

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**MODELOS DE SIMULAÇÃO DA FERRUGEM
DA FOLHA DO TRIGO: VALIDAÇÃO E
IMPACTO ECONÔMICO**

GUILHERME MALLMANN

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Fitopatologia.

Passo Fundo, julho de 2009.

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**MODELOS DE SIMULAÇÃO DA FERRUGEM
DA FOLHA DO TRIGO: VALIDAÇÃO E
IMPACTO ECONÔMICO**

GUILHERME MALLMANN

Orientador: Prof. PhD. José Maurício Cunha Fernandes

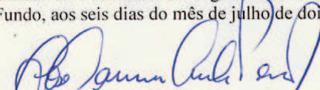
Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Fitopatologia.

Passo Fundo, julho de 2009.



ATA DA DEFESA DE TESE DO CANDIDATO, GUILHERME MALLMANN, DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOPATOLOGIA DA FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA DA UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO.

Aos seis dias do mês de julho de dois mil e nove, às quatorze horas, no Auditório da Pós-Graduação, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, sob a Presidência do Dr. José Maurício Cunha Fernandes, em Sessão Pública, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa de Tese do candidato Guilherme Mallmann, do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - área de Concentração em Fitopatologia, constituída pelos Doutores: José Maurício Cunha Fernandes (Orientador), Carlos Alberto Forcelini, André Cunha Rosa, Alfredo Nascimento Júnior e Willingthon Pavan indicada pelo Conselho do Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Iniciados os trabalhos, a presidência deu conhecimento aos membros da comissão e o candidato das normas que regem a defesa de tese e definiu a ordem a ser seguida pelos examinadores para a arguição: a seguir, o candidato passou a apresentação e defesa de sua tese intitulada "Modelos de simulação da ferrugem da folha do trigo: validação e impacto econômico". Encerrada a defesa, a avaliação foi a seguinte: Dr. José Maurício Cunha Fernandes: **APROVADO**; Dr. Carlos Alberto Forcelini: **APROVADO**; Dr. André Cunha Rosa: **APROVADO**; Dr. Alfredo Nascimento Junior: **APROVADO**; Dr. Willingthon Pavan: **APROVADO**, tendo o candidato sido **APROVADO**, fazendo jus ao Título de "Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Fitopatologia". Para estar em dia com suas obrigações perante o curso, o aluno terá o prazo de quarenta e cinco dias, a partir desta data, para entrega da tese definitiva, com as alterações sugeridas pelos membros da Comissão Examinadora e juntamente pelo menos um trabalho científico da mesma, redigido de acordo com normas de publicação da revista científica da área indicada pelo orientador, com comprovação de recebimento do artigo pela revista. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente Ata, que vai assinada pelos Membros da Comissão Examinadora, pelo Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Prof. Dr. Vilson Antonio Klein e pelo Prof. Dr. Mauro Antônio Rizzardi, Diretor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, aos seis dias do mês de julho de dois mil e nove.

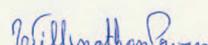

Dr. José Maurício Cunha Fernandes
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

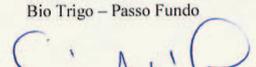

Dr. Vilson Antonio Klein
Coordenador PPG Agro


Dr. Alfredo Nascimento Junior
Embrapa Trigo
Co-orientador


Dr. Mauro Antonio Rizzardi
Diretor FAMV


Dr. André Cunha Rosa
Bio Trigo – Passo Fundo


Dr. Willingthon Pavan
Universidade de Passo Fundo


Dr. Carlos Alberto Forcelini
Universidade de Passo Fundo

 **UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOPATOLOGIA



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese

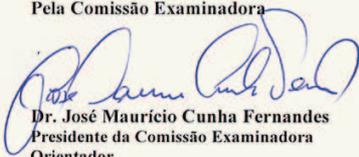
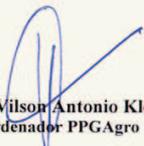
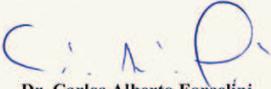
“Modelos de simulação da ferrugem da folha do trigo: validação e impacto econômico”

Elaborado por

GUILHERME MALLMANN

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Agronomia – Área de Fitopatologia

Aprovada em: 06/07/2009
Pela Comissão Examinadora

 Dr. José Maurício Cunha Fernandes Presidente da Comissão Examinadora Orientador	 Dr. Vilson Antonio Klein Coordenador PPGAgro
 Dr. Alfredo Nascimento Junior Embrapa Trigo Co-orientador	 Dr. Mauro Antônio Rizzardi Diretor FAMV
 Dr. André Cunha Rosa Bio Trigo – Passo Fundo	 Dr. Willington Pavan Universidade de Passo Fundo
 Dr. Carlos Alberto Forcelini Universidade de Passo Fundo	

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Camilo e Talira, as minhas irmãs Raquel e Camila Mallmann, pelo amor, carinho, incentivo e exemplos proporcionados.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre guiar e iluminar meu caminho.

Ao orientador Dr. José Maurício Cunha Fernandes, pela amizade e por ter acreditado e dedicado longos períodos de seu tempo na orientação desse trabalho.

Ao coorientador Dr. Alfredo do Nascimento Junior, pela amizade e colaboração neste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, juntamente com seu quadro docente, pela valiosa oportunidade proporcionada.

A Embrapa Trigo, pelo suporte estrutural e pessoal, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Fitopatologia da Embrapa Trigo, em especial a Ana, José Carlos, Eloni e João, pela amizade e auxílio durante todas as etapas deste trabalho.

Ao amigo Dr. Willingthon Pavan e equipe do projeto de pesquisa Mosaico/Simuplan da Universidade de Passo Fundo, pela amizade, auxílio e companheirismo.

Ao amigo João Eduardo Pedrini, pela amizade, e auxílio nos trabalhos realizados.

Aos demais meus colegas do PPGAgro, pela valiosa amizade, companheirismo e pela disponibilidade em sempre auxiliar-me nos trabalhos conduzidos.

Aos meus pais Camilo e Talira Mallmann, de uma forma especial e carinhosa, que me deram apoio, incentivo, e exemplo de vida, e me ajudaram mais uma vez, a vencer mais este desafio em minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Trigo	7
2.1.1 Doenças foliares no trigo	9
2.1.2 Modelos de simulação	39
CAPÍTULO I	
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE FERRUGEM DA FOLHA DO TRIGO	71
Introdução	74
Material e Métodos	77
Resultados	80
Discussão	86

CAPÍTULO II

IMPACTO DA FERRUGEM DA FOLHA NO TRIGO	97
Introdução	100
Material e Métodos	103
Resultados	106
Discussão	108
3 CONCLUSÃO	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

LISTA DE FIGURAS

- 1 Modelo estrutural da ferramenta DSSAT utilizada na simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de trigo. 51
- 2 Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2000. 83
- 3 Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2001. 84
- 4 Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2002. 85
- 5 Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2003. 86
- 6 Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2004. 87

7	Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2006.	88
8	Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2007.	89
9	Diagrama de caixa representando a variabilidade no rendimento do trigo na região de Passo Fundo - RS, durante os anos de 1979 a 2007 com uma cultivar hipoteticamente imune (Fator do Hospedeiro 0) e outra cultivar totalmente suscetível (Fator do Hospedeiro 0.8).	108
10	Área abaixo da curva do progresso da da ferrugem da folha (AACPD) obtida a partir da simulação de uma condição de suscetibilidade total (superior) e parcial (inferior) na região de Passo Fundo - RS, durante os anos de 1979 a 2007.	109

LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem da folha do trigo (parte 1).	80
2	Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem da folha do trigo (parte 2).	81
3	Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem da folha do trigo (parte 3).	82
4	Descrição dos códigos genéticos utilizados pelo modelo CropSim-Wheat.	82
5	Dados climáticos médios dos meses de junho a outubro no período de 2000 a 2003.	90
6	Dados climáticos médios dos meses de junho a outubro no período de 2004 a 2007.	91
7	Análise da performance do modelo com os índices estatísticos MAE(Mean Absolute Error), MSE (Mean Square Error) e RMSE (Root Mean Square Error) comparando os valores simulados e observados nas três folhas superiores da planta no período 2000 à 2007. . . .	92
8	Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no modelo na amplitude de $\pm 20\%$ com interferência na produtividade do trigo.	93

- 9 Valores estimados de produtividade de uma cultivar hipotética de trigo imune e suscetível a ferrugem da folha (*Puccinia triticina*) e valor econômico (US\$) da diferença na produtividade em relação a área cultivada no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1979 à 2007 para a localidade de Passo Fundo, RS. 117
- 10 Valores estimados de produtividade de uma cultivar hipotética de trigo parcialmente resistente e suscetível a ferrugem da folha (*Puccinia triticina*) e valor econômico (US\$) da diferença na produtividade em relação a área cultivada no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1979 à 2007 para a localidade de Passo Fundo, RS. 118

RESUMO

MODELOS DE SIMULAÇÃO DA FERRUGEM DA FOLHA DO TRIGO: VALIDAÇÃO E IMPACTO ECONÔMICO

GUILHERME MALLMANN¹

RESUMO - O trigo (*Triticum aestivum* L.) dentre as diversas culturas, destaca-se como um dos alimentos mais importantes da humanidade, sendo cultivado nos quatro cantos do mundo e possuindo uma grande relevância econômica e social. Porém, a produtividade do trigo é muito variada, sendo afetada por muitos fatores, como as condições do solo, do clima, do manejo entre outras. Em algumas regiões, como o Brasil, a ocorrência de elevado número de doenças é um dos fatores mais importantes que contribuem significativamente para a redução do rendimento e da qualidade dos grãos. Dentre as doenças fúngicas que limitam a produção do trigo em todo o Brasil, destaca-se a ferrugem da folha causada por *Puccinia triticina*. A ferrugem da folha é uma das principais doenças desta cultura no mundo e de ocorrência comum no sul do Brasil. A doença desenvolve-se rapidamente quando há água livre nas folhas e temperaturas em torno de 20°C. Gerações sucessivas de uredosporos podem ser produzidas a períodos de 10 a 14 dias, se as condições forem favoráveis, sendo que, a chuva é considerada o fator condutor para a expansão da doença, pois o evento da chuva é, geralmente, seguido por um período estendido de água livre na folha, que é crítico para o processo de infecção da ferrugem. As perdas na produtividade em função da ferrugem da

¹Universidade de Passo Fundo - guifito@hotmail.com

folha podem chegar a 46% na cultura do trigo. Nas últimas décadas, a modelagem matemática de doenças de plantas, por exemplo, tem se expandido muito rapidamente, contribuindo para o manejo integrado. O uso de modelos de simulação de epidemias de ferrugem é uma ferramenta útil a tomada de decisões no manejo da doença. Deste modo, os objetivos deste trabalho foram: 1) calibrar e validar o modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento do trigo acoplado a um sub-modelo genérico de doenças que simula uma epidemia de ferrugem da folha e, 2) utilizar esse modelo para avaliar o impacto financeiro da resistência genética à ferrugem de cultivares de trigo no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram que o modelo simulou corretamente a planta de trigo e a severidade da ferrugem, indicando com eficiência os anos epidêmicos e pouco epidêmicos no comparativo com dados observados a campo. O custo financeiro da resistência genética na produtividade do trigo foi medido a partir da alteração dos parâmetros eficiência de infecção e fator de resistência do hospedeiro utilizados pelo modelo. Essa estimativa indicou um prejuízo financeiro médio anual para o período de 1979 à 2007 de US\$ 130.663.070,10 no caso da utilização de um cultivar totalmente suscetível em comparação a um cultivar imune para a área cultivada de trigo no Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

WHEAT LEAF RUST SIMULATION MODELS: VALIDATION AND ECONOMIC IMPACT

GUILHERME MALLMANN¹

ABSTRACT - The wheat (*Triticum aestivum* L.) among the different crops, draft as one the most important humanity foods, being grown in the four corners of the world and a great economic and social relevance. Therefore, the yield wheat is very changed, is affected by many factors, as soil condition, environment conditions, management crop, among others. In some places, like Brazil, the incidence of many diseases is one of the most important factors that significantly contribute in the grain yield and quality loss. Among the fungal disease that limiting the yield wheat throughout the Brazil, there is the leaf rust caused by *Puccinia triticina*. The leaf rust is a major wheat disease in the world and common occurrence in southern Brazil. The disease develops readily when there is free moisture and temperature around 20°C. The successive generations of uredospores can be produced for each period of 10 to 14 days, if conditions are favorable, where the rain is often considered a factor leading in disease expansion, because the event rain is followed by an extended leaf wetness period, which is critical for infection process of leaf rust. The yield losses due leaf rust may reach 46% in crop wheat.. In last decades, the mathematical modeling of disease in plants, for example, has been expanding very rapidly, contributing to integrated management. The simulation models from leaf rust epidemics is a useful tool to decision making in the disease management Thus, the objective this study was: 1)

¹Universidade de Passo Fundo - guifito@hotmail.com

calibrate and validate the simulation CropSim-Wheat model coupled in a generic sub-module disease than simulate a leaf rust epidemic, and, 2) use this model to assess financial impact of genetic resistance to leaf rust wheat cultivars in Rio Grande do Sul state. The results showed that model simulated correctly the plant growth and leaf rust severity, indicating the efficiency with little epidemics and epidemics years in comparison with data observed in the field. The financial cost of genetic resistance on yield wheat was measured with the parameters change of infection efficiency and resistance host factor used by the model. This estimate pointed an average annual financial loss from 1979 to 2007 period of \$ 130,667,070.10 for the use of a fully susceptible cultivar compared to a grown immune to the area sown to wheat in Rio Grande do Sul.

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) dentre as diversas culturas, destaca-se como um dos alimentos mais importantes da humanidade, sendo cultivado nos quatro cantos do mundo e possuindo uma grande relevância econômica e social. Botanicamente o trigo pertence ao gênero *Triticum*, família *Poaceae*. Este gênero apresenta um grande número de espécies. As espécies de maior importância sob o ponto de vista agrícola é *Triticum durum* e *Triticum aestivum*. O cultivo de trigo no Brasil, teve início no ano de 1534, com a vinda dos colonizadores europeus, na Capitania de São Vicente.

A produção comercial do trigo no estado do Rio Grande do Sul iniciou-se a partir de 1950, com o processo de modernização da agricultura, com a incorporação de máquinas e equipamentos agrícolas, em razão dos fortes subsídios governamentais daquela época. Após, o processo de produção avançou para os demais estados do Brasil, iniciando pelo oeste de Santa Catarina, seguido pelo Paraná, algumas regiões de São Paulo e, mais recentemente, para o centro-oeste brasileiro (BRUM; HECK, 2005).

Graças à atual tecnologia e à grande variedade de cultivares existentes, o trigo pode ser cultivado nas mais variadas condições climáticas, podendo, no Brasil, ser cultivado com sucesso desde a região sul até a região centro-oeste. Na região do Brasil central, dependendo da época do ano, duas opções de cultivo estão disponíveis, de sequeiro e o cultivo irrigado.

A produtividade do trigo é muito variada, sendo afetada por muitos fatores, como as condições do solo, do clima, e do manejo entre outras. Em algumas regiões, como o sul do Brasil, a ocorrência de elevado número de doenças é um dos fatores mais importantes que contribuem significativamente para a redução do rendimento e da qualidade dos grãos.

As perdas de rendimento de grãos por doenças na cultura do trigo são relativamente elevadas, podendo chegar a 44,6% (PICININI et al., 1996). O controle químico, quando usado, é através da pulverização de fungicidas na parte aérea da cultura via equipamentos terrestres ou em aeronaves. A eficiência de um fungicida selecionado para o controle de uma doença específica depende do momento da aplicação e da qualidade da pulverização. Fungicidas que aplicados na semente são translocados para os órgãos aéreos da planta e lá permanecem por um longo período e podem oferecer uma ação prolongada à entrada de patógenos (GOULART, 1998).

Dentre as doenças fúngicas que limitam a produção do trigo em todo o Brasil, destaca-se a ferrugem da folha causada por *Puccinia triticina* Erikss. (= *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici*). A doença desenvolve-se rapidamente quando há umidade livre e temperaturas em torno de 20°C. Gerações sucessivas de uredosporos podem ser produzidas a cada período de 10 a 14 dias, se as condições forem favoráveis. A chuva é freqüentemente considerada um fator condutor para a expansão da doença pois o evento é seguido por um período estendido de umidade da folha, que é crítico para a infecção da ferrugem (processo de penetração e germinação) (NIKS, 1986). Nas safras de 1994 e 1995 nos cultivares suscetíveis como o BR 34, houve perdas de até 80% em rendimento e de até 10 pontos percentuais no peso de mil sementes (PICININI; FERNANDES, 1995).

Segundo dados sobre perdas causadas pela ferrugem da folha obtidos em Passo Fundo, em parcelas experimentais de trigo no ano de 1982, as cultivares CNT 10 e IAS 54 produziram menos de 200 kg.ha⁻¹.

Na cultivar CNT 9 houve perdas de 37, 40 e 43%, respectivamente, de 1983 a 1985, devido a infecções da ferrugem da folha do trigo (PICININI; FERNANDES, 1995). O desenvolvimento das doenças foliares interfere diretamente no processo de fotossíntese, além de alterar o metabolismo das plantas, influenciando respectivamente o rendimento e a qualidade dos grãos de trigo (GOODING et al., 2000).

No Brasil, a maior parte do cultivo do trigo localiza-se na região sul, abrangendo os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Também é nestes estados que a cultura está sujeita às maiores adversidades climáticas, associadas à influência de fenômenos de grande escala, como o ENOS (El Niño Oscilação Sul).

A presença das fases do ENOS (El Niño e La Niña) altera significativamente a variabilidade interanual dos elementos meteorológicos. Em anos de ocorrência de El Niño, observam-se precipitações pluviométricas acima da média histórica para o sul do Brasil, principalmente na primavera e no início do verão (período de maturação e colheita do trigo), e em anos de La Niña a tendência é que ocorram estiagens no mesmo período para a região (FILHO et al., 1995; BERLATO; FONTANA, 2003; BERLATO et al., 2005).

Além dos fatores climáticos, a alegada falta de competitividade na cultura nos sistemas de produção têm sido uma das maiores dificuldades para que o Brasil se firme, de fato, como um país produtor de trigo. Os problemas são atinentes a aspectos da produção nacional, mas também têm relação com a importação de trigo de países que

oferecem subsídios aos seus produtores e à cadeia de comercialização de trigo.

O sistema de produção de trigo no Brasil é muito complexo, incluindo interações entre fatores bióticos e abióticos. Alguns desses podem ser modificados via manejo da cultura, entretanto o clima ainda exerce a maior influência sobre o rendimento final do trigo. Um dos grandes desafios da ciência agrônômica é a análise objetiva de um conjunto de fatores que atuam simultaneamente.

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 é uma 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).

Os modelos de simulação há mais de 60 anos têm auxiliado 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).

Apesar da existência de um grande número de modelos para a cultura do trigo, poucos reúnem, ao mesmo tempo, os efeitos das condições climáticas, das ocorrências de secas, pragas e doenças, das práticas de manejo da cultura e da fertilidade do solo, sobre o comportamento agrônômico e fisiológico da cultura. Isso ocorre em razão da complexidade envolvida e da falta de padronização nos desenvol-

vimentos dos modelos pelos cientistas. Modelos complexos, essencialmente mecânicos, do tipo de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas ligados à ocorrência, o curso e o risco de perdas na produção.

Entretanto, neste trabalho, o modelo de crescimento do trigo CSM-CropSim-CERES Wheat v.4.5 (aqui referido como CropSim-Wheat) aliado ao módulo de doença da ferrugem da folha, foi validado a partir de dados de campo e utilizado para avaliar a importância da resistência genética de cultivares na produtividade e/ou no rendimento final da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Trigo

O trigo (*Triticum aestivum*) é um cereal originário das regiões semi-áridas e temperadas da Mesopotâmia e Europa, cujo cultivo teve início nas lavouras primitivas do sudoeste da Ásia de 7000 à 9000 a.C. (BELL, 1987). É um cereal de grande importância, sendo fonte de 20% das calorias consumidas pela humanidade (ANGRA, 1995). Possui um destaque mundial, sendo a segunda cultura em produção de grãos, superada apenas pelo milho.

Botanicamente o trigo pertence ao gênero *Triticum*, família *Poaceae*. Este gênero apresenta um grande número de espécies. As espécies de maior importância sob o ponto de vista agrícola é *Triticum durum* e *Triticum dicocum*.

A domesticação e a produção de plantas modernas tem provavelmente estreitado a base genética do trigo (*Triticum aestivum*), o qual seria futuramente melhorado. Variedades tetraplóides de trigo domesticado foram derivadas de um único progenitor tetraplóide. Logo após a domesticação do *Triticum dicoccoides*, ocorreu a melhoria de suas formas com genótipos menos evoluídos. Espécies de trigo com genomas tetraplóides foram subsequentemente envolvidos em cruzamentos naturais com as espécies diplóides *T. tauschii*, doador do genoma “D”. Isto deu a ascensão para o trigo hexaplóide *T. aestivum*, também conhecido como trigo de pão (MCFADDEN; SEARS, 1946; SALAMINI et al., 2002).

O número de cruzamentos entre os progenitores de *T. aestivum* é considerado limitado (DVORAK et al., 1998; TALBERT et al., 1998), resultando presumivelmente em perdas de diversidade. Com o passar dos séculos, a mutação gerou novos alelos, enquanto a recombinação criou novas combinações de alelos. A variação genética foi subsequente reduzida pela impulsão e seleção genética, ambas de maneira natural, as quais eventualmente resultam em cultivares crioulas, adaptadas às condições específicas de seus habitats. Durante o século passado muitos dos tradicionais cultivares crioulas foram continuamente substituídos por modernas cultivares de trigo, que atualmente somente 3% da área cultivada de trigo é semeada com tais cultivares (SMALE et al., 2002). As cultivares modernas de trigo foram produzidas com um número limitado de cultivares crioulas em suas linhagens, e isto pressupõe que cultivares modernas contenham menos diversidade genética que as cultivares crioulas (FRANKEL, 1970; REIF et al., 2005).

Durante os últimos 100 anos, o desenvolvimento e o cultivo de trigo bem sucedido resultou em cultivares modernas de altos rendimentos nas quais está baseada a agricultura atual. Ainda que, ironicamente, este é um processo próprio para o cultivo de plantas que ameaçam a base genética em cima das quais depende a produção. Um relato realizado pela comissão da Academia Nacional de Ciências, em resposta ao desastre de manchas foliares no milho em 1970, recomendou dar mais ênfase na coleta e preservação da diversidade genética das espécies cultivadas (ANONYMOUS, 1972). Um dos resultados foi a fundação de bancos de germoplasma como o CIMMYT, onde uma grande quantidade de variedades de trigo são conservadas.

Graças à atual tecnologia e a grande diversidade de cultivares existentes, o trigo pode ser cultivado nas mais variadas condições cli-

máticas, podendo, no Brasil, ser cultivado com sucesso desde a região Sul até o Centro-Oeste. Na região do Brasil Central, dependendo da época do ano, duas opções de cultivo estão disponíveis: o cultivo de sequeiro e o cultivo irrigado.

Apesar dos esforços das pesquisas, dos reais avanços conquistados e da produção de apenas 50% das necessidades do consumo nacional, dificuldades ainda são encontradas pelos produtores de trigo no que diz respeito ao aumento da produção, dentre as quais estão o elevado custo de produção, a comercialização das safras e a incidência de um grande número de doenças (BRUM; HECK, 2005).

2.1.1 Doenças foliares no trigo

Mancha marrom

A doença é causada pelo fungo *Bipolaris sorokiniana* e tem como nomes comuns no Brasil helmintosporiose e mancha marrom. Os cereais de inverno hospedam *B. sorokiniana*.

Além da aveia, centeio, cevada, trigo e triticale, o fungo tem sido isolado, também, de lesões radiculares de algumas gramíneas forrageiras, invasoras e nativas (REIS et al., 1985a). Estes hospedeiros secundários podem contribuir para a infecção do solo (REIS, 1982; DIEHL, 1983).

O patógeno apresenta a peculiaridade de utilizar como substrato todos os órgãos dos cereais de inverno, decorrendo duas fases distintas da doença que são a interferência no processo fotossintético, quando o ataque ocorre em órgãos verdes como folhas, bainhas, colmos, glumas, aristas e sementes em formação (fase denominada de mancha marrom), a interferência na procura e absorção de água e nutrien-

tes, que constitui a fase da doença que ocorre em órgãos subterrâneos como raízes seminais, mesocótilos, raízes secundárias e coroa (fase denominada de podridão comum de raízes) (BEDENDO, 1995b).

Nas folhas, caracterizam os primeiros sintomas, pequenas manchas alongadas de cor marrom escura à negra. As manchas quando bem desenvolvidas são elípticas, apresentando abundante esporulação no centro. Quando as lesões coalescem, a folha fica crestada, seca e morre prematuramente (METHA, 1978).

Processo semelhante acontece na espiga, onde as espiguetas infectadas, quando, mortas, apresentam cor palha, tornando-se negras quando há frutificação do fungo (WIESE, 1977; METHA, 1978; ZIL-LINSKI, 1983). Sementes infectadas, originadas de espigas doentes, podem ou não exibir o sintoma de ponta preta, bem como apresentar aspecto enrugado (LUZ, 1982a).

Lesões de cor castanho-escuras verificam-se, nos nós e, às vezes, entre-nós, podendo ocorrer estrangulamento, com conseqüente quebra e morte da planta (METHA, 1978; PICININI; FERNANDES, 1995). Em condições climáticas favoráveis, epidemias de *B. sorokiniana* podem ser uma ameaça para o cultivo do trigo, principalmente para as áreas tropicais e subtropicais. Combinações de umidade e temperatura elevadas são responsáveis pela alta severidade desta doença (MEHTA et al., 1996). A temperatura ótima para a germinação dos conídios, crescimento micelial e esporulação é de 24 a 25°C (ANDERSEN, 1952; CLARK; DICKSON, 1958). Porém Filippova e Kashe-mirova (1992), relataram a temperatura ótima para a infecção de 22 a 30°C e a temperatura ótima para o desenvolvimento da doença em torno de 26°C.

Couture e Sutton (1978), relataram que a temperatura ótima para

a infecção de *B. sorokiniana* em trigo deve ser igual ou superior a 18°C e com duração do molhamento por 9 - 24 horas.

A disseminação do patógeno implica na movimentação do mesmo. Essa movimentação é proporcionada na maior parte dos casos, por agentes externos, que tem como principais representantes o ar, a água, o homem e os insetos (AMORIN et al., 1995). *Helminthosporium spp.* podem ser disseminados passivamente por propágulos aderidos externamente à superfície de semente (infestação), ou levados internamente nos tecidos das sementes do hospedeiro, através do micélio no pericarpo e no endosperma (infecção) (REIS, 1987), sendo que a disseminação está relacionada com o patógeno. Com relação aos propágulos do fungo que são disseminados no ciclo da doença, os principais agentes de disseminação de *B. sorokiniana* são o vento e os respingos de chuva, responsáveis pela condução dos conídios das lesões para outras folhas, plantas e o solo (REIS et al., 1988).

O agente causal da mancha marrom causa danos ao rendimento da cultura de trigo e ainda provoca a redução no tamanho de grãos colhidos (MATHRE, 1982). Reduções de rendimento na cultura de trigo de 16 a 33% tem sido relatada em cultivares suscetíveis (CLARK, 1979; WILCOXSON et al., 1990), embora grandes perdas são possíveis quando a doença ocorre na planta antes do estágio 45 (emborrachamento) (NUTTER et al., 1985).

Anderson e Banttari (1976) estudando o efeito de *B. sorokiniana* sobre o rendimento, peso de grão e ponta preta, concluíram que a incidência de ponta preta foi diferenciada em relação ao genótipo estudado. Os autores também relataram haver uma relação direta entre o rendimento e o peso de grãos com a incidência da ponta preta em genótipos resistentes e suscetíveis quando inoculados com *B. soroki-*

niana.

Wildermuth et al. (1992), afirmaram que o rendimento e o número de grãos foram altamente afetados com alta severidade da doença. Segundo os autores, perdas de rendimentos de 6,8 a 13,6% e 13,9 a 23,9% foram observadas em cultivares resistentes e suscetíveis, respectivamente.

Bayles (1997), demonstrou a redução da emergência das plântulas e o aumento da severidade de *B. sorokiniana* oriundos de sementes infectadas, além da presença de genótipos tolerantes a podridão comum de raízes. As perdas no rendimento nas cultivares testadas foram de 11,1% em cevada e 6,2% em trigo. O aumento da precipitação pluvial ou alta umidade relativa na fase final de desenvolvimento da cultura de trigo e rotação de cultura afetam principalmente o tamanho da semente e também promovem o aparecimento de agentes de doenças, como *Alternaria alternata* e *B. sorokiniana*. A ocorrência de *B. sorokiniana* se dá em todo o mundo, porém é mais grave em regiões tropicais, onde perda completa da produção de trigo tem sido reportado por causa desse patógeno.

Modelos dinâmicos que simulam o crescimento de culturas acoplados em modelos de dinâmica de patógenos, desde que validados, podem ser extremamente úteis no suporte à tomada de decisões no manejo de doenças. A expansão de lesões é um aspecto importante no desenvolvimento das epidemias de manchas foliares. O uso de imagens digitais associadas a um software de reconhecimento possibilita medir um grande número de lesões com precisão e rapidez.

Dessa maneira, pode-se determinar a taxa de expansão das lesões causadas por *B. sorokiniana* e *Stagonospora nodorum* para um grupo representativo de cultivares de trigo.

Além dos modelos de previsão de doenças, o uso de sementes saudáveis, ou seja, que não apresentam níveis de infecção maiores que 5,0%, ou o tratamento de sementes com fungicidas, associado a rotação de culturas, também são métodos eficientes de controle da doença. A resistência genética é o método mais eficiente e econômico de controle da mancha marrom do trigo, e por fim os fungicidas inibidores da biossíntese de ergosterol (IBE), como os triazóis, também são utilizados no controle da mancha marrom do trigo (PICININI; FERNANDES, 1995).

Septoriose ou mancha das glumas

O fungo *Stagonospora nodorum* (Berk.) E. Castell. & Germano sin. *Septoria nodorum* (Berk.) Berk. em Berk. & Broome (teleomórfo *Phaeosphaeria nodorum* (E. Mull.) Hedjar. sin. *Leptosphaeria nodorum* E. Müll) causa a doença comumente denominada de septoriose, mancha das glumas e dos nós do trigo ou mancha de *Stagonospora*. A *Stagonospora nodorum* pode infectar outras gramíneas além do trigo. Alguns isolados do patógeno ficaram especializados, na cevada por exemplo.

