

RAFAEL DE ÁVILA RODRIGUES

**MODELAGEM DOS EFEITOS DA FERRUGEM ASIÁTICA NO
RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

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

T

R696m
2011

Rodrigues, Rafael de Ávila, 1981-

Modelagem dos efeitos da ferrugem asiática no rendimento da cultura da soja em cenário de mudanças climáticas globais no Estado de Minas Gerais / Rafael de Ávila Rodrigues.

– Viçosa, MG, 2011.

xv, 98f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Luiz Cláudio Costa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 89-98

1. Soja – Desenvolvimento – Simulação por computador.

2. Climatologia agrícola. 3. Mudanças climáticas.

4. Ferrugem-da-soja. 5. *Phakopsora pachyrhizi*.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

RAFAEL DE ÁVILA RODRIGUES

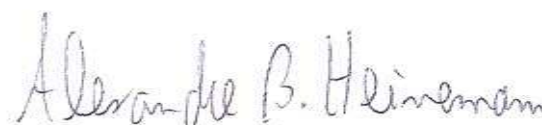
**MODELAGEM DOS EFEITOS DA FERRUGEM ASIÁTICA NO
RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS GLOBAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

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


APROVADA: 11 de abril de 2011.



Reinaldo Lúcio Gomide




Alexandre Bryan Heinemann



Fábio Ricardo Marin



Carlos Fernando Lemos



Flávio Barbosa Justino
(Presidente da Banca)

À minha princesa e esposa, Francielle.

À minha vida, Melissa.

Aos meus irmãos, Fábio e Fabrício.

Aos meus pais, Valtamir e Maria,
pelo exemplo em mostrar que, diante do impossível,
há sempre uma esperança.

Aos meus avós maternos e paternos (*in memoriam*).

*“IV – Não sejas vaidoso nem orgulhoso, pois que o orgulho e a vaidade custam mais que a fome e a sede;
VII – Faz de boa vontade tudo o que tiveres de fazer: nunca te cansarás;
IX – Considera todas as coisas sob um ponto de vista favorável”.*

(Adaptação do decálogo de Tomas Jefferson)

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”.

(Leonardo da Vinci)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre conceder-me força, sabedoria e coragem.

Aos meus pais, Maria e Valtamir, pelo esforço incondicional realizado durante todos esses anos. Pela luta e fé em todos os momentos, os quais foram vividos através de uma longa jornada com muito amor, humildade, atenção, dedicação e carinho.

À minha princesa e esposa, Francielle, por vencer uma batalha que somente sabemos que não foi fácil. A uma mulher guerreira, trabalhadora e principalmente amorosa e carinhosa, desprendendo de todo o esforço para suportar a minha ausência e ao mesmo tempo, ter a missão de cuidar e educar a nossa filha, diante da distância. Muito obrigado por tudo, por estar sempre ao meu lado, saiba que serei eternamente grato por compreender a minha ausência, pelo tempo dedicado à tese, pelo que vivemos e passamos um ao lado do outro e pelo que teremos muito que viver ainda. Amo você.

À nossa filhota, Melissa, pela inocência em saber que estava tão longe, mas ao mesmo tempo tão perto, durante as nossas conversas de amor e carinho. Daqui alguns anos quando você, ao ler os agradecimentos na tese do papai, verá que todo esforço e coragem realizados, foi pelo grande amor que sinto por você e que entenderá e compreenderá a minha ausência durante os seis meses e meio longe de alguém tão especial. Obrigado pelo direito de amá-la incansavelmente.

Aos meus irmãos, Fabrício e Fábio, pelo apoio, pela atenção e pela união, concedidos durante a minha ausência e ao longo de nossas vidas.

Aos professores Antonio Giacomini Ribeiro e Washington Luiz Assunção, da Universidade Federal de Uberlândia, e à professora Selma Simões de Castro, da

Universidade Federal de Goiás, pela base concedida na graduação e no mestrado, os quais foram essenciais para o término dessa jornada.

Ao professor Francisco Xavier Ribeiro do Vale, do Departamento de Fitopatologia, pelo grande apoio e pela oportunidade concedida.

Ao professor Luiz Cláudio Costa, primeiramente pela oportunidade concedida em realizar o Doutorado no Departamento de Engenharia Agrícola, no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa; e pela confiança depositada ao longo desses quatro anos, através de seus ensinamentos e palavras de apoio.

Ao professor Flávio Barbosa Justino, pelos ensinamentos durante o convívio nas aulas de Estágio em Ensino, pelo respaldo, pela paciência e pela atenção, essenciais e relevantes no desenvolvimento da tese, bem como o fornecimento dos dados meteorológicos do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Ao pesquisador da Embrapa Trigo, José Maurício, pelo treinamento realizado na Embrapa para o aperfeiçoamento dos conhecimentos em modelagem e as valiosas sugestões para a concretização do trabalho.

Agradeço ao professor Fraisse, da University of Florida (Estados Unidos), pela imprescindível contribuição no desenvolvimento do trabalho, pela paciência durante as discussões no desenvolvimento da tese, pela oportunidade, pela acolhida e, principalmente, pela humildade. Durante os seis meses e meio no Simulation Lab, a experiência adquirida foi fundamental para o crescimento pessoal e profissional.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola.

Ao amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao Evandro, pela paciência e ajuda dedicada nos ensinamentos do DSSAT, Marcelo Cid, Rafael Delgado, Natália, Roziane e Robson, Jackson, Leydimere, Amanda, Paulo Jorge, Evaldo, Viviane, Geraldo, Anáilton, Paulo, João Batista e Bruno.

À Secretária da Pós-Graduação, Graça, pela paciência e pelo suporte nas horas mais decisivas.

Ao pessoal do Laboratório do professor Francisco Xavier Ribeiro do Vale, com grande distinção. A todos que contribuíram para a execução do experimento, especialmente ao grande amigo Eder, Macabeu, Ramirez, Isaías, Leandro, Leonardo, Diego e Pablo.

À dona Neusa e ao Mário, do Viveiro do Café, pertencente ao Departamento de Fitopatologia, que ajudaram de forma substancial no desenvolvimento do experimento de campo.

À University of Florida pela oportunidade do estudo e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola. Ao Dr. Jones, pelas sugestões pertinentes e pelo espaço no Simulation Lab para a realização do Doutorado Sanduíche nos Estados Unidos.

Aos amigos do Simulation Lab da University of Florida, em especial, a Bruna Forcelini, Eduardo Gelcer, Flávio Hazan e Renan Mendes, pelo grande respaldo concedido nas simulações computacionais.

Ao pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Fábio Ricardo Marin, pelas longas conversas na University of Florida e pela ajuda no desenvolvimento do trabalho, com sugestões e ensinamentos importantes.

A Jéssica, pelo fornecimento dos dados experimentais.

A Rafael Cruz, pela ajuda na obtenção dos dados meteorológicos do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Ao professor Willingthon Pavan, da Universidade de Passo Fundo, pela disponibilidade de sempre ajudar e disponibilizar toda a infra-estrutura necessária para a realização das simulações no Laboratório Mosaico.

A João Eduardo Pedrini, pela ajuda incondicional nas simulações com o módulo de doença da ferrugem asiática da soja, sem o qual seria muito difícil a finalização do presente trabalho, tendo contribuído muito com sua dedicação e sua inteligência.

A Júlio, pela disponibilização das sementes de soja para a realização dos experimentos de campo na Universidade Federal de Viçosa.

A Geisi, Zaíra e Suaní, pela ajuda na tabulação dos dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); e a Mayara e Laís, pela tabulação dos dados de solos do RADAM BRASIL.

Ao INMET, pela disponibilização dos dados meteorológicos, os quais foram essenciais no desenvolvimento do trabalho.

A Edmar Vasconcelos, pelo contato e pelas sugestões pertinentes no desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Uberlândia, pela disponibilização dos dados meteorológicos, em especial ao grande amigo Emerson Malvino.

À Capes e ao CNPq, pela concessão das bolsas de doutorado e doutorado sanduíche no exterior.

À Universidade Federal de Viçosa, por toda a infra-estrutura disponível.

Ao grande amigo Erik, pela amizade e excelente apoio em Gainesville – Flórida – Estados Unidos.

Aos meus *roommates*, Rachel e Elton, pelo grande aprendizado e pelo convívio durante o período do Doutorado Sanduíche nos Estados Unidos. Agradeço a paciência, atenção e amizade, sendo essenciais no processo de amadurecimento pessoal e profissional.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho e sempre torceram pelo meu crescimento pessoal e profissional.

BIOGRAFIA

RAFAEL DE ÁVILA RODRIGUES, filho de Valtamir Rodrigues de Oliveira e Maria Ana de Ávila Rodrigues, nasceu em 25 de abril de 1981, em Araguari, Minas Gerais.

Em março de 1999, ingressou no curso de Geografia, na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), graduando-se em fevereiro de 2003, na Licenciatura, e, em setembro de 2003, no Bacharelado.

Em março de 2004, iniciou o curso de Mestrado em Geografia na Universidade Federal de Goiás no Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (IESA), concluindo-o em março de 2006, com dissertação desenvolvida na área de Geografia Física, com ênfase em Climatologia.

Durante o período de março de 2008 a julho de 2009, exerceu o cargo de Professor Substituto no Departamento de Geografia da Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2007, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo a tese em abril de 2011. De junho a dezembro de 2010, realizou o Doutorado Sanduíche nos Estados Unidos, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade da Flórida, em Gainesville.

SUMÁRIO

RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1. Mudanças climáticas globais.....	1
1.2. A cultura da soja: produção e aspectos econômicos	2
1.3. Importância da ferrugem asiática da soja.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1. Histórico da soja.....	7
2.2. Ferrugem asiática da soja e condições favoráveis ao seu desenvolvimento	8
2.3. Modelo e modelagem.....	13
2.4. Modelo de simulação de culturas e doenças	15
2.5. DSSAT	19
2.6. Descrição da integração do módulo de doença da ferrugem asiática da soja ao CSM-CROPGRO-Soybean.....	22
CAPÍTULO 1 - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO CROPGRO PARA A CULTURA DA SOJA	30
1. INTRODUÇÃO	30
2. METODOLOGIA	32

2.1. Área de estudo e base de dados.....	32
2.1.1. Características climáticas de Viçosa, MG.....	32
2.1.2. Dados de solos.....	34
2.1.3. Estimativa da duração do período de molhamento foliar.....	35
2.2. Dados experimentais.....	36
2.2.1. Caracterização do experimento conduzido em 2006 e 2010.....	36
2.2.2. Calibração dos coeficientes genéticos utilizando a metodologia GLUE.....	37
2.2.3. Validação do CSM-CROPGRO-Soybean.....	38
2.3. Avaliação estatística do modelo.....	39
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
3.1. Calibração e validação do CSM-CROPGRO-Soybean.....	40
3.2. Simulação do rendimento da cultura da soja em Viçosa, MG, considerando os efeitos da ferrugem asiática da soja.....	44
4. CONCLUSÕES.....	48
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM DOS EFEITOS DA FERRUGEM ASIÁTICA NO RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA UTILIZANDO O MODELO CROPGRO	49
1. INTRODUÇÃO.....	49
2. METODOLOGIA.....	52
2.1. Área de estudo.....	52
2.2. Base de dados.....	54
2.2.1. Estações meteorológicas convencionais do INMET.....	54
2.2.2. Estimativa da duração do período de molhamento foliar.....	54
2.2.3. Dados de solos.....	56
2.2.4. Base cartográfica utilizada na elaboração dos mapas.....	56
2.3. Dados experimentais.....	57
2.3.1. Caracterização do experimento conduzido em 2006 e 2010.....	57
2.3.2. Calibração dos coeficientes genéticos utilizando a metodologia GLUE.....	58
2.3.3. Validação do CSM-CROPGRO-Soybean.....	59

2.4. Avaliação estatística do modelo.....	60
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
3.1. Análise espacial do rendimento sem e com os efeitos da ferrugem a partir das datadas de semeadura na cultura da soja nas mesorregiões de Minas Gerais.....	61
4. CONCLUSÕES	66
CAPÍTULO 3 - IMPACTO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS	
67	
1. INTRODUÇÃO	67
2. METODOLOGIA	69
2.1. Área de estudo.....	70
2.2. Descrição do modelo ECHAM5/MPI-OM	71
2.3. Base de dados.....	74
2.3.1. Séries meteorológicas em base dinâmica	74
2.3.2. Estimativa da duração do período de molhamento foliar.....	74
2.3.3. Dados de solos.....	76
2.4. Dados experimentais	76
2.4.1. Caracterização do experimento conduzido em 2006 e 2010.....	76
2.4.2. Calibração dos coeficientes genéticos utilizando a metodologia GLUE.....	78
2.4.3. Validação do CSM-CROPGRO-Soybean.....	79
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
3.1. Análise comparativa do período entre 1981-2009 a partir dos dados meteorológicos do INMET e ECHAM	80
3.2. Perda no rendimento devido aos efeitos da ferrugem asiática nas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, nos anos de 2020, 2030 e 2040, em comparação com o presente e simulado pelo modelo ECHAM.....	82
4. CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS.....	89

RESUMO

RODRIGUES, Rafael de Ávila, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2011.
Modelagem dos efeitos da ferrugem asiática no rendimento da cultura da soja em cenário de mudanças climáticas globais no Estado de Minas Gerais.
Orientador: Luiz Cláudio Costa. Coorientadores: Francisco Xavier Ribeiro do Vale e José Maurício Cunha Fernandes.

Nos últimos anos, tem-se observado grande aumento na utilização de modelos de simulação na agricultura. Atualmente, o DSSAT (Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia), insere-se como uma importante ferramenta no que tange à modelagem e à simulação de crescimento de culturas, porém, uma das limitações está relacionada com os modelos de simulação que não contabilizam o efeito imposto por pragas/doenças. A soja foi uma das culturas que apresentaram maior crescimento em área plantada no segmento agroindustrial brasileiro, em função do seu valor econômico e da potencialidade de cultivo em diversas condições de ambiente. Dentre as doenças que ocorrem na cultura da soja, a ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow, é considerada a doença de maior potencial destrutivo, provocando danos às lavouras no Brasil, principalmente nos Estados de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. A temperatura, a umidade relativa do ar e o período de molhamento foliar favorecem o desenvolvimento do fungo. Assim, o presente trabalho objetivou calibrar e validar o CSM-CROPGRO-Soybean na estimativa do crescimento, desenvolvimento e da produtividade da cultura

da soja no Estado de Minas Gerais para três cultivares (BRS6101, BRS Valiosa e MGBR-46 Conquista); avaliar o CSM-CROPGRO-Soybean, considerando as simulações com os efeitos no rendimento pela ferrugem asiática na cultura da soja ligado e desligado; e analisar o impacto da ferrugem da soja em cenário de mudanças climáticas, utilizando o modelo ECHAM5/MPI-OM do IPCC. Os dados experimentais para a avaliação, teste e ajuste dos coeficientes genéticos do modelo para as três cultivares de soja foram obtidos no Viveiro do Café, área experimental que pertence ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°44'48.5''S, 42°50'58.4''W, alt. 670 m), durante as épocas de cultivo 2006 e 2010. A validação foi realizada segundo Vasconcelos (2009). O GLUE (do inglês, *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) foi utilizado para a estimativa dos coeficientes genéticos. As funções de pedotransferência foram utilizadas para a estimativa dos parâmetros físicos do solo. As simulações da produtividade da soja foram realizadas com base nos dados meteorológicos de 42 estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 12 pontos do modelo ECHAM5/MPI-OM para os anos de 2020, 2030 e 2040. O modelo apresentou alta sensibilidade à variação dos coeficientes genéticos por meio das diferentes cultivares analisadas, bem como do desenvolvimento fenológico e da produtividade de grãos, considerando as condições de solo e clima de Viçosa, MG. Analisando-se os efeitos da ferrugem asiática, a cultivar BRS 6101 (semiprecoce) apresentou um menor efeito no rendimento em relação a cultivar BRS Valiosa (médio a semitardio), que teve maior quebra de produtividade. No que tange às mudanças climáticas globais utilizando os dados do modelo ECHAM5/MPI-OM para os anos de 2020, 2030 e 2040, os resultados mostraram que as simulações realizadas a partir dos dados do INMET e do modelo ECHAM apresentaram bons ajustes, entretanto observamos que não foi satisfatório. O cenário A1B indica uma redução na produtividade que pode alcançar até em torno de 15% no Oeste Mineiro para o ano de 2040. O ano de 2030 mostra-se possivelmente como detentor de grande rendimento na cultura da soja, exceto no Vale do Mucuri e Campo das Vertentes. Desse modo, conclui-se que o modelo pode ser uma importante ferramenta no entendimento e na análise da produtividade nas diferentes mesorregiões do Estado de Minas Gerais, utilizando dados meteorológicos históricos, solos e cenário de mudanças climáticas globais para cada localidade.

ABSTRACT

RODRIGUES, Rafael de Ávila, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2011.
Evaluation of the effects of soybean rust on soybean yield under a global climatic change scenario in state of Minas Gerais. Adviser: Luiz Cláudio Costa.
Co-advisers: Francisco Xavier Ribeiro do Vale and José Maurício Cunha Fernandes.

In recent years, there has been a large increase in the use of simulation models in agriculture. Currently, DSSAT (Decision Support System for Agro-technology Transfer), is an important tool for modeling and simulation of crop growth. However, one of its limitations is the fact that simulation models do not take into account the effect on pests/diseases. Soybean is among the cultures that showed the greatest growth in a Brazilian agribusiness segment area, because of its economic value and cultivation potential under different environmental conditions. Among the diseases that occur in soybean culture, the Asian Soybean Rust, *Phakopsora pachyrhizi*, caused by the fungus Sydow & Sydow, is considered the most destructive one in Brazil, mainly in the states of Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais and Mato Grosso do Sul. Temperature, relative humidity and leaf wetness period favor fungal development. Thus, this work aimed to calibration and validation of CSM-CROPGRO-Soybean in estimating the growth, development and yield of soybean culture in the state of Minas Gerais, in relation to three cultivars (BRS6101, BRS Valiosa and MGBR-46 Conquista); evaluate the coupling module of Asian Soybean Rust to CSM-CROPGRO-Soybean, considering on and off soybean culture yield simulations; and analyze the impact of soybean rust in a climate change scenario, using the model ECHAM5/MPI-OM IPCC. Experimental data

for evaluation, testing and fitting genetic coefficients of the model for all three soybean cultivars were obtained in Viveiro do Café, an experimental area owned by the Department of Plant Pathology of the Federal University of Viçosa (UFV) in Viçosa, Minas Gerais, Brazil (20°44'48.5''S, 42°50'58.4''W, alt. 670 m), during the 2006 and 2010 growing seasons. Validation was performed by Vasconcelos (2009) and GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) was used to estimate genetic coefficients. The pedo-transference functions were used to estimate soil physical parameters. The soybean yield simulations were based on the meteorological data of 42 Conventional Stations of the National Institute of Meteorology (INMET) and 12 points of the ECHAM5/MPI-OM model for the years 2020, 2030 and 2040. The model presented high sensitivity to genetic coefficient variation by means of the different cultivars analyzed, as well as phenological development and grain yield, under the soil and climate conditions in Viçosa MG. Analyzing the effects of Asian rust, cultivar BRS 6101 (medium) presented a smaller effect on yield for cultivar BRS Valiosa (medium to medium late), which had increased yield break. As for global climate change, the use of data of the model ECHAM5/MPI-OM for the years 2020, 2030 and 2040 showed that the simulations based on INMET model and ECHAM data presented good fits in some years. However, for other years, the fit was not found to be satisfactory. The A1B scenario indicates a decrease in yield up to around 15% in Oeste Mineiro until 2040. The year 2030 appears to be a producer of large soybean crop yields, except in Vale do Mucuri and Campo das Vertentes. Thus, it is concluded that the model can be an important tool for understanding and analyzing yield in different meso-regions of the state of Minas Gerais using historical weather data, soils and global climate change scenarios for each location.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Mudanças climáticas globais

Nos meios de comunicação, tem-se observado as consequências de situações meteorológicas adversas, que levam constantemente a graves impactos ambientais e sociais, acarretando prejuízos econômicos significativos que podem ser difíceis de serem quantificados. As variações climáticas afetam qualquer região e mesmo nos países mais desenvolvidos, com uma maior disponibilidade de recursos tecnológicos, sendo capaz de produzir enormes danos econômicos e sociais (CALVE et al., 1994).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), estabelecido em 1998 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM), mostra diferentes cenários de emissão de CO₂, sendo os quatro cenários A1, B1, A2 e B2. O cenário A1 foi dividido em três subtipos (A1B, A1F1, A1T), que resultam em seis cenários coletivos representando os diferentes cenários do IPCC. Estes são baseados numa variedade de simulações com distintos modelos que foram validados conforme sua capacidade de representar satisfatoriamente o clima do passado e do presente.

No último relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007a) permanece a tendência de aumento da temperatura média do ar e a possibilidade eminente da ocorrência de eventos extremos, como secas e enchentes. O estudo prevê, ainda, um aumento da precipitação média anual nas regiões a latitudes mais elevadas,

assim como nas regiões equatoriais, em oposição a uma diminuição da precipitação nas regiões subtropicais.

O aquecimento global provavelmente terá um impacto negativo nos trópicos e em algumas outras áreas onde altas temperaturas ou chuvas inadequadas frequentemente irão limitar a produção das culturas. Regiões onde baixas temperaturas são primariamente fatores limitantes da produção agrícola serão beneficiadas pelo maior aquecimento. Os produtores em regiões temperadas, onde a maioria da alimentação é produzida, irão encontrar caminhos alternativos para práticas de produção para evitar a ocorrência de temperaturas particularmente sensíveis durante os estádios fenológicos em breves períodos de temperaturas extremamente elevadas. A importância relativa de algumas culturas em certas áreas irá alterar devido ao aquecimento global, e fatores econômicos determinarão essas mudanças (REDDY et al., 2000).

1.2. A cultura da soja: produção e aspectos econômicos

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das principais plantas produzidas no mundo e matéria prima empregada na elaboração de diversos produtos, desde óleo até papel. Essa leguminosa, em função de seu valor econômico e de sua potencialidade de cultivo em diversas condições de ambiente, tem apresentado constante desenvolvimento tecnológico, o que permitiu, entre outras coisas, aumento significativo de sua produtividade e expansão de fronteiras agrícolas (OLIVEIRA et al., 2005).

A produção de soja no Brasil tem crescido a cada ano, sendo que, em 2004, produziu-se 50 milhões de toneladas, o que correspondeu a 25,0% da safra mundial. No ano de 2005, a produção chegou a 52 milhões de toneladas, representando 27,0% da safra mundial. Devemos destacar a safra 2006/07, que atingiu 58,4 milhões de toneladas, posicionando o Brasil como o segundo produtor do mundo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2006). A produtividade média da soja no Brasil cresceu nas últimas décadas, atingindo 2,82 ton.ha⁻¹ na safra 2006/07. Nos Estados do Mato Grosso e Paraná a produtividade alcançou patamares superiores a 3,0 ton.ha⁻¹. Na safra 2009/2010, produziu 67,9 milhões de toneladas de soja (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2010).

A soja foi uma das culturas que apresentaram maior crescimento em área plantada e no segmento agroindustrial brasileiro. Atualmente, é cultivada em ampla

diversidade de ambientes, desde altas latitudes (Sul e Sudeste) até as baixas latitudes equatorial-tropicais (Nordeste, Norte e Centro-Oeste). Essa expansão e estabelecimento das fronteiras agrícolas somente foi possível devido ao desenvolvimento de tecnologia nacional de produção e, principalmente, à criação de cultivares dotadas de genes que expressam alta produtividade, ampla adaptação às diferentes condições edafoclimáticas e resistentes a pragas e a doenças (EMBRAPA, 2006).

1.3. Importância da ferrugem asiática da soja

As doenças em plantas resultam da complexa interação entre hospedeiro, patógeno e ambiente, processo que, em fitopatologia, é conhecido como o clássico triângulo de doenças, o qual estabelece as condições para o desenvolvimento das mesmas. Se um desses componentes for eliminado, não ocorrerá doença. Dentro do ambiente, destacam-se os elementos climáticos de temperatura, umidade relativa, radiação, chuva e período de molhamento foliar. Cada uma dessas variáveis exerce papéis importantes nas diversas etapas do desenvolvimento da doença. A infecção, a incubação, o crescimento de lesões, a esporulação, a dispersão de esporos e sua sobrevivência, são etapas de uma doença afetada pelos elementos climáticos, com maior ou menor intensidade (VALE et al., 2004).

Dentre as doenças que ocorrem na cultura da soja, a ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow, é considerada a doença de maior potencial destrutivo.

As perdas econômicas devido a esta doença no Brasil, que foram estimadas em 125 milhões de dólares na safra de 2001/2002, saltaram para mais de um bilhão de dólares em 2002/2003, e para mais de dois bilhões de dólares em 2003/2004 (YORINORI et al., 2005). Segundo estimativas recentes, os danos na produtividade provocados pela ferrugem asiática da soja somaram aproximadamente 4,5% da safra brasileira de soja em 2006/07, o que equivale a 2,67 milhões de toneladas de grãos. Somando-se o custo da operação de controle, o custo total da ferrugem asiática na safra 2006/07 foi estimado em US\$ 2,19 bilhões (EMBRAPA, 2005) e gerou um custo de US\$ 1,74 bilhões na safra 2008/2009, segundo o Consórcio Antiferrugem.

O Brasil, grande produtor de soja, deve ter a sua produção comprometida caso a hipótese de mudanças climáticas se configure, o que deve provocar a migração das áreas de plantio e uma reorganização social e espacial das atividades agrícolas. A

variabilidade climática sempre foi um dos principais fatores na determinação dos riscos às atividades agrícolas, o que ressalta a importância do aperfeiçoamento e desenvolvimento de projetos desta natureza (ASSAD et al., 2005).

Assad e Pinto (2008) ressaltam, ainda, que essa é a cultura que mais deve sofrer com o aquecimento global, caso as condições de plantio se mantenham como as atuais e nenhuma modificação genética seja feita (este, pelo menos, não deve ser o caso, visto que novas variantes já estão sendo estudadas). Até 2070, a área com baixo risco no País pode ser reduzida a 60% da existente hoje em decorrência do aumento da deficiência hídrica e de possíveis veranicos mais intensos. A região sul e o cerrado nordestino serão as áreas mais fortemente afetadas.

É importante notar que o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas são extremamente afetados por eventos extremos como veranicos, frentes frias e quentes, que muitas vezes são mais determinantes para a produtividade das culturas do que as médias dos elementos climáticos. Desse modo, a análise dos efeitos das mudanças climáticas na produtividade agrícola deve levar em consideração as respostas lineares e não lineares da cultura, bem como os eventos extremos, através de uma análise da distribuição dos elementos climáticos e da produtividade (SEMENOV; PORTER, 1995).

Nesse sentido, Pedrini (2010) realizou o acoplamento do modelo de crescimento e desenvolvimento do CSM-CROPGRO-Soybean, com o módulo de doença da ferrugem asiática da soja apresentando resultados satisfatórios, proporcionando simular o progresso da mesma para estimar o efeito na produção de grãos causada pela doença.

Como ressalta Mallmann (2009), a modelagem e simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura integrado ao módulo de doenças fornecem aos usuários diversos cenários para a safra da cultura.

Nas últimas décadas, a agricultura tem se beneficiado significativamente com a rápida evolução dos computadores associado à tecnologia da informação. Os modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas, juntamente com sistemas de apoio e a decisão, tornaram-se instrumentos fundamentais para a tecnologia da informação agrícola (HOOGENBOOM, 2000).

Na busca de mecanismos que ofereçam aos agricultores e demais envolvidos no setor agrícola ferramentas para seu processo de tomada de decisão em cenários de mudanças climáticas, tem-se observado, nos últimos anos, um crescente aumento na

utilização de modelos de simulação na agricultura. As aplicações dos modelos de simulação na agricultura vão desde a busca do simples entendimento dos fatores que afetam a produtividade de uma cultura localmente até o desenvolvimento de sistemas que permitam a tomada de decisão e a obtenção de informações sobre o sistema agrícola regional e nacional. Tais sistemas têm se mostrado eficientes em permitir uma análise objetiva dos principais fatores envolvidos nas flutuações espaciais e temporais da produtividade agrícola em diferentes países (BETTS et al., 2004; HANSEN; INDEJE, 2004; POPOVA; KERCHEVA, 2004; COSTA; BARROS, 2001).

Apesar da complexidade envolvida na construção de modelos, os esforços são compensados em função de sua grande aplicabilidade, que auxilia o agricultor na tomada de decisão, permitindo a organização racional de questões envolvendo distribuição, armazenamento, comercialização do produto agrícola, entre outras (GEDANKEN, 1998).

Devemos ressaltar que atualmente o Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), o qual será utilizado no presente trabalho, insere-se como uma importante ferramenta no que tange à modelagem e à simulação de crescimento de culturas, porém uma das limitações está relacionada com os modelos de simulação que não contabilizam o efeito imposto por pragas/doenças.

Ressaltamos os prejuízos acarretados pela ferrugem asiática no Brasil nas últimas safras, comprovando que a mesma é alvo de preocupação em todas as regiões de cultivo onde ocorre, destacando-se pela sua rápida expansão, virulência e pelo montante de perdas que tem causado; o que representa uma preocupação aos sojicultores.

Desse modo, na presente tese, as etapas no entendimento da modelagem dos efeitos da ferrugem asiática da soja no Estado de Minas Gerais em cenário de Mudanças Climáticas, foram divididas através de uma revisão de literatura e três capítulos. Na revisão de literatura destacamos um panorama geral sobre a cultura da soja associada às condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem e estado da arte a respeito da modelagem agrometeorológica com ênfase nos modelos de simulação para a cultura da soja. No primeiro capítulo, realizamos a calibração do CSM-CROPGRO-Soybean utilizando o programa GLUE (do inglês, *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), para a estimativa dos coeficientes genéticos, juntamente com os dados experimentais e de solos. A validação foi realizada segundo os dados experimentais de Vasconcelos (2009). No segundo capítulo, apresentamos os efeitos no rendimento da ferrugem asiática da soja considerando a integração do CSM-CROPGRO-Soybean com

o módulo de doença. Finalizando, no terceiro capítulo, mostramos a o impacto da ferrugem da soja em cenário de mudanças climáticas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Histórico da soja

No Brasil, a soja foi introduzida em 1882 no Estado da Bahia, sendo depois levada para São Paulo (Instituto Agrônomo de Campinas - IAC), onde os primeiros resultados experimentais foram relatados em 1892 (MANICA; COSTA, 1996).

Em 1900, foi introduzida no Rio Grande do Sul. Neste estado, foram realizadas descrições detalhadas sobre seus aspectos botânicos e culturais, no ano de 1901, bem como avaliações experimentais em 1921, enquanto seu cultivo para fins agrícolas foi iniciado em 1924. Em 1931, foi introduzida a variedade cultivada Amarela-rio grande que, por muitos anos, foi responsável por mais de 95% da produção de soja no Rio Grande do Sul, sendo que, em 1965, de um total de 350 mil hectares cultivados, 70% da área era dessa variedade cultivada (FERREIRA, 2002).

No Estado de Minas Gerais, a soja chegou por volta de 1925, em Lavras, depois em Barbacena e, por volta de 1930, em Viçosa. Na década de 1950, foram lançadas, pela Universidade Federal de Viçosa, variedades cultivadas de soja para plantio em solos de cerrado, sendo a UFV uma das pioneiras nessa área. No programa atual de melhoramento, iniciado em 1963 pelo professor Sílvio Brandão e pelo Dr. Kirk L. Athow – hoje coordenado pelo professor Tuneo Sedyama –, Viçosa conta com 45 novas variedades cultivadas, sendo, mais uma vez, pioneira no lançamento de variedades cultivadas próprias para consumo humano e que não possuem os genes que causam o gosto amargo característico do produto. Do total da área plantada em Minas

Gerais, aproximadamente 17% é ocupada por variedades cultivadas de Viçosa, e considerando o Brasil, já ocupam mais de 600 mil hectares (FERREIRA, 2002).

