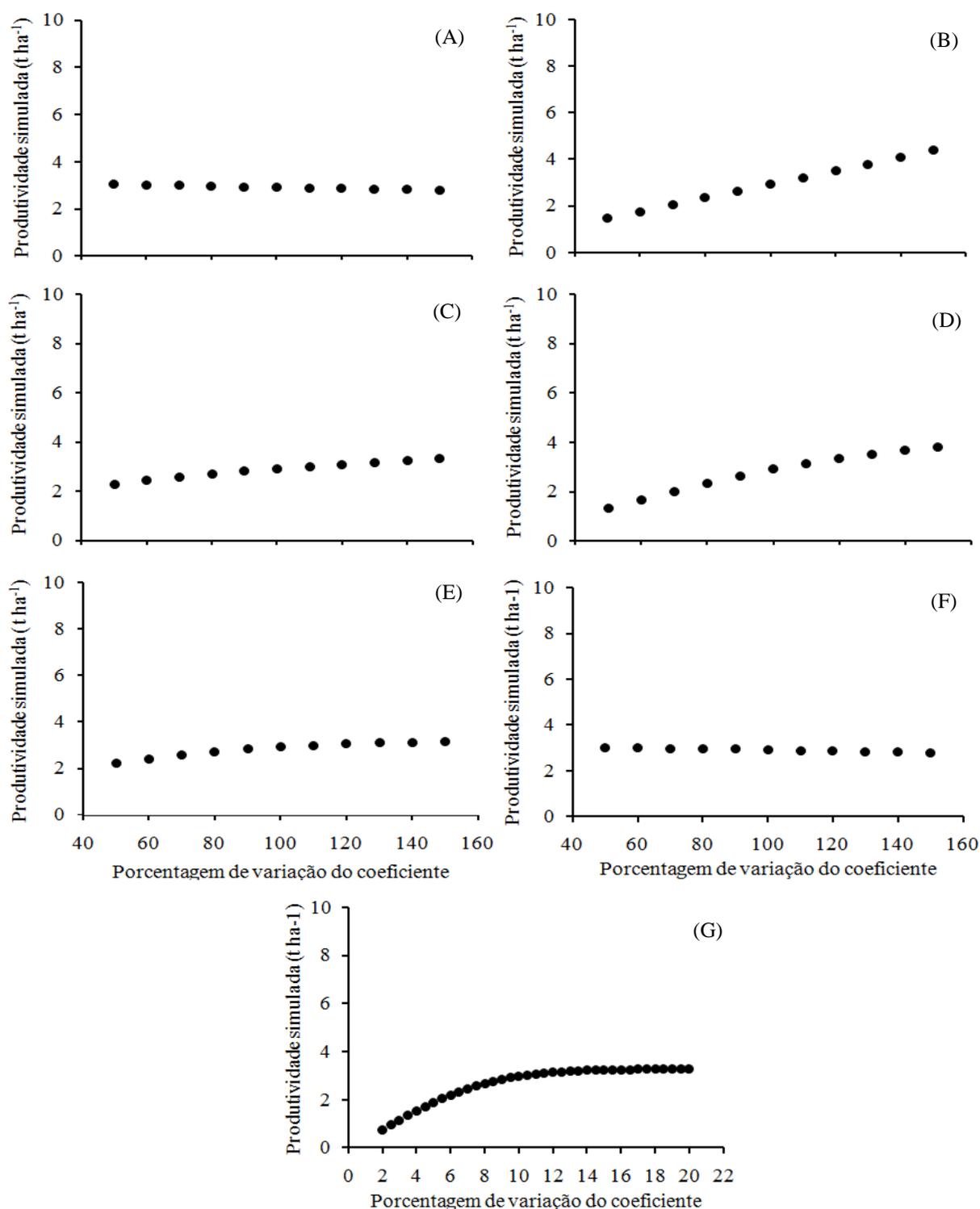


Figura 5 - Análise de sensibilidade do modelo de Spitters (1987) para batata com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade tubérculos de batata em função dos coeficientes  $r$  (refletividade (A)), EUR (eficiência de uso da radiação (B)),  $f_0$  (capacidade inicial de interceptação pela planta (C)),  $R_0$  (taxa de crescimento relativo inicial (D)),  $s$  (declividade inicial da curva de crescimento (E)),  $i$  (início do enchimento de tubérculos (F)) e  $m$  (caracterização do ciclo (G)).