A mancha da gluma pode ocorrer nas folhas, no colmo, brácteas florais e pericarpo (WILLIANS; JONES, 1972). Os sintomas nas folhas, nos colmos e nas espigas são característicos, pois as lesões aumentam rapidamente deixando perceber, após cerca de duas semanas, pontuações escuras no centro que são os picnídios.

Nas folhas, os sintomas de manchas foliares característicos da doença, surgem após 8 a 9 dias, como consequência da penetração do fungo. Os sintomas iniciais são pequenas manchas cloróticas que surgem primeiro nas folhas inferiores, especialmente naquelas que entram

em contato com o solo. Apresentam uma forma elíptica, as vezes fusiforme, de cor castanha a castanho escuro (METHA, 1993).

As lesões tornam-se amarelas e, por último, pardo-avermelhadas (REIS, 1987). O patógeno avança nos tecidos mortos, mas a necrose observada estende-se além das células aparentemente colonizadas, devido à difusão de toxinas, septorina e ocracina, que contribuem na expressão dos sintomas. A septorina induz alterações na atividade respiratória, enquanto a oracina inibe a fotossíntese e diminui a abertura estomática (EYAL et al., 1987). Estas toxinas provavelmente sejam mais móveis paralelo ao eixo da folha (KENT; STROBEL, 1976). Em regiões relativamente secas, *S. nodorum* pode desenvolver-se dentro da bainha foliar, causando o anelamento e subsequente morte da folha.

Nos colmos e bainhas formam-se manchas de coloração castanho escuras a negras. Estas manchas são lineares e quase retangulares, sem picnídios (MEHTA, 1978). Os nós infectados tornam-se escuros ou castanho escuros, com a evolução da doença e desenvolvimento do patógeno, os nós adquirem uma aparência salpicada devido a formação de picnídios. O fungo pode provocar o enfraquecimento dos nós, os quais podem quebrar-se provocando acamamento das plantas (MEHTA, 1978). As infecções nos nós causam mais perdas no rendimento de grãos do que quando o ataque ocorre em folhas.

Nas glumas ocorrem pequenas manchas castanhas irregulares, geralmente, na parte superior externa. Estas manchas, com a evolução da doença, aumentam o diâmetro e tornam-se castanhas, formando-se os picnídios. Nas glumas, geralmente, as lesões são mais escuras que nas folhas e colmos. Em caso de ocorrência severa, as espigas ficam completamente atacadas e tanto glumas, lemas e aristas tornam-se

infectadas (REIS, 1987).

A esporulação de *Stagonospora nodorum* ocorre na presença de luz. Períodos prolongados de escuro inibem a esporulação. Em condições artificiais, ciclos alternados de 12 horas de luz e 12 horas de escuro são ideais para uma intensa esporulação. A germinação e infecção de picnidiosporos em trigo ocorrem com temperaturas que variam entre 15 e 22°C e com umidade relativa acima de 98% (RAPILLY; SKAJENNIKOFF, 1974). A produção de picnídios está associada a fatores ambientais, principalmente temperatura e meio nutricional (RICHARDS, 1951). O período de molhamento na folha é o fator essencial para a germinação e infecção dos picnidiosporos. No entanto, o período ótimo de umidade pós-inoculação para a maioria das cultivares é de 72 a 96 horas com a temperatura em torno de 20°C (REIS, 1987).

Inicialmente, a distribuição da mancha da gluma é restrita a algumas plantas isoladas, porém com a disseminação rápida da doença para as plantas vizinhas a distribuição no campo passa a ser generalizada. No Brasil, o inóculo é endógeno a doença começa nas folhas de baixo progredindo para as folhas superiores a medida que a infecção progride. No caso do inóculo ser proveniente de fontes externas através de ascosporos, ou seja, distribuição horizontal pelo vento, a infecção pode ser maior nas folhas superiores do que nas inferiores. A disseminação da doença pode ser muito rápida quando as condições forem muito favoráveis, pois um picnídio pode produzir até 300.000 picnidiosporos. A monocultura permite a sobrevivência dos patógenos necrotróficos nos resíduos culturais durante a sua fase saprofítica. A incidência de doenças é menor sob rotação de culturas do que em monocultura, sempre que a duração da rotação possibilite a decomposição dos restos culturais (REIS et al., 1997; PRESTES et al., 1999).

Ambas as espécies, *Stagonospora nodorum* e *Septoria tritici*, podem reduzir a produtividade do trigo de 40 a 45% (BRONNIMAN, 1968; SHARP et al., 1972), chegando em alguns casos a 70% (JONES; ODEBUNMI, 1971). Na Alemanha uma epidemia severa causou danos no rendimento de grãos de 10 a 30% (OBST, 1980). Danos entre 33 e 90%, também, foi registrada na província de Buenos Aires (ANNONE, 1990). No Brasil, foram citados danos anuais entre 10 a 20% devido a esta doença (PRESTES, 1990). Segundo Eyal et al. (1987) danos podem chegar a 30% devido, principalmente, a não formação completa do grão, resultado da redução da fotossíntese.

S. nodorum é capaz de afetar o rendimento de grãos tanto nos primeiros quanto nos últimos estádios de desenvolvimento da planta de trigo (JONES; ODEBUNMI, 1971). Desse modo, a importância de uma cultivar, embora mais suscetível na espiga que outra, oferecer alguma resistência nos estádios anteriores ao florescimento, está no fato dela contribuir para menor produção de inóculo.

Tem sido observado que infecções severas nos estádios de plântula podem reduzir o afilamento, contribuir para menor estatura dos colmos e menor tamanho de espigas, devido à redução do potencial fotossintético e bloqueio do sistema condutor pelo estrangulamento dos nós. Quando a infecção tem início na emergência da espiga ocorrem as maiores perdas no rendimento de grãos. Com a ocorrência de grande precipitação pluvial durante a formação do grão, a incidência e a severidade do patógeno aumenta significativamente (LEATH et al., 1993). A contribuição fotossintética da espiga é de 29%, da folha bandeira 23% e as duas folhas mais novas de 13%. Portanto, a infecção da espiga e das últimas três folhas resulta num total de 65% de danos (REIS, 1987). De um modo geral, os danos afetam o rendimento mais intensamente quando a incidência da doença ocorre entre

o florescimento e o espigamento (BRONNIMAN, 1968; WILLIAMS; JONES, 1972).

No Brasil, Silva (1966) relatou que temperaturas elevadas com excesso de umidade relativa na primavera, entre o espigamento e o amadurecimento do trigo, são condições favoráveis ao ataque da doença, podendo até causar desfolhamento das plantas.

Cooke e Jones (1971) verificaram que *S. nodorum* foi capaz de causar grande intensidade de doença resultando em chochamento dos grãos. O mínimo de esporos de *S. nodorum* é suficiente para causar alta infecção na fase de florescimento (JONES; COOKE, 1969). Portanto, a incidência depende do estágio de desenvolvimento da planta, da concentração de inóculo e das condições climáticas para a infecção.

As medidas gerais de controle recomendadas para a cultura do trigo são rotação de culturas, controle fitossanitário e uso de variedades resistentes. A prática de rotação de culturas deve ser utilizada para manter o inóculo do patógeno em níveis baixos (PRESTES et al., 1999).

No controle químico o tratamento de sementes é feito para a eliminação de umas das fontes de inóculo primário. Os fungicidas inativam o fungo presente nas sementes e, se o fungicida for sistêmico, protege as folhas em desenvolvimento (FRY, 1982). O controle de *Stagonospora nodorum* deve ser iniciado quando, a partir do estágio de alongação, quando o nível de infecção atingir 5% (PICININI; FERNANDES, 2001).

Assim como para *B. sorokiniana*, no caso da *S. nodorum*, também pode ser utilizado modelos que simulam o crescimento da cultura acoplados em modelos de dinâmica de patógenos, como é o caso do

SISALERT, um sistema computacional que tem como finalidade auxiliar na tomada das decisões mais corretas e em programas de manejo de culturas. Ele utiliza modelos sofisticados de estimação de risco de ocorrência de doenças e pragas que se beneficiam da capacidade das estações automáticas e de coletar e distribuir dados de tempo a pequenos intervalos e da previsão climática em intervalos horários.

Mancha amarela

A mancha amarela ou bronzeada é causada pelo fungo *Drechslera tritici-repentis* (Died) Shoemaker, sinônimos *Helmintosporium tritici-repentis* Diedicke, *D. tritici-vulgaris* (Nisikado) Ito e *H. tritici-vulgaris* (Nisikado), forma imperfeita ou anamórfica. A forma perfeita ou teleomórfica corresponde a *Pyrenophora tritici - repentis* (Died.) Drechs. (sinônimo *P. trichostoma* (Fr.) (Fckl.)) (WIESE, 1987).

Os principais hospedeiros de *D. tritici-repentis* são o centeio, o trigo e o triticale (REIS et al., 2001). O trigo é o hospedeiro mais importante, porém existe uma ampla gama de hospedeiros secundários (REIS; CASA, 1996). Embora possam existir outros hospedeiros, a principal fonte primária de inóculo é originado de restos culturais de trigo que haviam sido infectados com *D. tritici-repentis* no ano anterior (PICININI; FERNANDES, 1995).

Os sintomas iniciais aparecem como pequenas manchas cloróticas nas folhas, que aumentam e adquirem um formato elíptico de, aproximadamente, 12mm de comprimento. Evidencia-se a presença de um halo amarelo ao redor da lesão que apresenta o centro de cor parda (REIS et al., 2001).

Conforme Reis e Casa (1996) os primeiros sintomas podem surgir

24 a 48 horas após a inoculação, porém uma diagnose segura deve ser realizada com base nos sinais, formação de conídios, evitando-se confundi-la com a mancha foliar causada por *Septoria* que forma picnídios.

A mancha bronzeada ou mancha amarela da folha do trigo é conhecida como a doença do plantio direto. Aparece geralmente nos estádios iniciais da planta formando, nas folhas, lesões ovais ou oblongas, amareladas ou de aspecto bronzeado que coalescem tornando-se de coloração marrom clara à marrom escura. No centro das manchas, sob condições de umidade, são observados os conidiofóros do fungo, de coloração marrom escura (PICININI; FERNANDES, 1995).

O patógeno causador da mancha amarela do trigo *D. tritici-repentis*, é introduzido na lavoura através do uso de sementes infectadas, forma pela qual o patógeno é levado a longas distâncias. Após sua entrada em uma área ou região, sua sobrevivência pode ser garantida nos resíduos culturais pela produção de pseudotécios (*P. tritici-repentis*) ou conídios (*D. tritici-repentis*). Assim, a semente infectada e a presença de restos culturais infectados serão as principais fontes de inóculo primário para o próximo cultivo (REIS; CASA, 1996).

Os respingos de chuva e o vento fazem a disseminação dos ascósporos e conídios a curtas distâncias (REIS et al., 2001). Tanto os conídios quanto os ascósporos são infectivos e, ao atingirem a superfície verde da planta, iniciam a infecção na presença de água líquida, sendo o período de molhamento requerido de 6 a 48 horas (REIS et al., 2001; WIESE, 1987). Segundo Reis et al. (2001), a temperatura ótima para o desenvolvimento da doença está entre 18 e 28°C e, para

a infecção, 30 horas de molhamento. Os conídios produzidos sobre as lesões serão a fonte de inóculo secundário (WIESE, 1987).

Na Austrália Rees e Platz (1983) estimaram danos devido à doença de 13 a 48%, sendo grande parte da redução da produtividade devido a redução do tamanho dos grãos. No ano de 1991, Picinini e Fernandes (1992) avaliando o controle de manchas foliares com fungicidas, verificaram rendimentos de 46 à 59% superiores aos da testemunha, quando a predominância foi de mancha amarela em folhas de trigo.

O desenvolvimento e a implementação de medidas de controle na cultura do trigo requerem informações precisas e acuradas sobre o dano causado pelos patógenos.

Waggoner e Berger (1987) afirmam que a lógica da relação entre severidade de doença e dano é incerta, pois severidade de doença, considerada isoladamente, tem efeito diferente caso ocorra precoce ou tardiamente numa planta, seja porque a desfolha não é considerada, seja porque a área foliar das plantas é ignorada, ou ainda, porque a fisiologia nos ensina que a produtividade depende de área sadia, verde, fotossintetizante das folhas (CHARLES-EDWARDS, 1982), não da área doente, necrosada, depauperada, ocupada pelo patógeno.

Estimar danos por meio de observações de doenças é extremamente difícil. A severidade dos sintomas visuais pode ser resultante de diferentes alterações na fisiologia da planta, o efeito depende do que aconteceu com a planta no passado, do que está acontecendo no presente e do que vai acontecer no futuro. Portanto, uma estratégia de prever danos é o emprego da simulação que usa modelos matemáticos de crescimento da planta em relação ao ambiente em que ela se encontra e, também, simula as alterações produzidas pelo pató-

geno no crescimento, na fisiologia, e as consequências no rendimento (SHAW, 1997).

Outro método de controle é o uso de fungicidas inibidores da biosíntese do ergosterol, como os triazóis e estrobirulinas, que apresentam efeito erradicante no controle da mancha amarela do trigo. O controle eficiente, entretanto, é utilizado no momento em que a severidade da mancha amarela for inferior a 5,0 %.

Ferrugem da folha do trigo

A ferrugem da folha é uma das principais doenças desta cultura no mundo e de ocorrência comum no sul do Brasil. O fungo que causa a ferrugem da folha cresce apenas em hospedeiros vivos. A ferrugem da folha pode atacar o trigo, triticale, cevada e muitas outras gramíneas relacionadas. Entretanto, o papel destas espécies como hospedeiros funcionais na natureza ainda não é claro para a “forma *specialis*” *tritici*, mas talvez isso não ocorra em condições de campo.

O fungo causador da ferrugem é um patógeno de planta altamente especializado, com gamas de hospedeiros de gramíneas. Nos primeiros registros, a ferrugem da folha do trigo não é distinta da ferrugem do colmo, denominada *Puccinia graminis*. Porém, a ferrugem da folha do trigo era causada por um fungo distinto chamado *Uredo rubigovera*. O patógeno sofreu várias mudanças no nome até que Cummins e Caldwell (1956) sugeriram que o nome poderia ser *Puccinia recondita*, que foi a nomenclatura geralmente usada. De acordo com estudos morfológicos por Savile (1984), morfológicos e genéticos por Anikster et al. (1997), *Puccinia recondita* não é a ferrugem da folha e sim a *Puccinia triticina*. Os nomes científicos oficiais aplicados aos fungos devem estar de acordo com as regras de nomenclatura botânica. Es-

tas especificam que quando uma espécie nova é nomeada, um tipo de espécime está designado, e com poucas exceções, o nome novo da espécie é associado para sempre com este tipo de espécime. Mesmo que o nome *Puccinia recondita*, tenha sido aplicado mais tarde à ferrugem da folha do trigo, a ferrugem da folha do centeio tem a prioridade. Primeiramente, *P. triticina* e *P. recondita* produzem seus estágios axiais em plantas de diferentes hospedeiros. A alternância de hospedeiros para *P. triticina* incluem os gêneros *Thalictrum*, *Isopyrum* e *Clematis*, da família Ranunculaceae. A alternância de hospedeiros para *P. recondita* inclui os gêneros *Anchusa*, *Echium*, e *Lycopsis* da família Boraginaceae. As tentativas extensivas de fertilidade do picnia da *P. triticina* com picnidiosporos de *P. recondita*, e vice-versa falharam completamente, indicando que *P. triticina* e *P. recondita* não podem ser hibridizados, mesmo sob condições de laboratório. Em segundo, os teliosporos de *P. triticina* são significativamente menores do que os de *P. recondita*. Por exemplo, nas comparações que envolveram 34 coleções de *P. triticina* de dez países e 32 coleções de *P. recondita* de quatro países, a largura média dos teliosporos de cada coleção de *P. triticina* foi menos do que a largura média e a menor encontrada para *P. recondita*. Em terceiro lugar, o genoma de *P. triticina* tem menos DNA do que o genoma de *P. recondita*. Nem toda ferrugem da folha no trigo é uma *P. triticina* (ANIKSTER et al., 1997).

Os sinais da ferrugem da folha são caracterizados pela presença de pústulas de formato ovalado, de coloração amareladas disseminadas predominantemente na região adaxial do limbo foliar (ROELFS, 1985). As pústulas (uredosporos) rompem a epiderme, porém sem dilacerar o tecido do hospedeiro. Os uredosporos são de coloração laranja escuro, equinulados e esféricos. Os teliosporos são de coloração café com paredes celulares planas, espessas e arredondadas no ápice.

Os teliosporos se formam nas bainhas e nas folhas durante as últimas etapas de desenvolvimento do trigo.

A ferrugem da folha é disseminada pelo vento e sobrevive em plantas hospedeiras no intervalo entre cultivos de trigo. A germinação dos esporos ocorre com períodos de 8 horas de molhamento por orvalho, chuva ou irrigação na superfície das folhas. Em torno de 7 a 10 dias da penetração do tubo germinativo ocorre a esporulação da ferrugem, que é o sinal mais conhecido, por leigos, nas condições de campo. Os fatores mais importantes que determinam o progresso mais rápido ou mais lento de epidemias de ferrugem da folha incluem o ambiente, a frequência de raças virulentas, o momento de aplicação e o modo de ação dos fungicidas, assim como o nível de resistência genética de cada cultivar (SACHE, 2000).

A dispersão no local, dos uredosporos é influenciada pela latitude e os padrões de vento respectivos. Em geral, os esporos movem-se de oeste a leste devido aos ventos que são o resultado da rotação da terra. Em latitudes progressivamente altas, os ventos tendem a levar os esporos mais do Sul para o Hemisfério Norte.

Em dias quentes o ar tende a subir dentro do dossel, e quando a umidade for alta, menos esporos deixam a urédia. Os ventos calmos secam o dossel, agitam as folhas liberando os uredosporos das urédias. Altas velocidades dos ventos podem resultar na liberação de mais esporos, porém areja rapidamente e dilui a concentração sobre o dossel e pode ser mais importante gerando transporte e escape do local. A chuva precipita uredosporos do ar, enquanto deposita nas plantas água livre. Porém, a chuva também pode lavar os esporos das superfícies da planta, e a alta umidade restringe o movimento do esporo. Outro fator importante é a mudança de temperatura devido à chuva influenciando

o progresso da doença (SACHE, 2000).

A doença desenvolve-se rapidamente quando há umidade livre e temperaturas em torno de 20°C. As próximas gerações sucessivas de uredosporos podem ser produzidas a cada período de 10 a 14 dias, se as condições forem favoráveis. A chuva é considerada freqüentemente um fator condutor para a expansão da doença pois o evento da chuva é seguido por um período estendido de umidade da folha, que é crítico para a infecção da ferrugem (processo de penetração e germinação) (NIKS, 1986). Além da influência direta da chuva na expansão da epidemia, há a remoção dos esporos da ferrugem do cereal através de gotas da chuva. A chuva é menos eficaz para a remoção do esporo inicial, e pode ser muito mais eficaz na expansão da doença. A chuva se for intensa, provavelmente será mais eficiente, principalmente se associada com ventos fortes. Quando há uma brisa, aumenta a distância de dispersão de esporos removidos durante os eventos da chuva, pode influenciar a expansão da infecção em escalas maiores. A importância relativa do vento e da chuva como agentes de dispersão é difícil de avaliar desde que ambos os agentes operam em escalas temporais e de espaços diferentes (SACHE, 2000).

Segundo Picinini e Fernandes (2003), o trigo no Brasil é hospedeiro de grande número de doenças e as condições climáticas, onde predominam temperaturas altas e precipitações pluviais freqüentes, favorecem o desenvolvimento de inúmeras doenças, principalmente aquelas causadas por fungos. Essas podem ser responsáveis por perdas elevadas no rendimento e na qualidade dos grãos de trigo. O volume de perdas é variável de ano para ano, dependendo das condições climáticas. Alguns trabalhos, no entanto, demonstraram que em 12 anos de experimentação houve uma perda média de 44,61%, equivalente a 1152 kg (19,2 sacas de 60 kg) de trigo por hectare, atri-

buída as doenças fúngicas. Nas safras de 1994 e 1995 nos cultivares suscetíveis como o BR 34, houve perdas de até 80% em rendimento e de até 10 pontos percentuais no peso de mil sementes (PICININI; FERNANDES, 1995).

Segundo dados sobre perdas causadas pela ferrugem da folha obtidos em Passo Fundo, em parcelas experimentais de trigo no ano de 1982, as cultivares CNT 10 e IAS 54 produziram menos de 200 kg.ha⁻¹. No cultivar CNT 9 houve perdas de 37, 40 e 43%, respectivamente, de 1983 a 1985, devido a infecções da ferrugem da folha do trigo (PICININI; FERNANDES, 1995). O desenvolvimento das doenças foliares interfere diretamente no processo de fotossíntese, além de alterar o metabolismo das plantas, influenciando, assim, o rendimento e a qualidade dos grãos de trigo (GOODING et al., 2000).

Dentre as medidas de controle o uso de cultivares resistentes, a eliminação de plantas voluntárias e de hospedeiros secundários, auxiliam na redução do patógeno. Além destas práticas, o controle químico também é bastante utilizado, com produtos triazóis e a mistura de triazóis com estrubirulinas que apresentam maior eficiência. O desenvolvimento e a implementação de medidas de controle na cultura do trigo requerem informações precisas e acuradas sobre o dano causado pelos patógenos. Portanto, uma estratégia confiável de prever danos é o emprego de simulação que usa modelos matemáticos de crescimento da planta em relação ao ambiente em que ela se encontra e, também, simula as alterações produzidas pelo patógeno no crescimento, na fisiologia, e as conseqüências no rendimento (SHAW, 1997).

Oídio

O oídio do trigo, causado pelo fungo *Blumeria* (sin. *Erysiphe*) *graminis* DC. Speer f.sp *tritici* Marchal, é a primeira doença fúngica foliar que ocorre na cultura na Região Sul do Brasil (REIS et al., 1988). Atualmente houve um aumento na ocorrência e na intensidade da doença, não somente no trigo, como também na cevada, o que vem preocupando produtores e pesquisadores. O fungo que causa o oídio cresce apenas em hospedeiros vivos e apresenta um elevado grau de especialização, os isolados do fungo que atacam o trigo são específicos para o trigo e o mesmo ocorre para a cevada, aveia e o centeio. Além da “forma specialis” existem também várias raças do fungo.

O sintoma típico do oídio no trigo é a formação algodonosa devido a massa de micélio e conídios do fungo. Com a evolução da doença são observadas pequenas manchas brancas que coalescem tornando-se de coloração acinzentada com pontículos escuros, denominados de cleistotécios. Sob o micélio, observa-se uma clorose, após a clorose a atividade do fungo declina. Em ataques intensos da doença, toda a planta é afetada, iniciando-se a infecção na base da planta chegando até a espiga, porém a presença de sinais do patógeno é mais comum em folhas e bainhas foliares (PICININI; FERNANDES, 1995).

Por ser um fungo biotrófico, o fungo sobrevive em plantas voluntárias do trigo, sendo que a germinação dos conídios não requer umidade sobre a folha, ao contrário, sendo inibida na presença de água livre. A disseminação da massa branca de esporos denominados de conídios ocorre principalmente pelo vento, podendo ser levados a grandes distâncias, sendo que temperaturas em torno de 17°C, altas densidades de plantas e doses excessivas de nitrogênio favorecem a ocorrência da doença (REIS; CASA, 2005).

O oídio do trigo ocorre de forma endêmica em áreas tritícolas de clima frio e úmido no Brasil, especialmente na Região Sul e em lavouras sob sistema irrigado nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. É citado como problema no Leste dos EUA e em países do Cone Sul da América do Sul e da Europa (LINHARES, 1988a., 1988b., 1988c.; KOHLI, 1996; MCINTOSH, 1998; NIEWOEHNER; LEATH, 1998).

Porém essa doença pode ocasionar danos significativos na produção de grãos, dependendo das condições climáticas, da resistência genética das cultivares em uso e da aplicação de fungicidas. Foram registrados danos de 10 a 14% (LINHARES, 1988a.), de 34 a 62% (FERNANDES et al., 1988) e de 39% (REIS et al., 1997) no rendimento do trigo afetado por oídio, nas condições de Passo Fundo, RS.

O uso de cultivares de trigo com resistência genética é a forma menos dispendiosa de controle da doença. Com esse objetivo, melhoristas de trigo tem tentado introduzir resistência em cultivares comerciais, porém baseando-se na ação de um ou de poucos genes que apresentem efetividade total contra o oídio. O fungo também pode ser controlado pelo uso de fungicidas sistêmicos em tratamento de sementes e/ou pulverizações de órgãos aéreos da planta (REIS et al., 1997).

Ferrugem do colmo

A doença é causada por *Puccinia graminis tritici* Erick & Henn. espécie fisiológica de *Puccinia graminis* Pers., da família *Pucciniaceae*, ordem *Uredinales*, da classe dos Basidiomicetos.

Puccinia graminis tritici é uma espécie de fungo parasita obrigatório, heteróica, de ciclo completo e heterotálica. Diz-se que uma

ferrugem é de ciclo completo quando apresenta todas as formas de reprodução (sexual e assexual); heteróica, quando, para completar o ciclo, necessita da ocorrência de duas diferentes espécies vegetais; e heterotática, quando, para completar o ciclo sexual, necessita de talos com diferentes cargas genéticas de acasalamento. No caso da ferrugem do colmo do trigo, o fungo forma sobre o trigo, primeiramente, a fase uredospórica e, depois, a teliospórica. *P. graminis tritici* é um dos fungos mais intensamente investigados quanto a sua especialização fisiológica. Através do seu estudo é que se foram fixando os atuais conceitos de espécies fisiológicas, raças fisiológicas e biótipos. De seu estudo resultou o conhecimento da complexidade e variabilidade dentro de espécies fúngicas.

P. graminis tritici é uma das espécies fisiológicas ou variedades de *P. graminis*, existindo pelo menos 6 diferentes espécies fisiológicas, diferenciadas principalmente pela gama de hospedeiros: *tritici* (trigo), *secalis* (centeio e cevada), *avenae* (aveia), *phleipratensis* (*Phleum pratense*), *agrostidis* (*Agrostis* spp) e *poae* (*Poa pratensis* e espécies correlatas) (CARDOSO; KIMATI, 1980).

Os sintomas primários da ferrugem começam a aparecer 2 a 3 dias após a penetração do fungo, na forma de uma mancha puntiforme levemente amarelada. A medida que o fungo se desenvolve nos tecidos da planta, essa mancha vai se tornando saliente, aumenta de tamanho, toma uma conformação alongada no sentido das nervuras, formando pústulas ou soros, cuja epiderme se rompe expondo os uredosporos, individualmente de coloração amarelada e no conjunto pardo-ferruginosa. No fim do ciclo vegetal do trigo, quando sobrevem um frio imenso, os soros passam a produzir os teliosporos, individualmente castanho-escuros, mas que no conjunto parecem pretos. Daí a razão de também se chamar a ferrugem preta do trigo. Os soros ocor-

rem principalmente no colmo e na bainha foliar se bem que possam afetar também o limbo e, em condições climáticas favoráveis, toda a parte aérea da planta (CARDOSO; KIMATI, 1980).

A ocorrência desta ferrugem se dá normalmente na fase de espigamento do trigo. O desenvolvimento da doença é favorecido por condições de temperatura entre 19 a 25°C e alta umidade, sendo a chuva ou orvalho noturno indispensáveis. Os uredosporos produzidos são facilmente transportados pelo vento, os teliosporos formam basidiosporos que infectam plantas da espécie *Berberis vulgaris*. Nos locais onde esta planta não existe, como na América do Sul, o ciclo deste patógeno se interrompe neste ponto. Portanto, os uredosporos fornecem o inóculo primário para iniciar as epidemias a cada safra, estes infectam o trigo somente através dos estômatos, por onde o fungo forma um apressório, penetra o hospedeiro e começa efetivamente a infecção.

Epidemias explosivas podem ocorrer durante condições ambientais favoráveis, causando danos de 50 a 70% em uma região. Os danos decorrem de várias razões, o fungo absorve nutrientes dos tecidos da planta, os quais seriam usados na formação de grãos em uma planta sadia. Com a formação da pústula no tecido epidérmico, fica afetada a transpiração e o metabolismo se torna menos eficiente.

O uso de variedades resistentes, é o método de controle preferencial, por ser o mais prático, apesar de, na obtenção dessas variedades, ser necessário levar em consideração a complexidade do problema. Existem várias variedades resistentes às raças mais freqüentes e encontradas em determinadas regiões. O uso de variedades precoces e plantio em época adequada também podem diminuir o prejuízo da ferrugem. Outro método importante é o controle químico, através do

uso de fungicidas (CARDOSO; KIMATI, 1980).

Barley yellow dwarf virus - BYDV

Esta virose está mundialmente associada aos cultivos de aveia, trigo e cevada. No Brasil, relatos de sua ocorrência estiveram sempre associados a cultura do trigo (KIMATI et al., 1997). O BYDV/CYDV (*Cereal yellow dwarf virus*) são duas viroses transmitidas por vetores afídeos e freqüentemente encontradas em cereais. Cerca de 150 espécies de gramíneas da família Poaceae são suscetíveis a estas viroses. BYDV/CYDV são diferenciados pelas espécies dos afídeos vetores, cada qual é transmitido por apenas uma ou poucas espécies de afídeos.

O BYDV infecta uma extensa gama de membros da família Poaceae, a qual é a única família de plantas suscetíveis ao ataque do vírus. Aproximadamente 100 espécies anuais e perenes são hospedeiras do vírus no mundo todo, fato este que contribui para perpetuar a enfermidade no campo (BURNETT et al., 1995). Algumas das espécies de cereais de importância agrônômica como cevada (*Hordeum vulgare* L.), aveia (*Avena sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), trigo duro (*Triticum turgidum* L.), arroz (*Oryza sativa* L.), milho (*Zea mays* L.), e centeio (*Secale cereale* L.) são suscetíveis ao BYDV. Porém os cereais de inverno, trigo, triticale, cevada e aveia, estão mais sujeitos a redução na produtividade (BURNETT et al., 1995).

Os sintomas induzidos pelos luteovírus são freqüentemente dificultados pela semelhança de sintomas causados por outros patógenos, deficiência nutricional e baixas temperaturas (MILLER; RASOCHOVA, 1997), ou com distúrbios fisiológicos, como estresse hídrico devido ao encharcamento do solo. Na aveia os sintomas caracterizam-se por alterações na cor normal da folha, a qual torna-se clorótica,

amarelo intensa e, principalmente, roxo-avermelhada. Estes sintomas só se manifestam em folhas que se desenvolvem após a infecção viral e, normalmente evoluem da parte mediana da folha até a sua extremidade (KIMATI et al., 1997).