2.2. Ferrugem asiática da soja e condições favoráveis ao seu desenvolvimento

A soja é cultivada em diversas regiões tropicais e subtropicais, das quais os Estados Unidos (EUA) e o Brasil são os maiores produtores e exportadores mundiais dessa cultura. No Brasil, a soja é a principal cultura agrícola destinada à exportação. Apesar da elevada produção, muitos fatores podem afetar a produtividade, tais como as doenças de plantas. Entre essas doenças, encontra-se a ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & P. Sydow), relatada em diversas regiões do mundo como a responsável por reduções significativas de produtividade (FERREIRA, 2002).

A primeira descrição da ferrugem asiática da soja, em lavouras no Continente Americano, foi relatada no Paraguai, na safra 2001 (MOREL, 2001) e posteriormente no Brasil, safra 2001, na região oeste do Estado do Paraná (YORINORI et al., 2005). Rapidamente espalhou-se pelas principais regiões produtoras, em função da eficiente disseminação pelo vento. Reduções de produtividade próximas a 70% podem ser observadas quando comparadas áreas tratadas e não tratadas com fungicidas. A perda esperada, sob condições ótimas para o desenvolvimento do fungo, é acima de 80% (EMBRAPA, 2005).

A ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & Sydow) constitui-se na principal doença da cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] no Brasil. Condições climáticas favoráveis ao patógeno, na maioria das regiões produtoras, associadas à sua alta virulência e velocidade de dispersão são fatores que tornam a doença extremamente severa afeta significativamente o potencial produtivo da cultura da soja. Plantas severamente atacadas apresentam desfolha antecipada, prejudicando a formação e desenvolvimento de legumes e o peso final de grãos (SINCLAIR, 1989).

Uma vez que no cenário atual pode-se desconsiderar uma influência decisiva do hospedeiro, os elementos-chave das epidemias de ferrugem asiática são, portanto, em sequência lógica: 1) a quantidade de *inóculo* e a época em que este chega em uma lavoura ou região; e 2) as condições de *ambiente* quando da chegada do inóculo na lavoura ou região até o final do ciclo da cultura. A variação individual e a interação desses elementos, sob influência de vários fatores, explicam o comportamento

extremamente variável das epidemias de ferrugem asiática no espaço e no tempo, seja em uma ou ao longo de várias safras (DEL PONTE et al., 2006b).

O sucesso da infecção do patógeno depende da sequência de eventos determinada pela germinação de esporos, formação de apressório e penetração. Cada um desses eventos e a subsequente colonização e esporulação são influenciadas por fatores bióticos, como interação patógeno-hospedeiro e fatores abióticos do ambiente (VALE et al., 1990).

Entre os fatores abióticos, a temperatura e o molhamento foliar exercem papel fundamental, principalmente nos processos monocíclicos de germinação e de infecção de *P. pachyrhizi* em soja. Esses dois fatores abióticos foram estudados em cultivares adaptadas a outros países (ALVES, 2007). Em sua revisão, Sinclair e Backman (*apud* ALVES, 2007) citaram o intervalo de temperatura ótima para a infecção entre 20°C a 25°C. Nessas condições, e havendo disponibilidade de água livre sobre a superfície da planta, a infecção ocorre no período de seis horas após a deposição do esporo, sendo que quanto maior a duração do molhamento foliar, maiores serão as chances de sucesso no estabelecimento da infecção (SINCLAIR, 1989).

Entretanto, Vale et al. (1990), estudando o efeito da temperatura e duração do molhamento foliar sobre a infecção de *P. pachyrhiz* na cultivar Paraná, observaram o número máximo de lesões.cm-2 de área foliar sob temperatura de 20°C, com 24 horas de molhamento na superfície foliar. Dessa forma, tais estudos são importantes para prever a ocorrência e formular estratégias de controle da doença, além de verificar o potencial de perdas causadas pela doença nas principais regiões produtoras durante a estação de crescimento.

A ocorrência da ferrugem está diretamente associada às condições climáticas. Temperaturas do ar inferiores a 28°C e molhamento foliar superior a 10 horas favorecem a infecção da planta (EMBRAPA, 2005). Como o fungo é disseminado, principalmente pelo vento, é importante fazer um monitoramento para detectar as próximas regiões passíveis de infecção pela doença.

O molhamento foliar contínuo, promovido pelo orvalho ou pela chuva, sob condições ótimas de temperatura (18°C a 26,5°C), favorece o rápido desenvolvimento da doença (MELCHING et al., 1989; ALVES et al., 2006), sendo a precipitação considerado o fator mais importante no progresso da doença nas condições de campo (TSCHANZ, 1984; DEL PONTE et al., 2006a).

O período de molhamento foliar é um parâmetro importante que deve ser considerado na maioria dos modelos epidemiológicos de doença de plantas. Muitos patógenos necessitam de um período relativamente grande de molhamento para que sejam possíveis processos como a infecção e a esporulação. Infelizmente, o período de molhamento foliar varia muito em função do microclima, especialmente com o tamanho do dossel e sua estrutura. Para muitas infecções, como o míldio da videira, o período de molhamento foliar é o principal determinante para que ocorra a infecção. Com o aumento de CO₂ na atmosfera, espera-se um aumento relativo do dossel foliar (IDSO; IDSO, 1994), que propiciará um microclima mais favorável às doenças e o aumento na taxa de esporulação desses patógenos nas folhas do dossel mais denso das plantas (PANGGA, 2002).

Resultados da literatura demonstram o efeito dos elementos climáticos, principalmente temperatura e molhamento foliar sobre a capacidade dos fungos infectarem e provocarem doenças na parte aérea da soja (REIS et al., 2004). A presença do molhamento é fundamental para a ocorrência da doença, já que a presença ou ausência da água livre na superfície foliar determina a possibilidade de germinação dos esporos e, conseqüentemente, a ocorrência da infecção.

Marchetti et al. (1976) demonstraram o efeito da temperatura e duração do período de molhamento na germinação e infecção por uredosporos de *P. pachyrhizi*. Esse trabalho mostrou que o fungo foi capaz de germinar entre as temperaturas de 7°C e 28°C, com faixa ótima de 15°C a 25°C. Infecções ocorreram com temperaturas entre 20°C e 25°C e 6 horas de duração de molhamento, sendo que taxas de infecções máximas ocorreram entre 10 a 12 horas de molhamento.

O efeito dos vários elementos do clima de uma região e do microclima do dossel da cultura nos vários processos da epidemia deve ser, sempre que possível, quantificado para que se possa descrever ou, eventualmente, prever o comportamento da doença ou de seus componentes. Vários estudos já foram conduzidos para se obter tal conhecimento. O efeito isolado ou em interação de variáveis importantes, como o molhamento foliar e a temperatura na infecção ou outros processos do ciclo da doença, é normalmente medido sob condições controladas. Estudos da década de 1970 e 1980 permitiram observar que esporos de *Phakopsora pachyrhizi* foram capazes de germinar em temperaturas de 7°C a 28°C, com faixa ótima de 15°C a 25°C (MARCHETTI et al., 1976; MELCHING et al., 1989). Resultados similares, quanto à germinação de esporos,

foram também observados recentemente em estudos conduzidos no Brasil (ALVES et al., 2006).

A rápida expansão e o grande potencial de perdas fazem da ferrugem asiática uma das mais importantes doenças da cultura da soja (YORINORI et al., 2005). O fungo, muito agressivo, pode causar rápido amarelecimento e queda prematura de folhas, ocasionando danos na formação das vagens e enchimento de grãos (YANG et al., 1991a). Reduções na produtividade foram relatadas na Tailândia (10- 40%), na China (10-50%) e em Taiwan (23-90%) (TSCHANZ, 1999). No Brasil, as perdas de produção podem atingir 70% em áreas não controladas (YORINORI et al., 2005).

Conforme ressalta Moreira (2009), o uso de fungicidas é a principal estratégia de controle para minimizar os danos. No entanto, essa moléstia gera outros problemas ao produtor, dentre os quais se destacam o aumento no custo de produção, dificuldade no gerenciamento de aplicações de fungicidas em condições adversas e aumento no número de aplicações de fungicidas, com os consequentes impactos negativos ao meio ambiente.

Quanto ao inóculo, a sua presença está condicionada à presença local de plantas hospedeiras vivas e doentes, mas também às condições que promovem o seu transporte à longa distância e que influenciam na sua sobrevivência enquanto aéreo. A capacidade da planta em se manter viva e do fungo em se manter em atividade sofre, logicamente, influência direta do clima, principalmente por fatores que geram estresse de secas associadas às altas temperaturas ou condições de baixas temperaturas por longo período no inverno, sendo esta última condição limitante à sobrevivência em regiões de clima temperado (DEL PONTE et al., 2007).

Tal fenômeno sugere a modelagem do efeito do clima sobre o inóculo e a determinação de áreas com maior ou menor potencial de inóculo disponível no início da safra (PIVONIA; YANG, 2004). Além de permitir a quantificação do efeito do clima sobre a planta, o inóculo ou a doença resultante, a modelagem pode ser usada para identificar padrões de dispersão espacial da doença na escala da lavoura (ESKER et al., 2007b) até a escala continental (CHRISTIANO; SCHERM, 2007; DIAS et al., 2007) de forma a se inferir indiretamente sobre os mecanismos que atuam nas escalas inferiores. Ainda, padrões de progresso temporal da doença podem ser identificados e correlacionados às taxas e a outros parâmetros das curvas ajustadas, com variáveis climáticas, agronômicas, biológicas, dentre outras (ESKER et al., 2007a).

Melching et al. (1989), estudando a epidemiologia da ferrugem asiática da soja (*P. pachyrhizi*) em diferentes condições de molhamento foliar e temperatura, obtiveram resultados em que variedades de soja susceptíveis inoculadas com uredosporos viáveis não desenvolveram os sintomas de ferrugem sob períodos de orvalho menores que 6 horas, porém níveis traços de lesões primárias desenvolveram-se a 18, 20, 23 e 26,5°C. Depois de 8 horas de orvalho a 18-26,5°C a intensidade das lesões foi 10 vezes maior do que aquela observada com 6 horas de orvalho nas temperaturas correspondentes. A crescente duração do orvalho de 12 a 16 horas não resultou em aumento significativo na intensidade da ferrugem, mesmo sob as temperaturas mais favoráveis (18-26,5°C). Uredosporos sobre folhas de soja não umedecidas progressivamente perderam o poder de causar infecção durante as condições de brilho solar, porém exibiram aumento de severidade durante 1 ou 2 horas sobre folhagem seca, em condições de dia nublado.

As mudanças climáticas podem ter efeitos diretos e indiretos tanto sobre os patógenos quanto sob as plantas hospedeiras e interação de ambos. Sobre os micro-organismos fitopatogênicos, a distribuição geográfica, por exemplo, é determinada pela gama de temperatura nas quais o micro-organismo pode crescer, mas muitas espécies prevalecem somente em regiões onde a temperatura e outros fatores climáticos estão próximos aos valores ótimos para permitir um rápido desenvolvimento. A distribuição temporal também pode ser afetada. Diversos patógenos, especialmente os que infectam folhas, apresentam flutuações quanto a incidência e a severidade durante o ano, que podem ser devidas às variações do clima. Muitos desses patógenos são favorecidos pelo aumento da umidade durante a estação de crescimento, devido ao aumento da produção de esporos. Por outro lado, doenças como o oídio são favorecidas por condições de baixa umidade. As condições favoráveis são específicas para cada patossistema e, assim, não podem ser generalizados (GHINI, 2005).

Na maioria das regiões tropicais e subtropicais, no período de cultivo de soja no Brasil, a temperatura média se encontra na faixa de conforto para o patógeno, aparentemente não causando estresse significativo, uma vez que as condições de umidade não sejam limitantes. A análise dos dados de 34 epidemias, observadas em três anos e 20 locais no Brasil, mostraram fraca correlação entre a severidade máxima da doença e as temperaturas médias, tanto máximas como mínimas diárias, por 30 dias durante o progresso da doença (DEL PONTE et al., 2006a).

Em vista da dinâmica populacional do patógeno, o controle da doença deve ser buscado através da utilização integrada de diversas estratégias que visem a redução do

nível de inóculo a que a cultura será submetida. Outro aspecto é a planificação de controle, obedecendo aos parâmetros de um manejo integrado, no qual um conjunto de práticas baseadas em evasão, manejo cultural, nutricional, genético e químico possa reduzir o inóculo inicial e a taxa de progresso da ferrugem. A proteção química realizada preventivamente, aliada às estratégias de manejo durante a fase crítica da cultura, possibilita redução consistente no dano relativo à ferrugem asiática da soja. Sendo assim, é importante orientar os produtores, evitando gastos desnecessários com medidas não eficazes ao combate da doença (BEDIN et al., 2008).

Nas condições de campo, baixos valores de taxa de progresso da doença foram verificados em Taiwan, em epidemias observadas sob condições de altas temperaturas médias, acima de 28°C, e baixa precipitação (YANG et al., 1990). A associação chuva x epidemias foi demonstrada por meio da observação da alta correlação entre a severidade máxima da doença e variáveis com base na chuva, como número de dias de chuva e acumulado de chuva por períodos de até um mês durante o progresso da epidemia (TAN et al., 1996; DEL PONTE et al., 2006a).

Os sintomas da ferrugem asiática podem surgir em qualquer momento do ciclo fenológico da cultura, porém tem surgido, de forma mais frequente, em plantas próximas a floração (SILVA, 2007).

2.3. Modelo e modelagem

Modelos podem ser definidos como uma representação simplificada por necessidade do que se percebe ser realidade, podendo ser um objeto, uma ideia ou um sistema (SHANNON, 1975). Eles são uma descrição matemática das diversas causas e efeitos envolvidos num sistema real; para serem perceptíveis é necessário que as relações entre causa e efeitos sejam claras e limitadas (KEEN; SPAIN, 1992). Além disso, são provenientes de aproximações realizadas para se poder entender melhor um determinado fenômeno, mesmo que essas aproximações não condizem totalmente com a realidade.

Jame e Curtforth (1996) definem modelo como uma série de equações matemáticas, as quais descrevem um sistema físico; no caso, sistema solo-planta-atmosfera. O modelo simula uma cultura pela estimativa do crescimento de seus componentes, como folhas, raízes, caules e grãos. Assim, um modelo de simulação de crescimento de cultura não somente estima a biomassa total ou a produção na colheita,

mas também inclui informações quantitativas sobre a maioria dos processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da planta.

Os modelos de simulação têm auxiliado, há mais de 60 anos, a abordagem globalizante dos problemas que envolvem o setor agrícola. Tal modo de observação da realidade, integrado e multidisciplinar, constitui o atributo fundamental do que, usualmente, se designa por investigação de sistemas agrícolas (BRAGA et al., 2005).

A metodologia da modelagem sempre inicia com a identificação precisa e com o entendimento do problema a ser resolvido. De qualquer forma, sempre existe o risco do desenvolvimento de um modelo que possa ser ineficiente ou que falhe na solução desses problemas (HILLEL, 1977).

Os modelos matemáticos e estatísticos podem ser desenvolvidos de inúmeras formas, dependendo da inclinação do cientista, do tipo de experimento, dos dados disponíveis e dos objetivos do trabalho. De qualquer maneira, os modelos podem ser classificados em dois grupos, baseados na estratégia geral de modelagem: empíricos ou descritivos e mecanísticos ou explanatórios (VALE et al., 2004).

Os modelos empíricos são desenvolvidos para descrever a relação observada entre duas ou mais variáveis. Esses modelos simplesmente correlacionam dados observados. Desse modo, eles não têm incorporado nenhuma informação previamente conhecida sobre as variáveis dependente e independente. Os modelos mecanísticos são desenvolvidos a partir de uma hipótese, conceito ou teoria, ao invés de um conjunto de dados, como os modelos empíricos. O modelo, portanto, é escrito baseado em seu conceito, e então poderá ser testado quanto à sua precisão em descrever a realidade. Na área epidemiológica, os modelos empíricos são os mais comumente empregados, principalmente devido à facilidade de utilização. Entretanto, com a necessidade de interpretação holística das interações patógeno-hospedeiro-ambiente-vetor (se presente)-homem, tem aumentado o uso dos modelos mecanísticos, embora a matemática empregada seja mais complexa, demandando equipes multidisciplinares em sua elaboração (VALE et al., 2004).

Modelos estocásticos ou probabilísticos: possuem pelo menos uma de suas características operacionais dada por uma função de probabilidade. São consideravelmente mais complexos que os determinísticos, pois descrevem processos aleatórios, como a distribuição espacial de indivíduos (SILVA; BERGAMASCO, 2001).

2.4. Modelo de simulação de culturas e doenças

Os primeiros modelos de simulação de culturas foram desenvolvidos nos anos de 1960 e tinham como finalidade simular a interceptação da luz e a fotossíntese nas plantas (WIT, 1965). Com o tempo, os modelos tornaram-se mais complexos, envolvendo grande quantidade de dados. Com a complexidade dos modelos, também vieram as limitações, mas, mesmo assim, há forte evidência de que os modelos de simulação de culturas podem ter participação importante na pesquisa científica, na tomada de decisão e na educação (GRAVES et al., 2002).

Os modelos de simulação de culturas podem auxiliar no entendimento desses fatores, assim como indicar alternativas no manejo da cultura perante diferentes cenários para o sistema de produção. Define-se que um sistema como a parte de um todo, constituído por uma série de componentes e suas inter-relações. Um modelo de sistema agrícola deve ter uma estrutura hierárquica composta de vários subsistemas (módulos) de definição autônoma e cujo exercício funcional deve fornecer uma descrição compreensiva e quantitativa do sistema de produção (FERNANDES et al., 1994).

Entender o comportamento dinâmico de epidemias é de fundamental importância no que diz respeito à sua evolução, estabilidade e controle, embora seja difícil descrever a maior parte dos fenômenos naturais devido à quantidade de parâmetros envolvidos, efeitos de escala, e pela elevada subjetividade que geralmente não ocorre nos modelos matemáticos tradicionais determinísticos (LEITE, 1999).

Os primeiros modelos de simulação serviram para avaliar aspectos básicos da epidemiologia e identificar falhas existentes no conhecimento do sistema. Com o passar do tempo e com a evolução do conhecimento, outros aspectos foram sendo introduzidos nos modelos de simulação, como o manejo de pragas/doenças, além da tomada de decisão. A inclusão desses aspectos visa ao fornecimento de informações quantitativas da projeção da doença, permitindo que decisões de manejo sejam tomadas, levando em consideração a relação custo/benefício (FERNANDES et al., 1994).

Na década de 1990, foi desenvolvido o primeiro modelo computacional para a simulação da ferrugem asiática da soja: o SOYRUST. Este modelo que simula o desenvolvimento da doença em função da temperatura e do molhamento foliar foi validado com experimentos da doença em diferentes épocas de plantio (YANG, 2006). Esse mesmo modelo foi desenvolvido para avaliar epidemias da doença, simulando o

aumento diário da severidade da doença em duas variedades e refletindo o efeito ambiental do ciclo da epidemia, a fim de prever o desenvolvimento em passos diários. As equações que descrevem os efeitos ambientais nos componentes da doença foram desenvolvidas para reanalisar dados coletados, com vistas a obter um método de avaliação do sistema. As taxas de infecção foram previstas utilizando o orvalho e a temperatura após a inoculação como variáveis independentes. Os modelos exponenciais, que usaram o dia fisiológico como uma variável independente, explicaram 98% das variações do período latente das lesões (YANG et al., 1991b; DEL PONTE et al., 2006b).

O desenvolvimento de modelos de simulação envolvendo sistemas de produção agrícola requer uma análise profunda do sistema, geração e acúmulo de conhecimento e uma ampla base de dados experimentais. Porém, é também crucial o emprego de métodos e ferramentas de tecnologia de software. A modularidade e a forma genérica são os termos que descrevem a nova e amplamente aceita metodologia para superar as complexidades que surgem ao construir, manter e reusar modelos em partes ou como um todo (REYNOLDS; ACOCK, 1997).

A modelagem de epidemias de plantas objetiva permitir uma melhor compreensão e representação dos processos envolvidos na dinâmica de uma epidemia, tal como ocorre na natureza. Os modelos matemáticos, por sua vez, permitem quantificar o efeito dos fatores que influenciam os processos, sejam, no caso da ferrugem asiática, processos aerobiológicos ou epidemiológicos, podendo levar a predição de seu comportamento. Diversos modelos têm sido desenvolvidos para essa doença, de concepção simples ou complexa, e que descrevem, individualmente, de maneira mais ou menos abrangente, os diferentes processos epidêmicos desde parâmetros monocíclicos até dispersão de esporos e da doença em escala regional, conforme revisados recentemente (DEL PONTE et al., 2006b).

Três categorias ou gerações de aplicações dos modelos podem ser definidas de acordo com os objetivos e a maior ou menor complexidade de informação e tecnologias necessárias: 1) estudos de avaliação de risco e impacto potencial da doença; 2) sistemas de previsão com base em modelos climáticos; e 3) plataformas tecnológicas de monitoramento e previsão de risco de epidemias. Na primeira situação, os estudos envolvem o uso de um modelo de concepção simples com variado número de parâmetros (PIVONIA; YANG, 2006; DEL PONTE et al., 2006b; CANTERI et al., 2005), ou mesmo modelos mais elaborados e complexos, do tipo mecanísticos, que

usam diversos modelos, regras e informações em sua composição (YANG et al., 1991a).

Um modelo baseado em processos foi desenvolvido para a simulação do progresso das epidemias e avaliação do risco da doença sob diferentes cenários climáticos (YANG et al., 2001). Por outro lado, os modelos empíricos, como aqueles com base na chuva, têm sido usados para avaliação do risco da doença, com o uso de registros históricos de série de 50 anos de precipitação para se estimar a probabilidade de ocorrência de epidemias severas em determinadas regiões nos Estados Unidos (DEL PONTE et al., 2005).

Em recente revisão, foram discutidos doze modelos matemáticos encontrados na literatura para a previsão de diferentes componentes da epidemia usando distintos métodos de modelagem e conjunto de dados (DEL PONTE et al., 2006b), e é possível que outros modelos já estejam em desenvolvimento. A estratégia utilizada para estimar o risco da doença varia conforme os objetivos, disponibilidade e validade dos modelos, dados climáticos disponíveis, forma de aquisição e processamento dos dados, capacidade de interpretação e disseminação da informação de risco, dentre outros.

Esses estudos objetivam determinar probabilidades de risco de componentes das epidemias, uma vez que se utilizam registros históricos como variáveis de entrada nos modelos, usualmente com base no clima. Como exemplos de estudos para esse patossistema citam-se aqueles para: avaliação do potencial de danos na produção (YANG et al., 1991b); mapeamento de áreas sob risco de epidemias usando modelos climáticos com base em períodos críticos para infecção usando dados climáticos históricos (CANTERI et al., 2005; MAGAREY et al., 2004) estimativa de probabilidade histórica de ocorrência de epidemias de diferentes intensidades (DEL PONTE et al., 2005); estimativa de áreas favoráveis à sobrevivência do inóculo (PIVONIA; YANG, 2004); estimativa da época de aparecimento da doença (PIVONIA; YANG, 2006); estimativa de áreas sob risco de disponibilidade de inóculo aéreo oriundo de determinados locais fontes de inóculo (KIM et al., 2005); e estimativa de potencial de transporte de inóculo aéreo à longas distâncias (ISARD et al., 2005; PAN et al., 2006). No segundo tipo de aplicação, o desenvolvimento de modelos climáticos para previsão de ferrugem asiática durante a safra (REIS et al., 2004; CANTERI et al., 2005) seguiu um modelo antigo com base na estimativa de períodos críticos para a infecção, os quais são monitorados com base em variáveis meteorológicas medidas em estações automáticas.

Lelis (2007) conclui que as redes neurais artificiais mostraram-se como uma boa opção para a investigação das condições de favorabilidade ao desenvolvimento de doenças em plantas, respondendo bem aos experimentos de campo realizados em Uberlândia e Viçosa, evidenciando o início da doença. Em todas as regiões do Estado de Minas Gerais, os meses de julho e agosto foram os que apresentaram as piores condições ao desenvolvimento da ferrugem, devido às baixas temperaturas. O período que apresentou as condições mais favoráveis à doença, devido às altas temperaturas e umidades relativas, estende-se de outubro a abril, com maior ou menor intensidade, em todo o estado.

Modelos de simulação de culturas capazes de prever o rendimento final têm sido estudados intensivamente em várias partes do mundo (HOOGENBOOM, 2000) e representam a simulação da dinâmica do crescimento das culturas através da integração numérica, com a ajuda de computadores. Em essência, esses modelos de simulação são programas de computadores que representam, matematicamente, o crescimento das plantas em relação ao ambiente (GRAVES et al., 2002). Essas aplicações variam desde a predição do rendimento final em nível de propriedade até escalas regionais e nacionais, maior parte dessas predições envolve prognósticos climáticos, sendo feitas antes do momento da semeadura; outras são obtidas durante o desenvolvimento da cultura (BANNAYAN et al., 2003).

O conhecimento sobre modelos complexos, aliado às informações meteorológicas e projeções climáticas, tem oferecido a oportunidade de aplicar técnicas de modelagem e simulação a fim de obter as respostas para as perguntas dos tomadores de decisões, como a amplitude de rendimento de uma determinada cultura e a severidade do ataque de uma doença (LIMA, 2009).

Modelos podem ser utilizados para analisar os efeitos de diferentes estratégias, ajudando na determinação da melhor decisão, e apresentam uma série de vantagens para uma análise econômica, em relação aos dados provenientes de experimentação em campo. Entre essas vantagens destacam-se: um grande número de diferentes estratégias pode ser avaliado rapidamente e com baixo custo, cada estratégia pode ser avaliada em um amplo intervalo de condições incertas, como, por exemplo, clima; e, dependendo do modelo de crescimento utilizado, podem-se avaliar complexas estratégias de manejo interagindo com diversas decisões, como irrigação, fertilização, datas de semeadura, dentre outras (BOOGES; RITCHIE, 1998).

Dallacort et al. (2005) utilizaram o modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (*Cropgro-soybean*), ajustando os coeficientes genéticos do modelo para os cultivares de soja CD 202, CD 204, CD 206 e CD 210, cultivados na região de Palotina, PR. Os autores fizeram a simulação da produtividade da soja para a semeadura em 1º de novembro, com objetivo de testar os coeficientes ajustados nas 25 safras compreendidas entre o período de 1974 a 1999. Por meio das análises realizadas nas simulações, verificou-se que o modelo apresentou alta sensibilidade à variação dos coeficientes genéticos das cultivares estudadas.

Desse modo, modelos de simulação do crescimento e do desenvolvimento de culturas têm sido projetados e desenvolvidos em várias partes do mundo (SWANEY et al., 1983; JONES; RITCHIE, 1990; MAVROMATIS et al., 2001; VERHAGEN et al., 2001; KEATING et al., 2003; NORWOOD et al., 2006). Dentre as culturas, pode-se citar o desenvolvimento para o trigo, soja, milho, cana de açúcar, mandioca, etc., sendo esses para fins acadêmicos e práticos. Como um exemplo prático pode-se citar o uso do DSSAT.

2.5. DSSAT

O DSSAT é uma das mais conhecidas e difundidas aplicações dos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas, tendo sido desenvolvido pelo projeto *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer* (IBSNAT), na Universidade do Havaí, a partir de 1974. O projeto IBSNAT teve duração de cerca de 10 anos, resultando no aplicativo DSSAT e numa rede internacional de pesquisadores envolvidos no desenvolvimento e em teste de modelos de simulação. Atualmente é mantido pelo consórcio *International Consortium for Agricultural Systems Applications* (ICASA), que reúne um grande número de cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa, trabalhando de forma colaborativa para a construção dos modelos e suas aplicações (JONES et al., 2001 e 2003; INTERNATIONAL CONSORTIUM FOR AGRICULTURAL SYSTEMS APPLICATIONS – ICASA, 2010).

O DSSAT é um sistema composto por diversos modelos de simulação, orientados para processos, projetados para aplicações globais, trabalhando independentemente de local, estação e cultivar (VERHAGEN et al., 2001). É apropriado para que os estudos a longo prazo avaliem as estratégias eficientes da gerência da

cultura e otimizem a produção (FARIA; BOWEN, 2003). O DSSAT combina dados de solo e de clima com modelos de culturas e aplicativos, a fim de simular os resultados de vários anos de estratégias no manejo de culturas (ICASA, 2010). É o resultado do trabalho colaborativo de muitos cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa que fazem parte do consórcio Icasa.

O DSSAT simula o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura numa área uniforme de terreno, com as informações de manejo informadas ou simuladas, assim como mudanças no conteúdo da água do solo, carbono e nitrogênio que ocorrem em relação ao tempo. Possui uma estrutura composta por um programa principal, uma unidade módulo solo e os módulos para os componentes primários. A unidade módulo solo é responsável pela interface entre a aplicação e os componentes que interagem numa área uniforme de solo, ao passo que os componentes descrevem as mudanças temporais no solo e nas plantas, em resposta ao clima e ao manejo (JONES et al., 2003). Cada módulo possui seis passos operacionais responsáveis pela estruturação e organização, os quais são: inicialização da execução, instalação da cultura, cálculo das taxas, integração, saídas diárias e sumário das saídas.

Dentre os componentes primários encontrados no DSSAT, como clima, solo-planta-atmosfera, CSM-CROPGRO-Soybean (modelo para a cultura), planta, manejo e praga. O módulo solo é representado como um perfil unidimensional, sendo homogêneo horizontalmente e consistindo de um número de camadas verticais de solo. O módulo solo é composto por quatro submódulos: água no solo, temperatura do solo, carbono e nitrogênio do solo (ICASA, 2010).

O submódulo água no solo computa as mudanças diárias no conteúdo de água do solo pela infiltração da chuva e irrigação, drenagem vertical, fluxo insaturado evaporação e processo de absorção de água pelas raízes. A infiltração de água é computada pela subtração da quantidade de água da precipitação que ocorre durante o dia, sendo o processo baseado no número da curva, que leva em conta a textura, declive e cobertura. A drenagem através do perfil é calculada com base num parâmetro assumido para que seja constante com a profundidade (JONES et al., 2003).

Caso a condutividade hidráulica saturada de qualquer camada seja menor que a drenagem vertical computada, a água é acumulada na camada acima. Quando há a aplicação de irrigação, a quantidade de água é adicionada à precipitação para cálculo de infiltração e quantidade de água diária (FARIA; BOWEN, 2003).

O submódulo solo-planta-atmosfera é responsável por computar diariamente a evaporação do solo e transpiração das plantas; traz junto ao solo as entradas da planta e atmosfera e computa a interceptação da luz pelo dossel, a evapotranspiração potencial e a transpiração da planta.

Com o módulo praga, o usuário pode entrar com as observações sobre populações de insetos ou danos em diferentes partes da planta, severidade de doenças em diferentes tecidos da planta e danos físicos a plantas ou a seus componentes. Os efeitos da praga e/ou doença no crescimento e produção são determinados de forma empírica, por meio de uma função de dano (ICASA, 2010).

Os dados mínimos exigidos pelo modelo para sua operação abrangem o local onde o modelo será operado (latitude, longitude, elevação, médias anuais de temperatura e sua amplitude, etc.), dados meteorológicos diários do período do ciclo de crescimento (radiação solar, temperatura do ar máxima e mínima e precipitação), características do solo (características básicas das camadas do solo), condições iniciais (cultura anterior, raiz, etc.) e gerenciamento da cultura (tipo e nome do cultivar, data de plantio, profundidade, espaçamento, etc.) (JONES et al., 2003).