APÊNDICE F - Análise de sensibilidade dos coeficientes do modelo de Pereira et al. (2008).

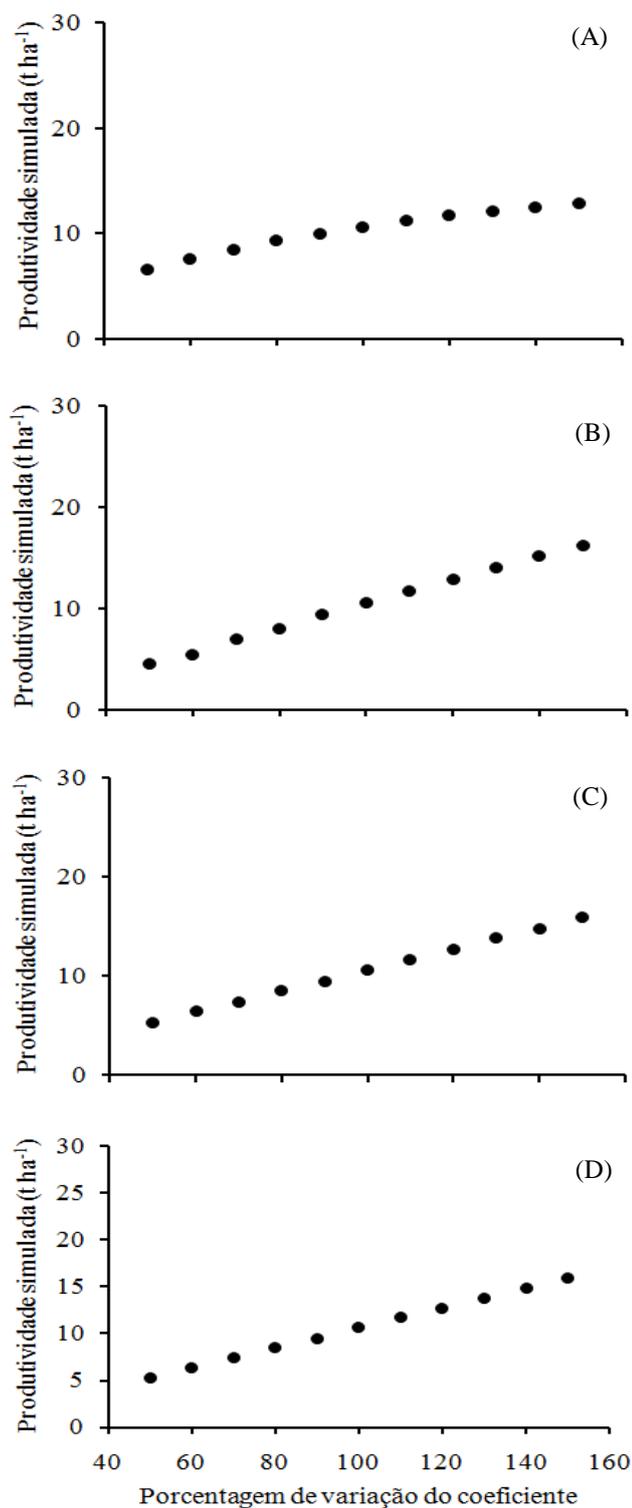


Figura 6 - Análise de sensibilidade do coeficiente do modelo de Pereira et al. (2008) com plantio em 28/02/03. Variação da produtividade de tubérculos de batata em função dos coeficientes  $CDA_{max}$  taxa máxima de assimilação de dióxido de carbono (A), IAF é o índice de área foliar (B), HI é o índice de colheita (C) e  $C(T)$  é o fator de correção da respiração de manutenção (D).