Em trigo, centeio, cevada e triticale os efeitos do BYDV são semelhantes. Quando a inoculação acontece na fase de plântula, os sintomas apresentados são clorose e nanismo. Em estádios mais avançados, as folhas se tornam amareladas, podendo mostrar um leve avermelhamento, sendo que algumas vezes as margens das folhas de trigo podem ser serrilhadas. Em lavouras de trigo infectadas, as espigas permanecem eretas e podem se tornar pretas ou descoloridas durante o amadurecimento, devido à presença de fungos patogênicos. Na aveia, as folhas se tornam avermelhadas ou adquirem uma intensa coloração púrpura, às vezes acompanhadas pelo enrijecimento da planta (BURNETT, 1983).

Todos os vírus da família Luteoviridae, incluindo o BYDV, são transmitidos de forma persistente por afídeos, sendo adquiridos através da ingestão da seiva do floema das plantas infectadas (GILDOW, 1983). Outonos amenos favorecem a multiplicação dos afídeos de gramíneas causando danos significativos. A existência de plantas hospedeiras com bom crescimento para servir de abrigo e alimento para os afídeos durante este período e na primavera é importante (CAETANO, 1972). A temperatura pode influenciar a transmissão das espécies do BYDV. A transmissão de RMV por *Rhopalosiphum padi* (L.), *Sitobium avenae* (Fabricius), aumentou de 6% e 11% a 15°C para um máximo de 70% e 80% a 30°C, respectivamente para cada afídeo (ROCHOW, 1969).

No caso do BYDV, os danos em plantas infectadas estão rela-

cionados principalmente com o nanismo da planta, o tamanho das espigas, o número e o peso dos grãos. As alterações no crescimento e nos teores de clorofila refletem-se em mudanças na anatomia, na citologia e na fisiologia de plantas infectadas pelo BYDV (JENSEN; D'ARCY, 1995). A perda total da colheita não é incomum (PLUMB, 1981). Em trigo, danos de até 63% foram observados no ano de 1999 (SCHONS; DALBOSCO, 2000).

Os procedimentos utilizados para controlar a ocorrência de moléstias causadas por vírus em plantas cultivadas visam reduzir as fontes de infecção, limitar a disseminação de vetores (insetos, na maioria dos casos) e minimizar o efeito da infecção na produção da planta. De modo geral, tais medidas não oferecem nenhuma solução permanente para o problema das moléstias causadas por vírus (MATTHEWS, 1981). Segundo Miller e Rasochova (1997), o BYDV é controlado principalmente pelo uso de cultivares tolerantes ou resistentes a certos isolados de BYDV. Apesar de considerável pesquisa na área, não existe nenhum composto químico que possa ser aplicado rotineiramente para controlar de forma direta os vírus que atacam as plantas (FRASER, 1992).

Soil borne wheat mosaic virus - SBWMV

O SBWMV (mosaico comum do trigo) é a mais importante virose da cultura do trigo no Brasil. Ocorre principalmente no planalto do Rio Grande do sul e no Paraná, causando perdas consideráveis no rendimento de grãos. Lavouras inteiras podem ser atacadas, embora a ocorrência em reboleiras seja mais comum (KIMATI et al., 1997).

O espectro natural de hospedeiros desse vírus é bastante restrita. O SBWMV é praticamente restrito a espécies de gramíneas. São

hospedeiros do SBWMV: algumas espécies de *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., *Secale cereale* L., *Bromus comutatus* L., *B. tectorum* L., e algumas espécies de *Chenopodium*.

Os sintomas mais comuns observados são o nanismo, excesso de afilhamento e variações nas formas das folhas, manchas, mosaico, clorose e esterilidade (PALM, 1993). No campo os sintomas de mosaico do trigo podem ocorrer em manchas ou reboleiras, ou ainda, generalizadamente (MCKINNEY et al., 1923). Os sintomas de mosaico do trigo, na cultura do trigo, caracteriza-se por manchas de cor verde ou verde-amareladas e ou estrias paralelas. A planta pode apresentar nanismo e/ou enrosetamento caracterizados por superbrotamento ou afilhamento excessivos e retardamento do desenvolvimento do sistema radicular. Geralmente, os sintomas aparecem nas folhas mais jovens, em fase de crescimento e são de início, mais facilmente observados no lado dorsal da folha (CAETANO, 1982).

Normalmente, a doença manifesta-se em reboleiras que correspondem a distribuição do fungo vetor no solo, principalmente em locais baixos sujeitos a alagamento (KIMATI et al., 1997). Com o progresso da doença, o sistema radicular das plantas infectadas mostra retardamento no desenvolvimento e estas podem ser infectadas por vários outros microrganismos (MCKINNEY et al., 1923). Campos com uniformidade da doença freqüentemente exibem cloroses correspondendo a distribuição do vetor *Polymyxa graminis*, o qual freqüentemente habita regiões com alta umidade (WIESE, 1977). A incidência de viroses em trigo e em outros cereais, como aveia, cevada, centeio e triticale em uma área cultivada pode ser relativamente insignificantes em alguns anos, porém, em outros, a incidência pode ser extremamente elevada, causando significativas perdas econômicas (PALM, 1993).

Polymyxa graminis é um *Plasmodiophoromyceto* biotrófico parasita obrigatório de raízes de plantas. Sua ocorrência foi amplamente relatada, sendo observada na África, Ásia, Europa, Austrália, América do Norte e América do Sul. Além de transmitir o SBWMV, sabe-se que transmite também “*Oat golden stripe virus*”, “*Rice stripe necrosis virus*”, “*Peanut clump virus*” e “*Broad bean necrosis virus*” (BRUNT; RICHARDS, 1989). Os zoósporos de *P. graminis* infectam as raízes transmitindo o vírus num período de quatro semanas após o estabelecimento da cultura de trigo (HIMMEL et al., 1992). Os fatores que levam à formação dos esporos de resistência não são conhecidos, entretanto, fatores externos (nutrição do hospedeiro, estresse) e um interno (cariogamia) parecem estar envolvidos (ADAMS, 1991).

O SBWMV afeta parâmetros de rendimento e crescimento do trigo. Reduções no rendimento de 32 a 61% foram registradas em Oklahoma em 1952. Os mesmos autores, em estudos subsequentes, observaram uma redução de 0 a 85% no rendimento de grãos, embora valores de 10-50% sejam mais comumente encontrados.

As medidas de controle das fitoviroses estão fundamentadas em três estratégias básicas: a) controle ou eliminação da fonte de inóculo, isto é, onde o vírus fica armazenado antes de passar para a planta cultivada; b) controle do vetor; c) e a planta que se infecta. O controle mais amplamente utilizado até o momento, e reconhecidamente o mais efetivo para minimizar a ação da doença é a utilização de cultivares resistentes. Algumas medidas de controle menos eficazes podem ser utilizadas, como a rotação de culturas, aumento nas doses de fertilizantes, semeaduras tardias que alcancem temperaturas mais elevadas, evitar o cultivo do trigo continuado na mesma área e fumigação do solo (CHEN; WILSON, 1995).

Wheat streak mosaic virus - WSMV

Esta doença está presente em quase todas as áreas produtoras de trigo, ocorrendo principalmente no norte dos EUA, leste da Europa, Ásia e alguns países da América Latina. Conforme McMullen (2002), *Wheat streak mosaic virus* (WSMV), pertence ao gênero *Tritimovirus*, este vírus apresenta RNA fita simples com senso positivo, com um tamanho de 8,5 Kb. O WSMV infecta as gramíneas, em especial as culturas do trigo, cevada, centeio e aveia.

Os sintomas nas folhas são estrias verde-amareladas com lados paralelos e descontínuos. Os sintomas podem variar entre cultivares, tensão do vírus, tempo de infecção e condições ambientais. Com o aumento da temperatura as folhas doentes apresentam-se totalmente amareladas. As espigas, se formadas, apresentam-se totalmente ou parcialmente estéreis. Muitas folhas, e as vezes até plantas podem apresentar-se totalmente amareladas e necróticas.

O WSMV é transmitido pelo ácaro *Aceria tosichella*, normalmente é encontrado nas margens das lavouras. Na planta, é possível encontra-lo na superfície superior das folhas próximo a base da mesma.

O vírus WSMV tem causado maiores perdas econômicas nas grandes planícies dos EUA, no estado do Colorado, Idaho, norte e sul de Dakota, Montana, Texas, Oklahoma e Washington. Este vírus também foi reportado no Canadá, Romênia, Alemanha, Bulgária e Hungria (SÁNCHEZ-SÁNCHEZ et al., 2001).

O WSMV é uma doença que causa muitos danos na cultura do trigo, em vários lugares do mundo. Porém não existe ainda cultivares resistentes de trigo tanto para o WSMV quanto para o vetor da

doença. Embora, pesquisas tem sido feita nesta área para a transferência de genes resistência do *Aegilops tauschii* para a colonização do ácaro, é um gene que condiciona resistência ao WSMV transferido do *Agropyron intermedium*.

Branqueamento da folha do trigo

A bactéria *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* ocorre em trigo e cevada, e *Pseudomonas syringae* pv. *coronafaciens* em aveia. A bactéria apresenta várias “subespécies”, difíceis de serem diferenciadas pelos sintomas ou por métodos normais de taxonomia.

Os primeiros sintomas da doença aparecem nas folhas superiores próximo ao estágio do espigamento. A infecção de *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* nas folhas iniciam-se com a presença de uma mancha aquosa com diâmetro em torno de 1mm que evoluem para uma coloração branca-amarelada com áreas cloróticas que podem coalescer (PICININI; FERNANDES, 1995).

O processo de penetração é muito rápido e associado a temperaturas moderadas de 20 à 22°C, com prolongados períodos de chuva ou umidade relativa alta (>90%). Em condições de ambiente favoráveis ao patógeno, o período compreendido desde a penetração da bactéria até a produção de novas células bacterianas pode ser de apenas 20 minutos, pois as bactérias diferentemente dos fungos apresentam um ciclo biológico muito simples. O surgimento de uma nova célula ocorre por fissão ou divisão (PICININI; FERNANDES, 1995).

A bactéria que causa a mancha esbranquiçada da folha do trigo, pode sobreviver em restos culturais na forma de exudatos desidratados. Essa forma de sobrevivência é tão longa quanto o período

de ausência das chuvas, a medida que os restos culturais absorvem umidade outros microrganismos competem com *P. syringae* pv. *syringae* por espaço e por nutrientes. As bactérias fitopatogênicas, em geral, apresentam baixa habilidade de competir com microrganismos responsáveis pela decomposição de restos culturais.

Os exudatos de *P. syringae* pv. *syringae* encontrados sobre as plantas infectadas são transportados eficientemente por insetos, disseminando a doença para áreas ainda não contaminadas. A transmissão por sementes é também uma importante fonte de inóculo, lotes de sementes apresentando uma semente infectada entre mil sementes saudáveis é o suficiente para produzir o inóculo necessário para o desenvolvimento de uma epidemia à campo caso as condições de ambiente sejam favoráveis. Inicialmente, a distribuição da mancha esbranquiçada é restrita a algumas plantas isoladas, porém, com a disseminação rápida da doença para as plantas vizinhas, a disseminação no campo passa a ser generalizada (PICININI; FERNANDES, 1995).

As células bacterianas podem ser transportadas dentro de gotículas de chuvas pelas correntes de vento a distâncias relativamente curtas. A falta de coloração e a fina espessura de sua parede celular não garantem proteção contra a radiação ultravioleta e a desidratação e, conseqüentemente, a viabilidade das células bacterianas torna-se muito limitada (PICININI; FERNANDES, 1995).

Essa bactéria é considerada nucleadora de gelo, isto é, a presença dela em gotas de orvalho acelera o processo de congelamento da água. As geadas com bactérias nas gotas causam injúrias nas folhas de cereais de inverno, permitindo a penetração da bactéria e o desenvolvimento de estrias ou manchas esbranquiçadas.

As medidas de controle mais eficientes e econômicas são o uso

de sementes sadias, livres do patógeno e a utilização de cultivares resistentes.

Estria bacteriana do trigo

A estria bacteriana do trigo é uma doença considerada importante no norte do Paraná, sul de São Paulo e Mato Grosso do Sul. A doença é causada pela bactéria *Xanthomonas campestris* pv. *undulosa*, que parasita o trigo, centeio e triticale. Na região Sul, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, a ocorrência da doença, com alguma severidade, porém, é restrita as regiões mais quentes e úmidas.

Os sintomas da estria bacteriana são facilmente observados após os estádios de emborrachamento e espigamento. Sobre as folhas, são observadas lesões aquosas, estreitas e longas, com o passar do tempo, estas lesões tornam-se pardo-avermelhadas. Quando ocorre longos períodos de chuvas as lesões coalescem, podendo destruir grande parte das folhas.

Sobre os pedúnculos, são visíveis lesões mais ou menos circulares, com o centro amarelado e as bordas pardas, tais lesões podem circundar o colmo. Sob clima úmido é produzido pus bacteriano nos tecidos infectados, estas exsudações solidificam ao secar a superfície (KIMATI et al., 1997; REIS et al., 2001a).

A bactéria sobrevive em sementes e restos culturais. A semente é também o mais importante agente de disseminação desta doença. dentro da lavoura, a disseminação ocorre por respingos de chuva, insetos, e o transporte mecânico, por exemplo, pelo rodado de tratores, veículos e pelo homem. O desenvolvimento da doença é favorecido por temperaturas de 18 a 20°C e por períodos prolongados de chuvas

(KIMATI et al., 1997; REIS et al., 2001a).

As reduções causadas no rendimento de grãos podem chegar a 40%, embora as perdas geralmente são de 10% ou até menos. Em ataques mais severos, 5 a 10% das espigas do trigo podem tornar-se estérís devido a infecção.

O controle baseia-se na eliminação do inóculo das sementes e sua redução nos restos culturais. A erradicação da bactéria de sementes tem sido alcançada por termoterapia (70-80°C durante 7-14 dias). No entanto, apesar deste método ser eficiente, seu emprego restringe-se a pequenas quantidades de sementes. O tratamento de sementes também possibilita a erradicação do patógeno. A rotação de culturas tem sido recomendada como medida complementar para eliminar a bactéria dos restos culturais infectados (KIMATI et al., 1997).

2.1.2 Modelos de simulação

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).

Na agricultura, como em outros modelos dinâmicos, o sistema pode ser analisado em termos de variáveis de estado, de fluxo e auxiliares (WIT, 1982). Estas variáveis, em geral, acabam fazendo parte de um conjunto de equações diferenciais que devem ser integradas nu-

mericamente, dada a complexidade do sistema. Esta estrutura comumente usada permite que seja possível desenhar e codificar um modelo com finalidades de entradas e saídas arranjadas com ferramentas de software.

Desde o surgimento dos primeiros computadores, o homem vem desenvolvendo técnicas para levar para dentro dos computadores o que encontra no mundo real, as linguagens de programação. Essas possibilitam que os computadores sigam ordens predefinidas e reportem os resultados obtidos. Nas últimas décadas, muitas linguagens foram criadas e em muitos paradigmas foram desenvolvidas, tentando fazer com que os computadores se pareçam cada vez mais com o cérebro humano. Dentre os paradigmas desenvolvidos estão o imperativo, o lógico, o funcional e o orientado a objetos, cada um tentando resolver os problemas de comunicação de forma diferente.

Modelos podem ser definidos como uma representação simplificada, por necessidade, do que se percebe ser realidade, podendo ser um objeto, uma idéia ou um sistema (SHANNON, 1975). 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). São provenientes de aproximações realizadas para se poder entender melhor um determinado fenômeno, mesmo que essas aproximações não condizam totalmente com a realidade. De qualquer forma, um modelo retrata, ainda que de maneira simplificada, os aspectos da situação pesquisada (LEAL, 1999).

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; MAVRO-

MATIS 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 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).

O DSSAT, desenvolvido por um grupo de pesquisadores das universidades da Georgia, Florida, Hawaii, Guelph e Iowa State, além do centro internacional para fertilidade do solo e desenvolvimento agrícola (IFDC - International Center for Soil Fertility and Agricultural Development), simula o crescimento de culturas, produtividade, necessidades de água e nutrientes e o impacto ambiental na produção agrícola, estando atualmente na versão 4.0.

Definição Teórica de Modelos de Simulação

Um modelo de simulação é uma representação simplificada de um sistema real. Há dois conceitos importantes nesta definição. Primeiro, *sistema* é um conjunto de objetos (componentes ou fatores) que atua com outro de um maneira organizada, e a rede de resultados dessas interações produzem o comportamento, função e a finalidade do sistema. Exemplos de sistemas na agricultura são: fotossíntese, balanço de água no solo, crescimento e produtividade de culturas e a interceptação da luz solar pelo dossel das plantas.

Segundo, quando um sistema é representado ou descrito em uma forma simples conhecida como um modelo, o modelo torna-se uma ferramenta para entendermos o sistema, e auxiliar-nos a aprofundar a complexidade e focar os aspectos de maior importância. Os modelos podem ser de diversos tipos:

- Ilustrado (ilustrações, diagramas e fluxogramas);
- Conceitual ou verbal (descrições numa linguagem natural);
- Físico;
- Matemático (HAEFINER, 1996).

Conseqüentemente, um *modelo matemático*, é um tipo de representação simplificada de um sistema real. Este descreve o sistema usando princípios matemáticos em forma de equação ou conjunto de equações (PANDEY et al., 2000).

Os modelos matemáticos são desenvolvidos primeiro porque queremos resolver um ou mais problemas num sistema real. Por exemplo, como aumentar o crescimento e a produtividade da cultura? Por que as práticas de conservação não são eficientes nas perdas de solo e de água na superfície do solo?

Quando comparado com outros tipos de modelo (ilustrado, conceitual ou físico), os modelos matemáticos são freqüentemente mais úteis que os demais. Isto devido ao modelo matemático não apresentar apenas quais são os componentes essenciais de um sistema real, mas também mostra passo a passo como cada um desses componentes atua com os demais. Além de, ajudar na compreensão do sistema (“o que? por que? e como?” de um sistema), modelos matemáticos exclusivamente permitem de uma maneira organizada prever e controlar o sistema. Conseqüentemente, modelos matemáticos fornecem uma ferramenta para resolver problemas (TEH, 2006).

Um modelo é uma simples representação de um sistema real, esta é uma descrição incompleta ou imperfeita de *sistema*. Há sempre algumas perdas de informações quando um sistema real é traduzido dentro

de um modelo. Um modelo não fornece uma descrição completa do sistema, apenas as partes essenciais que são importantes para explicar o comportamento, finalidade e a função do sistema. Essa descrição incompleta de um sistema de simulações de um modelo matemático são passíveis de erros.

O grau do erro da modelagem depende da quantidade de informações que são perdidas, ou seja, quantas partes essenciais do sistema serão ignoradas no modelo. Isto também dependerá se os efeitos dos componentes do sistema serão super ou subestimado. É importante então captar e resumir as informações essenciais do sistema real dentro do modelo. É necessário também identificar os componentes essenciais de um sistema real, e descrever adequadamente como e onde cada um desses componentes atua com os demais dentro do modelo. Conseqüentemente, o que se almeja é um modelo simples de um sistema real, porém bastante utilizado, pois tal modelo facilita o estudo e a compreensão do sistema, controla e antecipa o comportamento desse sistema com acurácia e com os detalhes desejados (TEH, 2006).

Os sistemas reais geralmente são bastante complexos, portanto, necessita-se simplifica-los para facilitar o entendimento. Sem a utilização de hipóteses corre-se o risco de fracassar no desenvolvimento de um modelo, por que existe ainda muita complexidade e incertezas em relação ao sistema. Em outras palavras, as hipóteses auxiliam a entender o sistema, quando o sistema for sintetizado dentro do modelo.

No desenvolvimento de um modelo matemático, existe freqüentemente uma troca ou permuta entre os modelos simplificados e modelos de precisão. Quanto mais holístico e mais profunda for a representação do sistema, mais complexo e acurado será o modelo. Ele torna-se progressivamente mais acurado, porque mais informações sobre o sis-

tema são sumarizadas e menos suposições são utilizadas no modelo. Em contraste, um modelo simples, torna-se menos acurado porque fornece progressivamente menos informações sobre o sistema, resultando em grande perda de informações.

No entanto, os modelos complexos são geralmente enfadonhos na utilização, pois requerem cálculos intensivos e repetitivos e uma certa quantidade de dados, alguns dos quais não estão facilmente disponíveis. Por outro lado, os modelos matemáticos simples são menos enfadonhos no manuseio e na utilização, pois não requerem apenas menor quantidade como também dados facilmente disponíveis (TEH, 2006).

Um sistema real é freqüentemente descrito por muitos modelos alternativos, isto porque um modelo pode focar num determinado aspecto do sistema, não abrangido ou abrangido com baixa intensidade pelos outros modelos. Estes modelos também diferem quanto a simplicidade e acurácia do modelo. Conseqüentemente, não existe um modelo que seja apropriado para todas as circunstâncias. O melhor modelo é aquele que reúne os interesses e o objetivo do estudo em questão, não necessariamente ser sempre o modelo mais acurado ou o mais simples.

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).

Apenas quando houver clareza da natureza do problema, é que poderá ser processada a formulação de um modelo conceitual. Este é o estágio onde se tenta representar o sistema real num resumo ou

numa forma generalizada. Esta forma pode ser visual ou narrativa que mostra claramente quais são os componentes do sistema e como eles interagem entre si.

A construção de um modelo é independente da matemática, ou seja, neste estágio da descrição do modelo conceitual não interessa a forma matemática, pelo contrário, interessa nessa fase de construção do modelo uma classificação da organização dos componentes e suas inter-relações. A utilização de hipóteses nessa fase é crucial, porque as hipóteses tornam um modelo complexo mais compreensível.

O modelo conceitual é traduzido para dentro de um modelo matemático. Todas as inter-relações entre os componentes do sistema precisam ser descritas matematicamente. A solução gerada pelos modelos matemáticos é de obter e interpretar as informações, estas também são comparadas com os dados reais (dados observados). Quando a solução do modelo é aceitável, o modelo está apto para ser utilizado na solução de problemas. Muito freqüentemente, a solução do modelo é inicialmente inaceitável, por causa da grande quantidade de erros. Nestes casos, o modelo precisa ser revisado, e os erros devem ser identificados e corrigidos. Esses erros, freqüentemente ocorrem na formulação do modelo conceitual, na formulação do modelo matemático ou em ambos os estágios.

Apesar de o desenvolvimento do modelo ser completo, é importante ressaltar que os modelos nunca serão perfeitos, são uma representação imperfeita do sistema. Conseqüentemente todos os modelos apresentam defeitos, portanto, podem ser utilizados apenas em situações ou condições onde apresentam soluções acuradas (TEH, 2006).

Tipos de modelos matemáticos

Os modelos matemáticos podem ser divididos em:

- **Modelos mecanísticos e empíricos.** Um modelo mecanístico é construído com bases nos conhecimentos da física, química ou biologia fundamentado nos processos que governam o estudo. Desse modo, esses modelos as vezes são conhecidos com um modelo explicativo, porque representam os efeito de causa e efeito entre as variáveis.

Em contraste, um modelo empírico descreve as relações entre as variáveis, mas oferece pouco ou nenhum discernimento para fundamentar o processo causa e efeito do fenômeno. Em outras palavras, um modelo empírico serve apenas para descrever as relações, enquanto que um modelo mecanístico fornece as descrições com maiores detalhes facilitando o entendimento (FRANCE; THORNLEY, 1984).

- **Modelos dinâmicos e estatísticos.** Um modelo estatístico é aquele que não utiliza o “tempo” como uma variável, ao contrário dos modelos dinâmicos, que tem o tempo como uma variável importante.
- **Modelos contínuos e descontínuos.** Tanto os modelos contínuos como os modelos descontínuos são modelos dinâmicos, como eles também apresentam o “tempo” como uma de suas variáveis. Para os modelos contínuos, entretanto, “tempo” é um cálculo real, enquanto que, para os modelos descontínuos o “tempo” é apenas um valor inteiro (TEH, 2006).
- **Modelos determinísticos e aleatórios.** Um modelo aleatório contém alguns elementos sem correlação ou provavelmente com distribuições dentro do modelo. A maior das incertezas no

comportamento do sistema, é provavelmente a construção de um modelo aleatório (estocástico) (FRANCE; THORNLEY, 1984). Apesar disso, o desenvolvimento desse modelo geralmente é bastante difícil. Um modelo determinístico, ao contrário, não tem muitos problemas de correlação ou com as distribuições dentro do modelo, muitos dos modelos utilizados na agricultura, são modelos determinísticos. Para o desenvolvimento simplificado de modelos de simulação de culturas os autores, Wit (1982), sugeriram quatro fases ou situações de produção de culturas:

- Fase de produção 1: esta é a fase potencial (ou máxima) de crescimento e produtividade da cultura, onde a produção da cultura é limitada somente pelas condições ambientais, primeiramente pela radiação solar e temperatura do ar.
- Fase de produção 2: esta fase de produção é limitada pelo déficit de água durante a menor parte dos estádios de crescimento da cultura. Esta limitação está vinculada com a limitação imposta pelas condições ambientais.
- Fase de produção 3: em adição as limitações impostas pelas condições climáticas e suprimento de água, a produção da cultura nesta fase também é limitada pelo déficit de nitrogênio, durante a menor parte do estágio de crescimento da cultura. Esta fase também é conhecida como a fase de produção limitada pelo nitrogênio.
- Fase de produção 4: a produção da cultura nesta fase é adicionalmente limitada pela deficiência de outros nutrientes tais como fósforo e outros minerais durante os estádios de crescimento da cultura. Esta fase é conhecida como a fase de produção com limitação de nutrientes.

Em todas as quatro fases de produção, pragas, doenças e plantas daninhas também podem limitar a produção da cultura.

Esta hierarquia das fases de produção, permitem um acesso sistemático na modelagem da cultura. Isto controla os níveis de detalhes exigidos na modelagem e ajuda a identificar e focar certas partes da produção da cultura. A complexidade da modelagem aumenta com o aumento das fases de produção, modelos das duas primeiras fases são os primeiros a serem desenvolvidos. Estes modelos também foram minunciosamente testados no passado por muitos pesquisadores. O número de modelos para a terceira e quarta fases, porém, são poucos. Estes modelos geralmente descrevem os efeitos de nitrogênio (N), potássio (P) e outros nutrientes na produção da cultura especialmente de maneira simplista, devido ao déficit de conhecimento ou entendimento dos processos ecofisiológicos envolvidos (KROPFF, 1993). Embora, o melhor modelo é aquele que inclui as quatro fases de produção descritas anteriormente, podendo acrescentar também as fases e/ou módulos de pragas, doenças e plantas daninhas (TEH, 2006).

Ferramentas de Tecnologia de Software

As ferramentas de tecnologia de software utilizadas nas tomadas de decisões de manejo das culturas agrícolas, são formadas por uma coleção de programas independentes que interagem entre si, na qual os modelos de simulação de culturas ficam no centro, ao passo que as bases de dados descrevem o clima, o solo, observações e condições experimentais, além de informações sobre genótipos para aplicar nos

modelos em diferentes situações. Portanto, segue abaixo a descrição de uma ferramenta onde estão inseridos os modelos de simulação.

O DSSAT é uma das mais conhecidas e difundidas aplicações dos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas, sendo desenvolvido pelo projeto IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) junto à Universidade do Havaí a partir de 1974. O projeto IBSNAT teve duração de cerca de dez 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 ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications - <http://icasa.net>), que reúne um grande número de cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa, os quais trabalham de forma colaborativa para a construção dos modelos e suas aplicações (JONES et al., 2001, 2003; ICASA, 2007).

O DSSAT é um sistema composto por diversos modelos de simulação, esses orientados a processos, projetados para aplicações globais e que trabalham independente 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, 2007). É o resultado do trabalho colaborativo de muitos cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa que fazem parte do consórcio ICASA.

Como um pacote de software, que integra os efeitos de solo, características da espécie, coeficientes genéticos, dados climáticos e op-

ções de manejo, o DSSAT permite que os usuários possam solicitar resposta a perguntas como “O que...se...?” e simular os resultados de experimentos em minutos num computador, os quais poderiam consumir uma parte significativa da vida profissional de um agrônomo (ICASA, 2007). A comparação das saídas dos modelos com os resultados observados faz parte da validação de um modelo.

O DSSAT é uma coleção de programas independentes que interagem entre si, no qual os modelos de simulação de culturas ficam ao centro, enquanto as bases de dados descrevem o clima, solo, observações e condições ambientais, além de informações sobre genótipos para aplicar nos modelos em diferentes situações (JONES et al., 2003). Os componentes de software são escritos em:

- FORTRAN (modelos)
- C (shell)
- Pascal (gráficos)
- Dbase (base de dados)
- Basic (programas de gerenciamento de estratégia e risco).

O DSSAT fornece também a possibilidade de validação das saídas dos modelos, permitindo assim, que os usuários possam comparar os resultados da simulação com os resultados observados. Esta validação se dá pela entrada de dados por parte do usuário (dados observados), executando o modelo e comparando as saídas obtidas. Simulando resultados prováveis de estratégias da gerência da cultura, oferece ao usuário as informações necessárias para apreciar novas culturas, produtos e práticas a fim de adotá-las (ICASA, 2007).

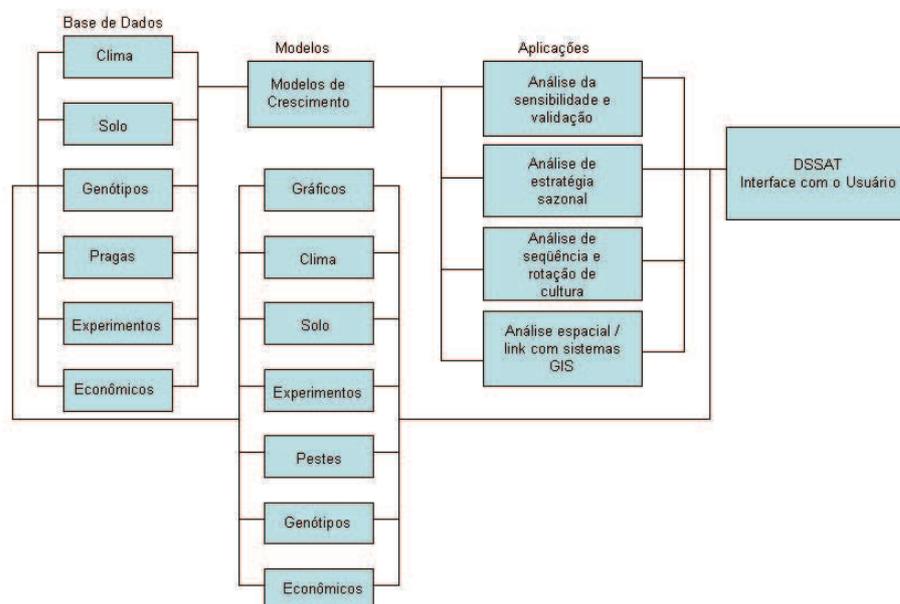


Figura 1: Modelo estrutural da ferramenta DSSAT utilizada na simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de trigo.