Atualmente, a suíte DSSAT é composta por 27 diferentes modelos de culturas, formada por uma coleção de programas independentes que operam em conjunto, estando inseridos numa ferramenta que facilita a criação e o gerenciamento de arquivos de experimentos, de solo e de clima. Inclui aplicações que auxiliam na análise sazonal e sequencial dos riscos econômicos e impactos ambientais associados com a irrigação, uso de fertilizantes e nutrientes, mudanças climáticas, sequestro de carbono no solo, variabilidade climática e agricultura de precisão (JONES et al., 2003; ICASA, 2010).

O modelo CSM-CROPGRO-Soybean foi desenvolvido para a cultura da soja e permite as simulações dos principais processos físicos e fisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acumulação e partição da biomassa, fenologia, crescimento foliar de caules e de raízes, extração de água do solo, evapotranspiração e produção da soja, respondendo à variação de dados climatológicos de entrada como precipitação, radiação solar, temperaturas máxima e mínima. Também utiliza parâmetros de água no solo para avaliar o suprimento de água pela planta. A sensibilidade do modelo varia com a cultivar, a data de plantio, o manejo entre plantas e o manejo de irrigação. Os modelos de simulação CSM-CROPGRO-Soybean estão agrupados em um Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), no qual se encontram os vários modelos para as diferentes culturas: milho

(Ceres-Maize), trigo (Ceres-Wheat), sorgo (Ceres-Sorghum), arroz (Ceres-Rice), cevada (Ceres-Barley), girassol (Ceres-Sunflower), etc. (INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER – IBSNAT, 2010).

Segundo Jones et al. (2003), é um modelo genérico para leguminosas e permite a simulação do crescimento e desenvolvimento da soja, amendoim e feijão, entre outras. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean consiste de códigos escritos em FORTRAN e todos os atributos relacionados a espécies como a soja e outras são informados em arquivos externos (BATCHELOR et al., 1993). O mesmo contém equações que descrevem as relações de desenvolvimento, fotossíntese, respiração, disponibilidade de água, etc.

2.6. Descrição da integração do módulo de doença da ferrugem asiática da soja ao CSM-CROPGRO-Soybean

Atualmente, a modelagem agrometeorológica mundial insere-se num contexto de relevante importância no que tange ao desenvolvimento e entendimento das simulações de crescimento de cultura, utilizando inúmeras ferramentas para analisar diferentes estratégias de manejo, dentre elas, contamos com a associação das informações de dados experimentais, solos juntamente aos modelos de circulação geral da atmosfera possibilitando o estudo dos impactos das mudanças climáticas globais aplicadas na agricultura.

Descreveremos a seguir a trajetória do acoplamento do DSSAT Cropogro-Soybean com o Módulo de Doença da Ferrugem Asiática da Soja através de metodologia desenvolvida por Pavan (2007 e 2008) e Pedrini (2010). Os autores, por meio da utilização da modularidade integrando os efeitos impostos pelas doenças nos modelos de crescimento de culturas, proporcionaram uma melhor visibilidade no que tange ao avanço na modelagem agrometeorológica.

Inicialmente, Pavan (2007) criou um modelo para o patossistema ferrugem da folha do trigo, onde o autor incorporou-o ao modelo de crescimento e desenvolvimento do trigo (CSM-CROPSIM-Wheat). Para o desenvolvimento do modelo o autor tomou por base o ciclo de vida do patógeno, criando uma estrutura facilmente parametrizável, buscando, dessa forma, obter os resultados esperados.

Com a visão de criar um modelo de forma a ser decomposto em partes coesas, mas fracamente acopladas (modularidade), que permitisse a substituição de diferentes

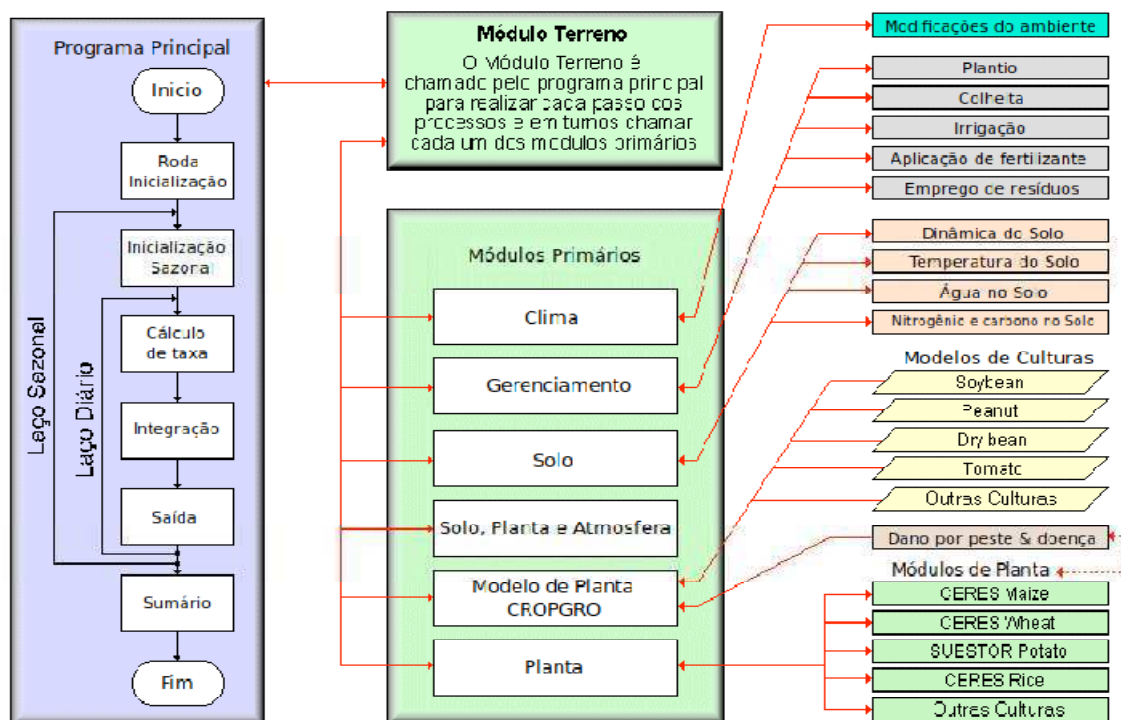
O modelo é de passo diário, alimentando-se de dados climáticos armazenados em bancos de dados, tanto prognósticos como observados ou capturados de estações meteorológicas. Cada componente do modelo é entendido como um objeto ou um grupo de objetos, ou seja, uma entidade virtual que representa as características essenciais da entidade real (PAVAN, 2008).

O modelo foi desenvolvido com o objetivo de abranger um maior número possível de doenças (genérico), de forma que estas pudessem ser parametrizadas a fim de representar o mais realisticamente possível as observações feitas em campo. Nesse sentido, modelos de simulação como o proposto são de grande valia para o entendimento dos processos em funcionamento, como o impacto das doenças no rendimento (PAVAN, 2007).

O modelo, validado por Mallmann (2009), simula corretamente o crescimento da área foliar do trigo e o progresso da ferrugem da folha, apresentando-se como uma excelente alternativa para o estudo das relações entre o patógeno e o hospedeiro.

Como ressalta Pedrini (2010), a estrutura do modelo da ferrugem da folha do trigo, como mostrado acima, sendo parametrizável é possível utilizar o mesmo modelo para calcular o dano de outras doenças foliares, sendo assim, um modelo genérico de doenças. Nesse sentido, as descrições abaixo, referentes à metodologia de integração do módulo de doença da ferrugem asiática da soja, são referentes ao autor mencionado nesse parágrafo.

Assim, para integrar os modelos CSM-CROPSIM-Wheat e o modelo genérico de doenças, o autor utilizou-se das mais variadas e heterogêneas tecnologias de linguagens de programação, tais como Java, R, C e Fortran, que estão contidas nessa estrutura. Com base na análise do modelo genérico de doenças e nas semelhanças da estrutura dos modelos CSM-CROPSIM-Wheat e o CSMCROPGRO-Soybean, a ideia inicial foi integrar o modelo genérico de progresso de doenças e o modelo de crescimento e desenvolvimento da soja para estimar o progresso e o dano causado por doenças foliares em soja, selecionando a ferrugem asiática da soja como o primeiro patógeno a ser utilizado nessa nova estrutura (Figura 2).



Fonte: Pedrini (2010).

Figura 2 – Visão geral dos componentes e da estrutura modular do DSSAT.

Os efeitos da praga e/ou doença no crescimento e produção são determinados de forma empírica, por meio de uma função de dano. Como essa sub-rotina foi desenvolvida para inserir danos causados por pragas e/ou doenças, algumas variáveis encontradas aqui são utilizadas para a integração com o modelo genérico de doenças. As variáveis são as seguintes:

Variáveis de saída do modelo CSM-CROPGRO-Soybean

- DOY (dia corrente da simulação) é o ano com o dia do ano em formato juliano;
- AREALF é a área foliar sadia remanescente em cm^2 ; e
- DYNAMIC é o estado do simulador, por exemplo: integração, taxa, final, entre outras.

Variáveis de integração

- DISLA é a variável utilizada para a atribuição do total de área foliar doente ao modelo cm^2 ; e
- WLIDOT, é uma variável de integração, utilizada originalmente para atribuir os danos causados por pestes ou danos causados pelo frio para a massa foliar ($\text{g}[\text{massa foliar}]/\text{m}^2[\text{chão}]/\text{dia}$) (BOOTE et al., 1983; BATCHELOR et al., 1993).

As variáveis de saída do modelo CSM-CROPGRO-Soybean são utilizadas como parâmetros de entrada em intervalo diário para o modelo genérico de doenças que atualiza as variáveis de integração (variáveis de dano). Em intervalo diário, também são utilizadas pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean, o qual, com o uso das variáveis, efetua o dano causado pela doença no dia corrente.

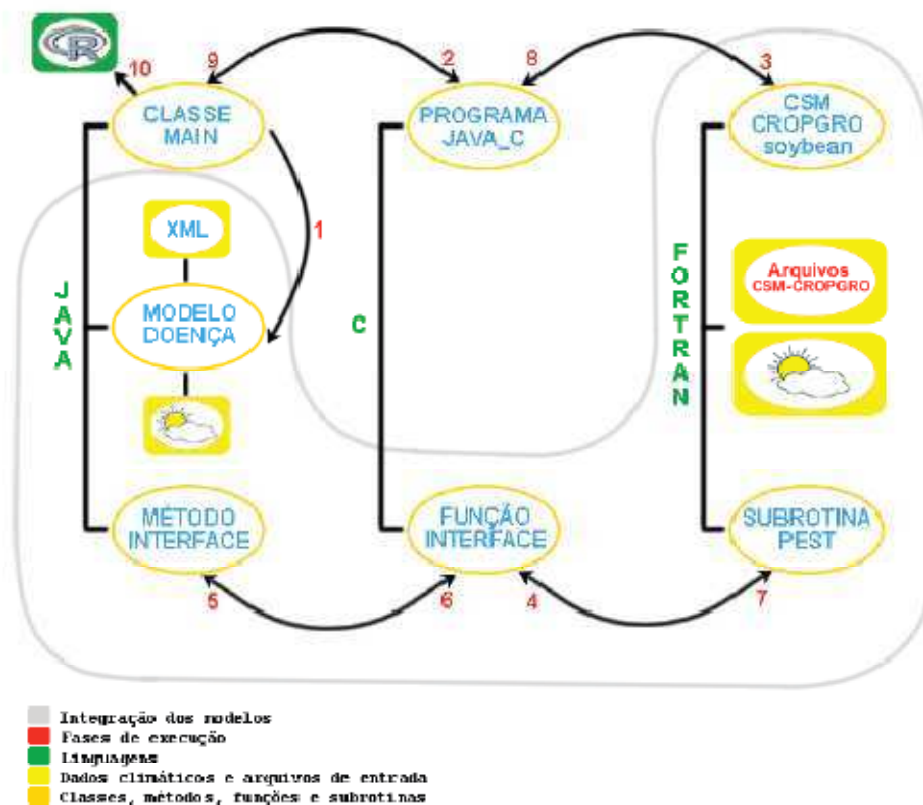
As variáveis escolhidas foram DISLA (Área Foliar Doente), representando o efeito da ferrugem na redução da absorção da radiação solar e WIDOT (Área Foliar Removida), que imita a desfolha prematura.

A seguir serão descritos os fluxos de execução seguidos dos passos para a realização da simulação do módulo de doença da ferrugem asiática, conforme descrito no diagrama apresentado na Figura 3, segundo metodologia de Pedrini (2010).

No primeiro passo da integração, dentro da classe Main, um método com o mesmo nome da classe inicia a execução do modelo genérico de doenças, o qual fica na espera de dados que serão fornecidos mais adiante pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean. Seguindo para o passo 2, o mesmo método Main envia os parâmetros fornecidos pelo usuário para inicializar o modelo CSM-CROPGRO-Soybean através de uma interface JNI (Java Native Interface).

Esses parâmetros são o nome do arquivo de entrada (.SBX) e o número do tratamento que se deseja simular desse arquivo. No passo 3 o simulador CSM-CROPGRO-Soybean é inicializado pela ponte de comunicação em C com os parâmetros anteriores através da chamada do programa principal CSM do CSM-CROPGRO-Soybean, o qual foi convertido em sub-rotina para tornar possível sua utilização na integração, conforme Figura 3.

Com os simuladores inicializados, em certo momento da simulação, o modelo CSM-CROPGRO-Soybean executa uma de suas sub-rotinas chamada PEST, que efetua uma requisição a outra função intermediária em C, chamada de INTERFACE (passo 4), passando três variáveis por parâmetro (DOY, AREALF e DYNAMIC), e que, dentro dessa mesma função, utilizando uma interface JNI, desenvolve uma chamada para o método Java INTERFACE que envia os parâmetros do FORTRAN-C do passo atual para C-JAVA (passo 5), como mostra a Figura 3.



Fonte: Pedrini (2010).

Figura 3 – Diagrama de fluxo da integração dos modelos.

Em seguida, o modelo genérico de doenças retorna aos valores calculados de área foliar doente e de área senescente para a função C INTERFACE no passo 6 (JNI), onde executa o passo 7 que, com o uso de ponteiros, atualiza os valores dessas variáveis no modelo CSM-CROPGRO-Soybean.

A interface de comunicação desenvolvida nos passos 4 a 7 é utilizada diversas vezes durante a simulação. Esse ciclo de execuções é realizado seguindo passos diários efetuados pelos modelos, onde ocorre a troca de dados entre modelos utilizando as seguintes variáveis já descritas anteriormente: DOY, AREALF, DYNAMIC, DISLA, WLIDOT.

Após os simuladores encerrarem suas execuções nos passos 8 e 9, é possível fazer uso dos dados gerados utilizando a linguagem R, passo 10, onde são desenvolvidas as análises estatísticas e a geração de gráficos.

O acoplamento dos modelos CSM-CROPGRO (Soybean e o modelo de ferrugem asiática da soja) permitiu que quando combinados, a simulação de cada um dos modelos interage durante o tempo de execução. O novo modelo combinado simulou o crescimento da soja e contabilizou os efeitos de um estresse biótico como, por exemplo, a ferrugem asiática da soja.

A metodologia “modelos-componentes” para a integração dos modelos desenvolvida por Pedrini (2010) mostrou que, utilizando os modelos como partes de um programa principal e o compartilhamento de bibliotecas, seria possível construir uma interface robusta e transparente. Esta metodologia mostrou-se eficiente para acoplar um modelo como o CSM-CROPGRO: Soybean escrito na linguagem FORTRAN e o modelo de ferrugem asiática da soja escrito em JAVA. As boas práticas de programação empregadas pelos cientistas no desenvolvimento desses dois modelos favoreceram a integração dos modelos.

Devemos ressaltar que uma das limitações e deficiência do CSM-CROPGRO: Soybean é a falta de detalhamento da estrutura do dossel de modo a permitir na comunidade de plantas estimativas dinâmicas do microclima que certamente influencia o estabelecimento e a sobrevivência de agentes causais de doença.

Por exemplo, a umidade é um dos fatores mais importantes, determinando a favorabilidade para o estabelecimento da grande maioria das doenças. A duração do molhamento foliar controla a germinação e a infecção. Além disso, o CSM-CROPGRO-Soybean usa a proposta de uma única grande folha para representar a área foliar. Isso traz dificuldades para distribuir no modelo a incidência das doenças ao longo das camadas das folhas próximo do que acontece no mundo real.

No caso da ferrugem asiática da soja, o aparecimento dos primeiros sintomas geralmente ocorre na porção inferior e disseminando com o passar do tempo para as camadas superiores. É provável que o ambiente mais favorável em termos de umidade e luz nas camadas inferiores contribui para o sucesso das primeiras infecções. No futuro, modificações no modelo CSM-CROPGRO-Soybean que contemplem um maior detalhamento da estrutura do componente “Arranjo de Folhas” deverá contribuir para que o acoplamento dos modelos, como aqui apresentado, venha a ter maior realismo.

A partir da integração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean a um modelo de doença, inicialmente para Passo Fundo, RS, o mesmo teve a capacidade de dinamicamente representar o progresso da ferrugem asiática da soja e a sua influência na produção.

A calibração foi realizada para a cidade de Passo Fundo, RS, onde conjuntos de dados foram coletados para alimentar as entradas dos modelos. Dados de clima, solo e cultivares foram utilizados para a calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean e dados do desenvolvimento da ferrugem asiática foram utilizados para calibrar o modelo de doença. As simulações desenvolvidas com os modelos integrados conseguiram diferenciar anos epidêmicos de não epidêmicos.

O modelo genérico de doenças ainda não se encontra disponível na suíte DSSAT, pois está em fase de final de desenvolvimento pela equipe da Universidade de Passo Fundo e da Embrapa Trigo, em breve estará sendo disponibilizada pela Internet, com a possibilidade de realizar as simulações do modelo CSM-CROPGRO-Soybean com os efeitos impostos pela doença.

CAPÍTULO 1

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO CROPGRO PARA A CULTURA DA SOJA

1. INTRODUÇÃO

Dentre as atividades econômicas desempenhadas pelo Brasil, a agricultura representada pelo complexo agroindustrial de soja movimenta 30 bilhões de dólares, sendo que a soja tem 5% na participação no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e 25% no PIB agrícola (EMBRAPA, 2005).

Dados climáticos disponíveis e confiáveis são fundamentais em uma eficaz previsão do desenvolvimento, do crescimento e da produção das culturas agrícolas através de modelos de simulação para determinada cultura. A técnica da modelagem pode ser utilizada para definir as prioridades da pesquisa, além de entender as interações entre o solo-planta-atmosfera (DOURADO NETO, 1999).

Os modelos assumem que a unidade espacial de simulação é homogênea, o que, na prática, e principalmente dependendo da escala ou do tamanho da unidade de simulação, nem sempre é verdadeiro. Conseqüentemente, os parâmetros do modelo e as variáveis que descrevem o estado do sistema dinâmico representam valores médios daquela unidade espacial. Isso é importante na hora de calibrar e validar os modelos (ANDRADE et al., 2009).

O intervalo de tempo para se calcularem os novos valores das variáveis de estado é de, geralmente, um dia na maioria dos modelos. As variáveis de estado de um modelo de cultura são aquelas que descrevem o sistema. Estas podem variar de modelo para modelo. Entretanto, as principais são fitomassa aérea, índice de área foliar (IAF), peso do material que se colhe (grão, no caso do milho), conteúdo de água e de nitrogênio do solo. Os modelos, previamente calibrados e validados com dados independentes, são empregados com dados históricos de clima de vários anos para simular o desempenho da cultura sob diferentes condições de manejo (ANDRADE et al., 2009).

De forma geral, os modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento das culturas foram projetados para estimar valores em áreas homogêneas. Entretanto, existe variabilidade nas produtividades, a mesma que se explica por fatores como: densidade da população, estresses hídricos, fatores nutricionais e físicos do solo ou até induzidos pelo próprio manejo, mudando espacialmente dentro da área (BATCHELOR et al., 2002).

Na agricultura, a simulação é importante para prever os resultados de uma determinada gerência de sistema ou de determinada condição ambiental (WU et al., 1996).

Uma ferramenta importante para o estudo do crescimento, desenvolvimento e produtividade de uma cultura, é o uso de modelagem agrometeorológica, a qual permite, entre outros, a descrição dos processos envolvidos no sistema e a simulação de situações que auxiliam na tomada de decisões antes do começo do plantio, aproximando-se do melhor resultado possível. Um instrumento significativo para se descrever os processos de crescimento da cultura de soja é a construção de modelos matemáticos que possibilitam o estudo de sistemas reais complexos, o qual exige modelos com integração coerente, banco de dados contendo informações experimentais e edafoclimáticas, além de permitir prever as produtividades de variedades de soja previamente calibradas, em ensaios de campo em alocações em vários ambientes (COSTA, 1997).

Nesse sentido, o conhecimento antecipado de indicadores de respostas da soja à condição hídrica pode auxiliar o empreendedor agrícola na busca de estratégias mais seguras às tomadas de decisões como, por exemplo, o momento certo de irrigar, optar por cultivares que completem o ciclo em períodos de oferta hídrica adequada, seguir as

recomendações do zoneamento agrícola (CUNHA; ASSAD, 2001) para a cultura da soja (CUNHA et al., 2001).

Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo calibrar e validar o CSM-CROPGRO-Soybean na estimativa do crescimento, desenvolvimento e da produtividade da cultura da soja em Viçosa, MG, para as três cultivares (BRS6101, BRS Valiosa e MGBR-46 Conquista), considerando os efeitos da ferrugem em diferentes datas de semeadura.

2. METODOLOGIA

A fim de se atingir os objetivos no presente trabalho, foram aplicados, as simulações de rendimento para a cultura da soja, utilizando a versão 4.5 do DSSAT.

2.1. Área de estudo e base de dados

O estudo foi realizado no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°44'48.5''S, 42°50'58.4''W, alt. 670 m).

Os dados meteorológicos utilizados pelo modelo, considerados como dados de entrada, compreendeu a Estação Meteorológica Convencional de Viçosa sob responsabilidade do 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com dados diários observados de temperatura média, máxima e mínima do ar (°C), precipitação (mm), e número de horas de insolação (n) para o cálculo da radiação solar (MJ.dia⁻¹.m⁻²). Estimou-se o Período de Molhamento Foliar (PMF), considerando a Umidade Relativa do Ar maior ou igual a 90% e 95%, o qual será descrito no item 2.1.3.

2.1.1. Características climáticas de Viçosa, MG

As condições climáticas reinantes em Viçosa, MG, são semelhantes às encontradas em uma parcela significativa do Sudeste do Brasil. Em termos termopluiométricos há uma ocorrência anual de duas estações bem distintas: uma estação chuvosa e quente, que vai de outubro a abril, e uma estação seca e mais amena, em função da latitude entre 20° e 42° de Latitude Sul, correspondendo ao período que vai de maio a setembro.

Outros dois fatores que caracterizam, também, o clima regional, estão relacionados com a concentração das precipitações nos meses de dezembro e janeiro. Em grande parte do Estado de Minas Gerais é comum a ocorrência de fortes chuvas com alta intensidade e, por outro lado, a duração do período de estiagem apresenta-se muito irregular, podendo em alguns meses ocorrer longos períodos de seca, sem ocorrência de nenhuma precipitação, o que são comumente chamados de “veranicos”, ocorrendo principalmente durante o período chuvoso.

A precipitação é uma variável que apresenta uma grande variabilidade temporal, principalmente na escala de tempo interanual. A Figura 1 ilustra a distribuição dos totais mensais no município de Viçosa, no período de 1968-2010. Observa-se que a menor ocorrência de chuvas no município foi registrada em junho e julho, com apenas 16,5 e 15,8 mm, respectivamente, ao passo que o maior valor foi registrado em dezembro com total de 253,5 mm, ressaltando uma alta variabilidade que pode ser observada no período seco e chuvoso. Devemos destacar a precipitação anual do período analisado considerando a média foi de 1265,8 mm.

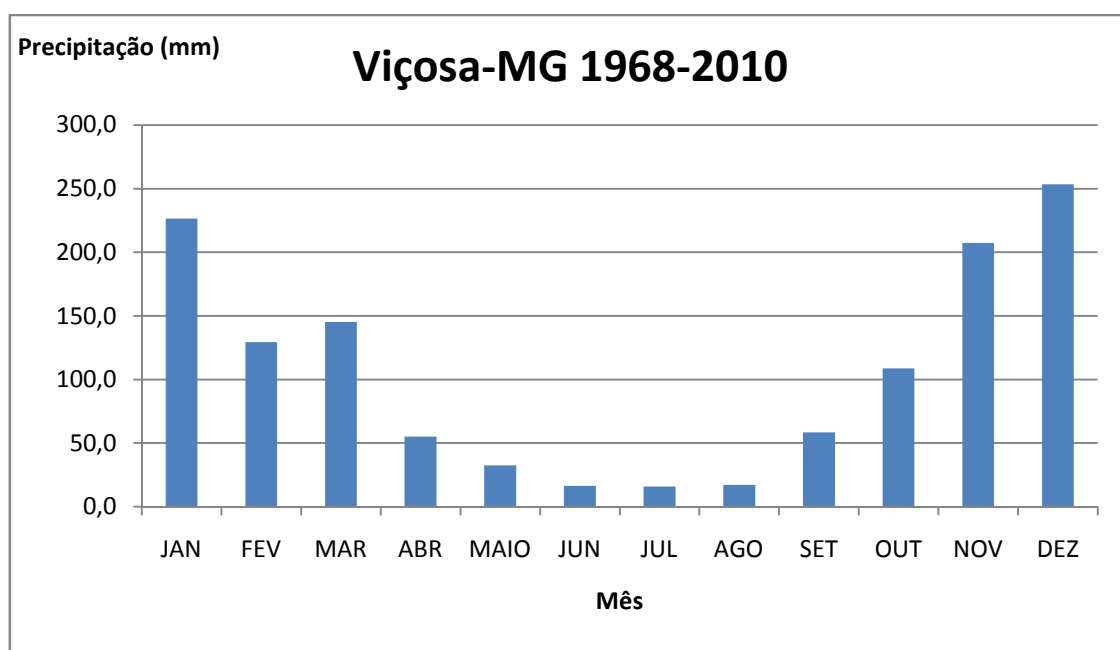


Figura 1 – Média do valor de precipitação (P) para Viçosa, MG, no período 1968-2010.

De acordo com a Figura 2, verifica-se que o mês mais quente do ano é fevereiro, com temperatura máxima de 29,2°C em Viçosa, seguido dos meses de dezembro e janeiro, os quais apresentam temperaturas máximas de 27,6°C e 28,5°C. Esses meses pertencem à estação do verão, exceto outubro, que se encontra na primavera. Os meses mais frios são junho e julho, os quais se destacam com temperaturas médias de 11,2°C e 10,7°C, isso devido ao inverno, quando ocorre o predomínio da Alta Subtropical do Atlântico que encontra-se sobre o Continente Sul Americano, que impede a formação de nuvens pelo fato de o ar estar frio e seco.

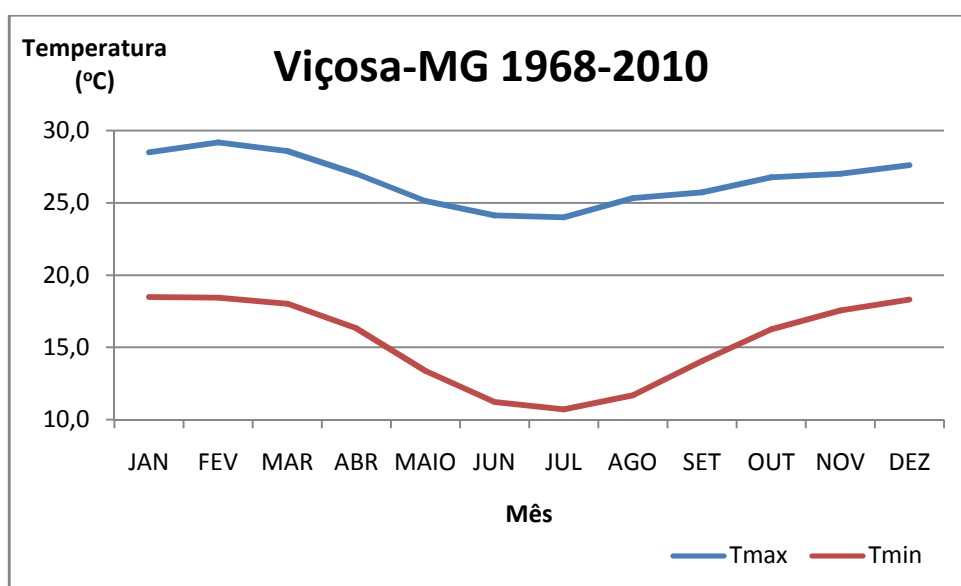


Figura 2 – Média dos valores de temperatura máxima e mínima para Viçosa, MG, no período 1968-2010

2.1.2. Dados de solos

Para a estimativa dos valores de ponto de murcha, capacidade de campo e saturação utilizamos a metodologia de Tomasella et al. (2000), a qual possui as funções de pedotransferência para a estimativa das curvas de retenção de água no solo, sendo desenvolvida exclusivamente para solos brasileiros.

Os resultados das análises físicas e químicas e a classe textural do solo dos experimentos realizados em Viçosa, MG, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais características químicas, físicas e classe textural do solo onde os ensaios foram conduzidos, em Viçosa, MG

Características químicas		
pH em H ₂ O		5,41
H + AL	Cmol(+)/dm ³	6,6
Al ²⁺	Cmol(+)/dm ³	0,00
Ca ²⁺	Cmol(+)/dm ³	3,41
Mg ²⁺	Cmol(+)/dm ³	0,44
K	mg/dm ³	80
P	mg/dm ³	17
Mat.Org	dag/kg	2,94
Sat. Al.	%	
Características físicas		
Areia grossa	%	18
Areia fina	%	11
Silte	%	15
Argila	%	56
Classe textural		Argiloso

* Análises químicas e físicas realizadas no Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Viçosa, MG.

2.1.3. Estimativa da duração do período de molhamento foliar

A duração do período de molhamento foliar (PMF) é uma variável muito importante para o desenvolvimento de doenças, pois, a maioria dos patógenos requer a presença de água líquida sobre as plantas, para a germinação dos esporos e consequente infecção do tecido, sendo relevante possuir o entendimento das condições ideais para o desenvolvimento da doença em uma cultura (VALE et al., 2004; SENTELHAS et al., 2004 e 2006).

Considerando a importância em se conhecer quais são as condições favoráveis do desenvolvimento da ferrugem, nesse trabalho consideramos que a temperatura e a umidade relativa do ar têm influência direta na favorabilidade de ocorrência da ferrugem asiática da soja, sendo utilizados para a estimativa do PMF. O procedimento será descrito a seguir.

A partir dos dados diários de temperaturas máxima e mínima do ar (INMET) das 42 estações convencionais, foi utilizado o algoritmo proposto por Parton e Logan (1981), para a transformação da mesma em dados horários, assumindo que a temperatura mínima seria como próxima da temperatura do Ponto de Orvalho. Posteriormente, foi estimada a umidade relativa do ar horária e depois foram gerados os dados do período de molhamento foliar – considerando a umidade relativa do ar maior ou igual a 90% e maior ou igual a 95% –, utilizando o método empírico proposto por Sentelhas e Gillespie (2007), o qual considera que o início da condensação na superfície das folhas ocorre, quando a umidade relativa do ar é maior ou igual a 90%. O procedimento descrito acima foi realizado para as 42 estações convencionais do INMET, conseguindo-se, dessa forma, estimar valores diários de molhamento foliar.