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 seqüencial dos riscos econômicos e impactos ambientais associados com a irrigação, uso de fertilizantes e nutrientes, mudanças climáticas, seqüestro de carbono no solo, variabilidade climática e agricultura de precisão (JONES et al., 2003; ICASA, 2007).

O DSSAT simula o crescimento, desenvolvimento e produção de

uma cultura considerando uma 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, CROPGRO (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 sub-módulos: água no solo, temperatura do solo, carbono e nitrogênio do solo.

O sub-módulo 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 do *runoff* da precipitação que ocorre durante o dia, sendo o processo baseado no número da curva (*curve number*), 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. Se a condutividade hidráulica saturada de qualquer

camada for 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 *runoff* diário (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 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.

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 climáticos 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.).

Conforme Verhagen et al. (2001), dentro da estrutura do DSSAT pode-se encontrar alguns modelos de simulação para diversas culturas como os seguintes:

- a família CERES de modelos: CERES-maize, CERES-wheat,

(CROPSIM-wheat), CERES-rice, CERES-barley, CERES-sorghum e CERES-millet;

- a série de modelos CROPGRO para leguminosas: CROPGRO-soybean, CROPGRO-peanut, CROPGRO-dry bean (*Phaseolus*);
- a série de modelos CROPSIM para culturas de raiz: CROPSIM-cassava e SUBSTOR-potato;
- outras culturas: CROPGRO-Tomato, CROPGRO-Chickpea, Sugarcane e Sunflower.

Todos os modelos de culturas compartilham um formato comum de entrada e saída e são similares em nível de detalhe, operando num passo de tempo diário; são baseados num entendimento de processos biofísicos. Os modelos simulam o efeito do clima, água no solo, genótipo e dinâmica do nitrogênio na cultura e no solo em relação ao crescimento da cultura e produção (VERHAGEN et al., 2001).

Dentre as maiores limitações existentes no DSSAT relacionadas com os modelos de simulação de culturas estão a ausência do efeito imposto às culturas por pragas/doenças, o modo de preparo do solo, o excesso de água no solo, entre outros, deixando um campo aberto para a inserção de outros modelos, mesmo que isso implique gasto de energia para a integração dos diferentes modelos.

A função do DSSAT primeiramente foi selecionada para dar suporte ao uso dos modelos de simulação de cultura na aplicação de tomadas de decisão. A utilidade deste sistema depende da capacidade dos modelos de cultura para fornecer estimativas realistas da performance da cultura num amplo espectro de condições ambientais, práticas de manejo e na disponibilidade de dados requeridos. O primeiro

lançamento do DSSAT (V2.1) continha modelos de quatro culturas: milho (Ceres-Maize V2.10), trigo (Ceres-Wheat V2.10), soja (SoyGro V5.42) e amendoim (PNUTGRO V1.02). Posteriormente, mais quatro modelos de cultura foram adicionados: arroz (Ceres-Rice), feijão (BeanGro; V1.01), sorgo (Ceres-Sorghum) e milheto (Ceres-Millet).

Esses modelos são desenvolvidos e designados para ter uma aplicação global, independente de local, época, cultivar e sistema de manejo. Os modelos simulam o efeito do clima, água do solo, cultivar, dinâmicas de nitrogênio no solo e na cultura, no crescimento e produtividade em solos bem drenados. Além dos modelos existentes na ferramenta DSSAT, existem outras ferramentas e modelos que apresentam finalidades semelhantes na simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas, por exemplo, o APSIM, SIRIUS entre outros.

Modelos de Simulação de Cultura

O CropSim-Wheat (CSM-CropSim-CERES-Wheat), substituto do Ceres-Wheat, é um dos modelos de simulação pertencentes à suíte do DSSAT, responsável pela simulação do crescimento e desenvolvimento do trigo.

No Brasil, o CropSim-Wheat, tem sido testado, calibrado e validado por pesquisadores, sendo utilizado para simular o processo do desenvolvimento de cultivares de trigo. Este modelo permite a sua parametrização por meio de arquivos texto. Suas saídas, resultado da simulação, podem ser utilizadas para alimentar outros modelos, responsáveis pela simulação de doenças em plantas, por exemplo (FERNANDES et al., 2004; DELPONTE et al., 2005).

Consiste do módulo planta de trigo que se conecta com os módulos

de clima e de solo, pertencentes a suite do DSSAT, os quais computam a energia e a água disponível para o crescimento da planta de trigo, ao passo que o módulo planta de trigo simula os eventos fenológicos, expansão foliar, acúmulo de carboidratos e a partição entre a parte aérea e as raízes.

A alimentação do modelo consiste em características da planta de trigo (cultivares), dados de clima (radiação solar, temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação), assim como, práticas agronômicas, data de semeadura e espaçamento (HUNT; PARARA-JASINGHAM, 1995).

As características físicas e químicas do solo no local do experimento e os coeficientes genéticos de cultivo usado, necessitam ser previamente determinados para que alimentem um arquivo de entrada de dados do modelo CropSim-Wheat (SILVA et al., 2002).

Na questão climática, as variáveis a serem medidas são temperatura máxima e mínima, a precipitação e a radiação solar global registradas diariamente em Estação Agrometeorológica local, associada às suas coordenadas geográficas durante todo o ciclo da cultura (SILVA et al., 2002).

O modelo CropSim-Wheat opera com passo diário e inclui subrotinas para simular o crescimento, a fenologia, o balanço hídrico, e a disponibilidade de nitrogênio no solo. Outro fator importante a destacar no modelo CropSim-Wheat é a simulação da área foliar e do número de folhas existentes, a cada dia do ciclo da cultura do trigo (SILVA et al., 2002).

Modelos de Simulação de Epidemias - Características epidemiológicas

Nas últimas décadas, a modelagem matemática de doenças de plantas tem se expandido muito rapidamente, originando diferentes metodologias de desenvolvimento de modelos de simulação. Os recentes avanços na ciência da computação têm auxiliado nesse desenvolvimento, trazendo vantagens e facilidades operacionais para a construção de modelos que representem os complexos patossistemas agrícolas, de uma forma mais genérica. A utilização de modelos que simulam o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e, ao mesmo tempo, contabilizam o impacto das doenças pode ser determinante para o auxílio às tomadas de decisões.

O entendimento dos processos relacionados ao desenvolvimento de doenças de plantas está fortemente ligado ao conhecimento dos seguintes fatores: o patógeno, o hospedeiro e o ambiente. Cada um desses fatores exerce papel fundamental no desenvolvimento de epidemias, e deve ser estudado em particular para o entendimento dos mecanismos que afetam a doença.

A doença como processo patogênico envolve diferentes etapas, incluindo a infecção, colonização, esporulação e disseminação. Normalmente essas etapas ocorrem em curtos espaços de tempo (VALE et al., 2004).

Plank (1963), foi o primeiro fitopatologista a utilizar os termos patógenos monocíclicos e policíclicos, e utilizou dois modelos simples de epidemias que resultavam desses dois tipos de patógenos.

Os patógenos monocíclicos infectam o hospedeiro durante a estação de cultivo e não ocorre produção de novos propágulos para futuras

infecções até o final da mesma estação, normalmente quando as plantas morrem. Os patógenos policíclicos produzem novas gerações de inóculo durante toda a estação de crescimento da planta, de forma que novas infecções constantemente estão sendo produzidas. Vários exemplos podem ser citados de patógenos policíclicos, entre eles agentes causais de ferrugens, manchas foliares, algumas viroses e bactérias. O progresso da doença causada por um patógeno policíclico apresenta lento desenvolvimento em seus estádios iniciais, devido ao fato de poucas infecções ocorrerem nesse período, mas rápida aceleração inicia-se assim que novos propágulos são formados.

As fases críticas do ciclo de vida de um patógeno, relacionadas com o desenvolvimento epidêmico e consideradas relevantes para simular e projetar o progresso de uma doença, são as seguintes:

- Período Infeccioso - A infecção inclui os processos de germinação, formação de apressório, penetração e estabelecimento de relações parasitárias. Durante a infecção, os fungos e as bactérias fitopatogênicas estão mais desprotegidas, uma vez que se encontram expostos às condições adversas do ambiente e às medidas de controle. Já o período infeccioso é compreendido entre o início e o final da produção de esporos da lesão ou urédia (PIVONIA; YANG, 2006).
- Período latente - O período de incubação (que vai da inoculação até o surgimento dos sintomas), a formação e o crescimento de lesões fazem parte do período latente, incluindo, ainda, a formação de esporos. Esta fase depende, em grande parte, da temperatura durante o período de infecção e da suscetibilidade do hospedeiro. O período latente médio determina o tempo que o patógeno necessita para se regenerar. Usualmente, utiliza-se

o Período Latente Médio (PLM), definido como o tempo decorrido da inoculação até que 50% das lesões estejam esporuladas. Quanto mais gerações do patógeno ocorrem por estação, mais severa será a doença e maior será seu progresso. A resistência genética das plantas e a aplicação de fungicidas podem aumentar os períodos latentes.

- Esporulação - Nesta fase, devem ser considerados dois aspectos: a intensidade de formação dos esporos e a duração de sua produção. Esses dois aspectos podem ser influenciados pelas mesmas condições descritas no item infecção. As medidas adotadas para o controle das infecções são, em geral, eficazes contra a esporulação.
- Disseminação - Pode chegar a novos sítios de infecção. Os fatores do ambiente desempenham papel decisivo na eficiência da disseminação.
- Período Necrótico - Este período é definido como sendo o momento em que uma lesão é incapaz de produzir novos propágulos (ABBAS et al., 2004; MIKLER et al., 2005), ou seja, incapaz de infectar outras áreas ou outros indivíduos. Abrange todos aqueles que não mais contabilizam para a infecção, pois passaram do período infeccioso (BERGER et al., 1997).
- Expansão da Lesão - O efeito da expansão das lesões é mais significativo em sistemas de latência prolongada, pelo maior tempo para a lesão crescer. Quanto maior o tamanho inicial da lesão, menor é o número de sítios sadios remanescentes, passíveis de serem ocupados exclusivamente pelo crescimento destas lesões. Nos sistemas que têm lesões iniciais grandes, a epidemia atinge

seu máximo mais rapidamente e a contribuição da expansão das lesões na severidade final torna-se menor.

- Sobrevivência - A sobrevivência do inóculo pode ser relevante para o desenvolvimento de uma epidemia, dependendo, muitas vezes, de condições diferentes de ambiente, e é importante como fonte de inóculo primário.

Vallavieille-pope et al. (2000), estudando a avaliação dos parâmetros epidemiológicos e seu uso em modelos epidemiológicos de disseminação de doenças de cereais, verificaram que se um patógeno causar uma epidemia significativa, o número de ciclos de infecção são dependentes, isto pode completar um período completo do hospedeiro.

Desta maneira, doenças policíclicas tendem a ser causadas por patógenos capazes de crescer exponencialmente no tamanho da população. O progresso da epidemia depende então dos valores atuais das variáveis em cada ciclo de infecção, incubação e crescimento de lesão para produção de esporos, os quais são específicos para cada combinação do genótipo do hospedeiro, do patógeno e condições ambientais. O entendimento da disseminação de doenças de cereais tinha sido aperfeiçoado pela quantificação de variáveis monocíclicas, como influências de fatores externos (VALLAVIEILLE-POPE et al., 2000).

Avaliação de parâmetros epidemiológicos são necessários para o prognóstico do progresso epidêmico para a estimação de componentes de resistência parcial para diferentes cultivares de plantas hospedeiras e para a estimação de componentes convenientes de patógenos isolados. Uma das variáveis importantes para o aumento da taxa de uma epidemia é o período latente do patógeno. A diminuição do período latente, a maior reprodução de ciclos de fungos pode-se realizar

por época de crescimento. Uma simples simulação mostrou que um quádruplo prolongamento do período latente de 4 para 16 dias reduz a forma epidêmica muito mais que uma quádrupla redução no fator de multiplicação de 16 para 4 fungos (VALLAVIEILLE-POPE et al., 2000).

Para estas doenças policíclicas, a produção de esporos é também um grande fator para determinação das taxas de progresso de doenças. Conhecer o efeito dos fatores, assim como densidade de lesão e condição nutricional das plantas, que podem influenciar a produção de esporos é necessário para a simulação de epidemias. A produção de esporos de lesões esporulando influencia a densidade do estabelecimento de novas lesões no tecido do hospedeiro, juntamente com a influência da dispersão de esporos depositados causando lesões.

Quando a dispersão de esporos e a aterrissagem são ignorados, o fator de multiplicação integra estes fatores. A taxa de progresso da doença no hospedeiro pode ser mostrada em alguns casos em aumentar com o inverso do período latente e com o logaritmo do fator de correção. Quando o fator de multiplicação é baixo, então, esse fator afeta a taxa da epidemia mais que o período latente (VALLAVIEILLE-POPE et al., 2000).

A avaliação dos parâmetros epidemiológicos é fundamental para muitas aplicações de patologias de plantas. Desenvolvimentos epidemiológicos também prevêem modelos que exigem avaliação de variáveis quantitativas do ciclo de infecção.

Simuladores de Doenças

Além dos modelos de simulação voltados às culturas, muitos esforços foram realizados para o desenvolvimento de simuladores de doenças de plantas. Segundo Fernandes et al. (1994), dentre os primeiros relatos encontra-se o EPIDEM, para a alternariose em tomate (WAGGONER; HORSFALL, 1969), e o EPIMAY, para a queima da folha do milho (WAGGONER et al., 1972). A partir dos trabalhos citados, muitos outros modelos foram desenvolvidos para a simulação de epidemias, alguns sendo utilizados pela academia com fins educacionais e outros, para aplicações práticas em sistemas de auxílio à tomada de decisões.

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 e 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).

Modelos de simulação de epidemias têm sido vislumbrados por muitos como uma ferramenta de utilidade para agricultores e agentes de extensão, com vistas a apoiá-los na tomada de decisão com relação ao controle da doença, podendo projetar situações e estimar a resposta do sistema ao tipo de manejo ou às alternativas disponíveis (FERNANDES et al., 1994; DELPONTE et al., 2004).

Segundo Fernandes et al. (1994), a maioria dos simuladores de

epidemias traz em si a equação da taxa básica de infecção de Vanderplank, visto que os modelos mais simples se baseiam na equação original, considerando um período latente p , um período infeccioso i e uma taxa R . A epidemia inicia com um conídio depositado numa planta suscetível germinando e, após completar o período latente, estabelecendo uma lesão, iniciando a esporular continuamente durante o período infeccioso. Durante esse período de esporulação, novos esporos são produzidos, podendo iniciar uma nova lesão, que, ao final do período latente, produzirá novos esporos, os quais podem originar novas lesões.

DelPonte et al. (2006), em seu artigo, relaciona um grupo de doze modelos de ferrugem, organizando-os em modelos de simulação (sete) e modelos empíricos (cinco). Modelos de simulação são baseados em conceitos derivados de um patossistema e ajudam a melhorar o entendimento da estrutura e comportamento de um sistema biológico. Por sua vez, modelos empíricos são tipicamente construídos através de relacionamentos estatísticos de variáveis explanatórias com dados experimentais.

Entre os modelos de simulação relacionados por DelPonte et al. (2006) estão o SOYRUST e o CLIMEX como modelos epidemiológicos, e o HYSPLIT e o SRAPS, como modelos aéreo-biológicos. Os modelos aéreo-biológicos mostram-se importantes quando se necessita controlar a entrada de uma nova praga numa determinada área. Como exemplo, pode-se citar a necessidade de monitoramento da ferrugem da soja nos Estados Unidos da América, o que fez com que grupos de pesquisadores desenvolvessem um grande número de modelos de simulação (MAGAREY et al., 2007).

Portanto, uma descrição sucinta de alguns modelos relatados por

DelPonte et al. (2006) pode ser encontrada abaixo:

- SOYRUST - É um modelo de simulação para a ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), desenvolvido para avaliar epidemias da doença, simulando o aumento diário da severidade da doença em duas variedades: reflete 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 racionalizar dados coletados, com vistas a obter um método de avaliação do sistema. As taxas de infecção foram preditas utilizando o orvalho e a temperatura após a inoculação como variáveis independentes ($R^2 = 0,88$, $P < 0,0001$). Os modelos exponenciais, que usaram dia fisiológico como uma variável independente, explicaram 98% das variações do período latente e senescente das lesões da doença (YANG et al., 1991; DELPONTE et al., 2006).
- CLIMEX - É um modelo computacional utilizado para avaliar o efeito das mudanças climáticas em processos biológicos. Permite a estimativa da distribuição geográfica potencial e a abundância sazonal de uma espécie em relação ao clima. Os modelos do CLIMEX consistem num conjunto de parâmetros que definem as condições ideais de temperatura e umidade, os quais permitem o crescimento populacional de uma determinada espécie durante uma estação favorável, e um conjunto de parâmetros de estresse, que definem sua habilidade para sobreviver em estações desfavoráveis (SUTHERST; MAYWALD, 1985; MCCLAY, 2005; DELPONTE et al., 2006).
- HYSPLIT - (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) - É um modelo que simula a simples trajetória de par-

tículas, sua dispersão, concentração e deposição, originado de uma determinada localização geográfica e período do ano. É um modelo de dispersão para simular o transporte a longa distância de *P. pachyrhizi* utilizando prognósticos climáticos de um mês. É o resultado do trabalho cooperativo do NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) e BOM (Australia's Bureau Of Meteorology) (DELPONTE et al., 2006; NOAA, 2007).

- SRAPS - (Soybean Rust Aerobiology Prediction System) - É um modelo modular que trata da maioria dos estádios dos processos aerobiológicos, como a produção de esporos, sua liberação e saída do dossel, mortalidade e deposição em regiões alvo. O modelo requer como dados de entrada informações sobre a localização geográfica do inóculo (DELPONTE et al., 2006).

Em Aris (2000) encontra-se a descrição do desenvolvimento de um modelo de simulação para a mancha da gluma do trigo. O modelo foi criado e adaptado para as condições climáticas prevalentes na Carolina do Norte, EUA, utilizando dados climáticos diários, com o objetivo de ser utilizado posteriormente para toda a região. A metodologia principal utilizada neste trabalho foi a adição de um modelo de doença a um modelo de crescimento de uma cultura já existente, neste caso o CERES-Wheat, do qual saídas (área foliar) serviram de entrada para o modelo doença.

PAVAN (2007) também relata em seu estudo a utilização do modelo CropSim-Wheat para a modelagem e simulação de doenças. PAVAN (2007) utilizou o modelo para o patossistema ferrugem da folha do trigo, onde o autor incorpora ao modelo de crescimento de trigo o módulo disease (módulo doença). Para o desenvolvimento deste

modelo genérico, foram utilizadas as mais variadas e heterogêneas tecnologias. Para o desenvolvimento do modelo tomou-se por base o ciclo de vida do patógeno, criando uma estrutura facilmente parametrizável, buscando, dessa forma, obter os resultados esperados. Como os modelos necessitam de integração (modelo de crescimento do trigo e do progresso da doença), todo processamento se dá pela troca de dados sobre o número de folhas criadas e a área disponível sobre cada uma (área sadia) naquele instante e pela informação sobre a área que a doença está utilizando (área infectada).

O modelo é composto pelos módulos Simulator (Simulador), Initial Condition (Condições iniciais), Plant (Planta), Organ (Órgão), Disease (Doença), Cloud (Núvem - representam a quantidade de esporos disponíveis para novas infecções), CloudO (Núvem do Órgão), CloudP (Núvem da Planta), CloudF (Núvem do Campo), Lesion-Cohort (Grupo de Lesões), Interface (Interface com o Usuário), RInterface (Interface com o R), Basic (Interface implementada pelos demais módulos), Weather (Clima) e Statistic (Estatísticas), desenvolvidos como classes da linguagem Java, os quais descrevem as características do grupo que representam, estando organizadas de forma hierárquica a fim de representar o modelo da forma mais próxima possível da realidade.

O modelo é de passo diário, alimentando-se de dados climáticos armazenados em bancos de dados, tanto prognósticos como observados e 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, 2007).

O modelo de simulação do patossistema *Puccinia* -Trigo 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. 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).

Willocquet e Savary (2004) apresentam um modelo de simulação epidemiológico integrando três escalas organizacionais de populações em plantas hospedeiras, sendo elas pequenas áreas (sítios), folhas e plantas inteiras. O modelo tem como objetivo, incorporar essas escalas numa estrutura espacial hierárquica de uma epidemia, utilizando taxas de auto-deposição, deposição de um propágulo produzido numa lesão localizada na própria folha, e allo-deposição, deposição de um propágulo produzido numa lesão localizada em outra folha da mesma planta ou outra planta.

Com um passo diário, o modelo simula o ciclo de infecção na escala do sítio, da folha e da planta. Na escala do sítio, o modelo distingue três tipos de infecções: (i) infecções de áreas localizadas na folha doente, (ii) infecções de áreas pertencentes a folhas saudáveis de uma planta infectada e (iii) infecções de áreas localizadas em plantas saudáveis. A distinção destes três tipos de infecções permite a incorporação de parâmetros epidemiológicos para a propagação da doença em diferentes escalas, assim como as taxas de auto-deposição e allo-deposição dos propágulos (WILLOCQUET; SAVARY, 2004).

Para o sítio, mais baixa escala, o modelo simula a dinâmica das áreas livres, latentes, infecciosas e removidas, considerando que não há propágulos vindos de fora, que o número de áreas, folhas e plantas não muda no tempo e que não há expansão das lesões.

Além de fornecer uma base para avaliar a eficiência potencial do uso de diferentes cultivares com suscetibilidade e resistência num patossistema, fornece uma maneira de investigar os efeitos da interação entre a arquitetura do hospedeiro e a disseminação do patógeno na dinâmica da epidemia (WILLOCQUET; SAVARY, 2004).

A ferramenta DESSAC (Decision Support System for Arable Crop) foi implementada no Reino Unido para aprimorar o uso racional de fungicidas em áreas de trigo. Este objetivo foi alcançado pelo desenvolvimento de um software de computador baseado num sistema de suporte de decisão (DSS) para ajudar nas tomadas de decisões no controle de doenças de trigo de inverno. Os sistemas de suporte de decisão fornecem informações relevantes para a decisão e permitem aos usuários perguntas do tipo: “O que se.....?” ou seja, questionamentos para testar as consequências de diferentes decisões. O modelo de doenças de trigo foi desenvolvido como um sistema que opera em um software específico (DESSAC Shell), capaz de operar um número de sistemas de suporte de decisões para produção de culturas (BROOKS et al., 2001).

Entretanto, essa ferramenta é composta por vários modelos, dentre os quais está inserido também o modelo de crescimento e desenvolvimento de doenças, que simula as principais doenças foliares de trigo de inverno como: septória, ferrugens, oídio entre outras. O modelo simula a infecção e o progresso da doença nas seis últimas folhas do dossel. A estrutura do modelo genérico inclui os efeitos de resistência

dos cultivares no crescimento da doença, e portanto, são descritas as características das doenças. Quando possível os fatores ambientais são quantificados através de dados publicados. Os parâmetros remanescentes são montados a partir de dados experimentais de progresso de doença para investigar os efeitos do ambiente no desenvolvimento epidêmico. A produtividade é afetada primeiramente pela ocorrência de doença nas folhas superiores do dossel da planta e, por esta razão, são modeladas apenas as seis folhas superiores do dossel (BROOKS et al., 2001).

Os níveis de doença são simulados pela construção de uma série de infecções diárias que são dependentes do tempo de desenvolvimento da planta, condições climáticas e qualquer aplicação de fungicida que tenha sido realizada. A taxa de desenvolvimento da doença é em grande parte controlada pela temperatura (KING et al., 1983), assim o crescimento de uma infecção é modelada em função do tempo térmico. A expressão do evento de uma única infecção é seguida pela solução da equação logística $dy / dT = 8 y (1 - y)$ com $y(0) = a$ onde, y é a porcentagem de doença na folha com o tempo térmico T (°C dias, base zero). O modelo logístico foi utilizado para representar o progresso da doença tanto numa escala de campo como também na escala de planta.

Os níveis de infecção numa folha da planta dependem da quantidade da fonte de inóculo, a distância entre o alvo e a fonte, condições ambientais, resistência de cultivares e o efeito de proteção de qualquer aplicação de fungicida. O objetivo do modelo é de estimar o risco de ocorrência de doença utilizando dados ambientais diários. Dados experimentais são utilizados para obter uma eficiência de infecção devido às condições ambientais, que combina o seu impacto na esporulação, transmissão e germinação. Com exceção da resistência de cultivares,

o efeito de cada um desses fatores diferem entre as doenças, porém apresentam um comportamento funcional semelhante. O efeito da resistência de cultivares é quantificada pelo grau de resistência a doença (1=suscetível e 9=resistente).

O modelo de simulação de doenças de trigo, associado a um mecanismo genérico de simulação de cultura (DESSAC Shell) fornecem um ambiente dentro do qual estão inseridas informações independentes e relevantes para que o técnico ou o produtor possam tomar as melhores decisões referentes a produção da cultura. Este modelo possibilita a adição de novos dados para atualizar o sistema dos modelos e as bases de dados. O objetivo específico do projeto, os quais tem sido alcançados, foram: desenvolver um mecanismo genérico para o suporte de tomadas de decisões (DESSAC Shell) na produção de culturas, e desenvolver um sistema de suporte de decisões específico que permite a utilização racional de fungicidas no controle de doenças no trigo de inverno (BROOKS et al., 2001).

Entretanto, percebe-se que existe uma ampla gama de ferramentas e modelos de simulação sendo utilizadas nas mais diversas culturas e com finalidades bastante distintas. Porém, essas ferramentas ainda podem alcançar um maior espaço no cenário agrícola nacional e mundial, auxiliando nas tomadas de decisões e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento da produção e da produtividade de culturas.

CAPÍTULO I

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE FERRUGEM DA FOLHA DO TRIGO

Guilherme Mallmann

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária

Universidade de Passo Fundo

C.P. 611, 99001-970

RESUMO

A ferrugem da folha (*Puccinia triticina*) é uma das principais doenças do trigo no mundo e de ocorrência comum em todo o Brasil. Os sinais da doença são caracterizados pela presença de pequenas pústulas, de coloração avermelhada disseminadas predominantemente na região adaxial do limbo foliar. A germinação dos esporos ocorre em períodos de 6 a 8 horas de molhamento por orvalho, chuva ou irrigação na superfície das folhas. Em torno de 7 a 10 dias após a penetração do tubo germinativo ocorre a esporulação. Os fatores mais importantes que determinam a taxa de progresso de epidemias de ferrugem da folha incluem as condições ambientais, a frequência de raças virulentas e o nível de resistência genética de cada cultivar. A doença desenvolve-se rapidamente quando há água livre nas folhas e temperaturas em torno de 20°C. Gerações sucessivas de uredosporos podem ser produzidas a períodos de 10 a 14 dias, se as condições forem favoráveis. O desenvolvimento e a implementação de medidas de controle na cultura do trigo requerem informações precisas e acuradas sobre o dano causado pelos patógenos. Limiares de danos empíricos foram determinados em ensaios de campo, porém são adequados apenas para explicar os resultados e podem falhar se forem

extrapolados. Portanto, uma estratégia confiável de prever danos são os modelos de simulação dinâmicos de crescimento de plantas acoplado ao modelo de doença em resposta as variáveis ambientais. O CropSim-Wheat, é um modelo que representa o crescimento e o desenvolvimento do trigo, entretanto, um modelo genérico de doença foi acoplado a este modelo. O objetivo desse trabalho foi calibrar e validar o modelo utilizando dados observados da severidade da ferrugem coletados em Passo Fundo, RS, durante os anos de 2000 a 2007. O modelo de simulação do patossistema Puccinia-Trigo simula corretamente o crescimento da área foliar do trigo e o progresso da ferrugem da folha. Uma análise de sensibilidade foi realizada com sete parâmetros do modelo de doenças para o ano de 2004. A produtividade dos grãos varia conforme as alterações feitas nos parâmetros do modelo. O acréscimo de 20% nos parâmetros da eficiência da infecção, inóculo inicial, limiar de molhamento, nuvem de esporos de autoinfecção, nuvem de esporos de aloinfecção na mesma planta (NEAMP) e nuvem de esporos de aloinfecção em uma nova planta (NEANP) resulta num decréscimo, obtendo uma produtividade, 3160 kg.ha⁻¹, 3255 kg.ha⁻¹, 2629 kg.ha⁻¹, 2714 kg.ha⁻¹, 3241 kg.ha⁻¹ estimada pelo modelo, respectivamente. O decréscimo de 20% nos parâmetros da eficiência da infecção, inóculo inicial, limiar de molhamento, nuvem de esporos de autoinfecção, nuvem de esporos de aloinfecção na mesma planta (NEAMP) e nuvem de esporos de aloinfecção em uma nova planta (NEANP) resulta num acréscimo atingindo uma produtividade de 3259 kg.ha⁻¹, 3247 kg.ha⁻¹, 3194 kg.ha⁻¹, 3255 kg.ha⁻¹, 3253 kg.ha⁻¹, 3111 kg.ha⁻¹ estimada pelo modelo, respectivamente.