2.2. Dados experimentais

2.2.1. Caracterização do experimento conduzido em 2006 e 2010

Foram utilizadas as cultivares de soja BRS 6101 (semiprecoce), BRS Valiosa (médio a semitardio) e MGBR-46 Conquista (semitardio), sendo os dados experimentais das terceira cultivar, utilizados de Schmidt (2009). Os experimentos foram conduzidos no Viveiro do Café, área experimental que pertence ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil (Latitude 20°44'48.5''S, Longitude 42°50'58.4''W, altitude 670 m), no município de Viçosa, durante as épocas de cultivo 2006 e 2010 em um local de topografia plana. A escolha das cultivares citadas justifica-se pelo fato de ambas serem de grupos de maturação diferentes, o que proporciona o entendimento do comportamento das mesmas em relação aos efeitos impostos pela ferrugem da soja, considerando a integração com o CSM-CROPGRO-Soybean.

As sementeiras foram realizadas nos dias 03/08/2006 (MGBR-46 Conquista) e 07/01/2010 (BRS 6101 e BRS Valiosa), em fileiras espaçadas de 0,5 m. Os sulcos de sementeira foram adubados com 60 kg de K_2O ha^{-1} e 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} , na forma de cloreto de potássio (KCl) e superfosfato simples (SS), respectivamente, correspondendo a 400 kg ha^{-1} da fórmula 0-30-15 (NPK). As simulações tiveram início 60 dias antes do início da primeira data estabelecida para a sementeira.

Nesse experimento, o conjunto de informações fenológicas necessárias para a calibração dos coeficientes genéticos foi verificado a partir dos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, tais como floração, maturação fisiológica, rendimento, peso de 1.000 grãos e índice de área foliar para a calibração dos coeficientes genéticos.

As simulações foram processadas considerando-se que as condições de água (precipitação) durante o período simulado fossem fornecidas pelos arquivos de entrada do modelo. Na realização das simulações, o mesmo assume que água é limitada pelo clima, ou seja, acompanham a variabilidade dos elementos climáticos ao longo da série temporal, tais como radiação solar, temperatura, etc., de modo que o desenvolvimento da planta fica condicionado às variações dos mesmos.

2.2.2. Calibração dos coeficientes genéticos utilizando a metodologia GLUE

Os procedimentos utilizados para a calibração e teste dos coeficientes genéticos consistiram em: 1) selecionar inicialmente os coeficientes genéticos para um determinado genótipo a partir de outros que estejam no mesmo grupo de maturação ou que apresentem crescimento em área de adaptação similar; 2) executar o modelo para o local ou tratamento; e 3) comparar os valores estimados e observados de cada tratamento e verificar seu ajuste. Se o ajuste não for adequado, deve-se ajustar, inicialmente, a data prevista de florescimento, em seguida, a data prevista de maturação e, finalmente, o ajuste dos componentes do rendimento (sementes por vagem, vagens por m², flores por m², massa de vagens e sementes), conforme recomendação de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003). Isso pode ser feito aumentando ou diminuindo o valor de determinado coeficiente por processo de tentativa até que se obtenham resultados de boa qualidade.

Para estimativa dos coeficientes genéticos utilizamos a metodologia GLUE (do inglês, *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), presente no DSSAT versão 4.5, segundo He et al. (2009). O Glue é uma ferramenta Bayesiana que usa o método de Monte Carlo e uma função de probabilidade normal (Gaussiana) para encontrar o melhor conjunto de coeficientes, baseando-se nos dados observados em campo e nas saídas do modelo, associados com os dados de clima e solo do respectivo experimento.

O programa inicia as simulações a partir dos parâmetros referentes à fenologia, seguidos pelos parâmetros de crescimento da cultura. Essa ordem é estabelecida pela

dependência dos parâmetros de crescimento em relação aos parâmetros fenológicos (JONES et al., 1987; HOOGENBOOM et al., 1992). As datas de emergência, de florescimento e de maturação fisiológica, dados de análise de crescimento e rendimento, foram utilizadas dos dados experimentais das cultivares.

O modelo gera aleatoriamente os parâmetros baseando-se em uma distribuição uniforme e compara as estimativas com os dados observados. O conjunto de parâmetros que oferecer a maior probabilidade, ou seja, na redução do erro entre a diferença do estimado e observado, será selecionada como o melhor conjunto de coeficientes. As respectivas cultivares tiveram as seguintes simulações utilizando o GLUE (BRS 6101, BRS Valiosa com 3.000 e MG BR 46 – Conquista 4.000).

2.2.3. Validação do CSM-CROPGRO-Soybean

A validação foi efetuada a partir do trabalho realizado por Vasconcelos (2009). As cultivares utilizadas para a validação foram a Splendor de ciclo médio e a MGBR-46 Conquista de ciclo semitardio. Utilizou-se a cultivar Splendor, visto que, a BRS Valiosa não estava disponível nos experimentos realizados pelo autor, assim como ambas são do mesmo grupo de maturação, foram realizadas as simulações para a cidade de Viçosa e São Gotardo, utilizando a Splendor.

As validações envolveram as cidades de Viçosa e São Gotardo, visto que possuíamos os dados meteorológicos observados do período, ou seja, 2006-2007 e 2007-2008. Desse modo, o modelo foi executado considerando a produtividade de cada localidade para as referidas cultivares.

O autor avaliou linhagens e cultivares de soja, de ciclos precoce, médio e tardio, nos ensaios finais de avaliação do comportamento agrônomo, do Programa de Melhoramento de Soja do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, conduzidos no Estado de Minas Gerais, em dois anos agrícolas, 2006/2007 e 2007/2008. Os experimentos foram conduzidos em quatro locais: Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, nos dois anos agrícolas.

A semeadura no ano de 2006 foi realizada nos dias 1, 2, 12 e 16 de dezembro em Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, respectivamente. A semeadura no ano de 2007 foi realizada nos dias 9 e 29 de novembro, 12 e 16 de dezembro, em Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba (VASCONCELOS, 2009).

Foi realizada adubação de base com 250 kg/ha do formulado 00-20-20 em todos os experimentos conduzidos no ano agrícola de 2006/2007. A mesma dose do mesmo formulado foi empregada no ano de 2007/2008, exceto para Florestal, em que foram aplicados 360 kg/ha do adubo 00-20-20 com adubação de base (VASCONCELOS, 2009).

Em cada experimento de campo, utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições, formando um arranjo fatorial triplo, com dois anos, 4 locais e 14 genótipos (2x4x14) para cultivares de ciclos precoce e médio e 3 locais e 14 genótipos (2x3x14) para as cultivares de ciclos semitardio e tardio. A parcela foi constituída de quatro linhas distanciadas 0,5 m entre si, com 5 m de comprimento. Foi realizado o desbaste das plantas de cada linha, visando deixar 14 plantas por metro linear. A produtividade dos materiais foi determinada a partir da produção da área útil de 4,0 m², corresponde às duas linhas centrais, com 4 m de comprimento, desprezando 0,5 m em cada extremidade da parcela (VASCONCELOS, 2009).

2.3. Avaliação estatística do modelo

O modelo CSM-CROPGRO-Soybean, incluído na versão 4.5 do DSSAT, foi calibrado, testado e validado para as condições experimentais do referido trabalho, conforme recomendação de Hoogenbomm et al. (2003) e Jones et al. (2003).

A avaliação e o teste do modelo foram baseados nas seguintes ferramentas estatísticas: Índice de Concordância (d) de Willmott et al. (1985), Quadrado Médio do Erro (EQM), a Porcentagem de Desvio (PD).

A PD foi calculada considerando-se a diferença entre os valores medidos e observados pelo modelo (para o rendimento e seus componentes), dividindo-se esse valor pelos valores observados e multiplicando-se por 100, para convertê-lo em porcentagem. Porcentagem de desvios negativos indica subestimativa, enquanto que porcentagem de desvios positivos indica superestimativa.

Foi calculado o quadrado médio do erro (EQM), através da produtividade estimada e da observada, para verificar o desempenho do modelo em Viçosa.

$$EQM = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \times 100/M$$

em que EQM é quadrado médio do erro (indica a diferença relativa em % entre os valores simulados e observados); N , número de pares de observações; O , valores observados (produtividade); P , valores estimados (produtividade); M , média dos valores observados.

Foi adotado um critério para os dados simulados em relação aos dados observados, considerando o EQM excelente quando for menor do que 10%, boa entre 10 e 20%, aceitável entre 20 e 30% e pobre quando maior do que 30%, proposto por Jamieson et al. (1991).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração e validação do CSM-CROPGRO-Soybean

A calibração e validação inicialmente foi realizada para a cidade de Viçosa a partir dos dados experimentais obtidos, conforme descrito no item 2.3.1, com as cultivares de ciclos semiprecoce, médio a semitardio e semitardio, possibilitando realizar a simulação do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura da soja, considerando as condições de clima e solo da referida cidade, por meio dos coeficientes genéticos ajustados, os quais foram obtidos em sequência, começando-se com os parâmetros referentes à fenologia, seguidos pelos parâmetros de crescimento da cultura. Essa ordem foi requerida devido à dependência dos parâmetros de crescimento em relação aos parâmetros fenológicos (JONES et al., 1987; HOOGENBOOM et al., 1992).

Os coeficientes genéticos CSDL, PPSEN, EM-FL, FL-SH, FL-SD, SD-PM e FL-LF definem o desenvolvimento da cultura, enquanto os LFMAX, SLAVAR e SIZLF o crescimento vegetativo; os coeficientes XFRT, WTPSD, SFDUR, SDPDV e PODUR estão relacionados com a definição do crescimento reprodutivo (OLIVEIRA, 2007). Na Tabela 2 encontram-se os coeficientes genéticos das três cultivares utilizadas no trabalho para as condições de solo e clima de Viçosa, Estado de Minas Gerais, sendo utilizados para simular o crescimento e o desenvolvimento da soja, bem como estimar a produtividade da cultura nas datas de semeadura para determinado local.

Tabela 2 – Coeficientes genéticos ajustados no CSM-CROPGRO-Soybean, calibrados para as cultivares plantadas em Viçosa, MG

Coeficientes genéticos	Unidade	Cultivar		
		BRS 6101	BRS Valiosa	MGBR-46 Conquista
CSDL	Horas	12.17	12.06	12.06
PPSEN	1/hora	0.135	0.376	0.331
EM-FL	Dias Fototermais	26.60	27.12	22.66
FL-SH	Dias Fototermais	10.00	10.00	10.00
FL-SD	Dias Fototermais	13.15	19.11	16.26
SD-PM	Dias Fototermais	33.81	24.28	27.46
FL-LF	Dias Fototermais	25.00	18.00	18.00
LFMAX	Taxa	1.048	1.144	1.004
SLVAR	cm ²	330.1	302.1	375.8
SIZLF	cm ²	142.7	139.2	143.3
XFRT	Proporção	1.000	1.000	1.000
WTPSD	Grama	0.182	0.188	0.173
SFDUR	Dias Fototermais	20.26	17.18	17.72
SDPDV	Dias Fototermais	1.952	2.153	2.347
PODUR	Dias Fototermais	10.00	12.00	10.00

Em que CSDL, também chamada de CSDVAR, duração crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado (horas); PPSSEN, inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo (1/hora); EM-FL, período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1); FL-SH, período entre o aparecimento da primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototermais); FL-SD, período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação da semente (R5) (dias fototermais); SD-PM, período entre o início da formação da semente e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototermais); FL-LF, período entre o aparecimento da primeira flor (R1) e final da expansão foliar; LFMAX, taxa máxima de fotossíntese da folha a uma taxa ótima de temperatura (30°C); Slavar, área foliar específica sob condições padrão de crescimento; SIZLF, tamanho máximo da folha completamente expandida (cm²); XFRT, máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais a vagem; WTPSD, peso máximo por semente (g); SFDUR, duração do período de enchimento das sementes nas vagens, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); SDPDV, média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); PODUR, tempo necessário para o cultivar alcançar condições ideais de vagens (dias fototermais).

Para a expansão da simulação nas diferentes mesorregiões de Minas Gerais, foram utilizados os coeficientes genéticos de Viçosa, visto que, não foram encontradas na literatura, informações que complementassem a calibração para cada localidade em todas as regiões do estado, sendo necessária a execução de diversos experimentos.

Na Tabela 3 são apresentadas as estatísticas do modelo CSM-CROPGRO-Soybean em Viçosa. Os dados apresentados mostram que os índices de concordância entre os valores estimados e simulados na Região de Viçosa foram satisfatórios de (0.99). A porcentagem de desvio (PD) para valores negativos indica subestimativa enquanto que a porcentagem de desvios positivos indica superestimativa. Assim, os valores variaram entre -5.76 e 15.7, mostrando que a cultivar MGBR-46 Conquista apresentou maior PD em relação às demais cultivares. O rendimento foi adequadamente simulado pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean para as três cultivares estudadas. A cultivar BRS Valiosa apresentou uma maior aproximação entre o observado e simulado. No que tange à Floração e Maturação Fisiológica, os mesmos foram altamente satisfatórios, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores médios dos rendimentos observados e simulados com o CSM-CROPGRO-Soybean para as cultivares BRS6101, BRS Valiosa e MGBR46 – Conquista semeados nos anos de 2006 e 2009/2010, em Viçosa, MG, Brasil

Cultivar	Variável	Simulado	Observado	PD (%)	d
BRS6101	Floração (dias)	41	42		
	Maturação fisiológica (dias)	98	98		
	Produtividade (kg ha ⁻¹)	3293	2986	10.28	0.99
	Peso de 1.000 grãos (gramas)	0.1693	0.162		
BRS Valiosa	Floração (dias)	51	52		
	Maturação fisiológica (dias)	105	108		
	Produtividade (kg ha ⁻¹)	2124	2254	-5.76	0.99
	Peso de 1.000 grãos (gramas)	0.082	0.148		
MGBR-46 Conquista	Floração (dias)	51	51		
	Maturação fisiológica (dias)	142	142		
	Produtividade (kg ha ⁻¹)	3272	2828	15.7	0.99
	Peso de 1.000 grãos (gramas)	0.2767	0.28		

O número de dias observados desde a emergência até o florescimento para as três cultivares e os valores simulados foram similares, como se observa na Tabela 3.

Podemos verificar na Tabela 3 que o ciclo médio da cultura para a variedade precoce foi de 98 dias para atingir a maturação. As demais cultivares apresentaram, respectivamente, 108 dias (médio a semitardio) e 142 dias (semitardio). A estimativa da data de ocorrência de estádios fenológicos se torna de grande importância para o planejamento das atividades agrícolas.

Em relação à validação dos dados, os índices de concordância foram elevados (0.99) para as cultivares, a estimativa foi considerada excelente e boa, com EQM variando entre 0.21 até 19 para a Splendor e MGBR-46 Conquista, respectivamente. Na Tabela 04 observamos que a Splendor mostrou uma subestimativa dos valores, enquanto que a MGBR-46 Conquista teve uma superestimativa.

Tabela 4 – Valores médios dos rendimentos observados e simulados com o CSM-CROPGRO-Soybean para as cultivares Splendor e MGBR46 – Conquista semeados nos anos de 2006/2007 e 2007/2008, em Viçosa e São Gotardo, MG, Brasil

Cultivar	Variável	Simulado	Observado	PD (%)	EQM (%)	d
Viçosa						
Splendor	Produtividade (kg ha ⁻¹)	1418	1772	-25.6	19	0.99
MGBR-46 Conquista	Produtividade (kg ha ⁻¹)	2266	2259	0.3	0.21	0.99
São Gotardo						
Splendor	Produtividade (kg ha ⁻¹)	4569	4898	-6.7	6.9	0.99
MGBR-46 Conquista	Produtividade (kg ha ⁻¹)	4835	4262	13.4	8.9	0.99

Fonte: Vasconcelos (2009).

3.2. Simulação do rendimento da cultura da soja em Viçosa, MG, considerando os efeitos da ferrugem asiática da soja

Observamos, através da Figura 3, que a melhor data de semeadura ocorreu nos dias 24 de setembro e 1º de outubro, com produtividade de 3.819 kg ha⁻¹ e 3.855 kg ha⁻¹. A menor produtividade média ocorreu na semeadura de 30 de janeiro para cultivar BRS 6101, isso considerando sem doença. Quando analisamos a variabilidade da produtividade com umidade relativa maior ou igual a 90% e 95% observamos que nas respectivas datas de semeadura temos uma queda na produtividade para a cultivar BRS 6101 com perda de 3.627 kg ha⁻¹ e 3.656 kg ha⁻¹, respectivamente, em relação à mesma data de semeadura, com umidade relativa acima de 90%. Entretanto, com umidade relativa do ar acima de 95% não ocorrem perdas significativas, conforme verificamos na Figura 3 (a, b e c). A variação da produtividade para as cultivares BRS 6101, BRS Valiosa e MGBR-46 Conquista foram, respectivamente de 2.971 kg ha⁻¹, 2.303 kg ha⁻¹, 2.659 kg ha⁻¹ como mostram as Figuras 3, 4 e 5 (a, b e c), considerando os efeitos da ferrugem.

Observamos também que ao longo das datas de semeadura os meses de dezembro e janeiro são considerados os mais chuvosos, apresentando maior altura pluviométrica, associado com maior umidade, o que, conseqüentemente, proporciona maior duração do período de molhamento foliar. Isso justifica a grande variabilidade da produtividade simulada a partir das diferentes datas de semeadura, comprovando a sensibilidade do modelo associado às condições ambientais, em atenção especial às condições hídricas dos solos.

Em relação a cultivar BRS Valiosa (ciclo médio a semitardio) observamos que na data de semeadura no dia 24 de setembro e 1º de outubro a produtividade alcançada foi de 2.119 kg ha⁻¹ e 2.221 kg ha⁻¹, sem a ocorrência de doença, no decorrer das demais datas a produtividade tem uma tendência de aumento, encontrando maiores riscos nos meses de dezembro e janeiro, semelhante a cultivar MGBR-46 Conquista, porém a segunda obteve uma maior produtividade. Nesse sentido, o controle da ferrugem asiática na cultivar de ciclo médio acarretaria um maior número na aplicação de fungicidas, proporcionando o aumento no custo de produção, verificado a partir das datas de semeadura (Figura 4).

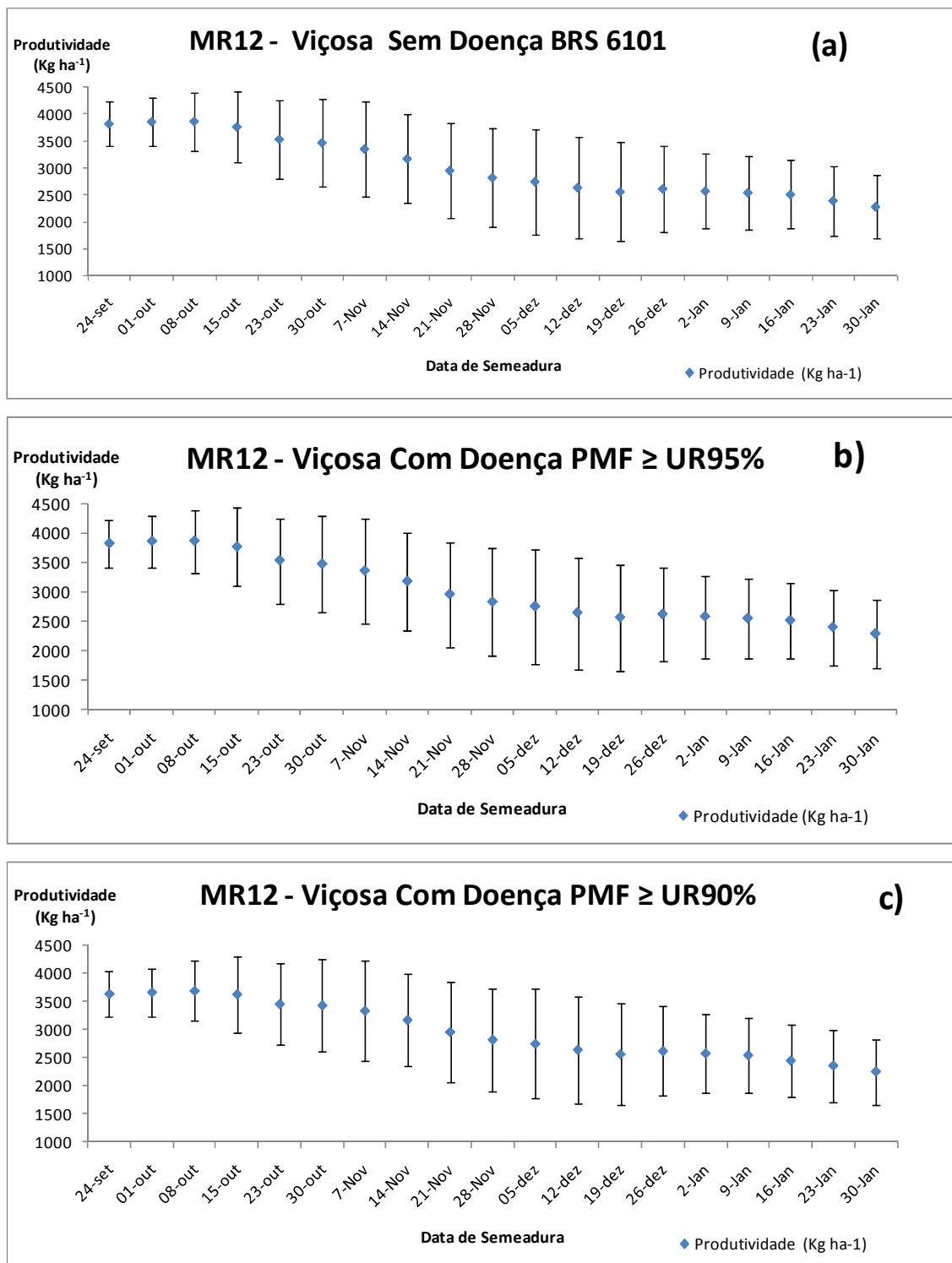


Figura 3 – Produtividade (kg ha⁻¹) e desvios padrões simulados de 1968-2009 (MR12 Viçosa, MG) pelo CSM-CROPGRO-Soybean, integrado ao modelo da ferrugem asiática da soja, considerando o efeito no rendimento sem doença (a), com doença com período de molhamento foliar (PMF) maior ou igual a UR95% (b) e com doença (c).

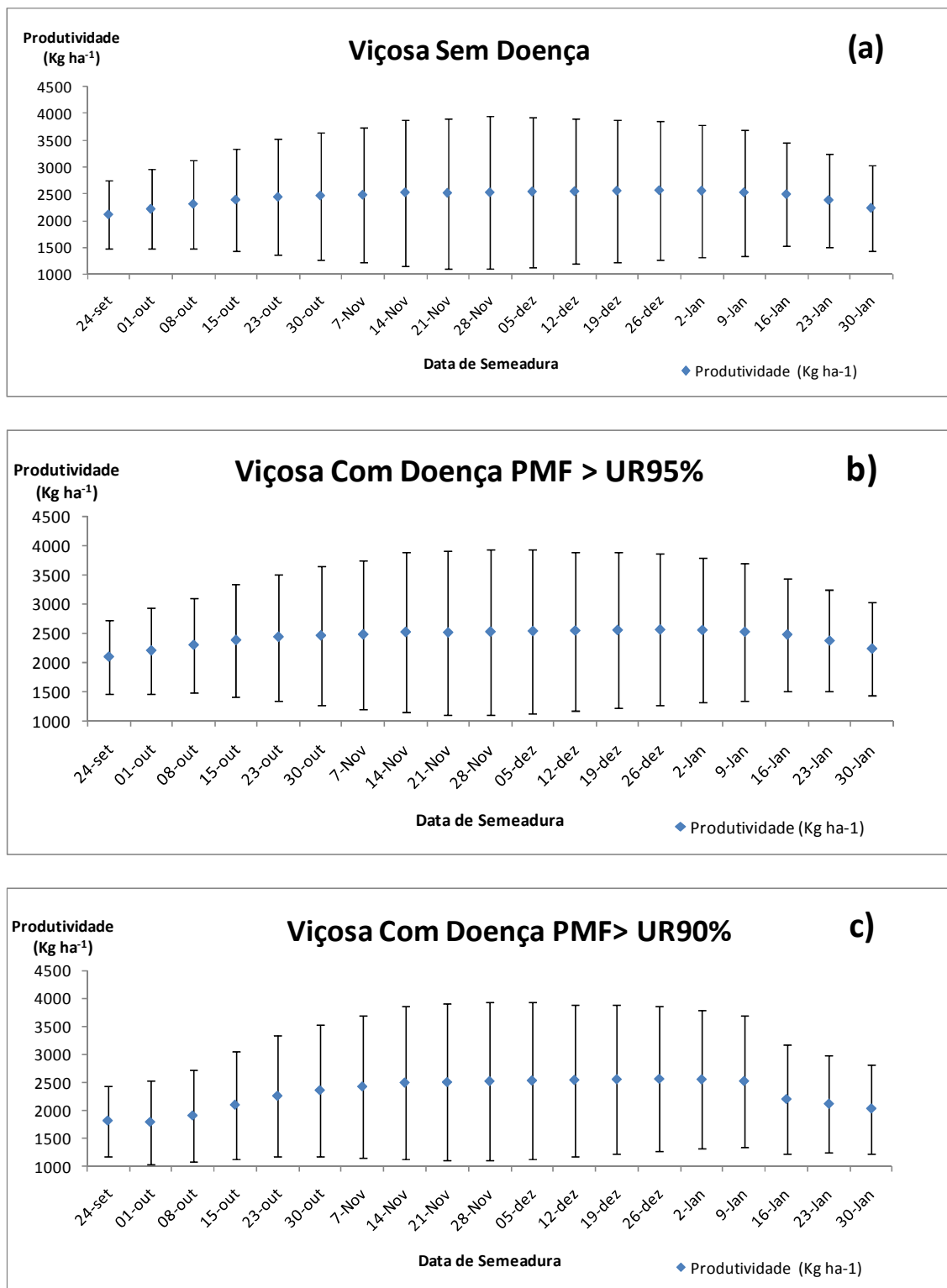


Figura 4 – Produtividade (kg ha⁻¹) e desvios padrões simulados de 1968-2009 (MR12 Viçosa, MG) pelo CSM-CROPGRO-Soybean, integrado ao modelo da ferrugem asiática da soja, considerando o efeito no rendimento sem doença (a), com doença com período de molhamento foliar (PMF) maior ou igual a UR95% (b) e com doença PMF maior ou igual a UR90% (c) para a cultivar BRS Valiosa.

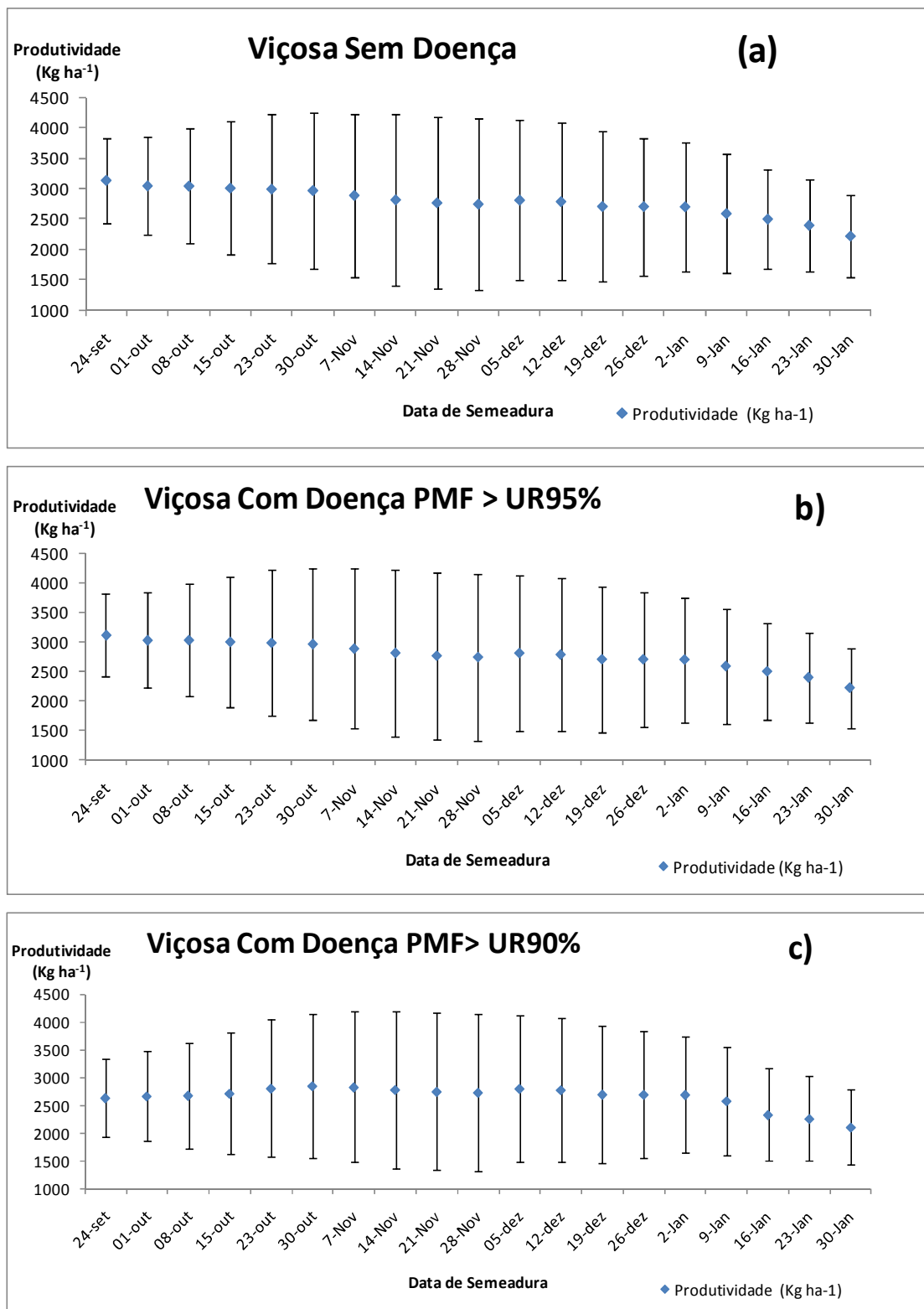


Figura 5 – Produtividade (kg ha⁻¹) e desvios padrões simulados de 1968-2009 (MR12 Viçosa, MG) pelo CSM-CROPGRO-Soybean, integrado ao modelo da ferrugem asiática da soja, considerando o efeito no rendimento sem doença (a), com doença com período de molhamento foliar (PMF) maior ou igual a UR95% (b) e com doença PMF maior ou igual a UR90% (c) para a cultivar MGBR-46 Conquista.

Quando analisamos a cultivar MGBR-46 Conquista verificamos outra configuração em torno das datas de semeadura, conforme mostra a Figura 3b. As melhores datas estão nos dias 24 de setembro e 30 de janeiro, com menos risco de perda devido ao impacto da ferrugem asiática da soja. As datas de semeadura nos meses de novembro e dezembro demonstram grande risco da ocorrência em obter uma menor produtividade associada com maior efeito no rendimento da cultura, visto que as condições são altamente favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem (Figura 5).

O menor valor obtido de desvio-padrão da produtividade em Viçosa foi para a cultivar BRS 6101, sendo em torno de 430 kg ha^{-1} para a semeadura em 24 de setembro, sem doença, enquanto a maior, 1422 kg ha^{-1} , ocorreu na data de semeadura com PMF maior ou igual a UR90% (c) para a cultivar BRS 6101 em 28 de novembro para a cultivar BRS Valiosa. Para a cultivar Conquista, os valores de desvios-padrões variaram em torno de 714 kg ha^{-1} para a data de semeadura em 30 de janeiro até 1423 kg ha^{-1} para 19 de novembro. Os desvios-padrões indicam a dispersão da produtividade em relação à média. Assim, podemos observar que as melhores produtividades foram obtidas a partir da data de semeadura no final de setembro, início de outubro e final de janeiro, com menor incidência de doença considerando os 41 anos simulados para o município de Viçosa, conforme podemos observar nas Figuras 3, 4 e 5 (a, b e c).

4. CONCLUSÕES

O modelo apresentou alta sensibilidade à variação dos coeficientes genéticos por meio das diferentes cultivares analisadas BRS 6101, BRS Valiosa e MGBR46 – Conquista, bem como do desenvolvimento fenológico e da produtividade de grãos, a partir das condições de solo e clima de Viçosa, MG, considerando os efeitos impostos pela ferrugem asiática no rendimento da cultura da soja, a partir das diferentes datas de semeadura.

A metodologia GLUE estimou satisfatoriamente os coeficientes genéticos para as cultivares, sendo as mesmas de diferentes grupos de maturação, mostrando ser uma importante ferramenta a ser utilizada no entendimento e análise da produtividade a partir de novas cultivares.

A validação dos dados do CSM-CROPGRO-Soybean, apresentou-se satisfatório.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DOS EFEITOS DA FERRUGEM ASIÁTICA NO RENDIMENTO DA CULTURA DA SOJA UTILIZANDO O MODELO CROPGRO

1. INTRODUÇÃO

A interação entre as plantas e o ambiente envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos. A fim de se obter melhor conhecimento das respostas da cultura ao ambiente, modelos de simulação são utilizados como ferramenta de grande potencial (SOLER, 2004). Os mesmos interagem como submodelos dos distintos processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, para a previsão de crescimento, desenvolvimento e produção das culturas, gerando um grande volume de dados.

A soja é uma cultura de grande interesse econômico ao agronegócio brasileiro, por gerar recursos financeiros à cadeia produtiva, fomentar empregos, propiciar um dinâmico fluxo de bens e serviços, além de demandar suporte técnico-científico para aumentar a precisão na agricultura. Cada cultura responde de forma diferenciada às condições ambientais de acordo com o seu potencial genético. Durante o ciclo, a cultura é submetida a condições meteorológicas que podem ser favoráveis ou adversas, interferindo em processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento, refletindo no seu rendimento final. Um desses fatores é a oferta pluvial (MARTORANO, 2007).

Booges e Ritchie (1988) destacam as vantagens para uma análise econômica em relação aos dados provenientes de experimentação em campo. Entre essas vantagens destacam-se: um grande número de diferentes estratégias pode ser avaliado rapidamente e com baixo custo; cada estratégia pode ser avaliada em um amplo intervalo de condições incertas, como, por exemplo, clima; e, dependendo do modelo de crescimento utilizado, pode-se avaliar complexas estratégias de manejo interagindo com diversas decisões como irrigação, fertilização, datas de semeadura, dentre outras.

Dallacort et al. (2006) sugerem que, para fins de estimativa da produtividade de cultivos, os modelos baseados em princípios agrometeorológicos mais importantes são aqueles que simulam as fases de desenvolvimento e de maturação das culturas, a disponibilidade de umidade no solo e os efeitos do estresse hídrico no rendimento da cultura. Os modelos são dinâmicos e funcionais, pois descrevem mudanças diárias nas variáveis da cultura, considerando os principais processos morfofisiológicos que nela ocorrem.

O entendimento dos componentes epidemiológicos tem como finalidade determinar os principais fatores que governam as epidemias e, assim, poder prever o curso do progresso da doença. Assim, as epidemias caracterizam-se por um processo integrado entre a planta, o ambiente e o patógeno. Portanto, um modelo de doenças precisa considerar a resposta da planta ao ambiente. A doença é capaz de progredir somente quando as condições providas pelo hospedeiro são favoráveis e o patógeno presente é virulento. Por exemplo, ao estimar o dano no rendimento devido a uma doença que causa lesões no limbo foliar requer a quantificação da redução na interceptação da radiação solar para o processo de fotossíntese, a redução na eficiência do uso da radiação solar, a desfolha, etc. (PEDRINI, 2010).

A análise integrada dessas variáveis demanda apoio computacional, em sistemas capazes de suportar decisões. Neles é possível armazenar, consistir e tratar dados, bem como, a partir de modelos bem calibrados, simular padrões de respostas evidenciados em experimento de campo (MARTORANO, 2007).

Dentre as doenças que ocorrem na cultura da soja, a ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow, é considerada a doença de maior potencial destrutivo. A primeira descrição da ferrugem asiática da soja, em lavouras no Continente Americano, foi relatada no Paraguai, na safra 2001 (MOREL, 2001) e posteriormente no Brasil, safra 2001, na região oeste do Estado do Paraná (YORINORI et al., 2002). Rapidamente espalhou-se pelas principais regiões produtoras em função da

eficiente disseminação pelo vento. Reduções de produtividade próximas a 70% podem ser observadas quando comparadas áreas tratadas e não tratadas com fungicidas. A perda esperada, sob condições ótimas para o desenvolvimento do fungo, é acima de 80% (EMBRAPA, 2005).

As principais variáveis climáticas determinantes da ocorrência da ferrugem asiática da soja são: a duração do molhamento foliar compreendido como sendo a água na fase líquida sobre a superfície dos folíolos; a temperatura média durante o molhamento; e a umidade relativa do ar. Essas variáveis, por sua vez, exercem influências fundamentais sobre o progresso da doença, por afetar diretamente o patógeno (REIS et al., 2004). O conhecimento epidemiológico sob condições controladas e naturais, que visa a elucidar os fatores que afetam os processos do ciclo da doença, tem sido fundamental para dar base a estudos de modelagem da epidemia (DEL PONTE, 2006a).

As perdas e o impacto da ferrugem asiática da soja, causado pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, desde que foi identificado nas principais regiões produtoras de soja nos continentes americanos, principalmente no Brasil, é colocada no patamar de doença mais importante da cultura. A afirmação vale tanto para os locais onde epidemias ocorrem regularmente, como em regiões onde sua ocorrência é limitada ou não se tem registro. Na primeira situação, o impacto é devido ao incremento do custo de produção com aplicações sequenciais de fungicidas – única forma de controle eficiente e que nem sempre produz resultados satisfatórios, de onde resultam as perdas quando há falhas no manejo. Na segunda situação, o impacto está na grande mobilização e atenção com o monitoramento intensivo e investimentos em treinamento e preparação para um possível confronto (DEL PONTE, 2007).

O conhecimento dos modelos complexos, aliado às informações meteorológicas e projeções climáticas, tem oferecido a oportunidade de aplicar técnicas de modelagem e simulação a fim de obter respostas para as perguntas dos tomadores de decisões, como a amplitude de rendimento de uma determinada cultura e a severidade do ataque de uma doença (LIMA, 2009).

Desse modo, diante do exposto acima, podemos notar uma interação entre os vários elementos com atuação direta na cultura da soja, que, partindo dos fatores que contribuem para o desenvolvimento dessa doença que afeta a produtividade da cultura no Estado de Minas Gerais, possibilitando um melhor entendimento de sua ocorrência, em função dos estudos decorrentes desse trabalho, cujo objetivo é a avaliação dos

efeitos da ferrugem da soja utilizando o CSM-CROPGRO: Soybean (JONES et al., 2003), considerando as simulações com e sem os efeitos da ferrugem no rendimento da cultura da soja no Estado de Minas Gerais.

2. METODOLOGIA

A fim de se atingir os objetivos no presente trabalho, foram aplicadas as simulações de rendimento para a cultura da soja, utilizando a versão 4.5 do DSSAT.

2.1. Área de estudo

O Estado de Minas Gerais está situado na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 14°13'57'' e 22°55'47''S e os meridianos de 39°51'27'' e 51°02'56''W, e suas respectivas mesorregiões, como mostram as Figuras 1 e 2.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estruturou a divisão do Estado de Minas Gerais em 12 mesorregiões geográficas (Figura 2): Sul e Sudoeste de Minas (MR01), Noroeste de Minas (MR02), Norte de Minas (M03), Jequitinhonha (MR04), Vale do Mucuri (MR05), Vale do Rio Doce (MR06), Oeste Mineiro (MR07), Campos das Vertentes (M08), Central Mineira (MR09), Metropolitana de Belo Horizonte (MR10), Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (MR11) e Zona da Mata Mineira (MR12) – o IBGE define mesorregião como uma subdivisão adotada no Brasil que congrega diversos municípios de uma área geográfica com similaridades econômicas e sociais. Frequentemente é utilizada para fins estatísticos e não constitui, portanto, uma entidade política ou administrativa.

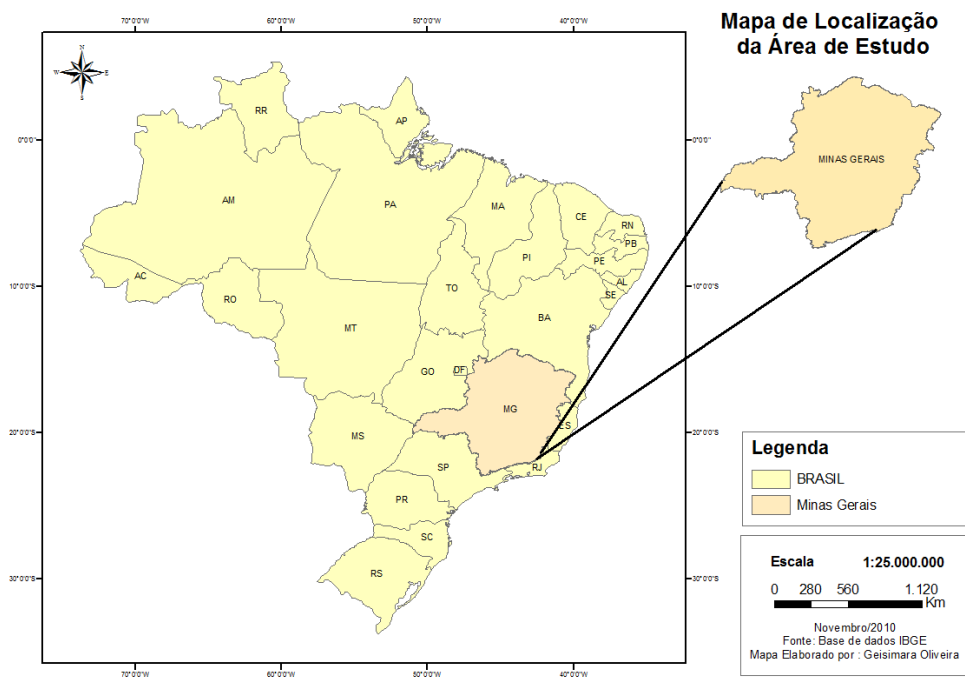


Figura 1 – Localização da área de estudo.

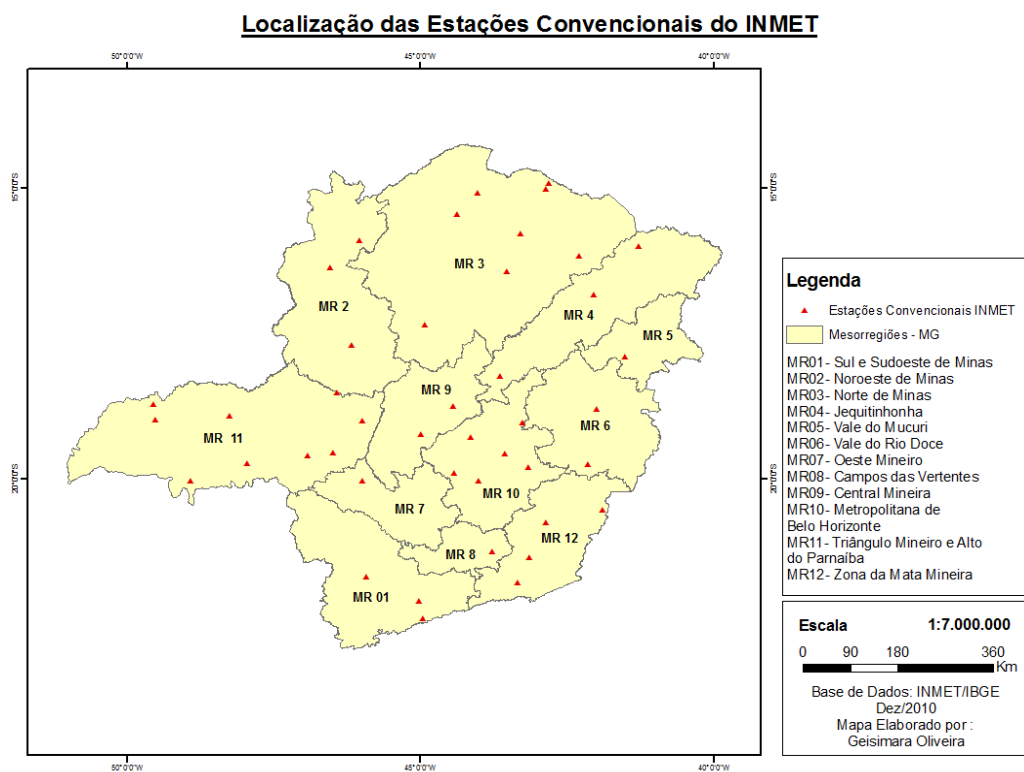


Figura 2 – Localização das estações convencionais do INMET nas mesorregiões do Estado de Minas Gerais.

2.2. Base de dados

2.2.1. Estações meteorológicas convencionais do INMET

Os dados meteorológicos utilizados pelo modelo, considerados como dados de entrada, compreenderam 42 estações meteorológicas sob responsabilidade do 5.º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com dados diários observados de temperatura média, máxima e mínima do ar (°C), precipitação (mm), e número de horas de insolação (n) para o cálculo da radiação solar ($\text{MJ}\cdot\text{dia}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), cujas informações encontram-se na Tabela 1.

Ressaltamos que as referidas estações, dentre alguns anos, apresentaram falhas ao longo da série temporal utilizada, desse modo, não foram contabilizadas na interpretação dos resultados. A radiação solar quando da não disponibilidade dos dados de insolação, a mesma foi estimada a partir da metodologia proposta por Lima (2005).

Através das análises interpretamos a saída dos modelos por meio de simulações pontuais (cidade), como forma de obtermos maior confiabilidade nos resultados. Em análise minuciosa realizada, todas as variáveis meteorológicas apresentaram ocorrência de falhas, sendo: radiação solar, temperatura máxima e mínima, precipitação, velocidade do vento e umidade relativa do ar, desse modo, os anos com as respectivas falhas não foram considerados nas análises.

2.2.2. Estimativa da duração do período de molhamento foliar

A duração do período de molhamento foliar (PMF) é uma variável muito importante para o desenvolvimento de doenças, pois, a maioria dos patógenos requer a presença de água líquida sobre as plantas, para a germinação dos esporos e consequente infecção do tecido, sendo relevante possuir o entendimento das condições ideais para o desenvolvimento da doença em uma cultura (VALE et al., 2004, SENTELHAS et al., 2004 e 2006).

Tabela 1 – Estações meteorológicas do INMET utilizadas no trabalho

Código	Estação sinótica	Mesorregião	Longitude (°)	Latitude (°)*	Altitude (m)**	Série temporal
83037	Coronel Pacheco	MR12	-43.15	-21.35	435	1967-2004
83338	Espinosa	MR03	-42.51	-14.55	571	1974-2006
83384	Arinos	MR03	-46.05	-15.9	519	1976-2006
83386	Januária	MR03	-44.37	-15.45	473	1961-2006
83388	Monte Azul	MR03	-42.45	-15.05	604	1974-2006
83389	Mocambinho	MR01	-44.02	-15.08	452	1976-2009
83393	Pedra Azul	MR04	-41.28	-16	648	1975-2005
83395	Janaúba	MR03	-43.3	-15.78	516	1977-2004
83428	Unai	MR02	-46.55	-16.37	460	1978-2006
83437	Montes Claros	MR03	-43.52	-16.43	647	1961-2006
83441	Salinas	MR03	-42.3	-16.17	471	1975-2005
83442	Araçuaí	MR04	-42.05	-16.83	289	1961-2004
83481	João Pinheiro	MR02	-46.17	-17.7	760	1961-2006
83483	Pirapora	MR03	-44.92	-17.35	505	1976-2005
83492	Teófilo Otoni	MR05	-41.5153	-17.8928	475	1961-2006
83514	Capinópolis	MR11	-49.55	-18.72	620	1970-2006
83521	Ituiutaba	MR11	-49.52	-18.97	560	1980-2006
83527	Uberlândia	MR11	-48.25	-18.91	869	1997-2009
83531	Patos de Minas	MR11	-46.43	-18.52	940	1961-2004
83536	Curvelo	MR09	-44.4536	-18.7478	670	1961-2006
83538	Diamantina	MR04	-43.65	-18.23	1296	1961-2009
83543	Governador Valadares	MR06	-41.9864	-18.7906	263	1961-2006
83574	Frutal	MR11	-48.93	-20.03	543	1961-2004
83577	Uberaba	MR11	-47.95	-19.73	737	1961-2009
83579	Araxá	MR11	-46.93	-19.6	1023	1961-2009
83581	Florestal	MR10	-44.4168	-19.8853	742	1961-2004
83582	Bambuí	MR07	-46	-20.03	661	2000-2009
83586	Sete Lagoas	MR10	-44.15	-19.28	735	1961-2009
83587	Belo Horizonte	MR10	-43.56	-19.56	852	1961-2009
83589	Conceição do Mato Dentro	MR10	-43.26	-19.02	652	1961-2009
83591	João Monlevade	MR10	-43.16	-19.80	732	1961-2001
83592	Caratinga	MR06	-42.14	-19.74	609	2000-2009
83632	Ibirité	MR10	-44.0111	-20.0314	****	1961-2004
83639	Caparaó	MR12	-41.9	-20.52	843	2000-2009
83642	Viçosa	MR12	-20.75	-42.86	689	1968-2009
83683	Machado	MR01	-45.92	-21.67	873	1961-2009
83689	Barbacena	MR08	-43.77	-21.25	1126	1961-2009
83692	Juiz de Fora	MR12	-43.35	-21.77	939	1961-2009
83736	São Lourenço	MR01	-45.02	-22.1	953	1961-2009
83737	Passa Quatro	MR01	-44.9617	-22.3961	****	1961-2004
***	São Gotardo	MR11	-46	-19	1058	2000-2009
***	Tapira	MR11	-46.4923	-19.5520	1091	1997-2007

* Negativa: Localidade situada no Hemisfério Sul; ** Altitude em metros; *** Estações gerenciadas pelo Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Uberlândia; **** Não informado.

Considerando a importância em se conhecer quais são as condições favoráveis do desenvolvimento da ferrugem, nesse trabalho consideramos que a temperatura e a umidade relativa do ar têm influência direta na favorabilidade de ocorrência da ferrugem asiática da soja, sendo utilizados para a estimativa do PMF. O procedimento será descrito a seguir.

A partir dos dados diários de temperaturas máxima e mínima do ar (INMET) das 42 estações convencionais, foi utilizado o algoritmo proposto por Parton e Logan (1981), para a transformação da mesma em dados horários, assumindo que a temperatura mínima seria como próxima da temperatura do Ponto de Orvalho. Posteriormente, foi estimada a umidade relativa do ar horária e depois foram gerados os dados do período de molhamento foliar – considerando a umidade relativa do ar maior ou igual a 90% e maior ou igual a 95% –, utilizando o método empírico proposto por Sentelhas e Gillespie (2007), o qual considera que o início da condensação na superfície das folhas ocorre, quando a umidade relativa do ar é maior ou igual a 90%. O procedimento descrito acima foi realizado para as 42 estações convencionais do INMET, conseguindo-se, dessa forma, estimar valores diários de molhamento foliar.

2.2.3. Dados de solos

Considerando a grande variabilidade na classificação dos tipos de solos e pela dimensão do Estado de Minas Gerais, utilizamos a base de dados feita a partir do projeto RADAM-BRASIL (BRASIL, 1986). Selecionamos cada tipologia de solo a partir das coordenadas geográficas de cada Estação Meteorológica, sempre buscando determinar o solo mais representativo.

Para a estimativa dos valores de ponto de murcha, capacidade de campo e saturação utilizamos a metodologia de Tomasella et al. (2000), a qual possui as funções de pedotransferência para a estimativa das curvas de retenção de água no solo, sendo desenvolvida exclusivamente para solos brasileiros.

2.2.4. Base cartográfica utilizada na elaboração dos mapas

Para elaboração de toda a base cartográfica para as mesorregiões do Estado de Minas Gerais, utilizou-se o *software* ArcGis versão 9.2. A base de dados utilizada corresponde à base do Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE). Com a finalidade de

visualizarmos a representação espacial da produtividade no estado, foram agrupadas 10 classes de produtividade (kg/ha), ordenadas da seguinte maneira: > 5.000, 4.500, 4.000, 3.500, 3.000, 2.500, 2.000, 1.500, 1.000 e < 500.

A partir das simulações realizadas, considerando as 19 datas de semeadura nas 42 estações meteorológicas Convencionais do INMET, para cada data de semeadura, foram espacializados tais valores pelo método da interpolação, através da krigagem, incluída no aplicativo *Arc Toolbox*, na extensão *Spatial Analyst*. Posteriormente, interpretaram-se os valores de produtividade nas diferentes mesorregiões.

O referido método de interpolação foi utilizado, visto que apresenta a menor variabilidade associada às estimativas obtidas. Ou seja, leva em consideração a continuidade e a distância que existem entre os valores dos pontos amostrados e não-amostrados para os quais se pretendem obter uma estimativa (SANTOS, 2008).

2.3. Dados experimentais

2.3.1. Caracterização do experimento conduzido em 2006 e 2010

Foram utilizadas as cultivares de soja BRS 6101 (semiprecoce), BRS Valiosa (médio a semitardio) e MGBR-46 Conquista (semitardio), sendo os dados experimentais das terceira cultivar, utilizados de Schmidt (2009). Os experimentos foram conduzidos no Viveiro do Café, área experimental que pertence ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil, (Latitude 20°44'48.5''S, Longitude 42°50'58.4''W, altitude 670 m), no município de Viçosa, durante as épocas de cultivo 2006 e 2010 em um local de topografia plana. A escolha das cultivares citadas justifica-se pelo fato de ambas serem de grupos de maturação diferentes, o que proporciona o entendimento do comportamento das mesmas em relação aos efeitos impostos pela ferrugem da soja, considerando o acoplamento com o CSM-CROPGRO-Soybean.

As semeaduras foram realizadas nos dias 03/08/2006 (MGBR-46 Conquista) e 07/01/2010 (BRS 6101 e BRS Valiosa), em fileiras espaçadas de 0,5 m. Os sulcos de semeadura foram adubados com 60 kg de K₂O ha⁻¹ e 120 kg de P₂O₅ ha⁻¹, na forma de cloreto de potássio (KCl) e superfosfato simples (SS), respectivamente, correspondendo a 400 kg ha⁻¹ da fórmula 0-30-15 (NPK). As simulações tiveram início 60 dias antes do início da primeira data estabelecida para a semeadura.

Nesse experimento, o conjunto de informações fenológicas necessárias para a calibração dos coeficientes genéticos foi verificado a partir dos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, tais como floração, maturação fisiológica, rendimento, peso de 1.000 grãos e índice de área foliar para a calibração dos coeficientes genéticos.

As simulações foram processadas considerando-se que as condições de água no solo são provenientes da precipitação durante o período simulado. Assim a água é limitada pelo clima, ou seja, acompanham a variabilidade dos elementos climáticos ao longo da série temporal, tais como radiação solar, temperatura, etc., de modo que o desenvolvimento da planta fica condicionado às variações dos mesmos.

2.3.2. Calibração dos coeficientes genéticos utilizando a metodologia GLUE

Os procedimentos utilizados para a calibração e teste dos coeficientes genéticos consistiram em: 1) selecionar inicialmente os coeficientes genéticos para um determinado genótipo a partir de outros que estejam no mesmo grupo de maturação ou que apresentem crescimento em área de adaptação similar; 2) executar o modelo para o local ou tratamento; e 3) comparar os valores estimados e observados de cada tratamento e verificar seu ajuste. Se o ajuste não for adequado, deve-se ajustar, inicialmente, a data prevista de florescimento, em seguida, a data prevista de maturação e, finalmente, o ajuste dos componentes do rendimento (sementes por vagem, vagens por m², flores por m², massa de vagens e sementes), conforme recomendação de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003). Isso pode ser feito aumentando ou diminuindo o valor de determinado coeficiente por processo de tentativa até que se obtenham resultados de boa qualidade.

Para estimativa dos coeficientes genéticos utilizamos a metodologia GLUE (do inglês, *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), presente no DSSAT versão 4.5, segundo He et al. (2009). O Glue é uma ferramenta Bayesiana que usa o método de Monte Carlo e uma função de probabilidade normal (Gaussiana) para encontrar o melhor conjunto de coeficientes, baseando-se nos dados observados em campo e nas saídas do modelo, associados com os dados de clima e solo do respectivo experimento.

O programa inicia as simulações a partir dos parâmetros referentes à fenologia, seguidos pelos parâmetros de crescimento da cultura. Essa ordem é estabelecida pela dependência dos parâmetros de crescimento em relação aos parâmetros fenológicos

(JONES et al., 1987; HOOGENBOOM et al., 1992). As datas de emergência, de florescimento e de maturação fisiológica, dados de análise de crescimento e rendimento, foram utilizadas dos dados experimentais das cultivares.

O modelo aleatoriamente os parâmetros baseando-se em uma distribuição uniforme e compara as estimativas com os dados observados. O conjunto de parâmetros que oferecer a maior probabilidade, ou seja, na redução do erro entre a diferença do estimado e observado, será selecionada como o melhor conjunto de coeficientes. Foram simulados para as respectivas cultivares as referidas simulações: BRS 6101 e BRS Valiosa com 3.000 e MG BR 46 – Conquista 4.000.

2.3.3. Validação do CSM-CROPGRO-Soybean

A validação foi efetuada a partir do trabalho realizado por Vasconcelos (2009). As cultivares utilizadas para a validação foram a Splendor (BRS Valiosa) de ciclo médio e a MGBR-46 Conquista de ciclo semitardio.

O autor avaliou linhagens e cultivares de soja, de ciclos precoce, médio e tardio, nos ensaios finais de avaliação do comportamento agrônomico, do Programa de Melhoramento de Soja do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, conduzidos no Estado de Minas Gerais, em dois anos agrícolas, 2006/2007 e 2007/2008. Os experimentos foram conduzidos em quatro locais: Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, nos dois anos agrícolas.

A semeadura no ano de 2006 foi realizada nos dias 1, 2, 12 e 16 de dezembro em Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, respectivamente. A semeadura no ano de 2007 foi realizada nos dias 9 e 29 de novembro, 12 e 16 de dezembro, em Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, respectivamente (VASCONCELOS, 2009).

Foi realizada adubação de base com 250 kg/ha do formulado 00-20-20 em todos os experimentos conduzidos no ano agrícola de 2006/2007. A mesma dose do mesmo formulado foi empregada no ano de 2007/2008, exceto para Florestal, em que foram aplicados 360 kg/ha do adubo 00-20-20 com adubação de base (VASCONCELOS, 2009).

Em cada experimento de campo, utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições, formando um arranjo fatorial triplo, com dois anos, 4 locais e 14 genótipos (2x4x14) para cultivares de ciclos precoce e médio e

3 locais e 14 genótipos (2x3x14) para as cultivares de ciclos semitardio e tardio. A parcela foi constituída de quatro linhas distanciadas 0,5m entre si, com 5 m de comprimento. Foi realizado o desbaste das plantas de cada linha, visando deixar 14 plantas por metro linear. A produtividade dos materiais foi determinada a partir da produção da área útil de 4,0 m², corresponde às duas linhas centrais, com 4 m de comprimento, desprezando 0,5 m em cada extremidade da parcela (VASCONCELOS, 2009).

2.4. Avaliação estatística do modelo

O CSM-CROPGRO-Soybean, incluído na versão 4.5 do DSSAT, foi calibrado, testado e validado para as condições experimentais do referido trabalho, conforme recomendação de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

O experimento conduzido durante os anos de 2009/2010 foi utilizado para calibrar e testar o CSM-CROPGRO-Soybean, enquanto que o experimento conduzido durante a safra 2006/2007 foi utilizado para a construção de um novo arquivo X com a entrada dos dados de Vasconcelos (2009), utilizando os mesmos coeficientes genéticos da BRS Valiosa e MGBR-46 Conquista para, posteriormente, realizar a simulação no intuito de observar a variação do simulado e observado, considerando o ano de 2006/2007 no que tange à validação dos dados. Ressaltamos que para a cultivar BRS 6101 não foi realizado a validação devido à falta de informações na literatura que complementassem o objetivo.

A avaliação e o teste do modelo foram baseados nas seguintes ferramentas estatísticas: Índice de Concordância (d) de Willmott et al. (1985), Quadrado Médio do Erro (EQM), a Porcentagem de desvio (PD) e a Eficiência da Modelagem.

A PD foi calculada considerando-se a diferença entre os valores medidos e observados pelo modelo (para o rendimento e seus componentes), dividindo-se esse valor pelos valores observados e multiplicando-se por 100, para convertê-lo em porcentagem. Porcentagem de desvios negativos indica subestimativa, enquanto que porcentagem de desvios positivos indica superestimativa.

Foi calculado o quadrado médio do erro (EQM), através da produtividade estimada e da observada, para verificar o desempenho do modelo em Viçosa.

$$EQM = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \times 100/M$$

em que EQM é quadrado médio do erro, indica a diferença relativa, em % entre os valores simulados e observados; N , número de pares de observações; O , valores observados (produtividade); P , valores estimados (produtividade); e M , média dos valores observados.

Foi adotado um critério para os dados simulados em relação aos dados observados, considerando o EQM excelente quando for menor do que 10%, boa entre 10 e 20%, aceitável entre 20 e 30% e pobre quando maior do que 30%, proposto por Jamieson et al. (1991).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos coeficientes genéticos ajustados na calibração foram realizadas simulações do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura da soja, com o objetivo de testar e avaliar o CSM-CROPGRO-Soybean juntamente com o modelo da ferrugem asiática, considerando as simulações das três cultivares utilizadas ligado e desligado.

Levando-se em conta que realizamos simulações para 42 localidades no Estado de Minas Gerais, serão apresentados a seguir os resultados de Viçosa, visto que a calibração e validação foram realizadas a partir de experimento realizado na referida cidade.

Posteriormente, abordaremos através de uma análise espacial a variabilidade da produtividade (kg/ha) no Estado de Minas Gerais, a partir das diferentes datas de semeadura, com o objetivo de entender os efeitos impostos pela ferrugem nas diferentes mesorregiões.

3.1. Análise espacial do rendimento sem e com os efeitos da ferrugem a partir das datas de semeadura na cultura da soja nas mesorregiões de Minas Gerais

Foram analisadas as datas de semeadura mais representativa para cada mês, sendo: 15 de outubro, 21 de novembro, 26 de dezembro e 23 de janeiro, de acordo com o calendário agrícola de Minas Gerais. As simulações levaram em consideração os

efeitos na produtividade considerando o efeito da ferrugem com duração do período de molhamento foliar com Umidade Relativa do ar maior ou igual a 90% e 95%, as quais foram obtidas através da série histórica de temperaturas máxima e mínima do INMET. Foram utilizadas as médias, desvios padrões e coeficientes de variação para o entendimento das simulações realizadas.

As Figuras 3, 4 e 5 de a até l mostram a grande variabilidade na produtividade a partir das diferentes datas de semeadura nas diferentes Mesorregiões de MG para as três cultivares analisadas, indicando maior produtividade sem o efeito da ferrugem para todo o estado, com exceção do Norte de Minas, que apresenta em torno de 500 kg ha⁻¹. No decorrer das datas, a produtividade apresenta variações significativas nas 12 mesorregiões. Os mapas mostram que, no mês de outubro, a MR01 – Sul e Sudoeste de Minas e MR07 – Oeste Mineiro apresentam maiores produtividades na data de semeadura do dia 23 de outubro em torno de 4.000 kg ha⁻¹.