ABSTRACT

CALIBRATION AND VALIDATION OF A WHEAT LEAF RUST MODEL

Leaf rust (*Puccinia triticina*) is a major wheat disease world wide and of common occurrence throughout Brazil. Leaf rust causes very small pustules, reddish in color and erupts predominantly in the adaxial portion of the leaf. The leaf rust is dispersed by wind and survives in volunteer wheat. Leaf wetness duration of 6-8 hours provided by

dew, rain or irrigation is necessary to the ingestion process. The latent period duration is around 7 to 10 days. The most important factors governing the epidemic rate include the environment conditions, virulent races frequency and cultivar resistance. Leaf rust is rapid in susceptible cultivars if free moisture is readily available and temperature is around 20°C. Under these conditions a new generation of spores is available in a period of 10 to 14 days. The development and implementation of control measures requires accurate and precise information on the damage caused by leaf rust. Empirical damage thresholds have been determined under field trials but are only adequate to explain the results and may fail if extrapolated. An approach to estimated disease damage is to use dynamic simulation models mimicking the growth of plants coupled to a disease model in response to environmental variables. The CropSim-Wheat, is a simulation model which represents wheat development and growth. A generic disease module has been coupled to Cropsim-Wheat. This work had as objective to calibrate and to validate the generic disease model using observed data of rust leaf severity, collected in Passo Fundo, RS, during 2000 to 2007. The simulation model for the pathosystem Wheat-Puccinia, simulated accordingly wheat leaf area growth and the leaf rust progress. A sensitivity analysis was performed in seven parameters of the disease model for the year 2004. Grain yield varied in response to changes in the parameters. The yield due to 20% increase in infection efficiency, initial inoculum, wetness threshold, autoinfection spores cloud (NEA), aoinfection spores cloud in the same plants (NEAMP), aoinfection spores cloud in a new plant (NEANP), resulted in a decrease of about 2623 kg.ha⁻¹, 3160 kg.ha⁻¹, 3255 kg.ha⁻¹, 2629 kg.ha⁻¹, 2714 kg.ha⁻¹, 3241 kg.ha⁻¹ estimated by model, respectively. The yield due to 20% decrease in infection efficiency, initial inoculum, wetness threshold, autoinfection spores cloud (NEA), aoinfection spores cloud in the same plants (NEAMP), aoinfection spores cloud in a new plant (NEANP), resulted in a increase of about 3259 kg.ha⁻¹, 3247 kg.ha⁻¹, 3194 kg.ha⁻¹, 3255 kg.ha⁻¹, 3253 kg.ha⁻¹, 3111 kg.ha⁻¹ estimated by the model, respectively.

Introdução

A ferrugem da folha causada por *Puccinia triticina* Erikss. (= *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici*) é uma das principais doenças desta cultura no mundo e de ocorrência comum em todo o Brasil. O fungo que causa a ferrugem da folha cresce apenas em hospedeiros vivos. A ferrugem da folha pode atacar o trigo, triticale, cevada e muitas outras gramíneas relacionadas. Entretanto, o papel destas espécies como hospedeiros funcionais na natureza ainda não é claro para a “forma specialis” *tritici*, mas talvez isso não ocorra em condições de campo.

Os sinais da ferrugem da folha são caracterizados pela presença de pústulas de formato ovalado, de coloração alaranjadas disseminadas predominantemente na região adaxial do limbo foliar (ROELFS, 1985). As pústulas (uredosporos) rompem a epiderme, porém sem dilacerar o tecido do hospedeiro. Os uredosporos são de coloração laranja escuro, equinulados e esféricos. Os teliosporos são de coloração café com paredes celulares planas, espessas e arredondadas no ápice. Os teliosporos se formam nas bainhas e nas folhas durante as últimas etapas de desenvolvimento do trigo.

O patógeno é disseminado pelo vento e sobrevive em plantas hospedeiras no intervalo entre cultivos de trigo. A germinação dos esporos ocorre com períodos de 8 horas de molhamento por orvalho, chuva ou irrigação na superfície das folhas. Em torno de 7 a 10 dias da penetração do tubo germinativo ocorre a esporulação da ferrugem, que é o sinal mais conhecido nas condições de campo. Os fatores mais importantes que determinam o progresso mais rápido ou mais lento de epidemias de ferrugem da folha incluem o ambiente, a frequência de raças virulentas, o momento de aplicação e o modo de ação dos

fungicidas, assim como o nível de resistência genética de cada cultivar (SACHE, 2000).

A dispersão local dos uredosporos é influenciada pela latitude e os padrões de vento respectivos. Em geral, os esporos movem-se de oeste a leste devido aos ventos que são o resultado da rotação da terra. Em latitudes progressivamente altas, os ventos tendem a levar os esporos mais do Sul para o Hemisfério Norte.

Em dias quentes o ar tende a subir dentro do dossel, e quando a umidade for alta, menos esporos deixam a urédia. Os ventos calmos secam o dossel, agitam as folhas liberando os uredosporos das urédias. Altas velocidades dos ventos podem resultar na liberação de mais esporos, porém areja rapidamente e dilui a concentração sobre o dossel e pode ser mais importante gerando transporte e escape do local. A chuva precipita uredosporos do ar, enquanto deposita nas plantas água livre. Porém, a chuva também pode lavar os esporos das superfícies da planta, e a alta umidade restringe o movimento do esporo. Outro fator importante é a mudança de temperatura devido à chuva influenciando o progresso da doença (SACHE, 2000).

A doença desenvolve-se rapidamente quando há umidade livre sobre as folhas e temperaturas em torno de 20°C. As próximas gerações sucessivas de uredosporos podem ser produzidas a cada período de 10 a 14 dias, se as condições forem favoráveis. A chuva é considerada freqüentemente um fator condutor para a expansão da doença pois o evento da chuva é seguido por um período estendido de umidade da folha, que é crítico para a infecção da ferrugem (processo de penetração e germinação) (NIKS, 1986). Além da influência direta da chuva na expansão da epidemia, há a remoção dos esporos da ferrugem do cereal através de gotas da chuva. A chuva é menos eficaz para a re-

moção do esporo inicial, e pode ser muito mais eficaz na expansão da doença. A chuva se for intensa, provavelmente será mais eficiente, principalmente se associada com ventos fortes. Quando há uma brisa, aumenta a distância de dispersão de esporos removendo durante os eventos da chuva, pode influenciar a expansão da infecção em escalas maiores. A importância relativa do vento e da chuva como agentes de dispersão é difícil de avaliar desde que ambos os agentes operam em escalas temporais e de espaços diferentes (SACHE, 2000).

A ferrugem da folha, disseminada pelo vento, sobrevive em plantas hospedeiras no intervalo entre cultivos de trigo. Segundo Picinini e Fernandes (2003), o trigo no Brasil é atacado por grande número de doenças e as condições climáticas, onde predominam temperaturas altas e precipitações pluviais freqüentes, favorecem o desenvolvimento de inúmeras doenças, principalmente aquelas causadas por fungos.

Dentre as medidas de controle o uso de cultivares resistentes, a eliminação de plantas voluntárias e de hospedeiros secundários, auxiliam na redução do patógeno. Além destas práticas, o controle químico também é bastante utilizado, com produtos triazóis e a mistura de triazóis com estrubirulinas que apresentam maior eficiência. O desenvolvimento e a implementação de medidas de controle na cultura do trigo requerem informações precisas e acuradas sobre o dano causado pelos patógenos. Portanto, uma estratégia confiável de prever danos é o emprego de simulação que usa modelos matemáticos de crescimento da planta em relação ao ambiente em que ela se encontra e, também, simula as alterações produzidas pelo patógeno no crescimento, na fisiologia, e as conseqüências no rendimento (SHAW, 1997). O objetivo deste trabalho consiste em calibrar e validar um modelo genérico de simulação encontrado na literatura, utilizando dados históricos coletados a campo para o patossistema *Puccinia* -Trigo.

Material e Métodos

Este trabalho consistiu inicialmente, de uma coleta e organização de dados históricos de experimentos de trigo contendo diversas informações agronômicas da cultura, através de exames de planilhas e cadernos de campo de pesquisadores. Segundo informações fornecidas por pesquisadores os experimentos foram realizados na área experimental da Embrapa-Trigo. O tipo de solo era latossolo vermelho escuro distrófico, previamente adubado com 250kg por hectare da fórmula 5-25-25 (N-P-K). As cultivares utilizadas foram semeadas entre 15 e 20 de junho, com uma semeadora de parcelas Hássia, com linhas espaçadas em 17cm. A densidade de semeadura foi de 330 sementes por metro quadrado. Entretanto as planilhas eletrônicas contendo os resultados dos experimentos descritos acima, forneciam uma grande diversidade de dados e informações como por exemplo a data de semeadura das cultivares (BR23, BR38, Embrapa27, Embrapa16) em seis tratamentos. Os tratamentos constituíram-se do fungicida Azoxystrobin aplicado nas dosagens de 125 g.i.a. ha⁻¹, 62,5 g.i.a ha⁻¹, 31,25 g.i.a. ha⁻¹, 15,62 g.i.a. ha⁻¹ e 7,82 g.i.a. ha⁻¹ respectivamente, com cinco doses de fungicidas com uma testemunha onde foram utilizadas cinco plantas para cada tratamento, entretanto, nesse trabalho foram utilizados apenas os dados do tratamento testemunha (sem fungicida) para cultivar Embrapa16 no patossistema ferrugem da folha do trigo. Além disso, nessas planilhas haviam também informações como a área foliar e a severidade de outras doenças como oídio, manchas foliares e ferrugem da folha nas quatro folhas superiores do dossel da planta. A partir dessas informações foi realizada uma média de severidade da ferrugem da folha de todas as plantas avaliadas, para as três folhas superiores folha bandeira (fb), primeira folha abaixo da folha bandeira

(fb-1) e segunda folha abaixo da folha bandeira (fb-2) em diferentes datas de avaliações no período de 2000 à 2007, com exceção do ano 2005 que não apresentou informações de severidade da ferrugem nas planilhas eletrônicas consultadas. Os dados do número de horas de umidade relativa acima de 90%, foram retirados da estação meteorológica de Passo Fundo.

A escolha do patossistema ferrugem da folha do trigo foi realizada devido a importância dessa doença na cultura, pois ocorre em todas as regiões tritícolas do país, ocasionando sérias reduções no rendimento, podendo ocasionar perdas em torno de 40%.

O modelo CropSim-Wheat, substituto do Ceres-Wheat, é um dos modelos de simulação pertencentes à suite do DSSAT, responsável pela simulação do crescimento e desenvolvimento do trigo. No Brasil, o CropSim-Wheat tem sido testado, calibrado e validado por pesquisadores, sendo utilizado para simular o processo do desenvolvimento de cultivares de trigo. Este modelo permite a sua parametrização por meio de arquivos texto. Suas saídas, resultados da simulação, podem ser utilizadas para alimentar outros modelos responsáveis pela simulação de doenças em plantas, por exemplo (FERNANDES et al., 2004; DELPONTE et al., 2005). É composto por um módulo planta de trigo que se conecta com o módulo de clima e de solo, pertencentes a suite do DSSAT, os quais computam a energia e a água disponível para o crescimento da planta de trigo, ao passo que o módulo planta de trigo simula os eventos fenológicos, expansão foliar, acúmulo de carboidratos e a partição entre parte aérea e raízes. A alimentação do modelo consiste em características da planta de trigo (cultivares) e dados de clima (radiação solar, temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação), assim como práticas agronômicas, como data de semeadura e espaçamento (HUNT; PARARAJASINGHAM, 1995),

entretanto, a descrição dos códigos genéticos utilizados pelo modelo CropSim-Wheat podem ser visualizados na Tabela 4.

A partir do modelo genérico de doenças de trigo que une diversas linguagens de programação, interligando as sub-rotinas e sub-módulos (doença) ao modelo de crescimento de trigo (CropSim), foram utilizados dados observados à campo contendo valores de severidade da ferrugem da folha no período correspondente de 2000 à 2007, com a finalidade de calibrar e validar o modelo com dados reais e verificar o impacto da ferrugem na cultura do trigo (PAVAN, 2007).

Como critérios estatísticos na validação, a fim de se avaliar o grau de ajuste entre os dados observados e simulados, foram quantificados os erros através das medidas do Erro Médio Quadrático (Root Mean Square Error - RMSE), do Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error - MAE) e o Erro Médio Padrão (Mean Standard Error - MSE), as análises estatísticas foram feitas usando o aplicativo R version 2.6.0 (Tabela 7).

Após a calibração e validação, realizou-se a análise de sensibilidade do modelo para o ano de 2004, alterando os valores de alguns parâmetros relacionados à infecção e severidade da ferrugem da folha como: eficiência de infecção, favorabilidade do ambiente, inóculo inicial, limiar de molhamento, NEA (nuvem de esporos de autoinfecção), NEAMP (nuvem de esporos de aloinfecção na mesma planta), NEANP (nuvem de esporos de aloinfecção em uma nova planta). A sensibilidade de cada parâmetro em relação a variável de produtividade da cultura (output) está representada graficamente e descrita quantitativamente. Cada parâmetro foi alterado numa amplitude de $\pm 20\%$ individualmente, enquanto todos os outros parâmetros permaneceram constantes. A análise de sensibilidade fornece informações

sobre a importância ou a sensibilidade de cada parâmetro do modelo. A descrição dos parâmetros utilizados no simulador de epidemia de ferrugem da folha são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Os valores dos parâmetros foram retirados da literatura (YANG et al., 1991; SACHE, 1997; PIVONIA; YANG, 2006) ou obtidos por meio de estimativas aproximadas e com algum sentido biológico.

Tabela 1: Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem da folha do trigo (parte 1).

Nome da variável	Descrição	Unidade	Exemplo
Eficiência de infecção	Eficiência de infecção	proporção	0.17
Favorabilidade do ambiente	Interferência do ambiente no desenvolvimento da doença	proporção	1
Frequência de deposição	Frequência de deposição de esporos	proporção	0.05
Inóculo inicial	Valor do inóculo inicial	unidades	10
Tamanho da nuvem no campo	Limite de permanência de esporos na nuvem do campo	unidade	5
Tamanho da nuvem na planta	Limite de permanência de esporos na nuvem do planta	unidade	7
Tamanho da nuvem no órgão	Limite de permanência de esporos na nuvem do órgão	unidade	10
Produção máxima de esporos	Produção máxima de esporos	unidade/dia	3000
Idade do grupo	Eficiência na produção de esporos (trapézóide) com relação a idade do cohort	dias	7, 15, 18, 37
scfA, scfB e scfC	Limitante da esporulação baseada na densidade da população	parâmetros	0.98669, 10.71894, 0.93374
Densidade máxima de esporos	Densidade máxima de esporos na nuvem	unidades	12000
NEA	Nuvem de esporos de auto-infecção	proporção	0.1

Resultados

Utilizando-se o simulador CropSim-Wheat ligado ao módulo de ferrugem da folha, várias rodadas foram realizadas para os anos de 2000 à 2007 com o intuito de verificar o comportamento do mesmo e analisar os resultados de severidade com referência às informações obtidas no campo.

Tabela 2: Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem da folha do trigo (parte 2).

Nome da variável	Descrição	Unidade	Exemplo
NEAMP	Nuvem de esporos de alo infecção na mesma planta	proporção	0.04
NEANP	Nuvem de esporos de alo infecção em nova planta	proporção	0.02
Temperatura favorável para infecção	Temperaturas cardinais utilizadas para cálculo da favorabilidade da temperatura, no período infeccioso (máxima, mínima e ótima)	temperaturas	30, 2, 15
Temperatura favorável no período latente	Temperaturas cardinais utilizadas para o cálculo da favorabilidade da temperatura, no período latente (máxima, mínima e ótima)	temperaturas	40, 0, 27
Período latente	Comprimento do período latente	dias	6
Função do crescimento no período latente	Função utilizada para o cálculo da expansão da lesão no período latente (lesão visível)	função	gompertz
Parâmetro do crescimento no período latente	Parâmetros da função utilizada no cálculo da expansão da lesão no período latente (lesão visível)	parâmetros	0.0161858, 1.563509, 0.441721
Período de infecção	Comprimento do período infeccioso	dias	20
Função do crescimento no período de infecção	Função utilizada para cálculo da expansão da lesão no período infeccioso (lesão visível)	função	exponencial

Por meio das Figuras 5 e 6 pode-se verificar os resultados obtidos com este experimento, demonstrando que o simulador acertou com relação aos anos epidêmicos e pouco epidêmicos.

O modelo foi avaliado por meio do comportamento do sistema, da dinâmica das variáveis de estado e das taxas de mudanças dessas variáveis. O modelo CropSim-Wheat unido ao módulo doença foi calibrado utilizando diversos parâmetros envolvidos na infecção e na severidade da ferrugem da folha. A validação deste modelo foi dada a partir do ajuste dos valores destes parâmetros e, posteriormente, na comparação gráfica entre os valores observados e simulados da severidade da ferrugem. O formato sigmóide da curva da progressão da ferrugem da folha do trigo nos diferentes anos avaliados (Figuras 5 a 8), confirma o resultado esperado do modelo, constatando-se que

Tabela 3: Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem da folha do trigo (parte 3).

Nome da variável	Descrição	Unidade	Exemplo
Parâmetro do crescimento no período de infecção	Parâmetros da função utilizada no cálculo da expansão da lesão no período infeccioso (lesão visível)	parâmetros	0.01507, 1.0104, 0.2125
Tamanho inicial da pústula	Tamanho inicial da pústula	cm ²	0
Tamanho máximo da pústula	Tamanho máximo da pústula (vetor: latente e infeccioso) ? lesão visível	cm ²	0.012F, 0.015F
Função do crescimento invisível	Função utilizada para o cálculo da expansão da lesão (lesão invisível ? área total)	função	exponencial
Parâmetro do crescimento invisível	Parâmetros da função utilizada no cálculo da expansão da lesão (lesão invisível ? área total)	parâmetros	0.036, 1.0104, 0.3125
Limiar de molhamento	Número mínimo de horas de molhamento necessário para criar novas lesões	horas	6
Favorabilidade acumulada	Número de dias fisiológicos necessário para a liberação dos primeiros esporos	Dias fisiológicos	25
Fator de resistência do hospedeiro	Fator de resistência do hospedeiro (0.8: sem resistência)	proporção	0.8
Número máximo de órgãos	Número máximo de órgãos por planta	unidades	10
Dia de início da simulação	Dia de início da simulação (calendário Juliano)	dia	143
Tempo máximo de vida de um órgão	Tempo máximo de vida de um órgão da planta	Dias fisiológicos	20
Temperatura cardinal	Temperaturas cardinais para cálculo de dias fisiológicos de um órgão da planta	Dias fisiológicos	0, 28, 30, 40
Data de semeadura	Data de semeadura	Datas (juliana)	166

Tabela 4: Descrição dos códigos genéticos utilizados pelo modelo CropSim-Wheat.

Código	Descrição
P1V	Quantidade relativa que o desenvolvimento é retardado para cada dia de vernalização não preenchida, assumindo que 50 dias de vernalização é suficiente para todas as cultivares.
P1D	Quantidade relativa que o desenvolvimento é atrasado, como penalidade, quando as plantas estão crescendo em um fotoperíodo uma hora mais curto que o ótimo (20 hs).
P5	Duração relativa do enchimento de grão baseado no tempo termal (graus dias acima de uma temperatura base de 10°C). Onde cada aumento unitário acima de zero adiciona 40 graus dias para um valor inicial de 300 graus dias.
G1	Número de grãos por unidade de massa da parte aérea da planta. (gãor/g)
G2	Taxa de enchimento dos grãos sob condições ótimas de crescimento. (mg/dia)
G3	Peso seco sem estresse de um único colmo (excluindo folhas e bainhas) e espiguetas quando o alongamento cessa. (g)
PHINT	Intervalo de filocron, ou seja, soma térmica em graus-dia entre o aparecimento de uma folha e a folha sucessiva

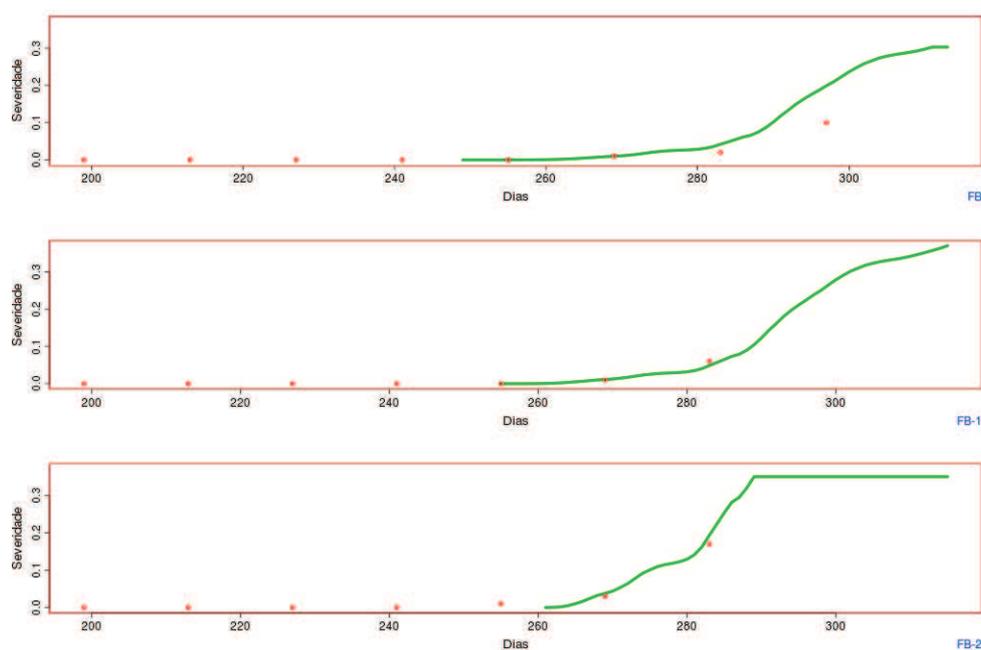


Figura 2: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2000.

mudanças nos parâmetros levaram a mudança no comportamento da epidemia. Entretanto, nos anos de 2000 e 2001 (Figuras 2 e 3) verificase através dos dados observados e simulados que foram anos pouco epidêmicos, sendo que em 2002 (Figura 4) e 2003 (Figura 5) houve um acréscimo na severidade da ferrugem, possivelmente por encontrarem um ambiente mais favorável a ocorrência da doença nesses anos. No ano 2004 (Figura 6) o parâmetro inóculo inicial teve que ser ajustado de 10, valor padrão desta variável, para 60, supondo-se que neste ano e/ou nas condições do experimento este encontrava-se em uma concentração mais elevada, provavelmente em função de vários fatores bióticos e/ou abióticos não mensurados neste trabalho, porém, a simulação e os dados observados confirmam que 2004 foi um ano

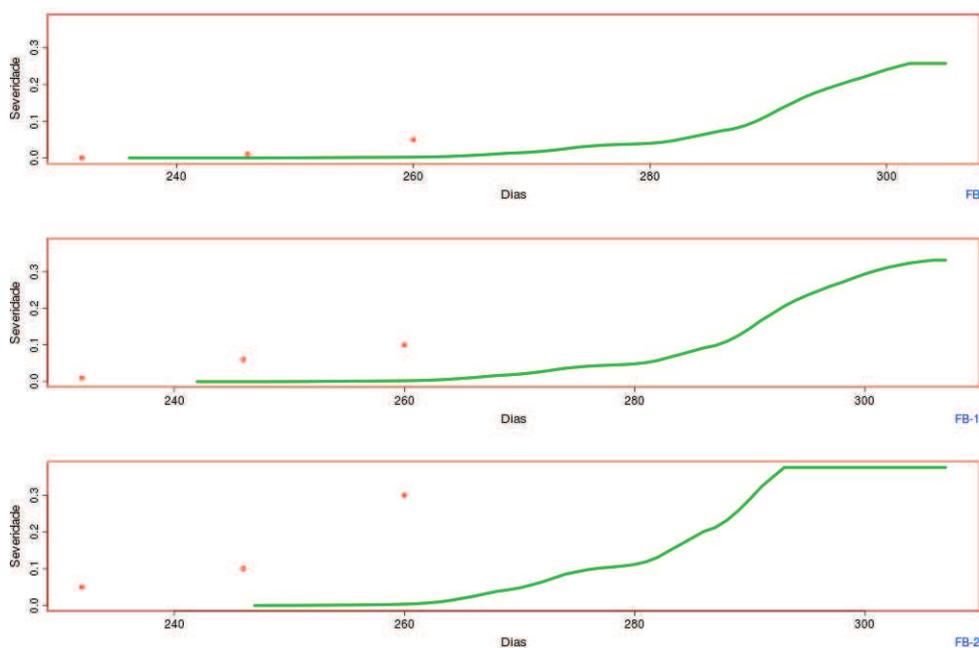


Figura 3: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2001.

menos epidêmico em comparação ao ano anterior. Nos anos de 2006 (Figura 7) e 2007 (Figura 8) verifica-se novamente a diferença entre anos pouco epidêmicos e epidêmicos, respectivamente, confirmando que o modelo de simulação está de acordo com os dados observados à campo, ou seja, calibrado e validado para esse patossistema. Nas tabelas 5 e 6 podem ser visualizado os dados climáticos referentes ao período de 2000 a 2007, mostrando a variabilidade climática entre os anos. Entretanto, a análise de performance do modelo utilizando os índices estatísticos MAE, MSE e RMSE mostram bons índices para a validação do modelo de simulação, uma vez que o ideal é a obtenção de valores o mais próximo possível de zero (Tabela 7).

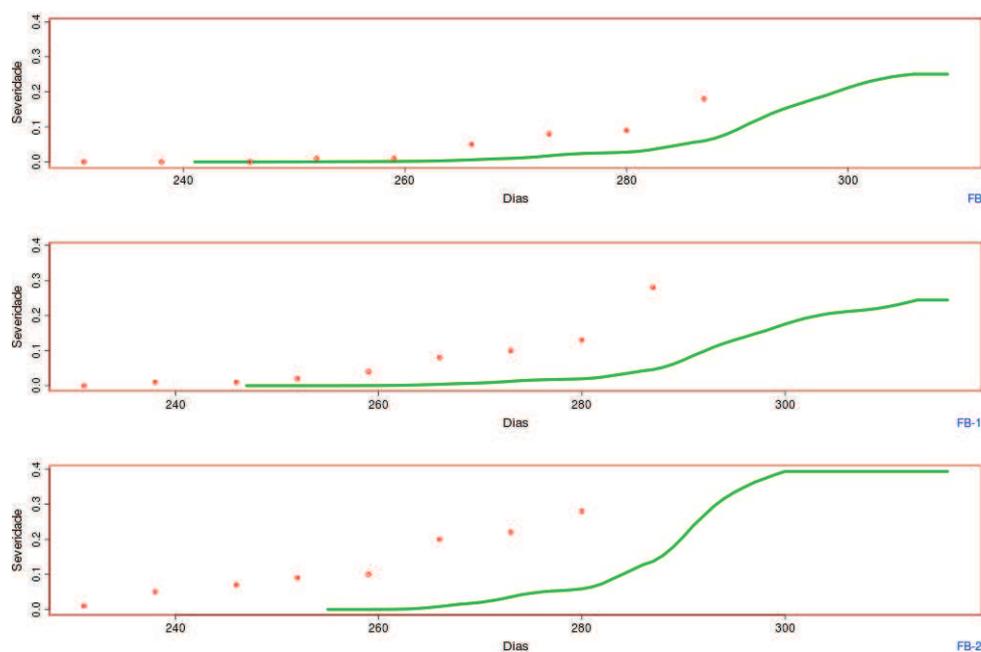


Figura 4: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2002.

A análise de sensibilidade é um método utilizado para avaliar um modelo de simulação, quando o valor de cada parâmetro é alterado individualmente e separadamente, o efeito da alteração é observado nas variáveis de saída (outputs), indicando dessa forma, qual parâmetro é o mais sensível para a variável estudada, e permite ainda, verificar se o modelo produz resultados lógicos em função de alterações nos parâmetros de entrada (inputs).

Neste estudo, a análise de sensibilidade de sete parâmetros do modelo de doenças para o ano de 2004 foram testados com uma amplitude de variação de $\pm 20\%$, para a variável da produtividade do trigo. A alteração da eficiência de infecção causa um grande impacto

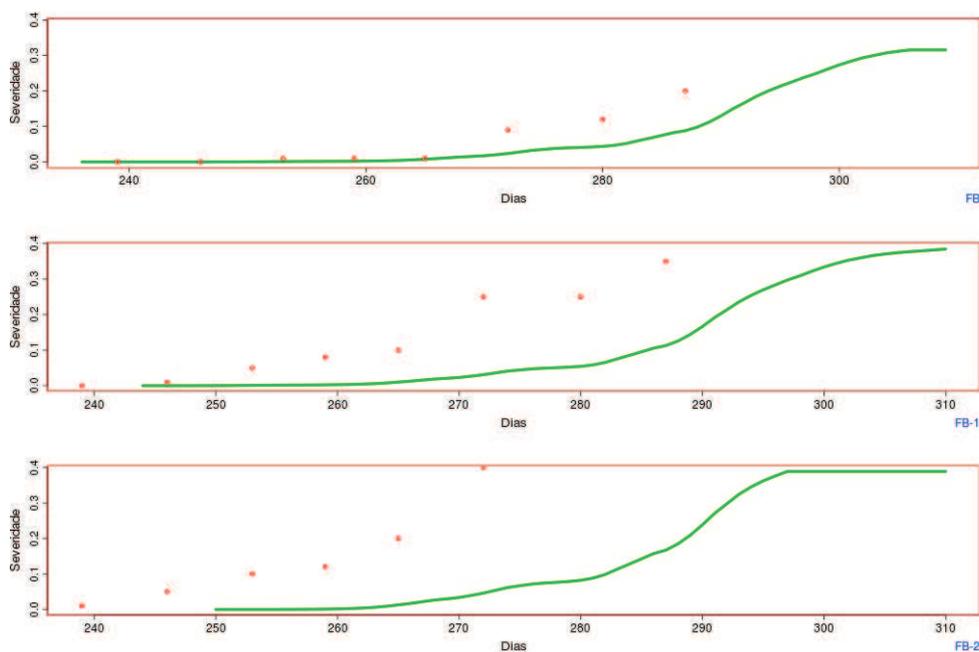


Figura 5: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2003.

na produtividade da cultura. Outros parâmetros que influenciaram drasticamente na produtividade foram as alterações de inóculo inicial, limiar de molhamento, nuvem de esporos de autoinfecção (NEA), número de esporos da aloinfecção na mesma planta (NEAMP) e número de esporos da aloinfecção para uma nova planta (NEANP), enquanto que a favorabilidade do ambiente não influenciou a produtividade na amplitude de $\pm 20\%$ conforme mostra a Tabela 8.

Discussão

Os modelos de simulação fornecem uma ferramenta para o estudo do crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como, uma possí-

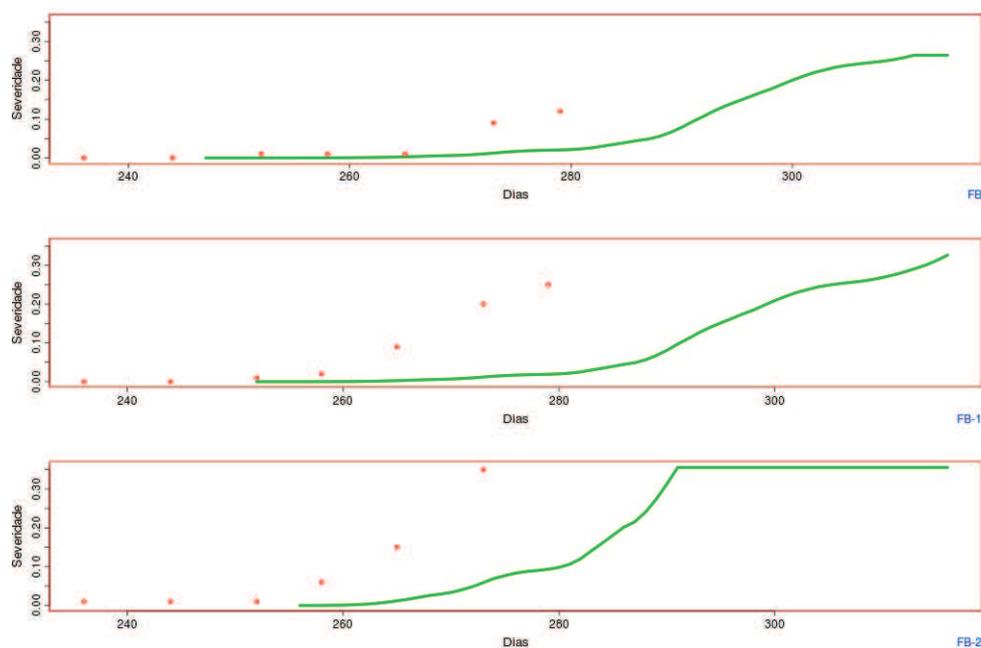


Figura 6: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2004.

vel ocorrência de pragas e doenças na cultura estabelecida. Segundo trabalho realizado por PAVAN (2007), foi desenvolvido um modelo conceitual de simulação para o patossistema ferrugem da folha no trigo, unindo várias linguagens de programação e interligando as sub-rotinas e sub-módulos (doença) ao modelo de crescimento de trigo (CropSim).

Uma das variáveis de maior importância para os modelos de simulação de doenças é o período de molhamento foliar. Tal importância se deve ao fato de que o processo epidemiológico de doenças de plantas está intimamente relacionado ao período de molhamento, uma vez que a maioria dos patógenos necessita da presença de água livre sobre as

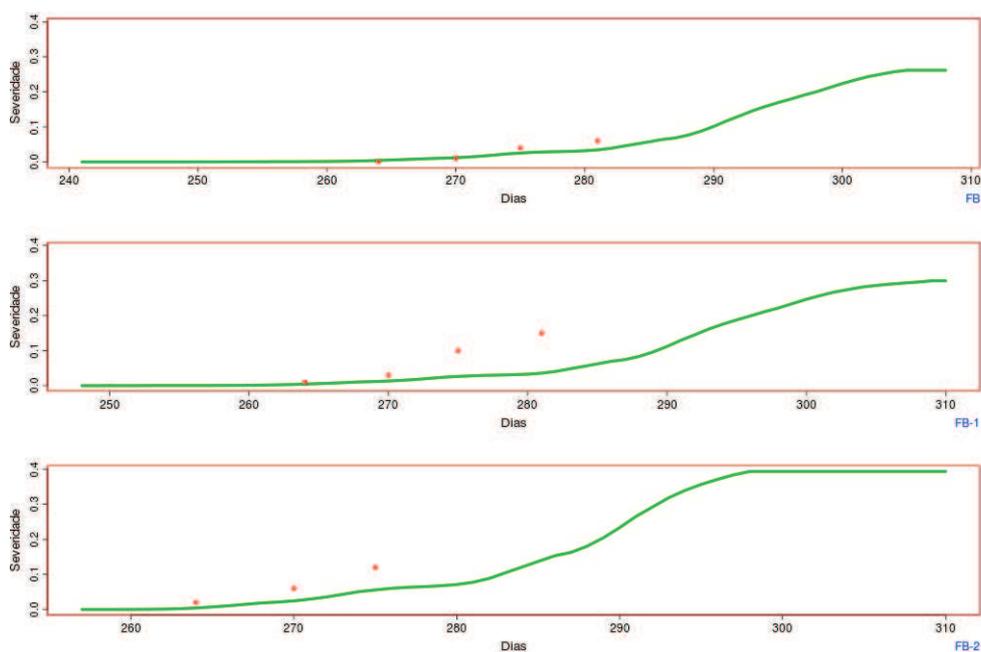


Figura 7: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2006.

plantas para a germinação dos esporos e para a infecção do tecido do hospedeiro. Portanto, esta variável é fundamental para a identificação do risco potencial de ocorrência de doenças (SENTELHAS, 2004). A determinação do período de molhamento foliar pode ser realizada de diversas maneiras, desde medidas diretas, com uso de sensores, ou por meio de estimativas baseadas em relações empíricas (SENTELHAS, 2004). Como a duração do período de molhamento (DPM) não é comumente medida nas estações meteorológicas padrões, essa variável deve ser estimada para que possa ser empregada em sistemas de alerta fitossanitários. Entre os modelos de estimativa da DPM, aqueles que utilizam os princípios físicos da formação e da evaporação do orvalho e/ou chuva tem mostrado boa portabilidade e resultados su-

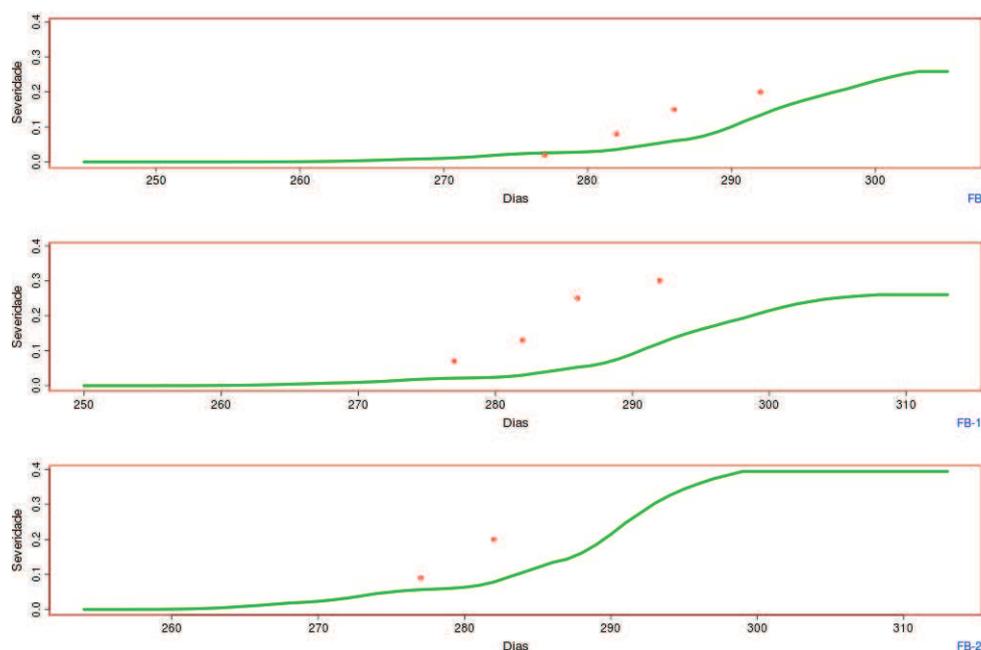


Figura 8: Comparação entre valores observados (pontos) e simulados (linha contínua) de severidade da ferrugem da folha na FB (folha bandeira), FB-1 (folha bandeira -1), FB-2 (folha bandeira -2) para o ano 2007.

ficientemente acurados para seu emprego em sistemas operacionais. Entretanto, a necessidade de se ter o saldo de radiação (R_n) como uma das variáveis de entrada é uma desvantagem dos modelos físicos, considerando que essa variável não é usualmente medida nem em estações meteorológicas nem nas culturas. Com o objetivo de solucionar esse problema, um trabalho foi realizado com o intuito de avaliar a performance de diferentes modelos de estimativa do R_n horário e de seu impacto nas estimativas da DPM com o uso do Modelo de Penman Monteith. Quando os dados medidos de DPM foram comparados aos dados estimados pelo método de Penman Monteith, tendo como base de entrada o R_n medido e estimado, poucas diferenças foram observadas. O erro absoluto médio da DPM associado às estimativas

Tabela 5: Dados climáticos médios dos meses de junho a outubro no período de 2000 a 2003.

Mês	TMin	TMax	TMédia	Volume Chuva	Dias com Chuva
2000					
Junho	11,06	19,51	15,28	205,50	15
Julho	8,08	17,74	12,91	559,10	11
Agosto	9,13	20,37	14,75	83,80	12
Setembro	10,62	20,81	15,71	169,00	11
Outubro	14,89	24,49	19,69	339,30	16
2001					
Junho	9,74	19,20	14,47	106,30	12
Julho	9,03	19,33	14,18	103,50	11
Agosto	12,45	22,63	17,54	146,10	6
Setembro	11,95	20,19	16,07	240,00	18
Outubro	13,88	24,69	19,28	275,50	12
2002					
Junho	9,30	18,56	13,93	241,90	16
Julho	8,55	18,20	13,38	146,20	14
Agosto	11,35	20,40	15,87	233,80	15
Setembro	9,07	20,02	14,54	253,60	13
Outubro	14,83	24,06	19,45	372,30	21
2003					
Junho	11,82	20,93	16,37	152,60	16
Julho	11,82	20,93	16,37	100,60	7
Agosto	7,51	19,11	13,31	57,50	6
Setembro	10,82	22,59	16,71	64,00	10
Outubro	11,82	20,93	16,37	237,10	11

de Rn estiveram entre 1,0 e 1,5 h, o que é bom o suficiente para ser empregado em sistemas de alerta fitossanitários.

As diversas formas de disponibilização de informações empregadas no modelo, possibilitam uma grande abrangência da plataforma, estando à disposição dos interessados nos mais variados lugares. A flexibilidade oferecida pelas interfaces Web (FRAISSE et al., 2006)

Tabela 6: Dados climáticos médios dos meses de junho a outubro no período de 2004 a 2007.

Mês	TMin	TMax	TMédia	Volume Chuva	Dias com Chuva
2004					
Junho	10,27	20,26	15,26	133,50	10
Julho	8,05	17,24	12,64	88,80	14
Agosto	9,10	21,04	15,07	53,00	8
Setembro	12,74	23,14	17,94	234,30	15
Outubro	12,01	24,29	18,15	193,20	11
2005					
Junho	12,68	20,29	16,49	273,10	13
Julho	7,98	17,66	12,82	83,70	6
Agosto	10,67	21,36	16,02	135,40	10
Setembro	8,87	17,36	13,11	152,70	16
Outubro	14,14	23,66	18,90	384,80	17
2006					
Junho	10,72	20,02	15,37	167,50	11
Julho	10,96	19,99	15,48	147,90	11
Agosto	9,28	20,15	14,71	132,20	8
Setembro	9,83	21,25	15,54	112,80	11
Outubro	14,38	26,85	20,61	95,10	8
2007					
Junho	9,61	24,51	17,06	48,60	15
Julho	6,43	25,65	16,04	227,70	18
Agosto	8,70	27,85	18,28	72,40	14
Setembro	13,59	31,56	22,58	95,20	11
Outubro	14,85	27,94	21,40	194,00	19

conduz a que a tomada de decisão seja facilitada tendo em vista a praticidade e a rápida obtenção das respostas sobre o problema em foco.

Tendo em vista, o carácter modular aplicado ao modelo de simulação de doenças, pode-se, por meio da parametrização do sistema, executar concomitantemente o modelo de crescimento e desenvolvi-

Tabela 7: Análise da performance do modelo com os índices estatísticos MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Square Error) e RMSE (Root Mean Square Error) comparando os valores simulados e observados nas três folhas superiores da planta no período 2000 à 2007.

Ano	Folhas	MAE	MSE	RMSE
2000	Fb	0,0669125	0,01436468	0,1198527
2000	Fb-1	0,008642857	0,0002726071	0,01651082
2000	Fb-2	0,01625714	0,001407	0,03751
2001	Fb	0,0196	0,0008271467	0,02876016
2001	Fb-1	0,0565	0,004533417	0,06733065
2001	Fb-2	0,1473	0,03277494	0,1810385
2002	Fb	0,0194	0,001650393	0,04062503
2002	Fb-1	0,05658889	0,006110188	0,07816769
2002	Fb-2	0,1469333	0,03317015	0,1821268
2003	Fb	0,0441	0,00438386	0,6621072
2003	Fb-1	0,0671875	0,006780684	0,0823449
2003	Fb-2	0,17595	0,04535884	0,2129762
2004	Fb	0,009242857	0,0001286929	0,01134429
2004	Fb-1	0,07621429	0,01371003	0,1170898
2004	Fb-2	0,1436286	0,04649555	0,2156283
2006	Fb	0,059175	0,004135643	0,06430896
2006	Fb-1	0,038075	0,002918778	0,05402571
2006	Fb-2	0,04206667	0,002536713	0,0503658
2007	Fb	0,122775	0,01632717	0,1277778
2007	Fb-1	0,05415	0,00430529	0,06561471
2007	Fb-2	0,0928	0,01086809	0,1042501

mento do trigo (CropSim-Wheat), obtendo-se, dessa forma, diversas informações sobre o desenvolvimento da planta, como, por exemplo, o estágio fenológico e até mesmo indicar uma tendência de produtividade da cultura. Com este acoplamento, estudos baseados em dados históricos e datas de semeadura podem ser realizadas para melhor entender os fenômenos ocorridos ao longo dos anos (LIMA et al., 2002).

Entretanto, o modelo de simulação do patossistema *Puccinia* - Trigo simula corretamente o crescimento da área foliar do trigo e

Tabela 8: Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no modelo na amplitude de $\pm 20\%$ com interferência na produtividade do trigo.

Nome da variável	Descrição	Produtividade (kg.ha-1)	
		-20.00%	20.00%
Eficiência de Infecção	Eficiência da Infecção	3259	2623
Favorabilidade do Ambiente	Interferência do ambiente no desenvolvimento da doença	3241	3241
Inóculo Inicial	Valor de inóculo inicial	3247	3160
Límiar de molhamento	Número mínimo de horas de molhamento necessário para criar novas lesões	3194	3255
NEA	Nuvem de esporos de auto-infecção	3255	2629
NEAMP	Nuvem de esporos de alo-infecção na mesma planta	3253	2714
NEANP	Nuvem de esporos de alo-infecção em nova planta	3111	3241

o progresso da ferrugem da folha, apresentando-se como uma excelente alternativa para o estudo das relações entre o patógeno e hospedeiro. Nesse sentido, destacam-se a quantificação e modelagem do dano causado pelas doenças nas plantas. Modelos de simulação como o proposto são de grande valia para o entendimento dos processos em funcionamento, como o impacto das doenças no rendimento. No caso do patossistema estudado, um dos desafios ainda restantes é a relação do nível de injúria com a radiação interceptada (RI) e a eficiência do uso da radiação (RUE), como pontos de acoplamento representando o dano (BOOTE et al., 1983). Verificada a relação, o modelo de simulação do patossistema *Puccinia* -Trigo poderá ser usado para estimar danos devidos à ferrugem da folha. Para isso, o modelo proposto contabiliza o crescimento do fungo como sendo lesão visível e não visível (lesão virtual), a primeira mais diretamente relacionada com a RI e a segunda com a RUE.

O conceito de lesão virtual foi introduzido por Bastiaans (1991), quando da formalização da relação entre a fotossíntese e a proporção

de área foliar doente, representando a técnica de prever a fotossíntese de uma folha de trigo infectada com uma simples doença. Com base neste conceito, verifica-se que melhorias na forma de avaliação da doença se fazem necessárias, minimizando a subjetividade geralmente encontrada na quantificação da severidade de doenças, a qual é, na maioria das vezes, obtida de forma manual e visível.

Escalas diagramáticas têm sido propostas com o intuito de padronizar as observações, constituindo-se como uma das principais ferramentas de avaliação (LEITE; AMORIM, 2002; MARTINS et al., 2004). Apesar de se mostrarem como importantes ferramentas de auxílio, o erro está geralmente presente e as observações não se mostram precisas, ou seja, não contabilizam, por exemplo, a extensão da lesão virtual (ELINGS et al., 1999).

Os modelos de simulação refletem os dados que os alimentam, sendo extremamente dependentes de informações confiáveis e precisas, justificando-se, dessa forma, o uso de técnicas mais sofisticadas, como o registro da severidade real (uso de softwares e equipamentos óticos), a densidade de lesões/cm² (NUTTER et al., 2006) e a obtenção da real extensão das lesões (ELINGS et al., 1999) (lesões visíveis e lesões virtuais), pela quantificação do DNA do fungo (SHETTY et al., 2007), pela quantificação do ergosterol (MORAES et al., 2003), às condições climáticas, podendo ser utilizados na previsão de epidemias e no auxílio à tomadas de decisões.

Com o desenvolvimento do simulador genérico para a ferrugem da folha do trigo utilizando-se da modularidade, verificou-se a possibilidade de que mais de uma doença possa ser incorporada, ao mesmo tempo, ao modelo proposto, bastando para isso descreve-las em arquivos de configuração XML. Podem-se configurar também diferentes

tipos de manejo e datas de semeadura, tornando-o além de genérico, adaptável às necessidades e condições do usuário.

Além de verificar as estimativas de crescimento do trigo e a incidência de doenças, pela união do modelo CropSim-Wheat com o módulo genérico de doenças, esta proposta poderá ser útil à realização de outros trabalhos, como teste de hipóteses, estratégia de controle de doenças, avaliação da resistência varietal a produtos químicos, quantificação de danos, análise de séries históricas e projeção de danos (SAVARY et al., 2006).

CAPÍTULO II

IMPACTO DA FERRUGEM DA FOLHA NO TRIGO

Guilherme Mallmann

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária

Universidade de Passo Fundo

C.P. 611, 99001-970

RESUMO

A ferrugem da folha (*Puccinia triticina*) uma das principais doenças da cultura do trigo de ocorrência em todo Brasil e no mundo. Sob condições ambientais favoráveis, os prejuízos ocasionados são significativos para a maioria dos cultivares de trigo comercializadas no Brasil. A incidência nas diferentes regiões e entre anos varia em intensidade, dependendo das condições climáticas, da resistência genética dos cultivares e do controle químico. Apesar do controle químico ser amplamente utilizado no combate a ferrugem da folha, a resistência genética é a melhor estratégia de controle e o conhecimento dos genes de resistência é a melhor prática de proteção contra o fungo. Muitos genes de resistência e QTLs da ferrugem da folha descritos são genes de raça específica e atualmente utilizado por melhoristas para desenvolver novas cultivares. Entretanto, a resistência proveniente destes genes pode ter um curto período de duração, devido as novas raças do patógeno estarem em constante evolução e adquirindo resistência contra estes genes. Portanto, os pesquisadores possuem um forte argumento de que a manutenção das pesquisas é importante, pois existem poucos estudos de análise econômica deste tipo, particularmente no melhoramento de resistência a doenças para o controle das ferrugens no trigo. Isto é especialmente verdadeiro em áreas tritícolas nos países em desenvolvimento, onde os custos no controle das doenças são

relativamente altos. Os melhoristas de trigo tem conhecimento já a algum tempo, que a raça específica a ferrugem sob extensas áreas de produção de trigo, possibilita a estimativa dos lucros apenas por tabulação. Sem esses dados, os lucros podem ser estimados baseados na expectativa de perdas obtidas a partir de um modelo de simulação validado que responde dinamicamente ao progresso da folha. O objetivo do trabalho foi avaliar o impacto financeiro da resistência genética de um cultivar hipotético de trigo no período de 1979 a 2007 para a área cultivada de trigo no Rio Grande do Sul. Um modelo de simulação estimou a produtividade em um cultivar suscetível, imune e parcialmente resistente à ferrugem da folha, no qual foram realizadas alterações nos valores dos parâmetros fator de resistência do hospedeiro e eficiência de infecção. A produtividade variou em função dos anos e cultivar. O preço histórico da tonelada de trigo de US\$ 129,00 foi usado para calcular o lucro financeiro bruto no estado do Rio Grande do Sul. Baseado nessas simulações, o pior cenário indica um prejuízo econômico médio para os anos estudados de US\$ 130.663.070,10 na utilização de cultivares totalmente suscetíveis em relação ao cultivar imune e US\$ 80.065.641,01 em comparação ao cultivar parcialmente resistente para a área de trigo.

ABSTRACT

LEAF RUST IMPACT IN WHEAT

The leaf rust (*Puccinia triticina*) is a major wheat disease occurring throughout Brazil and worldwide. Under favorable environment conditions the disease causes significant damage for most wheat cultivars growing commercially in Brazil. Leaf rust incidence varies in intensity from local and year depending on weather conditions, the genetic resistance of cultivars and frequency of virulent races. Although chemical control is the broadly used in the fight against the leaf rust, genetic resistance is the best control practice. Many leaf rust resistance genes and QTLs have been described are race-specific genes, and several are currently used by breeders to develop new cultivars. However, the resistance provided by these genes can be short-lived as new races of the pathogen are continuously evolving and acquire

virulence against these genes. Although researchers have long argued that maintenance research is important, there are relatively few economic analyses of this type of research, particularly on breeding for disease resistance for controlling wheat rusts. This is especially true in wheat-producing areas of developing countries, where the costs of controlling disease outbreaks are relatively high. Wheat breeders have known for some time that race-specific rust over extensive areas of wheat production, estimating the benefits would consist only of tabulation. Without these data, benefits may be estimated based on expected losses obtained from a validated wheat simulation model that dynamically are accountable for leaf progress. The objective in this work was to evaluate the financial impact of genetic resistance in a hypothetical wheat cultivar from 1979 to 2007 period, for the area of wheat grown in Rio Grande do Sul. A wheat simulation model estimated grain yield in a cultivar susceptible, immune and partial resistant to leaf rust which was accomplished by changing parameters values for resistance host factor and infection efficiency. Grain yield varied according to year and cultivar. The historical wheat price of \$ 129.00 ton^{-1} was used to calculate the gross benefits generated in the Rio Grande do Sul state. Based on these simulations, the worst scenario indicated an average economic loss of \$130,663,070.10 for growing a fully susceptible and of \$ 80,065,641.01 for growing a partially resistant cultivar.

Introdução

O trigo é uma cultura afetada por um grande número de doenças, as quais estão entre os principais fatores limitantes da produção, podendo causar prejuízos consideráveis, principalmente quando as condições climáticas são favoráveis ao desenvolvimento de epidemias. Os prejuízos podem ser agravados quando várias doenças incidem simultaneamente na lavoura. Diversos são os fatores que interferem no estabelecimento e desenvolvimento de epidemias, dentre os quais, estão as condições ambientais, a suscetibilidade das cultivares, a agressividade dos patógenos e a época do início da infecção (BARROS et al., 2006). A ferrugem da folha do trigo ou ferrugem marrom é causada pelo fungo *Puccinia triticina* Erikss., (ANIKSTER et al., 1997), anteriormente descrita como *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici*, agente causal da ferrugem da folha, doença fúngica comum em todo o Brasil, é amplamente distribuída atacando regularmente o trigo (*Triticum aestivum* L. em Thell). Sob condições ambientais favoráveis, os prejuízos ocasionados são significativos para a maioria das cultivares de trigo cultivadas.

As epidemias nas lavouras tritícolas, têm sido um dos fatores críticos nas frustrações da produtividade, contribuindo para a redução da área cultivada, instabilidade de colheitas e aumento de evasão de divisas, devido à necessidade de importação do produto. Investimentos no melhoramento genético varietal, tem sido uma das mais importantes estratégias para aumentar e estabilizar a produtividade. No Brasil, os prejuízos ocasionados pela ferrugem da folha ocorrem anualmente. Normalmente, entre uma a três “novas” raças de *P. triticina* são detectadas a cada ano (BARCELLOS et al., 1997). A incidência generalizada nas diferentes regiões tritícolas varia em intensidade,

dependendo das condições climáticas, da resistência genética das cultivares e do controle químico (BARCELLOS, 1994).

O método de controle mais utilizado, para evitar grandes perdas de rendimento, principalmente em anos favoráveis aos patógenos, ainda é através do uso de fungicidas sistêmicos. O controle químico aumenta os custos de produção, além de envolver riscos para a saúde humana e animal e para o equilíbrio ecológico. A importância econômica depende da intensidade e do início de ocorrência da doença, chegando a níveis limitantes à produtividade.

A resistência genética é a melhor estratégia de controle e o conhecimento dos genes de resistência é fundamental para uma maior proteção efetiva contra o fungo. A vulnerabilidade da resistência específica, pela rápida adaptabilidade do patógeno é a principal desvantagem. Deste modo, devido à natureza dinâmica da relação cereal-fungo, a estabilidade da resistência é crítica e está associada a resistência parcial, quantitativa ou de planta adulta, que é atualmente a estratégia do melhoramento. O número de genes envolvidos, o fenótipo da reação do hospedeiro à infecção, o estágio de desenvolvimento da planta em que a resistência se expressa, as interações com o ambiente, os mecanismos genéticos envolvidos e a combinação das resistências específica e não-específica a raças, são aspectos importantes a serem considerados (DYCK; KERBER, 1985; OHM; SHANER, 1992).

Quanto maior for o número de genes, numa cultivar, que conferem resistência à ferrugem, denominados genes *Lr* (leaf rust), maior será o número de mutações requeridas para que o patógeno supere a resistência. O conhecimento tanto do número de novos genes para resistência em novas cultivares, quanto de genótipos resistentes são de extrema valia nos programas de melhoramento genético, pois permitem que

seja mantida uma proteção consistente contra o fungo.

Em função destas mudanças dos patógenos a produção agrícola exige uma contínua reposição e diversificação dos genes de resistência para prevenir epidemias e evitar perdas que podem ser totais. Devido à natureza dinâmica da relação cereal-fungo, a demanda de pesquisa é permanente, principalmente porque o uso de cultivares com poucos genes de resistência facilita que variantes do patógeno apareçam e neutralizem os efeitos desses genes de resistência (ZOLDAN, 1998).

Tradicionalmente, os programas de melhoramento genético de cereais de inverno têm introduzido, resistência qualitativa para superar a adaptação dos patógenos às cultivares, principalmente pelo fato de ser herança simples e de fácil manipulação. Além disso, a resistência à ferrugem da folha pode ser o primeiro objetivo na busca de cultivares resistentes a outras doenças fúngicas, pois supõe-se que tal doença serviria de porta de entrada à infecções oportunistas como oídio, septoria e outras.

A reação de defesa das plantas frente a um patógeno pode resultar de diferentes mecanismos e a resposta da resistência também é variável, ocorrendo desde plantas imunes até completamente suscetíveis. Entre estes extremos há plantas com suscetibilidade crescente ou com resistência decrescente. Assim, as denominações resistente e suscetível são relativas, pois são termos quantitativos que dimensionam o processo da doença (THOME, 1999).

Conforme Barcellos (1994) atualmente, os cientistas têm concentrado esforços no tipo de resistência produzida por efeito de genes que se expressam mais efetivamente quando a planta atinge a fase adulta, reduzindo a pressão de seleção para a virulência do patógeno. A herança desse tipo de resistência é, freqüentemente, considerada

complexa. A combinação de muitos genes, cada um com pequeno efeito, tem sido associada à resistência durável.

As cultivares brasileiras Toropi e Trigo BR 35, sob as condições de elevada pressão de inóculo da região sul têm mostrado resistência durável de 30 e 11 anos, respectivamente. Barcellos (1994) identificou dois genes que conferem resistência de planta adulta, na cultivar brasileira Toropi, temporariamente designados *Trp-1* e *Trp2*, com resistência durável a ferrugem da folha.

Portanto, o objetivo deste trabalho é quantificar a importância da resistência genética numa determinada cultivar, ou seja, quanto um gene de resistência poderá interferir na produtividade ou no rendimento final da cultura. Esse processo foi simulado utilizando o modelo para o patossistema *Puccinia* - Trigo, alterando alguns parâmetros na configuração do modelo como, Infection Efficiency (eficiência de infecção) e Host Factor (fator de resistência genética do hospedeiro).

Material e Métodos

O modelo genérico de simulação de doenças do trigo encontrado na literatura, une várias linguagens de programação e interliga as sub-rotinas e sub-módulos (doença) ao modelo de crescimento de trigo (CropSim-Wheat).

A partir deste modelo genérico, foram utilizados dados observados a campo no período de 1979 a 2007, através de uma coleta em planilhas eletrônicas e cadernos de campo de pesquisadores da Embrapa Trigo, com a finalidade de calibrar e validar o modelo com dados reais e verificar o impacto da ferrugem na cultura do trigo, conforme relatado no capítulo anterior. A cultivar hipotética utilizada no mo-

delo para realizar as simulações de severidade da ferrugem da folha se assemelha as características da cultivar BRS 194, apresentando resistência à manchas foliares e oídio e suscetibilidade à ferrugem da folha.

Uma das variáveis de maior importância para os modelos de simulação de doenças é o período de molhamento foliar. Tal importância se deve ao fato de que o processo epidemiológico de doenças de plantas está intimamente relacionado ao período de molhamento, uma vez que a maioria dos patógenos necessita da presença de água livre sobre as plantas para a germinação dos esporos e para a infecção do tecido do hospedeiro. Portanto, esta variável é fundamental para a identificação do risco potencial de ocorrência de doenças (SENTELHAS, 2004). A determinação do período de molhamento foliar pode ser realizada de diversas maneiras, desde medidas diretas, com uso de sensores, ou por meio de estimativas baseadas em relações empíricas (SENTELHAS, 2004). Neste trabalho utilizou-se como período de molhamento foliar uma estimativa baseada no número de horas com umidade relativa acima de 90%, sendo que tais dados foram retirados da estação meteorológica de Passo Fundo e posteriormente organizados de acordo com as configurações do modelo.

Diferentes combinações de parâmetros podem ser necessárias para refletir as realidades de cada cultura, local e época do ano. Com pouco esforço, o modelo pode ser estendido para refletir outros fenômenos. O processo de simulação torna-se interessante a medida que diferentes cenários possam ser criados, com a alteração dos parâmetros nos dados de entrada do modelo (inputs).