Em 28 de novembro, a MR12 - Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba apresentam as maiores produtividades em torno de 4.200 kg ha⁻¹. Entretanto, a MR03 – norte de Minas apresenta baixos valores de produtividade, bem como menor favorabilidade para a ocorrência de ferrugem nas respectivas datas. As cultivares BRS Valiosa e MGBR-46 Conquista destacaram-se com maiores produtividades na respectiva mesorregião (Figuras 4 e 5).

Em 26 de dezembro, o Triângulo Mineiro começa a apresentar queda na produtividade, alcançando, no dia 23 de janeiro, as menores produtividades, sendo que na mesma data a MR05 – Vale do Mucuri e a MR06 – Vale do Rio Doce, destacam-se como detentores de maior rendimento. Observamos que a cultivar BRS Valiosa novamente é afetada devido ao efeito da ferrugem com PMF maior ou igual a UR 90%, com a produtividade diminuindo devido ao maior número de horas de molhamento foliar, proporcionando uma outra configuração espacial devido ao impacto da ferrugem, como mostra a Figura 4.

A distribuição da precipitação pluviométrica foi um dos fatores que mais influenciaram no crescimento e desenvolvimento da cultura da soja, com ênfase na produtividade. Ou seja, o modelo penaliza em condições de déficit hídrico, visto que podemos observar nitidamente a MR03 – Norte de Minas. Verificamos também que a precipitação teve influência no desenvolvimento da ferrugem em que anos com maiores alturas pluviométricas, automaticamente, favorecem uma maior duração do PMF,

proporcionando um maior efeito, principalmente na cultivar BRS Valiosa, como mostra a Figura 4.

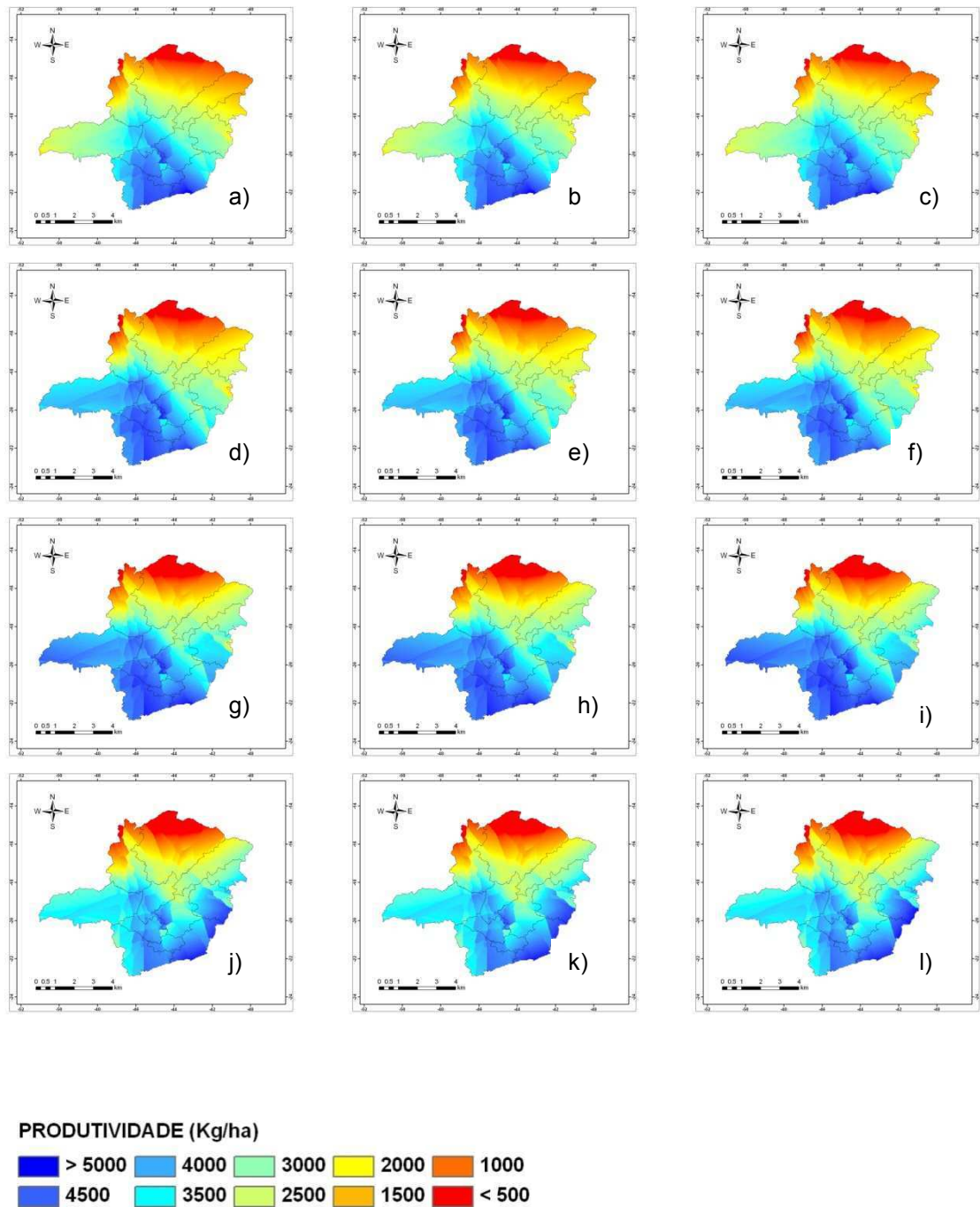


Figura 4 – Variação da produtividade média simulada (kg ha^{-1}) em MG na cultivar BRS 6101, compreendendo as datas de semeadura entre a, b, c (15 de outubro), d, e, f (28 de novembro), g, h, i (26 de dezembro) e j, k, l (23 de janeiro), sendo: sem ferrugem; PMF \geq UR95%; PMF \geq UR90%, respectivamente

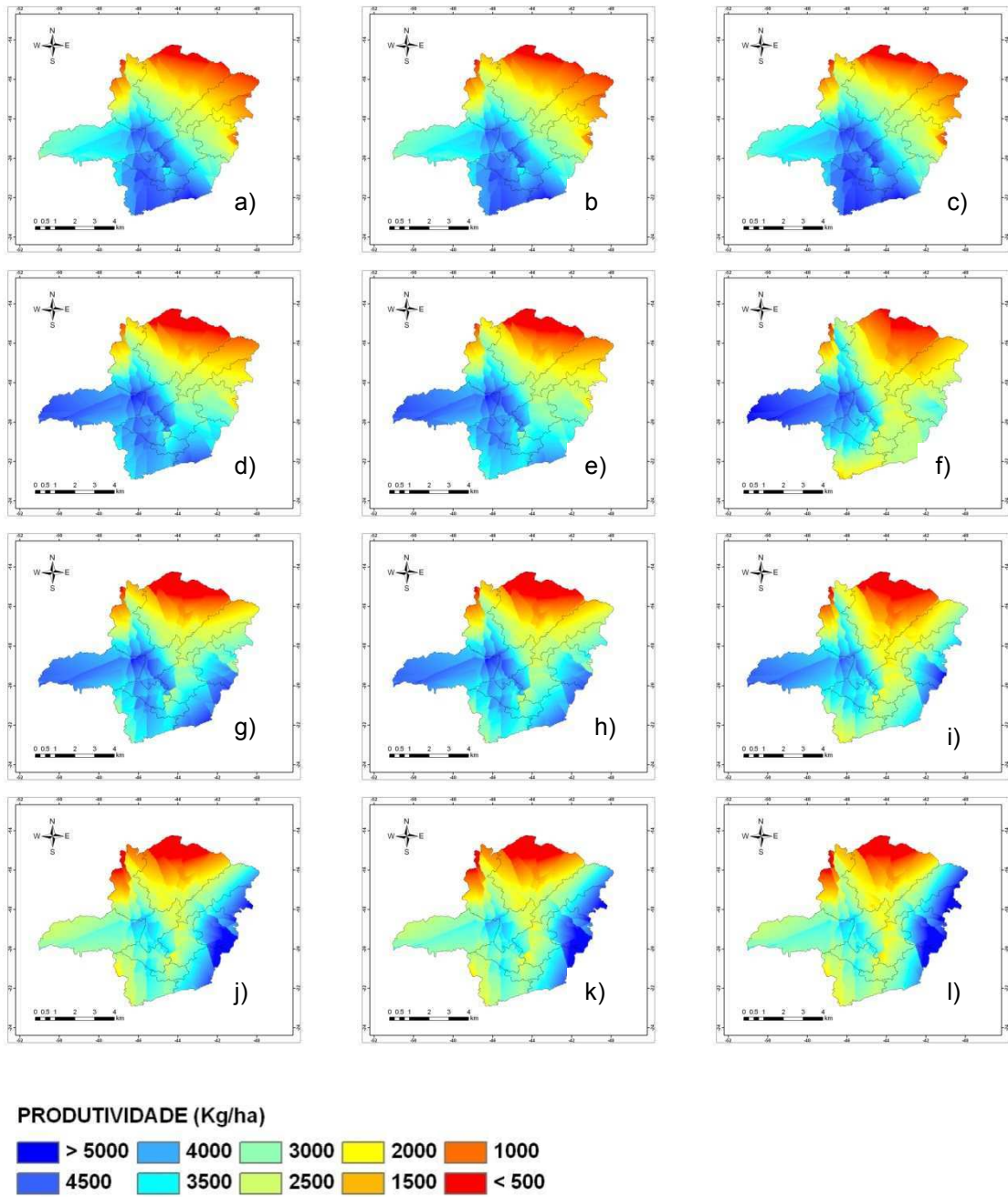


Figura 5 – Variação da produtividade média simulada (kg ha^{-1}) em MG na cultivar BRS Valiosa, compreendendo as datas de semeadura entre a, b, c (15 de outubro), d, e, f (28 de novembro), g, h, i (26 de dezembro) e j, k, l (23 de janeiro), sendo: sem ferrugem; $\text{PMF} \geq \text{UR95\%}$; $\text{PMF} \geq \text{UR90\%}$ respectivamente.

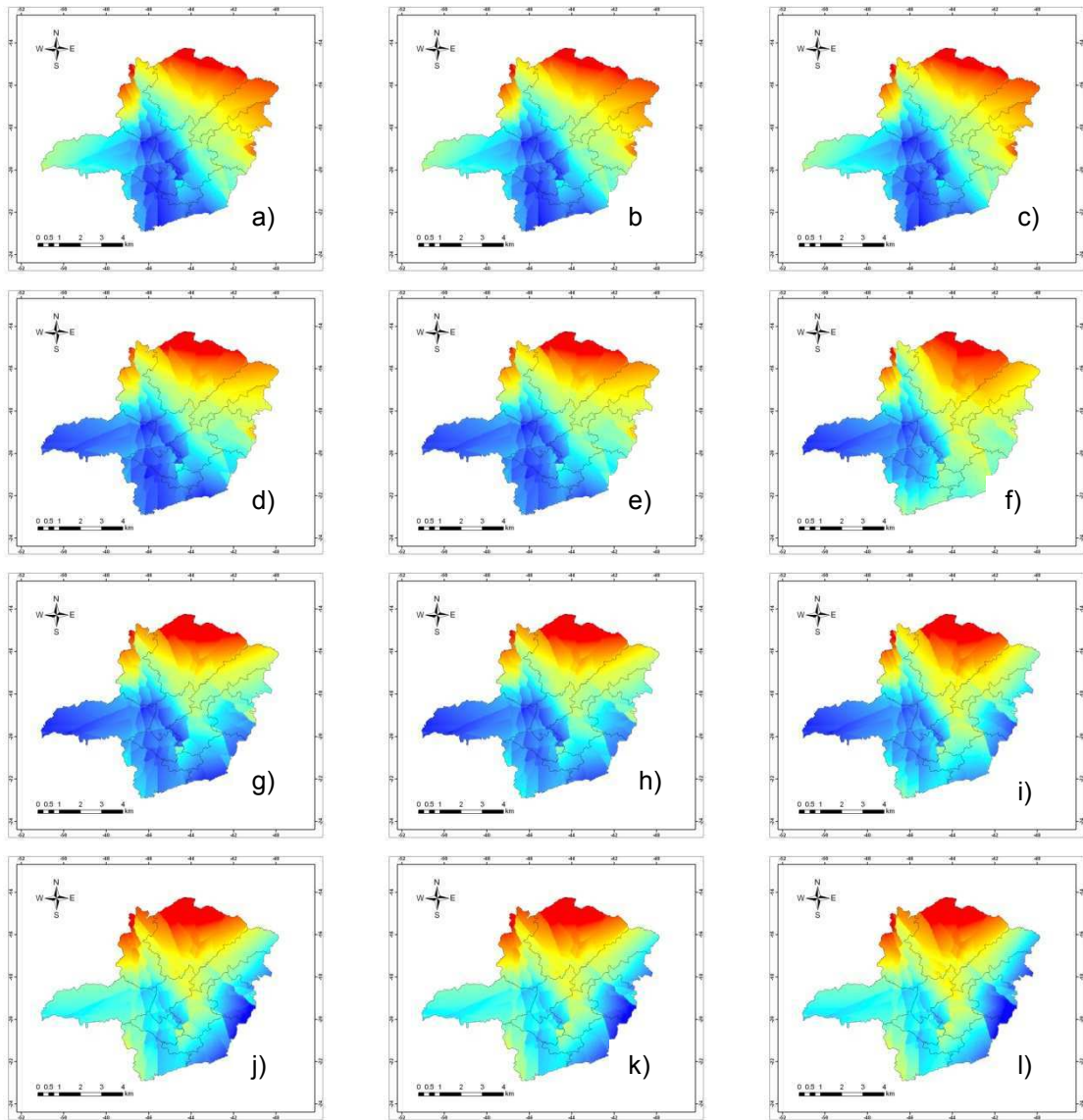


Figura 6 – Variação da produtividade média simulada (kg ha^{-1}) em MG na cultivar MGBR-46 Conquista compreendendo as datas de semeadura entre a, b, c (15 de outubro), d, e, f (28 de novembro), g, h, i (26 de dezembro) e j, k, l (23 de janeiro), sendo: sem ferrugem; PMF \geq UR95%; PMF \geq UR90% respectivamente

Como ressalta Silva Júnior (2007), as estiagens e as chuvas em excesso por períodos seguidos em várias partes do estado estão associadas aos fenômenos de escala global, como o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que afeta a Circulação Geral da Atmosfera. A fase quente (El Niño) e a fase fria (La Niña – LN) como, por exemplo, o fenômeno La Niña, influencia principalmente o início dos períodos chuvosos, com a ocorrência e duração de veranicos em anos de surgimento desse fenômeno, atuando no Estado de Minas Gerais.

4. CONCLUSÕES

Por meio das análises efetuadas observamos que a cultivar de ciclo médio a semitardio (BRS Valiosa) apresentou a tendência de expressar rendimentos (kg/ha) menores durante o período simulado, considerando o efeito da ferrugem asiática com $PMF \geq UR90\%$.

Entretanto, a cultivar semiprecoce (BRS 6101) mostrou um menor efeito no rendimento pela presença da ferrugem asiática.

Em relação à melhor data de semeadura para o Estado de Minas Gerais, observamos uma heterogeneidade da mesma, visto que o mesmo é considerado de grande variabilidade climática nas suas diferentes mesorregiões; o que será melhor interpretado a partir da respectiva cidade em que se tenha interesse na data de semeadura.

De forma geral, podemos observar que, no oeste e sul do estado, as melhores datas aparecem nos meses de outubro, novembro e dezembro, o que provavelmente está associado ao período chuvoso. Porém, no norte do estado não podemos dizer a mesma coisa, devido à grande escassez de água, o que provavelmente envolveria, nesse caso, diferentes formas de manejo.

CAPÍTULO 3

IMPACTO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global, tema discutido atualmente em todo o mundo, vem despertar em cada um de nós a possibilidade de refletir sobre os nossos atos no Planeta Terra. Diante disso, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), estabelecido em 1998 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) mostram diferentes cenários de emissão de CO₂, sendo os principais A2 (alta emissão) e B2 (baixa emissão). Cabe ressaltar que o cenário B1 se apresenta intermediário entre os dois acima, sendo considerado importante indicador da variabilidade da temperatura e precipitação.

Com base nesses cenários, são geradas diferentes projeções futuras de mudanças climáticas com a finalidade de projetar como será o futuro em relação ao aumento da temperatura, precipitação, destacando a ocorrência desses impactos em todos os continentes do mundo por meio de um conjunto de cenários conhecido como *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES).

Esses cenários são norteados a partir dos modelos climáticos globais, usados como ferramentas para projeções de futuras mudanças do clima, como consequência de

cenários utilizando forçantes climáticas (gases de efeito estufa e aerossóis). Sabe-se que existe uma incerteza do futuro cenário climático do planeta, incerteza muito maior quando se deseja projetá-lo para regiões usando modelos globais. A formulação de políticas de adaptação em resposta às mudanças do clima tem mostrado que o nível de detalhamento fornecido por esses métodos ainda não está consolidado, ainda que o Modelo Global de Circulação da Atmosfera (MCGA) forneça simulações adequadas da circulação atmosférica em escala global (CAMARGO et al., 2001; CAVALCANTI et al., 2002; MARENGO et al., 2003 *apud* AMBRIZZI et al., 2007).

Para o cenário climático de referência, utiliza-se a Climatologia, e para o cenário futuro projeta-se o comportamento do clima utilizando Modelos de Circulação Global (MCGs) ou são utilizadas condições hipotéticas. As projeções com os MCGs são feitas pelo acoplamento da atmosfera com os oceanos, forçados com a evolução das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE) medidas no século XX e projetadas para o futuro de acordo com a descrição do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (CÂNDIDO, 2007). Esse Relatório foi publicado em 2000 para uso em estudos de mudanças climáticas descrevendo uma visão possível do desenvolvimento futuro em todo o planeta com alusão especial à emissão de gases de efeito estufa.

O futuro do clima vem sendo estudado principalmente através do uso dos modelos climáticos globais (GCMs). Os modelos representam um importante processo complexo sobre a superfície da terra, atmosfera, oceanos e gelo, bem como interações entre ambos. Nos últimos 30 anos, esses têm sido continuamente aperfeiçoados em sua complexidade, resolução espacial e duração da simulação, parcialmente devido ao rápido aumento não linear na área computacional. Atualmente, existem 20 diferentes modelos climáticos globais que têm sido desenvolvidos em diversos centros de pesquisa no mundo. Representam a atmosfera como um sistema em *gridded boxes*, com resolução em torno de 250 km (125-400 km) e 20 níveis verticais através da atmosfera (MEARNS, 2011).

Dentre os fatores que têm contribuído para o grande desempenho da cultura da soja no Brasil, pode-se destacar: o preço pago ao produto no mercado internacional, sua liquidez, o melhoramento genético, através de variedades adaptadas às regiões produtoras; o desenvolvimento de técnicas de manejo inerente a cada região; o avanço da mecanização; o uso do manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas, com base na fisiologia das variedades e nas características edafoclimáticas de cada região; o uso da agricultura de precisão, conectada a técnicas de colheita, logística de

armazenamento e transporte. O somatório desses fatores, dentre outros, fazem do Brasil uma referência mundial na produção desse grão. Estimativas vislumbram a perspectiva de, em 2020, chegar a produzir cerca de 105 milhões de toneladas, ocupando uma área adicional de oito milhões de hectares (PARRA, 2006).

O principal objetivo da ciência agrícola é o desenvolvimento de métodos para analisar e selecionar opções de produção que irão se adaptar às condições climáticas em que ocorrem, levando em consideração as necessidades e a capacidade dos agricultores em determinada região. As respostas das culturas são altamente complexas e não lineares, são determinadas a partir da interação entre tempo, solo, cultura e manejo de fatores através do estágio fenológico. Existem sistemas de manejo para outras regiões, novas variedades e cultivares, bem como outras tecnologias vêm sendo implementadas pelos cientistas para fornecer opções de adaptações práticas (JONES et al., 2011).

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar o impacto da Ferrugem da soja em cenário de mudanças climáticas, utilizando o modelo ECHAM5/MPI-OM do IPCC.

2. METODOLOGIA

A fim de se atingir os objetivos do presente trabalho, foram aplicadas as simulações de rendimento para a cultura da soja, utilizando a versão 4.5 do DSSAT (Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia), associados aos conceitos e paradigmas propostos no IPCC. Ou seja, utilizar as saídas das simulações dinâmicas, por meio do modelo de circulação global (ECHAM5/MPI-OM), em condições iniciais considerando as tendências da concentração de dióxido de carbono, tomada a partir de medidas em *Mauna Loa* (Havaí/EUA) e, no futuro, por meio de projeções do IPCC-AR4 (cenário A1B).

O modelo foi forçado pelo nível de concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera do cenário A1B seguindo as projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007b), sendo inserida uma nova concentração ano a ano a partir do respectivo cenário nas diferentes mesorregiões do Estado de Minas Gerais.

2.1. Área de estudo

O Estado de Minas Gerais está situado na Região Sudeste do Brasil, entre os paralelos $14^{\circ}13'57''$ e $22^{\circ}55'47''$ S e os meridianos de $39^{\circ}51'27''$ e $51^{\circ}02'56''$ W, e suas respectivas mesorregiões, como mostram as Figuras 1 e 2.

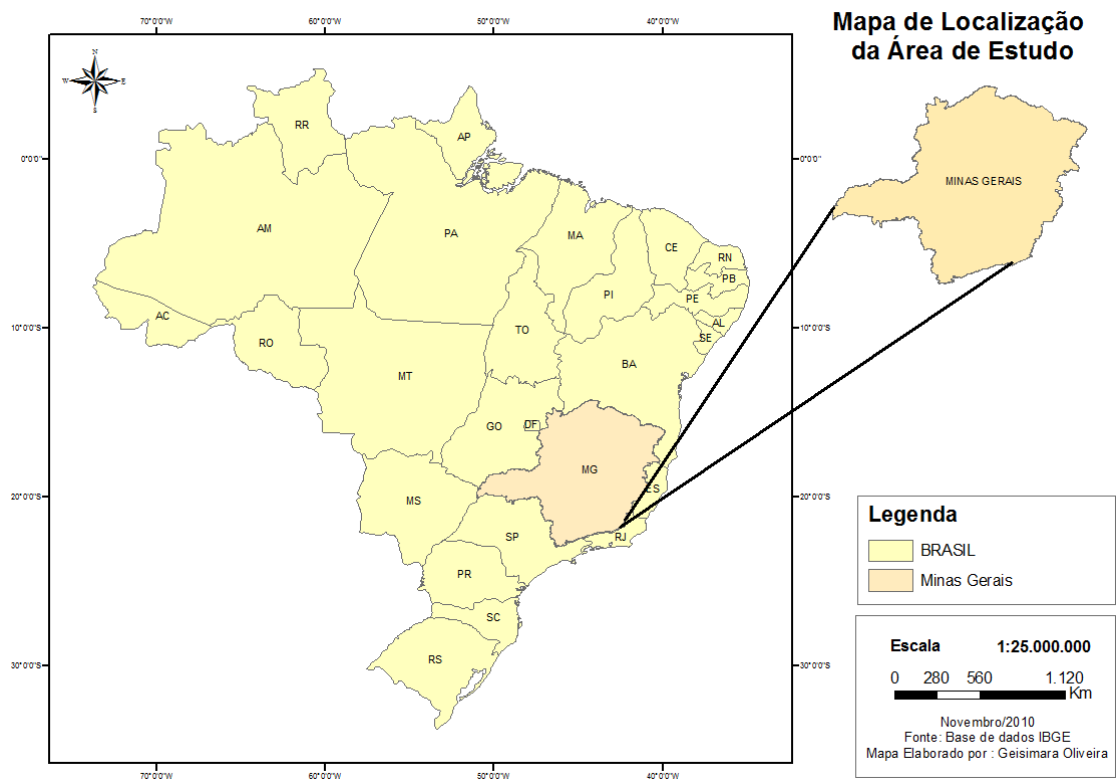


Figura 1 – Localização da área de estudo.

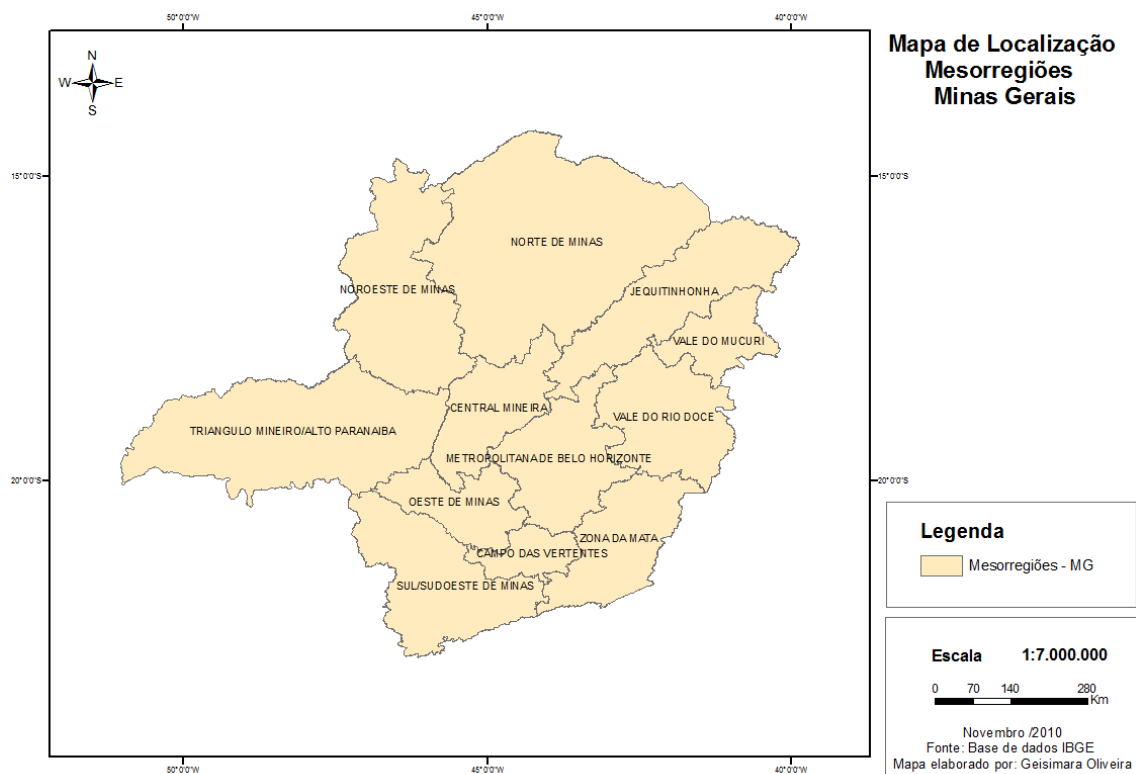


Figura 2 – Localização das mesorregiões do Estado de Minas Gerais.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estruturaram a divisão do Estado de Minas Gerais em 12 mesorregiões geográficas: Sul e Sudoeste de Minas (MR01); Noroeste de Minas (MR02); Norte de Minas (M03); Jequitinhonha (MR04); Vale do Mucuri (MR05); Vale do Rio Doce (MR06); Oeste Mineiro (MR07); Campos das Vertentes (M08); Central Mineira (MR09); Metropolitana de Belo Horizonte (MR10); Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (MR11) e Zona da Mata Mineira (MR12) – o IBGE define mesorregião como uma subdivisão adotada no Brasil que congrega diversos municípios de uma área geográfica com similaridades econômicas e sociais. Frequentemente é utilizada para fins estatísticos e não constitui, portanto, uma entidade política ou administrativa.

2.2. Descrição do modelo ECHAM5/MPI-OM

O modelo utilizado foi o ECHAM5/MPI-OM, originado inicialmente a partir do modelo *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (SIMMONS et al.,

1989; UPALLA et al., 2005). Os dois componentes do modelo, ECHAM5 para a atmosfera e MPI-OM para o oceano, estão bem documentados (JUNGCLAUS et al., 2006). Essa versão acoplada é uma das saídas que vem sendo utilizada para os cenários climáticos do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007b; ROECKNER et al., 2003).

O ECHAM4.5 é baseado no modelo de previsão de tempo do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Várias modificações têm sido aplicadas no *Max Planck Institute for Meteorology and German Climate Computing Centre (DKRZ)* para melhorar a previsão climática, estando o mesmo atualmente na quarta geração. Uma detalhada descrição do ECHAM4.5 pode ser encontrada em Roeckner et al. (1996). Na versão padrão do modelo o mesmo tem 19 níveis híbridos usados em um sistema de coordenadas de pressão-sigma. O domínio vertical se estende até o nível de pressão de 10 hPa. Variáveis prognósticas são vorticidade, divergência, logaritmo de pressão a superfície, temperatura, umidade específica, razão de mistura e total de água de nuvem. Exceto para componentes de vapor, o prognóstico das variáveis são representados por harmônicos esféricos com truncamento triangular no número de onda T42.

No contexto operacional, menciona-se que a configuração usada nesse estudo tem truncamento triangular no número de onda T63, aproximadamente 1,9° de latitude e de longitude, o que representa uma resolução espacial de aproximadamente 180 x 180 km, na faixa equatorial, com 31 níveis verticais. O modelo oceânico do Instituto de Max Planck (MPI-OM), descrito por Marsland et al. (2003), emprega as equações primitivas para um líquido hidrostático com uma superfície livre. A discretização possui 40 níveis verticais com uma resolução horizontal de 1.5°. Na Tabela 1 é apresentado o resumo do experimento numérico para geração de séries dinâmicas do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Tabela 1 – Resumo das características do modelo ECHAM5/MPI-OM

Pontos principais	Destques
Instituição	Instituto Max-Planck de Meteorologia (MPIM)
Local	Hamburgo, Alemanha
Simulação	Modelo de Circulação Geral Atmosférica (MCGA)
Versão	Sexta geração
Inicialização	Re-análise do ECMWF/ERA40
Acoplado	Sim [ECHAM5 (atmosfera) e MPI-OM (oceano)]
Dióxido de carbono	A1B (IPCC, 2000 e 2007)
Vulcanismo	Considerado
Registros gerados*	$P_t^{(a)}$ $T_m^{(b)}$ $T_n^{(c)}$ $R_g^{(d)}$ $W_v^{(e)}$
Resolução	1,875° x 1,875° (~ 180 x 180 km na faixa equatorial)
Período simulado	150 anos (1950 – 2100)
Disponibilidade	Disponível em contrapartida científica
Cenários [CO ₂]	A1B (pessimista) e B2 (otimista)
Portal	http://www.mpimet.mpg.de/en/home.html
Custo operacional	Elevado (produto em simulação de alto desempenho e equipe multidisciplinar)
Sistema operacional	Unix e Linux
Grau de execução	Complexo
Referências	Jungclaus et al. (2006) e Roeckner et al. (2003)

Fonte: Amorim (2008).

* Séries de (a) precipitação total, mm; (b) e (c) temperaturas máxima e mínima; (d) Radiação global, MJ/m²d; e (e) velocidade do vento, no plano 10 metros, m/s.

O passo de tempo para a dinâmica e a física é de vinte e quatro minutos para a resolução horizontal T42. O passo de tempo para a radiação é duas horas. Os ciclos diurnos e sazonais da forçante solar são simulados. Para o transporte de vapor d'água e água de nuvem um esquema semilagrangeano é usado. Os fluxos turbulentos de superfície são calculados através do Monin-Obukov *bulk* usando teoria da similaridade (LOUIS, 1981). Dentro e acima da camada limite atmosférica um esquema fechado de alta ordem é usado para computar a transferência turbulenta de momento, calor, mistura e água de nuvem. Os coeficientes de difusão turbulenta são calculados como função da energia cinética turbulenta (E). O modelo de solo contempla os balanços de calor, água

no solo, pacote de neve sobre o continente e balanço de calor no gelo sobre o continente.