Geralmente a expressão dos componentes de resistência variam entre locais e entre anos. A avaliação de uma variedade resistente

pode ser realizada pela consideração de valores médios para os parâmetros de resistência e a correspondente amplitude de variação. Neste estudo, o modelo foi modificado para a expressão de cada componente de resistência com um elemento estocástico. O objetivo da modificação do modelo foi entender a expressão da resistência, se os componentes fossem alterados dentro de certas amplitudes e quais seriam seus efeitos integrados. Entretanto, para estudar a resistência e/ou suscetibilidade genética da cultivar, foram alterados no modelo os parâmetros resistência do hospedeiro, onde seu valor padrão de 0.8, indicando suscetibilidade a doença, foi alterado para 0, indicando resistência (imunidade) a ferrugem da folha. O outro parâmetro testado foi eficiência de infecção que tem como valor padrão 0.17 e foi alterado para 0.1275. Cada parâmetro alterado foi rodado no modelo de forma individual, ou seja, após a alteração do valor foi rodado cada parâmetro separadamente, mantendo o valor padrão dos demais. A partir da modificação dos parâmetros foi elaborado um diagrama contendo informações climáticas de 1979 à 2007 para o parâmetro resistência do hospedeiro. Foi calculada também a AACPD (área abaixo da curva do progresso da doença) rodando o modelo para os mesmos anos, porém, alterando apenas a eficiência de infecção. A partir da alteração dos valores da resistência do hospedeiro que caracteriza uma cultivar imune e outra suscetível (Tabela 9), e também na alteração dos valores da eficiência de infecção que caracteriza uma cultivar parcialmente resistente e suscetível (Tabela 10), considerando a diferença de produtividade entre cultivares resistentes em relação a cultivares suscetíveis, foi utilizado preço histórico da tonelada de trigo de US\$ 129,00 para o cálculo de qual o prejuízo financeiro no caso do cultivo de uma cultivar totalmente suscetível na área cultivada no Rio Grande do Sul para cada ano avaliado, obtendo-se dessa forma o custo

da resistência genética para a ferrugem da folha do trigo. Além disso, foram criados quatro cenários de simulação, para quantificar qual a perda financeira se a área de trigo no estado for cultivada com 100%, 80%, 60% e 50% utilizando cultivar totalmente suscetível.

Resultados

O objetivo dessa simulação foi estimar o valor econômico da resistência genética de trigo a partir da comparação de uma cultivar imune e suscetível a ferrugem da folha (Tabela 9) e de uma cultivar parcialmente resistente e suscetível (Tabela 10), através da diferença de produtividade em relação a área cultivada no estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, supondo-se a utilização de uma cultivar totalmente suscetível na área cultivada de trigo no estado do Rio Grande do Sul, a Tabela 9 mostra que em anos epidêmicos, com condições climáticas (temperatura, chuva e umidade relativa) favoráveis à ocorrência da doença, como no caso do ano 2005 o prejuízo financeiro por utilizar uma cultivar totalmente suscetível poderia ultrapassar os US\$ 258.832.033,88, porém, em anos pouco epidêmicos, com condições climáticas menos favoráveis (temperatura, chuva e umidade relativa) a ocorrência da doença, como em 1988 a perda financeira para o produtor considerando o mesmo cenário seria bem menor alcançando a cifra de US\$ 14.916.357,72. Considerando a diferença média de produtividade entre cultivar imune e suscetível em relação a área cultivada de trigo no período de 1979 a 2007, verifica-se hipoteticamente que se em toda área cultivada fosse utilizado um cultivar suscetível o prejuízo médio anual ficaria em torno de US\$ 130.663.070,10 no estado do Rio Grande do Sul.

Na Tabela 10 pode-se observar o custo da resistência genética

a partir de uma cultivar parcialmente resistente em relação a outra suscetível. Por exemplo, no ano de 2005 o prejuízo financeiro na utilização de uma cultivar totalmente suscetível em comparação a uma cultivar com resistência parcial poderia chegar a US\$ 163.254.899,68 para a área de 844.821 ha cultivados. Já em relação a um ano menos epidêmico utilizando o exemplo de 1988, a perda financeira pela utilização de uma cultivar suscetível ao invés do cultivo de uma cultivar parcialmente resistente para 100% da área cultivada poderia atingir US\$ 8.271.798,37. Entretanto, o prejuízo médio anual gira em torno de US\$ 80.065.641,01 no caso da utilização de uma cultivar totalmente suscetível em comparação a uma cultivar parcialmente resistente para 100% da área cultivada.

A expectativa de perdas na produtividade causadas pela ferrugem é a freqüente preocupação durante a seleção de variedades. O modelo CropSim acoplado ao módulo de doença foi rodado para os anos de 1979 a 2007 fornecendo informações de produtividade da cultura com e sem doença, ou seja, resistência do hospedeiro 0.8 e zero respectivamente, registrou um grande impacto da doença na produtividade (Figura 9).

A AACPD mostra uma grande variabilidade na severidade da ferrugem da folha entre os anos de 1979 a 2007 (Figura 10). Essa variabilidade encontrada na AACPD pode se explicada devido a diferenças nas condições climáticas entre os anos, principalmente na quantidade de chuvas e de horas com umidade relativa superior a 90%. Os gráficos gerados neste trabalho representados nas Figuras 9 e 10 foram feitos usando o aplicativo R (R version 2.6.0).

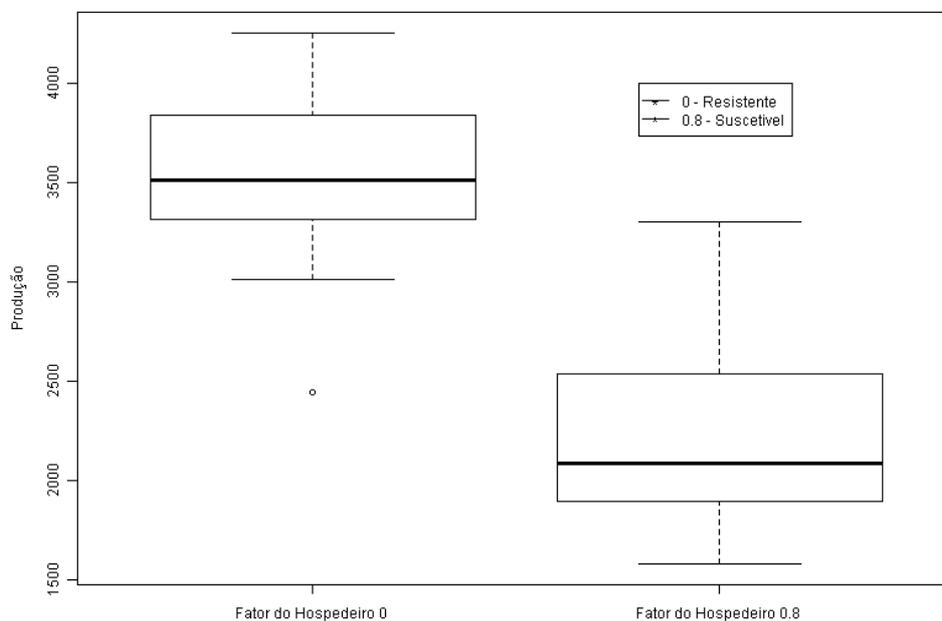


Figura 9: Diagrama de caixa representando a variabilidade no rendimento do trigo na região de Passo Fundo - RS, durante os anos de 1979 a 2007 com uma cultivar hipoteticamente imune (Fator do Hospedeiro 0) e outra cultivar totalmente suscetível (Fator do Hospedeiro 0.8).

Discussão

Além da simulação do crescimento de plantas e do surgimento de pragas e doenças, o modelo genérico também possibilita um melhor entendimento na obtenção de variedades resistentes, alterando parâmetros como a resistência do hospedeiro e a eficiência de infecção nos arquivos XML, representando dessa forma uma relação de cultivar imune/suscetível e parcialmente resistente/suscetível, respectivamente. Diferentes combinações de componentes de resistência podem causar diferentes formas de epidemias no campo. A utilidade

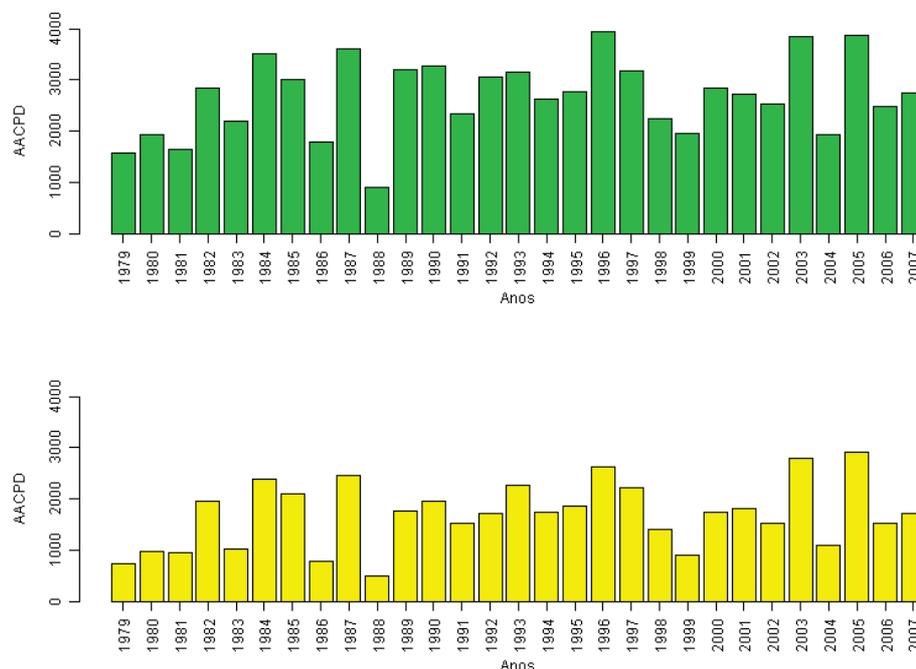


Figura 10: Área abaixo da curva do progresso da da ferrugem da folha (AACPD) obtida a partir da simulação de uma condição de suscetibilidade total (superior) e parcial (inferior) na região de Passo Fundo - RS, durante os anos de 1979 a 2007.

de variedades com baixa taxa de progresso da doença pode depender da combinação dos componentes de resistência. Uma variedade com baixa taxa de progresso pode evoluir para uma relativa resistência quando comparada com uma variedade suscetível (LUO; ZENG, 1988a). Epidemias da ferrugem da folha do trigo causadas por *Puccinia triticina* em variedades com baixa taxa de progresso da ferrugem, no campo são influenciadas não apenas por fatores genéticos das variedades hospedeiras, mas também pelo inóculo inicial da doença e pelas condições climáticas.

Os critérios de seleção num programa de melhoramento genético

devem ser apropriados para o local onde a cultura foi estabelecida. Uma variedade pode ser utilizada no controle da ferrugem em uma determinada região, não sendo eficiente no controle da ferrugem em outras regiões devido a variabilidade climática e também a população do patógeno, que influencia a quantidade de inóculo inicial.

As variedades que apresentam baixa taxa de progresso de doença também estão envolvidas numa complexa interação entre hospedeiro resistente, virulência do patógeno e as condições ambientais. Para estudar essas interações, o experimento deve ser conduzido em várias condições ambientais e diferentes épocas e ainda pela manipulação do inóculo em diferentes quantidades e composições, entretanto, pouca pesquisa está sendo realizada nesta área e poucas informações encontram-se disponíveis.

Neste caso, torna-se bastante útil e aplicável os modelos de simulação para estudar os efeitos de resistência das variedades com baixa taxa de progresso da doença com a consideração de várias interações possíveis. Baseado nos critérios desenvolvidos com estudos de simulação, os melhoristas de plantas poderiam avaliar e selecionar variedades resistentes de acordo com o valor dos componentes.

Luo e Zeng (1995) conduziram na China três experimentos de simulação com modelos epidêmicos de variedades de infecção lenta (SRESM - Slow-Rusting Epidemics Model), modificado para identificar a importância individual dos componentes de resistência em epidemias de ferrugem. Modelos de regressão foram desenvolvidos para prever o desenvolvimento da doença nas variedades resistentes sob certas condições climáticas e de inóculo inicial. Um índice integrado de resistência (IRI) o qual integra os efeitos de vários componentes de uma variedade foi definido para cada combinação de clima e das

condições de inóculo.

Luo e Zeng (1995) afirmaram que o efeito da taxa de expansão de lesão nas epidemias, fundamentado como o componente de resistência mais importante neste estudo, não foi considerado por Zadocks (1971), entretanto, a descoberta de que o período de infecção não foi um componente importante nas epidemias é compatível com Zadocks (1971). O modelo apenas simula epidemias assumindo que não há inóculo inicial de fontes externas e o efeito do inóculo externo proveniente de outras regiões com epidemias de ferrugem foram ignorados.

Os métodos utilizados neste estudo, poderiam também ser usados em outras regiões, após a alteração dos parâmetros relevantes ao modelo de simulação, tais como o crescimento do trigo, dados climáticos (temperatura, dias com orvalho e chuva durante a estação de crescimento). Os resultados da simulação representam uma situação normal de epidemias numa determinada região (LUO; ZENG, 1995).

Nesse sentido, o modelo CropSim-Wheat acoplado ao módulo doença, foi utilizado para fornecer uma tendência de resistência ou suscetibilidade de uma determinada cultivar ao patógeno, e, conseqüentemente, estimar o valor econômico de um gene de resistência no impacto da produtividade, podendo assim, ser bastante útil num possível programa de melhoramento genético. Entretanto, o modelo de simulação utilizado superestima a produtividade em torno de 30 à 40%, devido ao modelo considerar como fatores limitantes apenas a água disponível, radiação solar, nitrogênio do solo e as características do solo da região de Passo Fundo, as quais podem ser bastante distintas em outras regiões do estado, sendo que, o modelo não considera a limitação de fósforo e potássio no solo, o que pode ter uma grande influência na produtividade superestimada pelo modelo. Porém, apesar

de algumas limitações, o modelo está calibrado e validado para a simulação do crescimento da planta concomitantemente com a ocorrência da ferrugem da folha do trigo e apto à auxiliar na quantificação do custo financeiro de resistência genética na cultura. Salienta-se ainda a importância da metodologia empregada neste estudo, uma vez que, a modelagem de simulação facilita e agiliza o trabalho, principalmente quando comparada com outros métodos, como por exemplo, a realização de experimentos a campo que necessita de um período de tempo maior para a obtenção de resultados e dificulta o isolamento do gene a ser estudado, h da interferência dos demais fatores que agem na produtividade da cultura. Já no modelo de simulação esse gene pode ser isolado a partir da alteração nos valores de seus parâmetros.

Com o auxílio do modelo de simulação foi realizada uma série de cálculos para estimar o custo da resistência genética na produtividade do trigo na área cultivada no Rio Grande do Sul no período de 1979 a 2007. Na Tabela 9, pode-se observar uma grande disparidade no impacto econômico entre anos, quando utilizada cultivar suscetível proporcional a área cultivada. Essa disparidade apresenta-se bastante evidente na comparação entre os anos de 2005 e 1988, onde o impacto da utilização de cultivares totalmente suscetíveis na área cultivada de trigo no Rio Grande do Sul é de US\$ 258.832.033,88 e US\$ 14.916.357,72, respectivamente, ou seja, em anos onde as condições climáticas são mais favoráveis com maior frequência de chuvas e alta umidade, acarreta maior probabilidade da ocorrência da ferrugem da folha, e por esta razão se faz necessário nesses anos epidêmicos a utilização de cultivares que apresentam genes de resistência genética ao patógeno. Esses valores expressos nas Figuras 9 e 10, mostram o quão importante e imprescindível é investir em programas de melhoramento genéticos eficientes, com o intuito de estar sempre

monitorando e incorporando novos genes de resistência aos cultivares, que com o passar do tempo se tornam suscetíveis devido as mutações realizadas pelo patógeno, fato semelhante ocorrido no ano de 1982, quando a maioria dos tricultores gaúchos utilizaram o cultivar CNT 10 que já havia perdido a resistência a ferrugem da folha na safra anterior, causando uma grande frustração de safra naquele ano (PICININI; FERNANDES, 1995). Normalmente, entre uma a três “novas” raças de *P. triticina* são detectadas a cada ano. A incidência generalizada nas diferentes regiões tritícolas varia em intensidade, dependendo das condições climáticas, da resistência genética dos cultivares e do controle químico (BARCELLOS; CHAVES, 2003a). A procedência da maioria dos cultivares de trigo com resistência mais estável à ferrugem da folha, no mundo, é da região sul da América do Sul. Lamentavelmente, essa característica é de difícil constatação nas populações segregantes dos programas de melhoramento, em condições de campo (BARCELLOS, 1994). Os tipos de avaliação mais comumente empregados, baseiam-se em diferentes escalas, cada uma enfocando aspectos referentes ao tipo de infecção e severidade no hospedeiro.

A AACPD evidencia com bastante clareza a ocorrência de anos epidêmicos e pouco epidêmicos, confirmando a tendência apontada pelo modelo de simulação, ou seja, os anos que registraram maior número de horas de umidade relativa superior a 90% e maior número de dias com ocorrência de precipitação, apresentaram também maior severidade da ferrugem da folha, como no ano de 2005 que foi um ano altamente epidêmico em função das condições ambientais serem bastante favoráveis a ocorrência da doença (Figura 10).

Trabalho semelhante foi realizado por Nalley et al. (2008) que quantificaram os avanços do programa de melhoramento genético da

Estação de Experimentação Agrícola do Kansas (KAES) em dois períodos: 1) 1911 à 2006 e 2) 1977 à 2006. Para o primeiro período, dados do KAES foram coletados para testar a performance da produtividade de trigo desde 1911. No segundo período de 1977 à 2006 surgiram as primeiras variedades de trigo de porte baixo, iniciando uma “nova era” do melhoramento de trigo no Kansas. O KAES investiu uma grande quantia de recursos públicos em pesquisas de melhoramento de trigo durante muitas décadas. Estimativas quantitativas de aumento na produtividade contribuí para que programas de melhoramento de trigo forneçam informações importantes para decisões futuras de financiamentos. As estimativas de melhorias na produtividade também permitem a realização de uma análise completa do custo/benefício do programa de melhoramento e avaliação do impacto do programa. A partir da regressão múltipla, foram quantificados aumentos na produtividade de cultivares de trigo no Kansas, conservando constantes as condições de crescimento da cultura.

Nalley et al. (2008) neste estudo também quantificaram diferenças de produtividade entre as variedades do KAES e variedades lançadas por outros programas de melhoramento tanto públicos como privados. Com os resultados da regressão, foram identificados avanços tecnológicos na atividade de melhoramento do trigo e foi sumarizado também a contribuição econômica do programa de melhoramento de trigo do KAES para o estado de Kansas. Uma estimativa do lucro financeiro na utilização do programa de melhoramento de trigo (KAES) é aproximadamente de US\$ 78.901.924 por ano, para o período de 30 anos. A estimativa de custos do programa de melhoramento alcança aproximadamente US\$ 5.004.259.

Smale et al. (1998) estimaram o impacto econômico do melhoramento de cultivares de trigo à resistência não específica da ferrugem

da folha. Neste estudo os benefícios econômicos da incorporação de resistência não específica a ferrugem foram estimados utilizando dados de genes de resistência identificados em cultivares, seleção de dados, e em observações de campo nas áreas cultivadas com as cultivares modernas de trigo em Yaqui Valley no estado de Sonora no México. No cenário mais pessimista, o ganho financeiro bruto durante os anos de 1970 a 1990 foi de aproximadamente US\$ 17.000.000,00 em Yaqui Valley. Os substanciais benefícios econômicos provavelmente estão associados com a implantação da resistência não específica em muitas áreas de produção de trigo nos países em desenvolvimento, onde os produtores trocam de cultivares muito lentamente em função da demora na liberação de cultivares, estabelecimentos comerciais com déficit na oferta e fatores econômicos relacionados ao poder de compra de novos materiais.

Matuschke et al. (2007) analisaram a adoção e o impacto do trigo híbrido na Índia. Apesar das condições climáticas desfavoráveis durante o período da pesquisa, o híbrido de trigo teve uma vantagem significativa na produtividade de 351 kg/acre sobre as variedades de polinização aberta e a qualidade dos grãos esteve de acordo com as expectativas dos produtores. Os autores sugerem que a utilização de híbridos de trigo podem ser muito benéficos nas pequenas propriedades, em virtude do fato de que os produtores precisam adquirir novas sementes a cada safra da cultura. Isso acontece frequentemente principalmente com pequenos produtores em propriedades de subsistência, embora contratos institucionais podem limitar o acesso dos produtores a essas sementes. Conseqüentemente, maior envolvimento do setor público na promoção da distribuição de sementes híbridas é necessária.

Tendo em vista, os resultados do impacto econômico relatado

nesse trabalho, denota-se o quanto é importante investir em programas de melhoramento genético, para a obtenção de cultivares cada vez mais resistentes a ferrugem da folha, e a outras doenças como oídio e manchas foliares que em função da modularidade do modelo, verifica-se a possibilidade de que mais de uma doença possa ser incorporada, ao mesmo tempo ao modelo proposto, bastando para isso descrevê-las em arquivos XML, com a finalidade de reduzir os prejuízos financeiros gerados pela ocorrência dos patógenos, aumentar a produtividade da cultura e dar mais um passo importante no objetivo de tornar o Brasil um país autosustentável na produção desse cereal indispensável na alimentação cotidiana dos brasileiros.

Tabela 9: Valores estimados de produtividade de uma cultivar hipotética de trigo imune e suscetível a ferrugem da folha (*Puccinia triticina*) e valor econômico (US\$) da diferença na produtividade em relação a área cultivada no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1979 à 2007 para a localidade de Passo Fundo, RS.

Ano	Produtividade		Custo gene resistência US\$				Área cultivada (ha)
	com gene (Kg/ha)	sem gene (Kg/ha)	100% área suscetível cultivar	80% área suscetível cultivar	60% área suscetível cultivar	50% área suscetível cultivar	
1979	3211	3175	10146670.96	8117336.76	5073335.48	5073335.48	2184899
1980	4010	2879	198207001.28	158565601.02	118924200.77	99103500.64	1358522
1981	3012	2932	9328970.4	7463176.32	5597382.24	4664485.2	903970
1982	3619	2317	219697797.82	175758238.25	131818678.69	109848898.91	1308052
1983	3374	2383	88281266.87	70625013.5	52968760.12	44140633.44	690566
1984	3891	1796	171392207.69	137113766.15	102835324.61	85696103.84	634187
1985	3379	2049	166560842.28	133248673.82	99936505.37	83280421.14	970804
1986	3534	3304	34691172.78	27752938.22	20814703.67	17345586.39	1169234
1987	4080	2005	267226376.7	213781101.36	160335826.02	133613188.35	998324
1988	2446	2336	14916357.72	11933086.18	8949814.63	7458178.86	1051188
1989	4254	2928	169028378.53	135222702.83	101417027.12	84514189.27	988158
1990	3644	1648	254458048.03	203566438.43	152674828.82	127229024.02	988248
1991	3272	2544	58406032.78	46724826.22	35043619.67	29203016.39	621923
1992	3950	2471	92908348.52	74326678.82	55745009.11	46454174.26	486964
1993	3213	1582	125889927.26	100711941.81	75533956.36	62944963.63	598339
1994	3458	2123	95467213.04	76373770.43	57280327.82	47733606.52	554349
1995	3487	1988	57805166.51	46244133.21	34683099.91	28902583.26	298934
1996	3640	1769	136509995.45	109207996.36	81905997.27	68254997.73	565589
1997	3850	1829	129453228.99	103562583.19	77671937.39	64726614.49	496543
1998	3232	2047	58073413.5	46458730.8	34844048.1	29036706.75	379900
1999	4015	3065	48791199.15	39032959.32	29274719.49	24395599.58	398133
2000	3434	1804	117866848.5	94293478.8	70720109.1	58933424.25	560550
2001	3488	2249	98320359.31	78656287.45	58992215.59	49160179.66	615152
2002	3770	2039	178707752.79	142966202.23	107224651.68	89353876.4	800307
2003	3830	2010	249781033.32	199824826.66	149868619.99	124890516.66	1063894
2004	3290	1872	205758897.09	164607117.67	123455338.25	102879448.55	1124845
2005	3684	1309	258832033.88	207065627.1	155299220.33	129416016.94	844821
2006	3811	2525	116034724.19	92827779.36	69620834.52	58017362.1	699451
2007	3345	1913	156687767.42	125350213.94	94012660.45	78343883.71	848208
Média	3559.41	2237.62	130663070.1	104530456.08	78362853.54	65331535.05	834622.55

Tabela 10: Valores estimados de produtividade de uma cultivar hipotética de trigo parcialmente resistente e suscetível a ferrugem da folha (*Puccinia triticina*) e valor econômico (US\$) da diferença na produtividade em relação a área cultivada no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1979 à 2007 para a localidade de Passo Fundo, RS.

Ano	Produtividade		Custo gene resistência US\$				Área cultivada (ha)
	com gene (Kg/ha)	sem gene (Kg/ha)	100% área cultivar suscetível	80% área cultivar suscetível	60% área cultivar suscetível	50% área cultivar suscetível	
1979	3201	3175	7328151.25	5862521	3664075.62	3664075.62	2184899
1980	3801	2879	161579889.64	129263911.71	96947933.78	80789944.82	1358522
1981	2967	2932	4081424.55	3265139.64	2448854.73	2040712.28	903970
1982	3146	2317	139884388.93	111907511.15	83930633.36	69942194.47	1308052
1983	3347	2383	85876025.5	68700820.4	51525615.3	42938012.75	690566
1984	2570	1796	63321035.2	50656828.16	37992621.12	31660517.6	634187
1985	2828	2049	97557064.76	78045651.81	58534238.86	48778532.38	970804
1986	3522	3304	32881198.55	26304958.84	19728719.13	16440599.27	1169234
1987	2876	2005	112170686.32	89736549.05	67302411.79	56085343.16	998324
1988	2397	2336	8271798.37	6617438.7	4963079.02	4135899.19	1051188
1989	4221	2928	164821789.93	131857431.94	98893073.96	82410894.96	988158
1990	2775	1648	143674458.98	114939567.19	86204675.39	71837229.49	988248
1991	3225	2544	54635313.63	43708250.9	32781188.18	27317656.81	621923
1992	3779	2471	82166409.65	65733127.72	49299845.79	41083204.82	486964
1993	2217	1582	49012939.19	39210351.35	29407763.51	24506469.59	598339
1994	2732	2123	43550211.79	34840169.43	26130127.07	21775105.89	554349
1995	2965	1988	37675548.82	30140439.06	22605329.29	18837774.41	298934
1996	2804	1769	75514615.34	60411692.27	45308769.2	37757307.67	565589
1997	2334	1829	32347293.74	25877834.99	19408376.24	16173646.87	496543
1998	2982	2047	45821638.5	36657310.8	27492983.1	22910819.25	379900
1999	4000	3065	48020811.8	38416649.44	28812487.08	24010405.9	398133
2000	2883	1804	78023515.05	62418812.04	46814109.03	39011757.53	560550
2001	3026	2249	61658530.42	49326824.33	36995118.25	30829265.21	615152
2002	2755	2039	73919555.75	59135644.6	44351733.45	36959777.87	800307
2003	2614	2010	82894364.9	66315491.92	49736618.94	41447182.45	1063894
2004	3266	1872	202276376.97	161821101.58	121365826.18	101138188.49	1124845
2005	2807	1309	163254899.68	130603919.75	97952939.81	81627449.84	844821
2006	3393	2525	78318927.37	62655141.9	46991356.42	39159463.69	699451
2007	2748	1913	91364724.72	73091779.78	54818834.83	45682362.36	848208
Média	3040.72	2237.62	80065641.01	64052512.81	48014115.12	40032820.5	834622.55

3 CONCLUSÃO

O modelo de simulação é um sistema de auxílio à tomada de decisão no controle de doenças do trigo, que foi desenvolvido com o objetivo de orientar técnicos e produtores sobre o potencial de dano que as doenças podem causar no rendimento da cultura, com a possibilidade de ser utilizado na amplitude de uma região ou de uma forma mais isolada como, por exemplo, numa determinada lavoura, da mesma forma, o usuário poderá escolher um ou mais cultivar conforme suas necessidades. O sistema usa dados referentes às características do solo e de clima para estimar a produção de trigo na ausência e na presença de doenças. A época de semeadura, o cultivar utilizado e o momento do aparecimento dos primeiros sintomas da doença são fatores importantes levados em consideração pelo sistema.

Para usar o programa é necessário entrar com algumas informações sobre a lavoura de trigo como, por exemplo, o cultivar utilizado, a estação climática de referência, o tipo de solo, a data de semeadura, e a data de aparecimento dos primeiros sintomas das doenças. No momento, a população de plantas e a quantidade de nitrogênio são consideradas fixas pelo programa. Um dos problemas que poderia dificultar a utilização do modelo está justamente relacionado com a grande quantidade de informações que devem ser fornecidas nos dados de entrada do modelo. Porém, apesar da dificuldade de se obter tais dados para alimentar o modelo, este poderá ser de grande valia no auxílio às tomadas de decisões.

Estudos de casos de pior ou melhor cenário podem ser realizados usando-se a série de clima histórico presente para cada uma das estações climáticas de referência, ou seja, a que fique mais próximo da realidade do usuário. O programa também pode ser alimentado com os dados climáticos atualizados até a data da simulação e/ou com dados climáticos obtidos através de previsões meteorológicas para o período que resta até completar o ciclo da cultura.

A modelagem e simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura integrado ao módulo de doenças, fornece ao usuário diversos cenários para a safra da cultura. Entretanto, para que os modelos de simulação possam ser utilizados com eficiência, esses necessitam de algumas informações importantes como a previsão do tempo futuro. Essas informações são fornecidas com base na previsão do tempo geradas pelo INPE/INMET para os próximos quatro meses, contendo um leque de aproximadamente quinze possibilidades de ocorrências climáticas tabuladas em passos diários para que possam ser utilizadas pelos modelos de simulação.

A partir desse leque de possibilidades, para cada conjunto de informações climáticas (temperatura máxima, mínima, precipitação, etc.) e para uma determinada cultivar, poderá ser criado um cenário do comportamento da cultura, onde cada um dos cenários indicará a necessidade e/ou o número de aplicações de fungicida para a referida safra da cultura, possibilitando ao produtor e até mesmo as cooperativas possam se programar com alguma antecedência na aquisição nos insumos agrícolas, reduzindo os custos de produção.

Porém, as previsões de tempo fornecidas, muitas vezes não apresentam confiabilidade suficiente para que o usuário tenha uma previsão mais precisa de como o clima irá se comportar durante o ciclo

da cultura, ocasionando incertezas de qual dos cenários gerados pelo modelo seja o mais representativo para aquela safra. Entretanto, a estimativa é que daqui a cinco ou dez anos haverá um avanço significativo na confiabilidade das previsões do tempo.

As três folhas superiores do dossel do trigo (FB, FB-1, FB-2), possuem uma relevada importância no processo fotossintético da cultura principalmente no estágio reprodutivo, proporcionando flores mais férteis e, conseqüentemente, grãos em maior número e tamanho, com maior capacidade de formar grãos cheios, por esta razão, verifica-se a necessidade de manter essas folhas livres de doenças.

Nesse contexto, o modelo de simulação cumpre sua principal função, ou seja, simular e prever diversas possibilidades de comportamento da cultura e até mesmo no seu manejo, oferecendo desta forma, uma gama maior de informações aos produtores e técnicos à tomada de decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, K. et al. Computational epidemiology: Bayesian disease surveillance. In: *Proc. of the International Conference on Bioinformatics and its Applications*. [S.l.: s.n.], 2004.