Efeitos de vegetação tais como intercepções de chuva na copa das árvores e controle de evapotranspiração pelos estômatos são parametrizados. O esquema de estimativa do escoamento superficial tem como base a área de captação da bacia hidrográfica e leva em consideração as variações de subgrade da capacidade máxima de armazenamento de água no solo (capacidade de campo) sobre áreas continentais não homogêneas. Parâmetros de superfície tais como albedo, rugosidade, tipo de vegetação, índice de área foliar e parâmetros de solo tais como: capacidade de armazenamento de água, capacidade e condutividade térmica foram compiladas, segundo Claussen et al. (1994). As parametrizações de convecção cumulus (rasa, média e profunda) são baseadas no conceito de fluxo de Tiedtke (1989).

2.3. Base de dados

2.3.1. Séries meteorológicas em base dinâmica

Os dados meteorológicos utilizados pelo modelo, considerados como dados de entrada, compreenderam 12 pontos do Estado de Minas Gerais, a partir da resolução do modelo ECHAM de $\sim 180 \times 180$ km na faixa equatorial, com dados diários observados de temperatura média, máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), e número de horas de insolação (n) para o cálculo da radiação solar ($\text{MJ}\cdot\text{dia}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), como mostra a Figura 3.

2.3.2. Estimativa da duração do período de molhamento foliar

A duração do período de molhamento foliar (PMF) é uma variável muito importante para o desenvolvimento de doenças, pois, a maioria dos patógenos requer a presença de água líquida sobre as plantas, para a germinação dos esporos e consequente infecção do tecido, sendo relevante possuir o entendimento das condições ideais para o desenvolvimento da doença em uma cultura (VALE et al., 2004, SENTELHAS et al., 2004 e 2006).

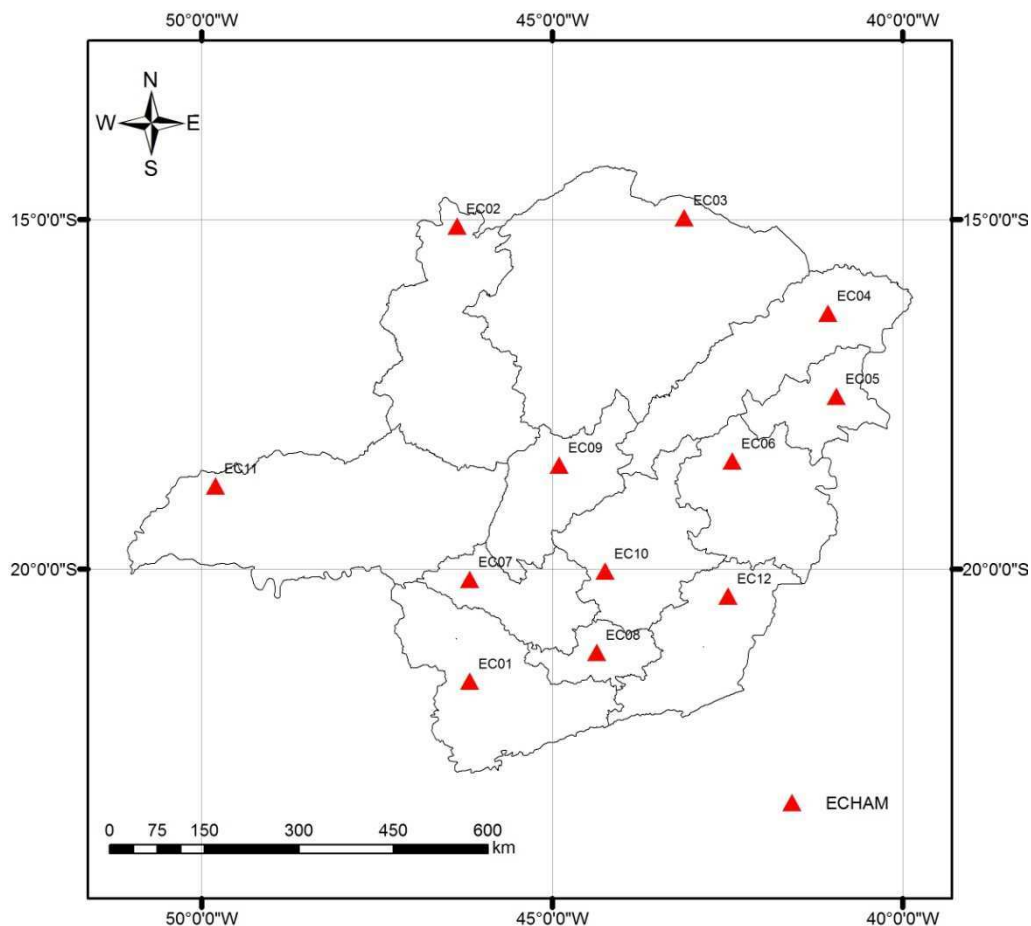


Figura 3 – Localização dos pontos utilizados pelo modelo ECHAM5/MPI-OM, nas mesorregiões do Estado de Minas Gerais.

Considerando a importância em se conhecer quais são as condições favoráveis do desenvolvimento da ferrugem, nesse trabalho consideramos que a temperatura e a umidade relativa do ar têm influência direta na favorabilidade de ocorrência da ferrugem asiática da soja, sendo utilizados para a estimativa do PMF. O procedimento será descrito a seguir.

A partir dos dados diários de temperatura do ponto de orvalho, foi utilizado o Algoritmo proposto por Parton e Logan (1981), para a transformação da mesma em dados horários. Posteriormente, foi estimada a umidade relativa do ar horária e depois foram gerados os dados do período de molhamento foliar – considerando a umidade relativa do ar maior ou igual a 90% e maior ou igual a 95% –, utilizando o método empírico proposto por Sentelhas e Gillespie (2007), o qual considera que o início da

condensação na superfície das folhas ocorre, quando a umidade relativa do ar é maior ou igual a 90%. O procedimento descrito acima foi realizado para os 12 pontos do modelo ECHAM, conseguindo-se, dessa forma, estimar valores diários de molhamento foliar.

2.3.3. Dados de solos

Considerando a grande variabilidade na classificação dos tipos de solos e pela dimensão do Estado de Minas Gerais, utilizamos a base de dados feita a partir do projeto RADAM-BRASIL (BRASIL, 1986). Selecionamos cada tipologia de solo a partir das coordenadas geográficas de cada ponto do modelo ECHAM, sempre buscando determinar o solo mais representativo, conforme observamos na Tabela 2.

Para a estimativa dos valores de ponto de murcha, capacidade de campo e saturação utilizamos a metodologia de Tomasella (2000), a qual possui as funções de pedotransferência para a estimativa das curvas de retenção de água no solo, sendo desenvolvida exclusivamente para solos brasileiros.

2.4. Dados experimentais

2.4.1. Caracterização do experimento conduzido em 2006 e 2010

Foram utilizadas as cultivares de soja BRS 6101 (semiprecoce), BRS Valiosa (médio a semitardio) e MGBR-46 Conquista (semitardio), sendo os dados experimentais das terceira cultivar, utilizados de Schmidt (2009). Os experimentos foram conduzidos no Viveiro do Café, área experimental que pertence ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil, (Latitude 20°44'48.5''S, Longitude 42°50'58.4''W, altitude 670 m), no município de Viçosa, durante as épocas de cultivo 2006 e 2010 em um local de topografia plana. A escolha das cultivares citadas justifica-se pelo fato de ambas serem de grupos de maturação diferentes, o que proporciona o entendimento do comportamento das mesmas em relação aos efeitos impostos pela ferrugem da soja, considerando o acoplamento com o CSM-CROPGRO-Soybean.

Tabela 2 – Principais características do solo nas mesorregiões de Minas Gerais

Mesorregião	Coordenadas geográficas		Perfil (cm)		Silte (%)	Argila (%)	Areia (%)
	LAT	LONG	Inferior	Superior			
MR01	-21.606	-45.55	0	7	24	37	39
			7	30	19	57	24
			30	75	17	62	21
			75	105	19	58	23
MR02	-17.712	-46.10	0	20	15	60	25
			20	45	9	72	19
			45	95	8	69	23
MR03	-14.976	-43.111	0	15	16.3	17.4	66.3
			25	40	13.6	26.4	60
MR04	-16.344	-41.06	0	20	36	51	13
			20	27	29	60	14
			27	180	35	61	4
MR05	-17.533	-41.31	0	11	19	26	55
			11	33	30	34	36
			33	95	35	38	27
MR06	-19.48	-42.09	0	3	26	25	49
			3	8	21	29	50
			8	14	19	29	52
			14	22	6	34	60
			22	40	12	60	28
40	72	17	61	22			
MR07	-20.149	-46.174	0	40	14	31	55
			40	75	20	35	45
MR08	-21.19	-44.36	0	20	21	31	48
			20	40	31	40	29
			40	55	27	35	38
			55	80	32	39	29
MR09	-18.747	-44.453	0	20	21	72	7
			20	60	10	86	4
MR10	-20.01	-44.03	0	20	14	31	55
			40	70	20	35	45
			75	100	8	8	84
MR11	-19.34	-46.56	0	10	12	16	72
			10	36	9	17	74
			36	84	6	24	70
MR12	-20.387	-42.487	0	37	14	34	52
			37	53	15	42	43
			53	90	14	47	39
			90	115	15	50	35

As semeaduras foram realizadas nos dias 03/08/2006 (MGBR-46 Conquista) e 07/01/2010 (BRS 6101 e BRS Valiosa), em fileiras espaçadas de 0,5 m. Os sulcos de semeadura foram adubados com 60 kg de K_2O ha^{-1} e 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} , na forma de cloreto de potássio (KCl) e superfosfato simples (SS), respectivamente, correspondendo a 400 kg ha^{-1} da fórmula 0-30-15 (NPK). As simulações tiveram início 60 dias antes do início da primeira data estabelecida para a semeadura.

Nesse experimento, o conjunto de informações fenológicas necessárias para a calibração dos coeficientes genéticos foi verificado a partir dos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, tais como floração, maturação fisiológica, rendimento, peso de 1.000 grãos e índice de área foliar para a calibração dos coeficientes genéticos, conforme descrito no item.

As simulações foram processadas considerando-se que as condições de água (precipitação) durante o período simulado fossem fornecidas pelos arquivos de entrada do modelo. Na realização das simulações, o mesmo assume que água é limitada pelos arquivos de clima, ou seja, acompanham a variabilidade dos elementos climáticos ao longo da série temporal, tais como radiação solar, temperatura, etc., de modo que o desenvolvimento da planta fica condicionado às variações dos mesmos.

2.4.2. Calibração dos coeficientes genéticos utilizando a metodologia GLUE

Os procedimentos utilizados para a calibração e teste dos coeficientes genéticos consistiram em: 1) selecionar inicialmente os coeficientes genéticos para um determinado genótipo a partir de outros que estejam no mesmo grupo de maturação ou que apresentem crescimento em área de adaptação similar; 2) executar o modelo para o local ou tratamento; e 3) comparar os valores estimados e observados de cada tratamento e verificar seu ajuste. Se o ajuste não for adequado, deve-se ajustar, inicialmente, a data prevista de florescimento, em seguida, a data prevista de maturação e, finalmente, o ajuste dos componentes do rendimento (sementes por vagem, vagens por m^2 , flores por m^2 , massa de vagens e sementes), conforme recomendação de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003). Isso pode ser feito aumentando ou diminuindo o valor de determinado coeficiente por processo de tentativa até que se obtenham resultados de boa qualidade.

Para estimativa dos coeficientes genéticos utilizamos a metodologia GLUE (do inglês, *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), presente no DSSAT versão 4.5,

segundo He et al. (2009). O Glue é uma ferramenta Bayesiana que usa o método de Monte Carlo e uma função de probabilidade normal (Gaussiana) para encontrar o melhor conjunto de coeficientes, baseando-se nos dados observados em campo e nas saídas do modelo, associados com os dados de clima e solo do respectivo experimento.

O programa inicia as simulações a partir dos parâmetros referentes à fenologia, seguidos pelos parâmetros de crescimento da cultura. Essa ordem é estabelecida pela dependência dos parâmetros de crescimento em relação aos parâmetros fenológicos (JONES et al., 1987; HOOGENBOOM et al., 1992). As datas de emergência, de florescimento e de maturação fisiológica, dados de análise de crescimento e rendimento, foram utilizadas dos dados experimentais das cultivares.

O programa gera aleatoriamente os parâmetros baseando-se em uma distribuição uniforme e compara as estimativas com os dados observados. O conjunto de parâmetros que oferecer a maior probabilidade, ou seja, na redução do erro entre a diferença do estimado e observado, será selecionada como o melhor conjunto de coeficientes. Foram simulados para as respectivas cultivares as referidas simulações: BRS 6101 e BRS Valiosa com 3,000 e MG BR 46 Conquista 4,000.

2.4.3. Validação do CSM-CROPGRO-Soybean

A validação foi efetuada a partir do trabalho realizado por Vasconcelos (2009). As cultivares utilizadas para a validação foram a Splendor (BRS Valiosa) de ciclo médio e a MGBR-46 Conquista de ciclo semitardio.

O autor avaliou linhagens e cultivares de soja, de ciclos precoce, médio e tardio, nos ensaios finais de avaliação do comportamento agrônomico, do Programa de Melhoramento de Soja do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, conduzidos no Estado de Minas Gerais, em dois anos agrícolas, 2006/2007 e 2007/2008. Os experimentos foram conduzidos em quatro locais: Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, nos dois anos agrícolas.

A semeadura no ano de 2006 foi realizada nos dias 1, 2, 12 e 16 de dezembro em Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, respectivamente. A semeadura no ano de 2007 foi realizada nos dias 9 e 29 de novembro, 12 e 16 de dezembro, em Viçosa, Florestal, São Gotardo e Rio Paranaíba, respectivamente (VASCONCELOS, 2009).

Foi realizada adubação de base com 250 kg/ha do formulado 00-20-20 em todos os experimentos conduzidos no ano agrícola de 2006/2007. A mesma dose do mesmo formulado foi empregada no ano de 2007/2008, exceto para Florestal, em que foram aplicados 360 kg/ha do adubo 00-20-20 com adubação de base (VASCONCELOS, 2009).

Em cada experimento de campo, utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições, formando um arranjo fatorial triplo, com dois anos, 4 locais e 14 genótipos (2x4x14) para cultivares de ciclos precoce e médio e 3 locais e 14 genótipos (2x3x14) para as cultivares de ciclos semitardio e tardio. A parcela foi constituída de quatro linhas distanciadas 0,5 m entre si, com 5 m de comprimento. Foi realizado o desbaste das plantas de cada linha, visando deixar 14 plantas por metro linear. A produtividade dos materiais foi determinada a partir da produção da área útil de 4,0 m², corresponde às duas linhas centrais, com 4 m de comprimento, desprezando 0,5 m em cada extremidade da parcela (VASCONCELOS, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise comparativa do período entre 1981-2009 a partir dos dados meteorológicos do INMET e ECHAM

A seguir mostraremos a variabilidade da produtividade com os dados meteorológicos obtidos através do INMET e as simulações realizadas com o modelo ECHAM para as três cultivares. Por meio das análises observamos que a cultivar BRS 6101 apresenta um bom ajuste (1982 e 2002), com produtividade média simulada, sem doença (SD) de 3400 kg ha⁻¹ e 2.669 kg ha⁻¹ (Figura 4a).

Quando analisamos a produtividade com ferrugem PMF \geq UR90% e com ferrugem PMF \geq UR95%, notamos um ajuste semelhante em relação a quando não temos doença. Entretanto, observamos alguns anos (1987, 1988 e 1989) em que o modelo ECHAM apresenta uma subestimativa dos dados de rendimento. Ou seja, os valores simulados estão menores que os valores dos dados observados (Figura 4).

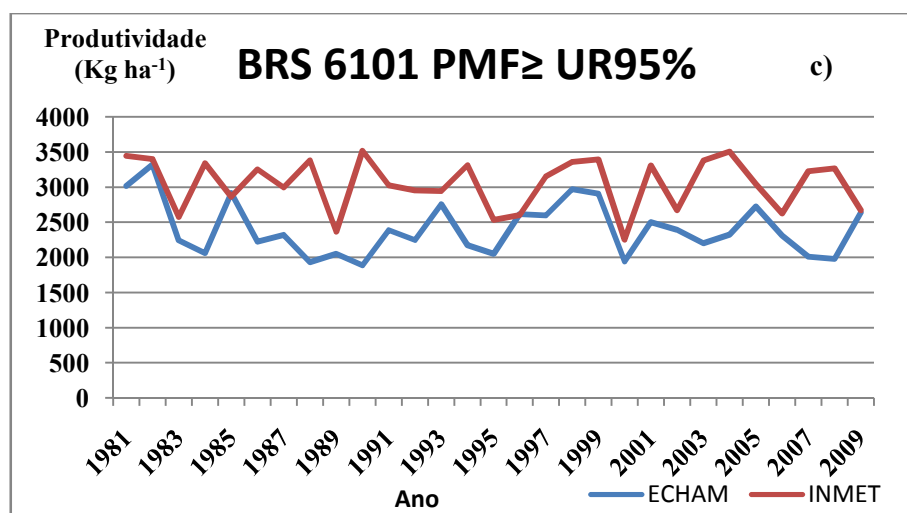
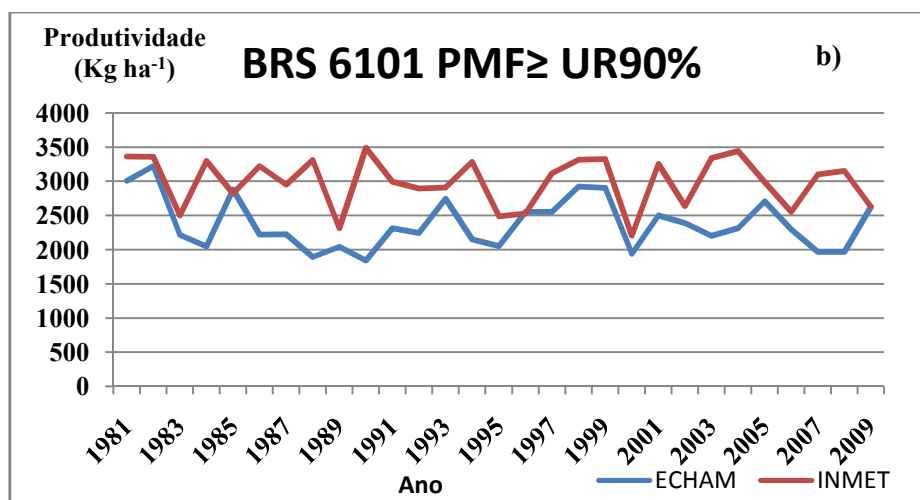
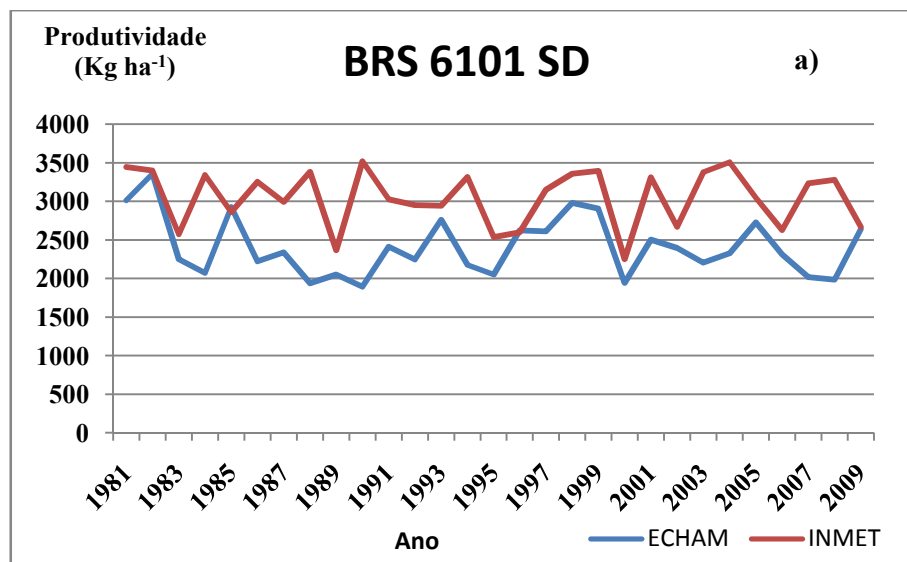


Figura 4 – Variação da produtividade média simulada (kg ha⁻¹) na cultivar BRS6101, considerando a) sem ferrugem; b) PMF ≥ UR90% e c) PMF ≥ UR95%, a partir das simulações realizadas com dados do INMET e ECHAM, compreendendo o período de 1981-2009.

Ao verificarmos a cultivar BRS Valiosa notamos uma maior oscilação em termos de variabilidade em relação à primeira cultivar analisada. Devemos destacar o ano de 1984 em que a produtividade gerada pelo modelo ECHAM foi de 959 kg ha^{-1} e pelo INMET 3.855 kg ha^{-1} , sem os efeitos da doença. Ao analisarmos os anos de 2000 a 2002 notamos um melhor ajuste da produtividade na Figura 5.

No que tange a cultivar MGBR-46 Conquista observamos um bom ajuste, principalmente nos anos de 1991 e 2002, com produtividade simulada pelo modelo de 2.819 kg ha^{-1} e 1.875 kg ha^{-1} . Porém, em alguns anos, o modelo não identificou condições de rendimento coerentes entre o observado e o simulado, favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática (Figura 6).

3.2. Perda no rendimento devido aos efeitos da ferrugem asiática nas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, nos anos de 2020, 2030 e 2040, em comparação com o presente e simulado pelo modelo ECHAM

As projeções climáticas baseadas no IPCC para Minas Gerais, por meio das análises realizadas a seguir, levantam uma enorme preocupação quanto aos impactos das mudanças climáticas na agricultura. Essas oscilações podem apresentar diferenciação entre as mesorregiões analisadas, visto que, possivelmente temos uma maior possibilidade da incidência de eventos extremos, como secas e períodos bastante chuvosos. Nas Figuras 7 a 9 são apresentadas a perda da produtividade média futura (kg ha^{-1}) em relação ao presente, considerando sem e com os efeitos da ferrugem asiática da soja, projetadas pelo modelo ECHAM nas diferentes mesoregiões do Estado de Minas Gerais.

Nesse sentido, verificamos inicialmente que a cultivar BRS 6101, no ano de 2020, será afetada pelas mudanças climáticas, tendo uma diminuição da produtividade em torno 8,7% na MR07 – Oeste Mineiro e MR10 – metropolitano de Belo Horizonte. No ano de 2030 observa-se que não terá um efeito significativo da ferrugem, sendo que a MR01 – sul e sudoeste de Minas e a MR11 – Triângulo Mineiro apresentam-se com o maior ganho no rendimento de 8,8% e 7%, respectivamente. Para o ano de 2040, a ferrugem volta a ocasionar maior perda no rendimento e a MR10 – Metropolitana de Belo Horizonte, ficando em torno de 8,5% (Figura 7).

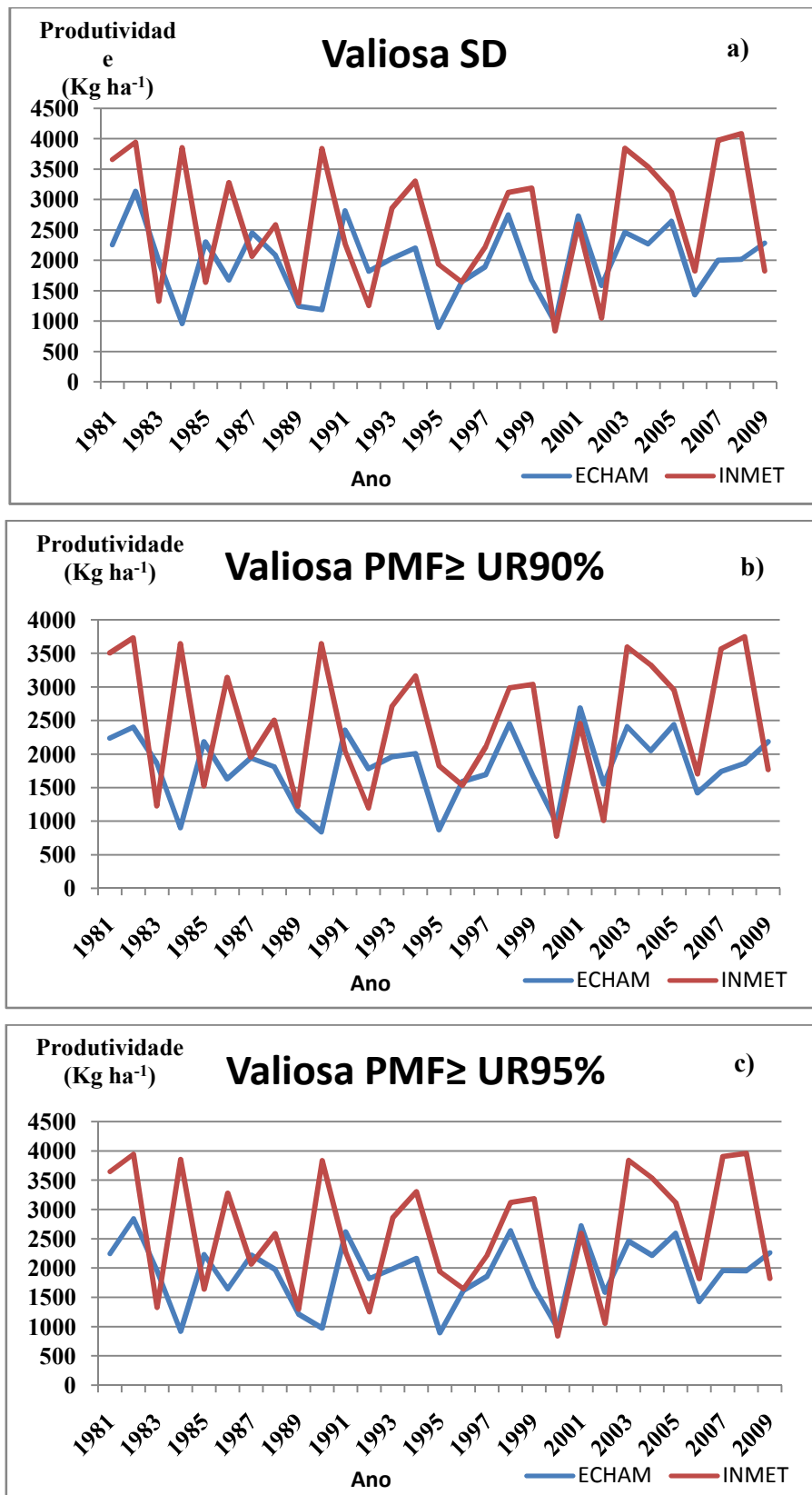


Figura 5 – Variação da produtividade média simulada (kg ha⁻¹) na cultivar BRS Valiosa, considerando a) sem ferrugem; b) PMF ≥ UR90% e c) PMF ≥ UR95%, a partir das simulações realizadas com dados do INMET e ECHAM, compreendendo o período de 1981-2009

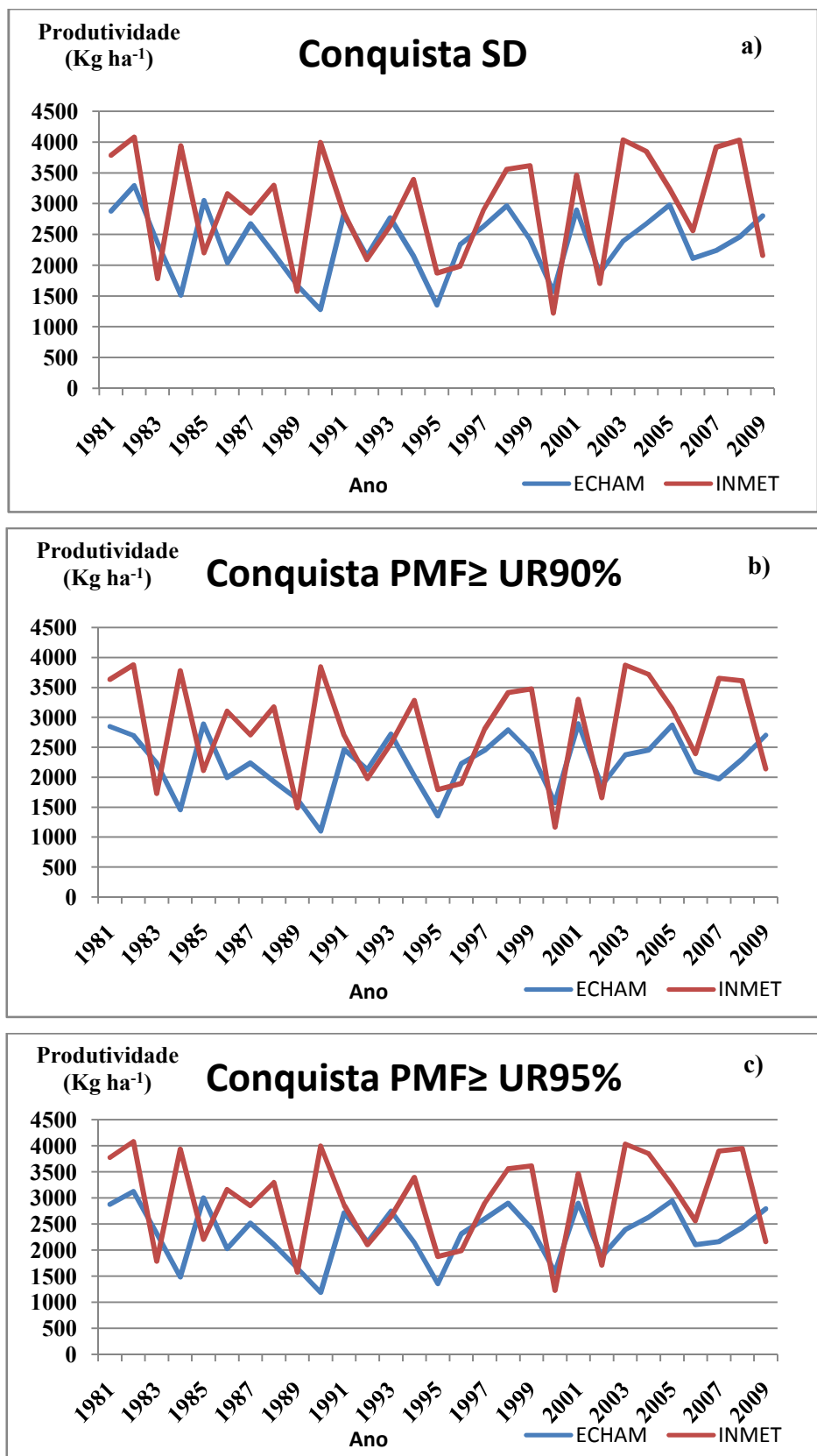


Figura 6 – Variação da produtividade média simulada (kg ha⁻¹) na cultivar MGBR-46 Conquista, considerando a) sem ferrugem; b) PMF ≥ UR90% e c) PMF ≥ UR95%, a partir das simulações realizadas com dados do INMET e ECHAM, compreendendo o período de 1981-2009.

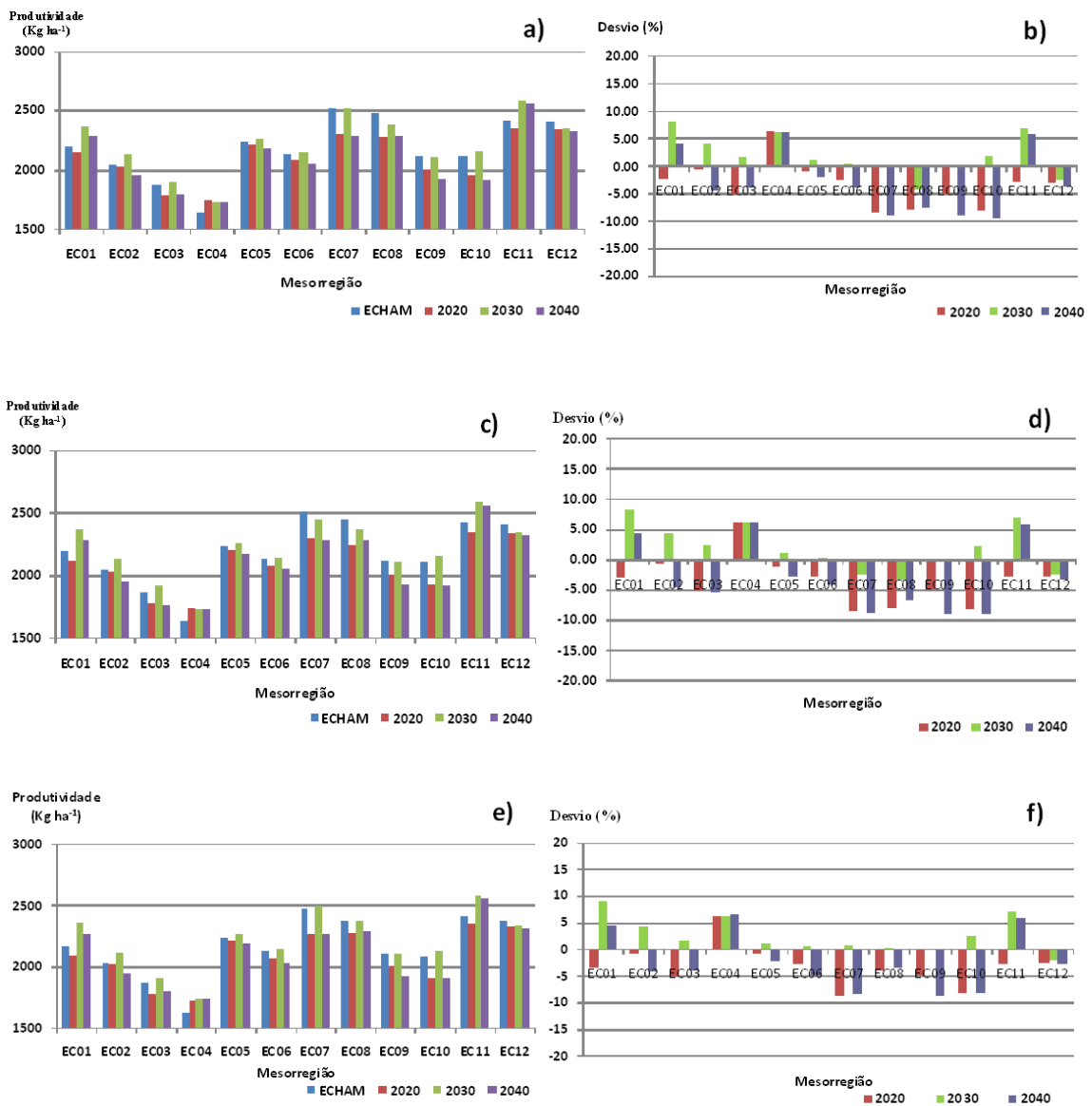


Figura 7 – Produtividade Média Simulada (kg ha^{-1}) para os anos de 2020, 2030 e 2040 em comparação com o presente (ECHAM) sem ferrugem (a); desvios da produtividade para os anos de 2020, 2030 e 2040 em comparação com o presente (ECHAM) sem ferrugem (b); Similar letra a: com ferrugem PMF \geq UR95% (c); Similar letra b: com ferrugem PMF \geq UR95% (d); Similar letra a: com ferrugem PMF \geq UR90% (e); Similar letra b: com ferrugem PMF \geq UR90%, ambos para a cultivar BRS6101 (f).

A BRS Valiosa terá maior perda no rendimento em relação as duas cultivares analisadas, com destaque para o ano de 2040 no oeste mineiro e central mineira, com 14,8% e 12,3%, e com aumento na produção de 10% e 11% na MR06 – Vale do Rio Doce e na MR09 – Central Mineira. No ano de 2020 a maior perda será na MR02 – Noroeste de Minas, com 11,9% (Figura 8). Para o ano de 2040, nota-se uma intensificação na queda de produtividade, principalmente na Figura 8, em que a perda chega a 12% e 9%.

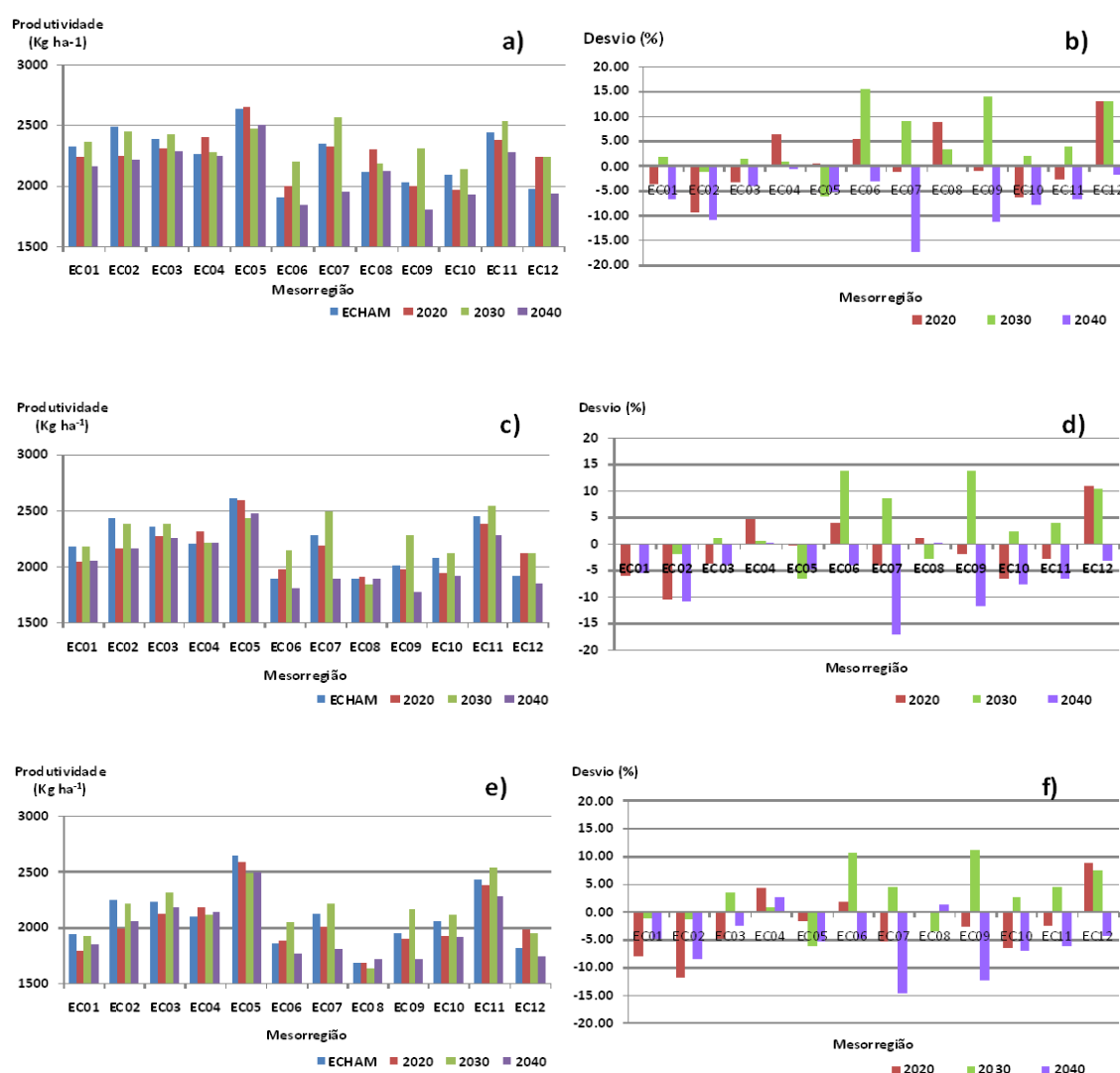


Figura 8 – Produtividade Média Simulada (kg ha⁻¹) para os anos de 2020, 2030 e 2040 em comparação com o presente (ECHAM) sem ferrugem (a); desvios da produtividade para os anos de 2020, 2030 e 2040 em comparação com o presente (ECHAM) sem ferrugem (b); Similar letra a: com ferrugem PMF ≥ UR95% (c); Similar letra b: com ferrugem PMF ≥ UR95% (d); Similar letra a: com ferrugem PMF ≥ UR90% (e); Similar letra b: com ferrugem PMF ≥ UR90%, ambos para a cultivar BRS Valiosa (f).

Na Figura 9, observamos o comportamento espaço-temporal das projeções para os anos de 2020, 2030 e 2040, no cenário A1B. Nota-se que em grande parte das mesorregiões, a ferrugem terá um efeito no sentido de proporcionar maior quebra de produtividade, principalmente na MR01 – Sul e Sudoeste de Minas e MR06 – Vale do Rio Doce, sem o efeito da doença terá uma diminuição de 5% no rendimento para ambas. No entanto, quando temos o efeito da ferrugem $PMF \geq UR90\%$, a perda vai para 9% na cultivar MGBR-46 Conquista.

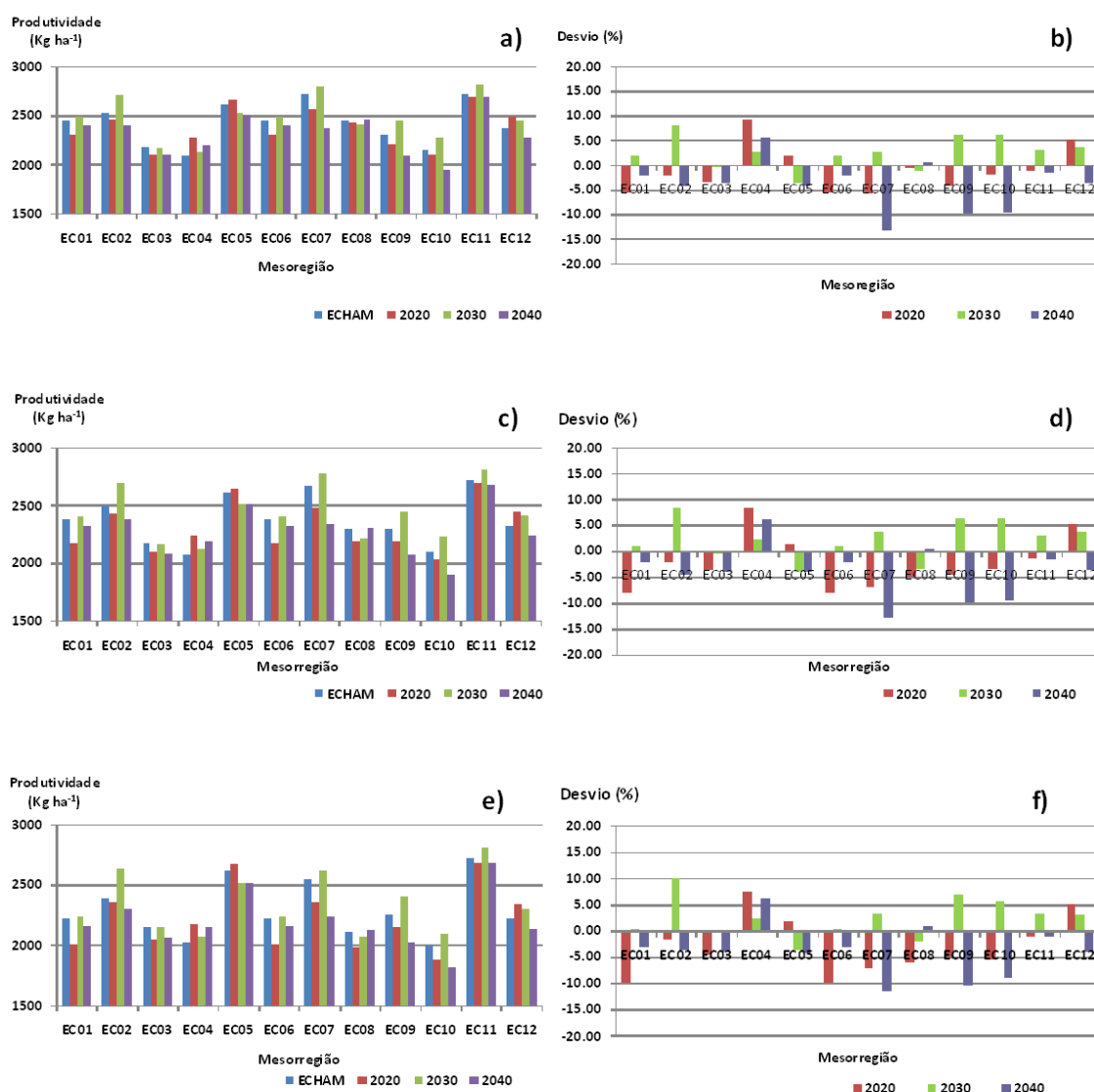


Figura 9 – Produtividade Média Simulada (kg ha⁻¹) para os anos de 2020, 2030 e 2040 em comparação com o presente (ECHAM) sem ferrugem (a); desvios da produtividade para os anos de 2020, 2030 e 2040 em comparação com o presente (ECHAM) sem ferrugem (b); Similar letra a: com ferrugem $PMF \geq UR95\%$ (c); Similar letra b: com ferrugem $PMF \geq UR95\%$ (d); Similar letra a: com ferrugem $PMF \geq UR90\%$ (e); Similar letra b: com ferrugem $PMF \geq UR90\%$, ambos para a cultivar MGBR-46 Conquista (f).

Nota-se um aumento significativo na produtividade de até 10% na MR02 – noroeste de Minas e na MR09 – Central Mineira para o ano de 2030 (Figura 9) em relação aos anos de 2020 e 2040. A menor perda verificada foi de 5% para a MGBR-46 Conquista, entretanto, a maioria das mesorregiões tem ganho significativo na produção, principalmente no Noroeste de Minas, no Campo das Vertentes e na Central Mineira.

4. CONCLUSÕES

As simulações realizadas a partir dos dados do INMET e do modelo ECHAM apresentaram bons ajustes em alguns anos para as referidas cultivares analisadas.

O cenário A1B indica uma redução na produtividade que pode alcançar até em torno de 15% no Oeste Mineiro para o ano de 2040. O ano de 2030 mostra-se possivelmente como detentor de grande rendimento na cultura da soja, exceto no Vale do Mucuri e Campo das Vertentes.

REFERÊNCIAS

ALVES, M.C. Intensidade da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & P. Sydow) da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] nas cultivares Conquista, Savana e Suprema sob diferentes temperaturas e períodos de molhamento foliar. **Summa Phytopathol.**, Botucatu, v. 33, n. 3, p. 239-244, 2007.

ALVES, S.A.M.; FURTADO, G. Q.; BERGAMIN FILHO, A. Influência das condições climáticas sobre a ferrugem da soja. In: ZAMBOLIM L. (Ed.). **Ferrugem asiática da soja**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2006. p. 37-59.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P.R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI**: projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Diretoria de Conservação da Biodiversidade, 2007. 108 p. (Relatório 3 - CPTEC/INPE, IAG/USP e FBDS).

AMORIM, M.C. **Impacto e projeção de séries meteorológicas na safra de milho em Minas Gerais**. 2008. 219 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, C.L.T. et al. **Modelagem do crescimento de culturas**: aplicações à cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 6 p.

ASSAD, E.; PINTO, H.S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa Agropecuária, Cepagri/Unicamp, 2008.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; FONSECA, M. **Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de riscos climáticos para a cultura da soja no Brasil**. 2005.

AZEVEDO, L.A.S.; JULIATTI, F.C.; BARRETO, M. Resistência de genótipos de soja à *Phakopsora pachyrhizi*. **Summa Phytopathologica**, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 252-257, 2007.

BATCHELOR, W.D.; BASSO, B.; PAZ, J.O. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1/2, p. 141-158, 2002.

BEDIN, C.; MENDES, L.B.; TRECENTE, V.C.; LOPES, R.L.B.; BOSQUÊ, G.G. Controle da ferrugem asiática na cultura da soja. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, ano 7, n. 13, jun. 2008.

BETTS, R.A.; COX, P.M.; COLLINS, M.; HARRIS, P.P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C.D. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. **Theoretical Applied Climatological**, v. 78, n. 1-3, p. 157-175, 2004.

BOOGES, W.G.; RITCHIE, J.T. Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. **Journal Produçiton Agricultural**, v. 1, n. 2, p. 116-122, 1998.

BRAGA, R.; PINTO, P.; COELHO, J. **Os modelos de simulação e a investigação de sistemas de agricultura**. 2005.

BRASIL. RADAM Brasil 1973-1986. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

CALVE, L.; ALFONSI, R.R.; ASSAD, E.D. Planilhas de cálculo para estimativas do ciclo de culturas a partir de graus-dia. In: FARE, R.; GROSSKOPF, S. **Production frontiers**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

CANTERI, M.G.; CARAMORI, P.; TSUKAHARA, R.; SILVA, O.C.; FARIA, R.; GODOY, C.V. A system to map risk of infection by *Phakopsora pachyrhizi* for Parana State, Brazil. **Phytopathology**, v. 95, p. 516, 2005.

CHRISTIANO, R.S.C.; SCHERM, H. Quantitative aspects of the spread of Asian soybean rust in the southern United States, 2005 to 2006. **Phytopathology**, v. 97, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 25 nov. 2010.

COSTA, L.C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997, Piracicaba. **CD-ROM...** Piracicaba: SBA, 1997.

COSTA, L.C.; BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 75-82, 2001.

CUNHA, G.R.; ASSAD, E.D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 446-459, 2001.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; FARIA, R.T.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; H. JÚNIOR, C. Ajuste e teste dos coeficientes genéticos do modelo de simulação do CSM-CROPGRO-Soybean para a região Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 363-371, Apr./Jun. 2005.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; FARIA, R.T.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A. Utilização do CSM-CROPGRO-Soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.

DEL PONTE, E.M.; LI, X.; YANG, X.B. Assessing the rainfall suitability of Asian soybean rust epidemics in the US soybean regions. In: NATIONAL SOYBEAN RUST SYMPOSIUM, 2005, Nashville. **Proceedings...** Nashville, TN, 2005.

DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.; LI, X.; YANG, X.B. Predicting severity of Asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, v. 96, p. 797-803, 2006a.

DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.; CANTERI, M.G.; REIS, E.M.; YANG, X.B. Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, p. 533-544, 2006b.

DEL PONTE, E.M.; MARTINS, E.J.; ESKER, P.D.; GODOY, C.V. Modelagem e previsão de epidemias de ferrugem asiática da soja – avanços na teoria e aplicação. In: WORKSHOP DE EPIDEMIOLOGIA DE DOENÇAS DE PLANTAS, 2, 2007, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão, 2007. p. 28-35.

DIAS, A.S.; PEREZ-HERNANDEZ, O.; YANG, X. Spatial and temporal analysis of Asian soybean rust spread to central U.S. in 2006. **Phytopathology**, v. 97, p. S28, 2007.

DOURADO NETO, D. **Modelos fitotécnicos referentes à cultura do milho**. 1999. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema de produção**: tecnologias de produção de soja – região central do Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2005. 220 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema de produção**: tecnologias de produção de soja – região central do Brasil Londrina: Embrapa Soja, 2006. 225 p.

ESKER, P.D.; DEL PONTE, E.M.; MARTINS, M.C.; KATO, F.V.; SIQUERI, F.V.; SILVA, L.H.; GODOY, C.V. Effects of location and year on the temporal disease progress of Asian soybean rust in Brazil. **Phytopathology**, v. 97, p. 33, 2007a.

ESKER, P.; NARVAEZ, D.; MAROIS, J.; WRIGHT, D.; DE WOLF, E.; NITA, M.; DEL PONTE, E.M.; ISARD, S. Effects of row spacing and canopy height on spatio-temporal development of Asian soybean rust. **Phytopathology**, v. 97, p. 33, 2007b.

FARIA, R.T.D.; BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, p. 489-498, 2003.

FERNANDES, J.M.C. et al. Simulação de epidemias. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, Passo Fundo, v. 2, n. 1, 1994.

GEDANKEN, A. **Utilização do modelo Ceres-Maize na avaliação de estratégias de irrigação na cultura do milho em duas regiões de Minas Gerais**. 1998. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 104 p.

GRAVES, A. et al. Crop simulation models as tools in computer laboratory and classroom-based education. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, v. 31, p. 48-54, 2002.

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

HE, J.; DUKES, M.D.; JONES, J.W.; GRAHAM, W.D.; JUDGE, J. Applying glue for estimating Ceres-Maize genetic and soil parameters for sweet corn production. **Transactions ASABE**, v. 52, n. 6, p. 1907-1921, 2009.

HILLEL, D. **Computer simulation of soil-water dynamic**. A compendium of recent work. Ottawa: International Development Research-Centre, 1977.

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

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Paris, 2007a. 21 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment**. 2007b.

INTERNATIONAL CONSORTIUM FOR AGRICULTURAL SYSTEMS APPLICATIONS – ICASA. Disponível em: <<http://icasa.net>>. Acesso em: 10 set. 2010.

ISARD, S.A.; GAGE, S.H.; COMTOIS, P.; RUSSO, J.M. Principles of the atmospheric pathway for invasive species applied to soybean rust. **Bioscience**, v. 55, p. 851-861, 2005.

JAME, Y.W.; CURTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 76, p. 9-19, 1996.

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

JONES, J.; RITCHIE, J. Crop growth models. **American Society of Agricultural Engineers**, p. 63-89, 1990.

JONES, J.W.; KEATING, B.A.; PORTER, C.H. **Approaches to modular model development**. Elsevier, 2001.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

JONES, J.W.; BARTELS, W.L.; FRAISSE, C.W.; BOOTE, K.J.; INGRAM, K.T.; HOOGENBOOM, G.L.O. Use of crop models for climate-agricultural decisions. In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. (Eds.). **Handbook of climate change and agroecosystems: impacts, adaptation, and mitigation**. Imperial College Press, 2011. p. 131-160. (ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation and Mitigation, 1).

KEATING, B. et al. An overview of apsim, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 22, p. 267-288, 2003.

KEEN, R.; SPAIN, J. **Computer simulation in biology: a BASIC introduction**. New York: Wiley-Liss, 1992. 498 p.

KIM, K.S.; YANG, X.B.; PAN, Z.; PEREZ-HERNANDES, O. Simulation of spore trajectories to identify potential pathways of soybean rust in the United States. **Phytopathology**, v. 95, p. 54, 2005.

LEITE, M.B.F. **Heterogeneidade populacional e fatores abióticos na dinâmica de uma epidemia**. 1999. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

LELIS, V.P. **Mudanças climáticas e ferrugem asiática da soja no Estado de Minas Gerais**. 2007. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LIMA, E.P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1988), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais**. 2005. 66 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MAGAREY, R.; ISARD, S.; RUSSO, J.; GAGE, S.; HARTMAN, G.; MILES, M. **Survey planning for soybean rust based on aerobiological and climatological factors**. USDA, 2004.

MALLMANN, G. **Modelos de simulação da ferrugem da folha do trigo: validação e impacto econômico**. 2009. 140 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.

MANICA, I.; COSTA, J.A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Evangraf, 1996. 233 p.

MARCHETTI, M.A.; MELCHING, J.S.; BROMFIELD, K.R. The effects of temperature and dew period on germination and infection by uredospores of *Phakopsora pachyrhizi*. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 66, n. 6, p. 461-463, 1976.

MARSLAND, S.J.; HAAK, H.; JUNGCLAUS, J.H.; LATIF, M.; RÖSKE, F. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. **Ocean Modelling**, v. 5, p. 91-127, 2003.

MARTORANO, L.G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MAVROMATIS, T. et al. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. **Crop Sci.**, v. 41, n. 1, p. 40-51, 2001.

MEARNS, L.O. Climate models for agricultural impacts: scales and scenarios. In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. (Eds.). **Handbook of climate change and agroecosystems: impacts, adaptation, and mitigation**. Imperial College Press, 2011. p. 161-178. (ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation and Mitigation, 1).

MELCHING, J.S.; DOWLER, W.M.; KOOGLE, D.L.; ROYER, M.H. Effects of duration, frequency and temperature of leaf wetness periods on soybean rust. **Plant-Disease**, n. 73, p. 117-122, 1989.

MOREIRA, E.N. **Ferrugem asiática da soja: influência do estágio fenológico na ocorrência e comparação de sistemas de aviso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.

NORWOOD, F.B.; ROBERTS, M.C.; LUSK, J.L. Reply: ranking crop yield models. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 88, n. 4, p. 1111-1112, 2006.

OLIVEIRA, E. C. **Desempenho do modelo CROPGRO-Dry bean em estimar a data de semeadura e a produtividade do feijoeiro**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

OLIVEIRA, R.C.; DI MAURO, A.O.; TREVISOLINI, S.H.U.; SANTOS, J.M.; OLIVEIRA, J.A.; PERECIN, D.; ARANTES, N.E. Progenies superiores de soja resistentes ao tipo 3 do nematóide de cisto da soja. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 40, n. 8, p. 745-751, ago. 2005.

PAN, Z.; YANG, X.B.; PIVONIA, S.; XUE, L.; PASKEN, R.; ROADS, J. Long-term prediction of soybean rust entry into the continental United States. **Plant Disease**, v. 90, p. 840-846, 2006.

PANGGA, I.B. Effects of elevated CO₂ on plant architecture of *Stylosanthes scabra* and epidemiology of anthracnose disease. 2002. Thesis (Ph.D.) – University of Queensland.

PARTON, W.J.; LOGAN, J.A. A model for diurnal variation in soil and air temperature. **Agric. for Meteorol.**, v. 23, p. 205-216, 1981.

PAVAN, W. **Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas**. 2007. 207 f. Tese (Doutorado em Fitopatologia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.

PAVAN, W. Uso de orientação a objetos no desenvolvimento de modelos de simulação de doenças de plantas genéricos. **Revista Brasileira de Agroinformática**, v. 8, n. 2, p. 1-16, 2008.

PEDRINI, J.E. **Acoplando um modelo de doenças ao CSM-CROPGRO-Soybean: ferrugem asiática da soja**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.

PIVONIA, S.; YANG, X.B. Assessment of potential year round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, v. 88, p. 523-529, 2004.

PIVONIA, S.; YANG, X.B. Relating epidemic progress from a general disease model to seasonal appearance time of rusts in the United States: implications for soybean rust. **Ecology and Phytopathology**, v. 96, p. 400-407, 2006.

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M. Integrated strategies for maize irrigation and fertilization under water scarcity and environmental pressure in Bulgaria. **Journal Irrigation and Drainage**, v. 53, p. 105-113, 2004.

PORTER, C.H.; BRAGA, R.P.; JONES, J.W. **An approach for modular crop model development**. Disponível em: <<http://www.icasa.net/modular/pdf/modular.pdf>>. Acesso em: 22/10/2010. Acesso em: 1999.

REDDY, K.R.; HODGES, H.F.; KIMBALL, B.A. Climate change and global crop productivity: an overview. In: REDDY, K.R.; HODGES, H.F. (Eds.). **Climate change and global crop productivity**. Wallingford, UK: CABI, 2000. p. 161-187.

REIS, E.M.; SARTORI, A.F.; CAMARA, R.K. Modelo climático para a previsão da ferrugem da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 30, p. 290-292, 2004.

REYNOLDS, J.; ACOCK, B. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. **Ecological Modelling**, v. 94, n. 1, p. 7-16, 1997.

SANTOS, N.Y.T. **Estatística espacial aplicada**. Viçosa: UFV, 2008. (Apostila).

SCHMIDT, J. **Yield loss caused by *Phakopsora pachyrhizi* on soybean based on physiological components**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SEMENOV, M.A.; PORTER, J.R. Climatic variability and the modelling of crop yields. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 73, p. 265-283, 1995.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J. Estimating hourly net radiation for leaf wetness duration modelling using the Penman-Monteith equation. **Theor. Appl. Climatol.**, 2007.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; MONTEIRO, J.E.B.M.; ROWLANDSON, T. Estimating leaf wetness duration on a cotton crop from meteorological data. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 2, p. 235-245, 2004.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; GLEASON, M.L.; MONTEIRO, J.E.B.A.; PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO, M.J. Evaluation of a Penman-Monteith approach to provide “reference” and crop canopy leaf wetness duration estimates. **Agric. Forest Meteorol.**, v. 141, p. 105-117, 2006.

SHANNON, R. **Systems simulation: the art and science**. New Jersey: Prentice-Hall, 1975. 387 p.

SILVA, V.A.S. **Resistência parcial e fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SILVA, F.C.; BERGAMASCO, A.F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Rev. Biociênc.**, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 7-14, jan./jun. 2001.

SILVA JÚNIOR, J. L. C. **Simulação da produtividade das culturas do milho e do feijão, baseada nos cenários de mudanças climáticas globais no Estado de Minas Gerais**. 2007. f. 95. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SINCLAIR, J.B.; BACKMAN, P.A. (Eds.). **Compendium of soybean diseases**. 3.ed. St. Paul: APS Press, 1989.

SOLER, C.M.T. **Uso do modelo Ceres-Maize para a previsão de safra do milho “Safrinha”**. 2004. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SWANEY, D. et al. Using crop models for management: Impact of weather characteristics on irrigation decisions in soybeans. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 26, n. 6, p. 1808-1814, 1983.

TAN, Y.J.; YU, Z.; YANG, C.Y. **Soybean rust**. Beijing: China Agricultural Press, 1996. 99 p.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 64, p. 327-338, 2000.

TSCHANZ, A.T. **Soybean rust epidemiology: final report**. Shanhua, Taiwan: Asian Vegetable Research and Development Center, 1984.

VALE, F.X.R.; ZAMBOLIM, L.; CHAVES, G.G.M. Efeito do binômio temperatura-duração do molhamento foliar sobre a infecção por *Phakopsora pachyrhizi* em soja. **Fitopatologia Brasileira**, v. 15, p. 200-203, 1990.

VALE, F.X.R. et al. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Perfil Editora, 2004. 532 p.

VASCONCELOS, E.S. **Produtividade de grãos e padrão de resposta da soja às variações ambientais no Estado de Minas Gerais**. 2009. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VERHAGEN, A.; CONIJN, S.; SCHAPENDONK, A. Quickscan of simulations models. **Plant Research International**, 2001.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M.; KLINK, D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WIT, C. Photosynthesis of leaf canopies. **Agric. Res. Rep.**, Pudoc, Wageningen, v. 663, 1965.

WU, H.; CHILDRESS, W.M.; LI, Y.; SPENCE, R.D.; REN, J. An integrated simulation model for a semiarid agroecosystem in the loess Plateau of North-western China. **Agricultural Systems**, Cambridge, v. 52, p. 83-111, 1996.

YANG, X.B. Framework development in plant disease risk assessment and its application. **European Journal of Plant Pathology**, v. 115, p. 25-34, 2006.

YANG, X.B.; ROYER, M.H.; TSCHANZ, A.T.; TSAI, B.Y. Analysis and quantification of soybean rust epidemics from 73 sequential planting experiments. **Phytopathology**, St. Paul, v. 80, n. 12, p. 1421-1427, 1990.

YANG, X.B.; DOWLER, W.M.; TSCHANZ, A.T. A simulation model for assessing soybean rust epidemics. **Journal of Phytopathology**, v. 133, p. 187-200, 1991a.

YANG, X.B.; DOWLER, W.M.; ROYER, M.H. Assessing the risk and potential impact of an exotic plant disease. **Plant Disease**, v. 75, p. 976-982, 1991b.

YORINORI, J.T.; PAIVA, W.M.; FREDERICK, R.D.; COSTAMILAN, L.M.; BERTAGNOLLI, P.F.; HARTMAN, G.L.; GODOY, C.V.; NUNES, J.J. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003, 2005. **Plant Disease**, v. 89, p. 675-677, 2005.