ADAMS, J. M. Transmission of plant viruses by fungi. *Annals of Applied Biology*, v. 118, p. 479–492, 1991.

AMORIN, L. et al. A simulation model to describe epidemics of rust of phaseolus beans. ii : Validation. *Phytopathology*, v. 85, n. 6, p. 722–727, 1995. ISSN 0031-949X.

ANDERSEN, N. Development of wheat head blight incited by helminthosporium sativum. *Phytopathology*, v. 42, p. 453–456, 1952.

ANDERSON, W.; BANTTARI, E. The effect of bipolaris sorokiniana on yield, kernel weight and kernel discoloration in sixrow spring barleys. *Plant Disease Reporter*, v. 60, p. 754–758, 1976.

ANGRA, D. *Transferência da resistência à ferrugem da folha através de cruzamentos intergenéricos entre Triticum aestivum e Agropyron elongatum (Dissertação de Mestrado)*. Pelotas, RS, Brasil: Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), 1995. 68 p.

ANIKSTER, Y. et al. Puccinia recondita causing leaf rust on cultivated wheats, wild wheats, and rye. *Canadian Journal of Plant Pathology*, v. 75, n. 12, p. 2082–2086, 1997.

ANNONE, J. G. Importancia e distribución de las septoriosis en la argentina. In: KOHLI, M. M.; BEUNINGEN, T. L. V. (Ed.). *Conferencia Regional sobre la septoriosis del trigo*. México, 1990.

ANONYMOUS. Genetic vulnerability of major crops. *National Academy of Sciences.*, ., p. ., 1972.

ARIS, V. *Use of Weather-based Modeling for Disease Management of Early Leaf Spot of Peanut and Glume Blotch of Wheat (Dissertação de Mestrado)*. 2000. 105 p. Disponível em: <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-19991104-074954/>. Acesso em 28/05/2007.

BARCELLOS, A. *Genética da Resistência de plant adulta à ferrugem da folha na cultivar brasileira de trigo Toropi (Triticum aestivum L. em Thell)*. Tese (Doutorado) — UFRGS, Porto Alegre, 1994.

BARCELLOS, A.; CHAVES, M. Epidemias de ferrugem da folha em cultivares brasileiras de trigo. alterações na população de patógenos de 1993 a 2002. In: INIA. *Seminário Internacional Resistência Royas em Trigo - III*. La Estanzuela, 2003a. p. 13.

BARCELLOS, A.; FERNANDES, M. M.; ROELFS, A. Ferrugem da folha do trigo: durabilidade da resistência. *Summa Phytopathologica*, v. 23, p. 101–111, 1997.

BARROS, B. d. C.; CASTRO, J. L. d.; PATRÍCIO, F. R. A. Resposta de cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) ao controle químico das principais doenças fúngicas da cultura. *Summa Phytopathologica*, sciELO, v. 32, p. 239–246, 09 2006. ISSN 0100-5405. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-54052006000300005&nrm=iso>.

BASTIAANS, L. Ratio between virtual and visual lesion sinze as a measure to describe reduction in leaf photosynthesis of rice due to leaf blast. *Phytopathology*, v. 81, p. 611–615, 1991.

BAYLES, R. A. Disease development - the interaction of variety resistance and pathogen. *Aspects of applied biology*, v. 50, p. 249–254, 1997.

BEDENDO, I. P. Manual de fitopatologia. In: _____. 3. ed. São Paulo: Agrônômica Ceres., 1995b. cap. Manchas foliares., p. 848–858.

BELL, G. *The history of wheat cultivation*. London: Chapman & Hall., 1987. 31-50 p.

BERGER, R.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. Lesion expansion as an epidemic component. *Phytopathology*, v. 87, n. 10, p. 1005–1013, 1997. Disponível em: <<http://apsjournals.apsnet.org/doi/abs/10.1094/PHYTO.1997.87.10.1005>>.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre el niño oscilação sul e a produtividade do milho no estado do

rio grande do sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, scielo, v. 40, p. 423–432, 05 2005. ISSN 0100-204X.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. *El Niño e La Niña; Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul. Aplicações de previsões climáticas na agricultura*. [S.l.]: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul(EDURGS), 2003. 110 p. ISBN 85-7025-687-6.

BOOTE, K. et al. Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. *Phytopathology*, v. 73, p. 1581–1587, 1983.

BRAGA, R.; PINTO, P.; COELHO, J. *Os Modelos de Simulação e a Investigação de Sistemas de Agricultura*. 2005. Disponível em: http://www.esaelvas.pt/ricardo_braga/ordem.html. Acesso em 26/05/2005.

BRONNIMAN, A. On septoria nodorum berk., the pathogen causing leaf blotch and glume blotch of wheat. *Phytopathologische Zeitschrift.*, v. 61, p. 101–146, 1968.

BROOKS, R. J.; SEMENOV, M. A.; JAMIESON, P. D. Simplifying sirius: sensitivity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction. *European Journal of Agronomy.*, v. 14, p. 43–60, 2001.

BRUM, A.; HECK, C. A economia do trigo no rio grande do sul: Breve histórico do cereal na economia do estado. *Análise*, Porto Alegre, RS, Brasil, v. 16, n. 1, p. 29–44, 2005.

BRUNT, A. A.; RICHARDS, K. E. Biology and molecular biology of furoviroses. *Advances in virus research.*, v. 36, p. 1–32, 1989.

BURNETT, P. A. Wheat program. In: _____. México: Cimmyt, 1983. cap. Barley yellow dwarf virus - A proceedings of the Workshop, p. 6–13.

BURNETT, P. A.; COMEAU, A.; QUALSET, C. O. Host plant tolerance or resistance for control of barley yellow dwarf. In: _____. St. Paul.: The American Phytopathological Society, 1995. cap. Barley yellow dwarf: 40 years of progress, p. 321–343.

CAETANO, V. R. *Estudo sobre o vírus do nanismo amarelo da cevada, em trigo, no Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba- SP, 1972.

CAETANO, V. R. Mosaico do trigo transmitido pelo solo "wheat soil-borne mosaic virus" tombamovirus. In: CARGILL., F. (Ed.). *Trigo no Brasil*. Campinas- SP: Fundação Cargill, 1982. v. 2, p. 563–570.

CARDOSO, E. J. B. N.; KIMATI, H. Manual de fitopatologia. doenças das planas cultivadas. In: _____. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres Ltda, 1980. II, cap. Doenças do Trigo, p. 553–573.

CHARLES-EDWARDS, D. A. *Physiological determinants of crop growth*. [S.l.]: London: Academic Press, 1982. 161 p.

CHEN, J.; WILSON, T. M. A. Taxonomy of rigid rod-shaped viruses transmitted by fungi. *Agronomie.*, v. 15, p. 421–426, 1995.

CLARK, R. Yield losses in barley cultivars caused by spot blotch. *Canadian Journal of Plant Pathology*, v. 1, p. 113–117, 1979.

CLARK, R.; DICKSON, J. The influence of temperature on disease development in barley infected by *helminthosporium sativum*. *Phytopathology*, v. 48, p. 305–310, 1958.

COOKE, B. M.; JONES, D. G. The reaction of spring and winter wheat varieties to infection by *septoria tritici* and *septoria nodorum*. In: *The epidemiology of Septoria tritici and S. nodorum. III*. [S.l.]: Trans. Brit. Mycol. Soc., 1971. v. 56, p. 121–135.

COUTURE, L.; SUTTON, J. C. Control of spot blotch in barley by fungicide applications timed according to wheat factors. *Phytoprotection*, v. 59, p. 65–75, 1978.

CUMMINS, G. B.; CALDWELL, R. M. The validity of binomials in the leaf rust fungus complex of cereal and grasses. *Phytopathology*, v. 46, p. 81–82, 1956.

DELPONTE, E. et al. Giberela do trigo: aspectos epidemiológicos e modelos de previsão. *Fitopatologia Brasileira*, sciELO, v. 29, p. 587–605, 12 2004. ISSN 0100-4158. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>.

DELPONTE, E. M.; FERNANDES, J. M. C.; PAVAN, W. A risk infection simulation model for fusarium head blight of wheat. *Fitopatologia Brasileira*, scielo, v. 30, p. 634–642, 12 2005. ISSN 0100-4158. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>.

DELPONTE, E. M. et al. Models and applications for risk assessment and prediction of asian soybean rust epidemics. *Fitopatologia Brasileira*, scielo, v. 31, p. 533–544, 12 2006. ISSN 0100-4158.

DIEHL, J. Reação de gramíneas à podridão comum de raízes causadas por *cochliobolus sativus*. *Fitopatologia Brasileira*, v. 08, p. 9–12, 1983.

DVORAK, J. et al. The structure of the *aegilops tauschii* genepool and the evolution of hexaploid wheat. *Theor Appl. Genet.*, v. 97, p. 657–670, 1998.

DYCK, P.; KERBER, E. Resistance of the race-specific type. *Academic Press*, v. 2, p. 469–500, 1985.

ELINGS, A.; ROSSING, W.; WERF, W. van der. Virtual lesion extension: a measure to quantify the effects of bacterial blight on rice leaf co2 exchange. *Phytopathology*, v. 89, p. 789–795, 1999.

EYAL, Z. et al. *The Septorian diseases of wheat: Concepts and methods of disease management*. Cimmyt. México, 1987.

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*, scielo, v. 46, p. 489–498, 12 2003. ISSN 1516-8913. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132003000400001&nrm=iso>.

FERNANDES, J. et al. Modelling fusarium head blight in wheat under climate change using linked process-based models. in: Canty, s.m. and boring, t. and wardwell, j. and ward, r.w. (eds.). In: *2nd International Symposium on Fusarium Head Blight; incorporating the 8th European Fusarium Seminar*. Orlando, FL, USA: Michigan State University, East Lansing, MI, 2004. p. 441–444.

FERNANDES, J. M. C. et al. Simulação de epidemias. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*, RAP, Passo Fundo, Brasil, v. 2, n. 1, 1994. ISSN 0104-0383.

FERNANDES, J. M. C.; ROSA, O. S.; PICININI, E. C. Perdas no potencial de rendimento de linhas quase-isogênicas de trigo devidas ao oídio. *Fitopatologia Brasileira.*, v. 13, p. 131, 1988.

FILHO, A. B. et al. Avaliação de danos causados por doenças de plantas. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*, v. 3, p. 133–184, 1995. ISSN 0104-0383.

FILIPPOVA, G.; KASHEMIROVA, L. Development of bipolaris sorokiniana (sacc.) shoem. on spring barley varieties under different temperature conditions. *Mikologiya-i-Fitopatologiya.*, v. 26, p. 502–505, 1992.

FRAISSE, C. et al. Agclimate: A climate forecast information system for agricultural risk management in the southeastern usa. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier B.V., <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T5M-4JMB0KB-1/2/608a1626d8a4c92dfc6f83ce85480992>, v. 53, n. 1, p. 13–27, 2006.

FRANCE, J.; THORNLEY, J. H. M. *Mathematical models in agriculture*. London.: Butterworths., 1984.

FRANKEL, O. Genetic dangers in the green revolution. *World Agric.*, v. 19, p. 9–14, 1970.

FRASER, R. S. S. The genetics of plant-virus interactions: implications for plant breeding. *Euphytica.*, v. 63, p. 175–185, 1992.

FRY, W. E. Principles of plant disease management. *Academic Press*, v. 1, p. 378, 1982.

GILDOW, F. E. Biology of aphid vectors of barley yellow dwarf virus and the effect of bydv on aphids. In: _____. México.: Gildow, F. E., 1983. cap. Barley yellow Dwarf - a proceedings of the workshop., p. 28–33.

GOODING, M. et al. Green leaf area decline of wheat flag leaves: the influence of fungicides and relationships with mean grain weight and grain yield. *Annals of Applied Biology*, v. 136, n. 1, p. 77–84, 2000. ISSN 0003-4746. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/aab/annals/2000/00000136/00000001/art99110>>.

GOULART, A. Controle do oídio e ferrugem da folha pelo tratamento de sementes de trigo com fungos. *Fitopatologia Brasileira*, v. 23, p. 248, 1998.

HAEFINER, J. W. *Modeling biological systems. Principles and applications*. New York: Chapman & Hall., 1996.

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

HIMMEL, P. T. et al. Effects of soil water status on infection of soft red winter wheat by soilborne wheat mosaic virus. *Canadian Journal of Plant Pathology*, v. 14, p. 147–151, 1992.

HUNT, L. A.; PARARAJASINGHAM, S. Cropsim-wheat: A model describing the growth and development of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, Ottawa, Canada, v. 75, p. 612–632, 1995.

HUNT, L. A.; PARARAJASINGHAM, S. Cropsim-wheat: A model describing the growth and development of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, v. 75, p. 619–632, 1995.

ICASA. *ICASA - International Consortium for Agricultural Systems Applications*. 2007. Disponível em: <http://icasa.net>. Acesso em 14/04/2007.

JENSEN, S. G.; D'ARCY, C. J. Barley yellow dwarf: 40 years of progress. In: _____. [S.l.]: D'Arcy, C. J. and Burnett, P. A., 1995. cap. Effects of Barley yellow dwarf on host plants., p. 55–74.

JONES, D. G.; COOKE, B. M. A tentative key for assessing septoria tritici infection on wheat heads. In: *The epidemiology of Septoria tritici and Septoria nodorum. I*. [S.l.]: Trans. Brit. Mycol. Soc., 1969. v. 53, p. 39–46.

JONES, G. D.; ODEBUNMI, K. Effect of mixed inoculo on disease symptoms and yield in two spring wheat varieties. In: *The epidemiology of Septoria tritici and Septoria nodorum. V*. [S.l.]: Trans. Brit. Mycol. Soc., 1971. v. 57, p. 153–159.

JONES, J.; RITCHIE, J. *Crop Growth Models*. [S.l.]: American Society of Agricultural Engineers, 1990. 63–89 p.

JONES, J. W. et al. The dssat cropping system model. *European journal of Agronomy: Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications*, v. 18, n. 3-4, p. 235–265, 2003.

JONES, J. W.; KEATING, B. A.; PORTER, C. H. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*, Elsevier Science Ltd, v. 70, n. 2-3, p. 421–443, 2001. ISSN 0308-521X.

KEATING, B. et al. An overview of apsim, a model designed for farming systems simulation. *European journal of Agronomy*, v. 18, p. 267–288(22), 2003. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/els/11610301/2003/00000018/00000003/art00108>>.

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

KENT, S. A.; STROBEL, G. A. *Phytotoxin from Septoria nodorum*. [S.l.]: Trans. Brit. Mycol. Soc., 1976. 354-358 p.

KIMATI, H. et al. *Manual de Fitopatologia. Doenças de plantas cultivadas*. 3. ed. São Paulo- SP: Kimati, H. and Amorim, L. and Bergamin Filho, A. and Camargo, L.E. A. and Rezende, J. A. N., 1997. 774 p.

KING, J. E.; COOK, R. J.; MELVILLE, S. C. A review of septoria diseases of wheat and barley. *Annals of applied biology*, v. 2, p. 345–373, 1983.

KOHLI, M. M. Importancia de las principales enfermedades del trigo como factores limitantes de la producción. In: PERGAMINO/CIMMYT, I.-E. (Ed.). *Jornada de Control Químico de Enfermedades del Trigo en Sistemas de Manejo para alta productividad, 1., 1996*. Buenos Aires - Argentina: INTA-EEA - Pergamino/Cimmyt, 1996. p. nao paginado.

KROPFF, M. J. Modelling crop-weed interactions. In: _____. Oxon, UK.: CAB International., 1993. cap. Eco-physiological models for crop-weed competition., p. 25–32.

LEAL, S. *Modelação Matemática uma Proposta Metodológica para o Curso de Economia (Dissertação de mestrado)*. Florianópolis, SC, Brasil: [s.n.], 1999. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta99/leal>. Acesso em 30/11/2006.

- LEATH, S. et al. Factors associated with global occurrences of septoria nodorum blotch and septoria tritici blotch of wheat. *Plant Disease*, v. 77, p. 1226–1270, 1993.
- LEITE, R. M.; AMORIM, L. Elaboração e validação de escala diagramática para mancha de alternaria em girassol. *Summa Phytopathologica*, v. 28, n. 1, p. 14–19, 2002.
- LIMA, M. I. P. M.; FERNANDES, J. M.; PICININI, E. C. Controle cultural de giberela em trigo. In: *Resumos do XXXV Congresso Brasileiro de Fitopatologia*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 27, p. 125–125.
- LINHARES, W. I. Comportamento de cultivares portadoras de genes de resistência ao oídio do trigo. *Fitopatologia Brasileira*, v. 13, p. 46–48, 1988a.
- LINHARES, W. I. Perdas de produtividade ocasionadas por oídio na cultura do trigo. *Fitopatologia Brasileira*, v. 13, p. 74–75, 1988b.
- LINHARES, W. I. Fontes de resistência ao oídio do trigo - avaliação de comportamento decultivares abrangendo os anos de 1975 a 1986. *Fitopatologia Brasileira*, v. 13, p. 332–340, 1988c.
- LUO, Y.; ZENG, S. Component analysis of slow-rusting resistance of wheat cultivars to stripe rust (*puccinia striiformis*). *Scientia Sinica (Series B)*, v. 31, p. 217–227, 1988a.
- LUO, Y.; ZENG, S. Simulation studies on epidemics of wheat stripe rust. *Plant Pathology*, v. 44, p. 340–349, 1995.
- LUZ, W. C. Mancha marrom. In: CARGILL, F. (Ed.). *Trigo no Brasil*. Campinas - SP: Osório, E. A., 1982a. p. 525–529.
- MAGAREY, R. et al. Nappfast: An internet system for the weather-based mapping of plant pathogens. *Plant Disease*, The American Phytopathological Society, v. 91, n. 4, p. 281–299, 2007. ISSN 91-4-0336.
- MARTINS, M. et al. Escala diagramática para a quantificação do complexo de doenças foliares de final de ciclo em soja. *Fitopatologia Brasileira*, v. 29, n. 2, p. 179–184, 2004.
- MATHRE, D. Compendium of barley diseases. *The American Phytopathological Society*, p. 78, 1982.

MATTHEWS, R. E. F. *Plant Virology*. 2 ed.. ed. New York: Matthews, R. E. F., 1981. 12-17 p.

MATUSCHKE, I.; MISHRA, R.; QAIN, M. Adoption and impact of hybrid wheat in india. *World Development*, v. 35, n. 8, p. 1422–1435, 2007.

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. Disponível em: <crop.sci-journals.org/cgi/content/abstract/cropsci;41/1/40>.

MCCLAY, A. *CLIMEX Models to Predict the Potential Naturalised Range of the European Bumblebee *Bombus Terrestris* (L.) in Australia (Report)*. 2005. Disponível em: <http://www.environment.gov.au/biodiversity/trade-use/invitecomment/pubs/bombus-terrestris-appendices.pdf>. Acesso em 28/05/2007.

MCFADDEN, E.; SEARS, E. The origin of triticum spelta and its free-threshing hexaploid relatives. *J. Hered.*, v. 37, p. 81–89, 1946.

MCINTOSH, R. A. Breeding wheat for resistance to biotic stresses. *Euphytica*, v. 100, p. 19–34, 1998.

MCKINNEY, H. N.; ECKERSON, S. H.; WEBB, R. W. The intracellular bodies associated with the rosette disease and a mosaiclike leaf mottling of wheat. *Journal of Agricultural Research*., v. 26, p. 605–608, 1923.

MCMULLEN, M. P. Wheat streak mosaic virus. *Extension Plant Pathologist*, v. 701, n. 197, p. 646, July 2002.

MEHTA, Y. R. *Doenças do trigo e seu controle*. [S.l.]: Mehta, Y. R., 1978. 190 p.

MEHTA, Y. R.; CAMPOS, L.; GUZMAN, E. Resistência genética de cultivares de trigo a bipolaris sorokiniana. *Fitopatologia Brasileira*, v. 21, p. 455–459, 1996.

METHA, Y. *Doenças do trigo e seu controle*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1978.

METHA, Y. *Manejo integrado de enfermedades del trigo*. Santa Cruz de la Sierra: Imprensa Landivar, 1993.

MIKLER, A. R.; VENKATACHALAM, S.; ABBAS, K. Modeling infectious diseases using global stochastic cellular automata. *Journal of Biological Systems*, v. 13, n. 4, p. 421–439, 2005. Disponível em: <<http://ejournals.worldscientific.com.sg/129/13/1304/S0218339005001604.html>>.

MILLER, W. A.; RASOCHOVA, L. Barley yellow dwarf viruses. *Annual Review of Phytopathology*, v. 35, p. 167–190, 1997.

MORAES, R. et al. Dosagem de ergosterol como indicador de contaminação fúngica em milho armazenado. *Arq. Inst. Biol.*, v. 70, n. 4, p. 483–489, 2003. Disponível em: <http://www.biologico.sp.gov.br/ARQUIVOS/V70_4/moraes.pdf>.

NALLEY, L.; BARKLEY, A.; CHUMLEY, F. The impact of the kansas wheat breeding program on wheat yields, 1911-2006. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, v. 40, p. 913–925, 2008.

NIEWOEHNER, A. S.; LEATH, S. Virulence of blumeria graminis f. sp. tritici on winter wheat in the eastern united states. *Plant Disease.*, v. 82, p. 64–68, 1998.

NIKS, R. E. Variation of the morphology mycelial between the species and the speciales of the formae of mushrooms of the oxidation of the cereal and of the grams. *Canadian Newspaper of Botany.*, v. 64, p. 2976–2986, 1986.

NOAA, N. O. A. A. *HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*. 2007. Disponível em: http://www.arl.noaa.gov/ready/hysp_info.html. Acesso em 28/05/2007.

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. Disponível em: <<http://www.blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8276.2006.00920.x>>.

NUTTER, F. W.; ESKER, P. D.; COELHO, R. A. Disease assessment concepts and the advancements made in improving the accuracy and precision of plant disease data.

European journal of Plant Pathology, Springer Netherlands, <http://www.springerlink.com/content/850114u838304484>, v. 115, n. 1, p. 95–103, 2006. ISSN 0929-1873.

NUTTER, F. W.; PEDERSON, J. V. D.; FOSTER, A. Effect of inoculations with *cochliobolus sativus* at apecific growth stages on grain yield and quality of malting barley. *Crop Science*, v. 25, p. 933–938, 1985.

OBST, A. The major leaf and ear diseases of wheat in europe. In: BASAL (Ed.). *Ciba-Geigy, Wheat Document*. Switzerland, 1980.

OHM, H.; SHANER, G. Breeding oats for resistance to disease. *Crop Science Society of America.*, v. 1, p. 657–690, 1992.

PALM, E. W. *Virus Diseases of wheat*. 1993.

PANDEY, R. K.; MARANVILLE, J. W.; ADMOU, A. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a sahelian environment i. grains yield and yield components. *Agricultural Water Management.*, v. 46, p. 1–13, 2000.

PAVAN, W. *Técnicas de Engenharia de Software Aplicadas à Modelagem e Simulação de Doenças de Plantas*. Tese (Doutorado) — Universidade de Passo Fundo, Julho 2007.

PICININI, E. et al. Impacto econômico do uso do fungicida propiconazole na cultura do trigo (*triticum aestivum*). *Fitopatologia Brasileira*, Sociedade Brasileira de Fitopatologia, v. 21, p. 326–368, 10 1996. ISSN 0100-4158.

PICININI, E. C.; FERNANDES, J. M. C. *Ensaio preliminares e cooperativos de fungicidas - Resultados obtidos no Centro Nacional de Pesquisa de Trigo período 1988 - 1991*. Passo Fundo - RS, 1992.

PICININI, E. C.; FERNANDES, J. M. C. *Doenças em cereais de inverno: aspectos epidemiológicos e controle*. Paosso Fund: Embrapa-CNPT, 1995. 58p. p.

PICININI, E. C.; FERNANDES, J. M. C. A importância do controle químico das doenças do trigo. In: *Anuário Brasileiro de Trigo*. o: [s.n.], 2001.

PICININI, E. C.; FERNANDES, J. M. C. Efeito do tratamento de sementes com fungicida sobre o controle de doenças na parte aérea do trigo. *Fitopatologia Brasileira*, scielo, v. 28, p. 515–520, 10 2003. ISSN 0100-4158. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>.

PIVONIA, S.; YANG, X. 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*, The American Phytopathological Society, v. 96, p. 400–407, 2006.

PLANK, J. Van der. *Plant diseases: epidemics and control*. New York, USA: Academic Press, 1963.

PLUMB, R. T. Strategies for the control o cereal disease. In: _____. [S.l.]: Jenkyn, J. F. and Plumb, R. T., 1981. cap. Chemical in the control of cereal virus disease., p. 135–145.

PRESTES, A. M. Efecto de la rotación de cultivos en la ocurrencia de manchas foliares de trigo. In: KOHLI, M. M.; BEUNINGEN, T. L. V. (Ed.). *Conferencia regional sobre la septoriosis del trigo*. México, 1990.

PRESTES, A. M. et al. Rotação de culturas nomanejo de doenças de plantas. In: _____. [S.l.]: RAPP, 1999. v. 7, cap. Revisão Anual de Patologia de Plantas, p. 369–405.

RAPILLY, F.; SKAJENNIKOFF, M. Etudes sur l' inoculum de septoria nodorum berk. agent de la septoriose du blé. ii les pycniospores. *Ann. Phytopathology*, v. 6, p. 71–82, 1974.

REES, R. G.; PLATZ, G. J. Effects of yellow spot on wheat: Comparison of epidemics at doifferent stages of crop development. *Australian Journal of Agricultural Research.*, v. 34, p. 346, 1983.

REIF, J. et al. Wheat genetic diversity trends during domestication and breeding. *Theor Appl. Genet.*, v. 110, p. 859–864, 2005.

REIS, E. Sementes de trigo infectadas por helminthosporium sativum fonte de inóculo para a podridão comum das raízes e seu controle pelo tratamento de fungicidas. *Summa Phytopathologica*, v. 3,4, p. 29–38, 1982.

REIS, E.; ARGENTA, J.; VELLOSO, J. Multiplicação de helmintosporium spp. em tecidos senescentes de gramíneas invasoras e soja sob condições naturais. *Fitopatologia Brasileira*, v. 10, p. 643–648, 1985a.

REIS, E.; CASA, R. T.; MADEIROS, C. A. *Diagnose, Patometria e Controle de Doenças de Cereais de Inverno*. Londrina- PR: Reis, E. and Casa, R. T and Medeiros, C. A., 2001a. 94 p.

REIS, E.; FERNANDES, J.; PICCININI, E. *Estratégias para o controle de doenças do trigo*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1988.

REIS, E. M. *Doenças do trigo. IV Septorioses*. [S.l.], 1987.

REIS, E. M.; CASA, R. T. *Doenças do Trigo VI- Mancha Amarela da Folha*. [S.l.]: Bayer S. A., 1996. 16 p.

REIS, E. M.; CASA, R. T. Manual de fitopatologia: Doenças das plant cultivadas. In: _____. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005. v. 2, cap. Doenças do Trigo, p. 631–638.

REIS, E. M.; CASA, R. T.; FORCELINI, C. A. Doenças das plantas cultivadas. In: _____. 3. ed. São Paulo: Kimati, H. and Amorim, L. and Bergamin Filho, A. and Camargo, L.E. A. and Rezende, J. A. N., 1997. v. 2, cap. Manual de Fitopatologia V. 2, p. 728–729.

REIS, E. M.; CASA, R. T.; MEDEIRA, C. A. *Diagnose, patometria e controle de doenças de cereais de inverno*. Londrina, PR, Brasil: Londrina: ES, 2001.

REYNOLDS, J.; ACOCK, B. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. *Ecological Modelling*, v. 94, n. 1, p. 7–16, 1997. ISSN 0304-3800.

RICHARDS, G. S. Factors influencing sporulation by septoria nodorum. *Phytopathology*, v. 41, p. 571–578, 1951.

ROCHOW, W. F. Biological properties four isolates of barley yellow dwarf virus. *Phytopathology*, v. 59, p. 1580–1589, 1969.

ROELFS, A. P. Diseases, distribution epidemiology and control. In: _____. Orlando: Academic Press, 1985. II, cap. Epidemiology in North America., p. 403–434.

SACHE, I. Effect of density and age of lesions on sporulation capacity and infection efficiency in wheat leaf rust (*puccinia recondita* f.sp. *tritici*). *Plant Pathology*, v. 46, n. 4, p. 581–589, 1997. Disponível em: <<http://www.blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1046/j.1365-3059.1997.d01-33.x>>.

SACHE, I. Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain. *Agronomie*, v. 20, p. 757–767, 2000.

SALAMINI, N.; HODKINSON, T.; SAVOLAINEN, V. Building supertrees: an empirical assessment using the grass family (poaceae). *Systematic Biology*, v. 51, p. 112–126, 2002.

SAVARY, S. et al. Quantification and modeling of crop losses: A review of purposes. *Annual Review of Phytopathology*, v. 44, n. 1, p. 89–112, 2006. Disponível em: <<http://arjournals.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143342>>.

SAVILE, D. B. O. As no cereal oxidam. In: _____. Florida: Bushnell W. R. and Roelfs, A. P., 1984. v. 1, cap. Taxonomy of cereal oxidation fungus., p. 79–112.

SCHONS, J.; DALBOSCO, M. Effects of sbwmv on the levels of protein and activity of peroxidase in wheat. *Virus reviews Supplement I*, v. 5, p. 88, 2000.

SENTELHAS, P. C. *Duração do período de molhamento foliar: aspectos operacionais da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do modelo de Penman-Monteith*. 2004. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-07062006073629>. Acesso em 18/06/2007.

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

SHARP, E. L.; BRONNIMANN, A.; MCNEAL, F. H. Reaction of selected spring wheat varieties to infection by *septoria nodorum*. *Plant Disease Reporter*, v. 56, p. 761–764, 1972.

SHAW, R. *Yield loss estimation*. [S.l.]: St. Paul: APS Press, 1997. 143 p.

SHETTY, N. P. et al. Role of hydrogen peroxide during the interaction between the hemibiotrophic fungal pathogen septoria tritici and wheat. *New Phytologist*, <http://www.ingentaconnect.com/content/bsc/nph/2007/00000174/00000003/art00019>, v. 174, p. 637–647, 2007.

SILVA, A. R. *Melhoramento de variedades de trigo às diferentes regiões do Brasil*. Serviço de informação agrícola. Rio de Janeiro, 1966.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F.; VENDITE, L. L. Modelo de simulação para análise e apoio à decisão em agrossistemas. *Revista Biociências*, v. 8, n. 2, p. 881–885, 2002.

SMALE, M. et al. Dimensions of diversity in modern spring bread wheat in developing countries from 1965. *Crop Science*, v. 42, p. 1766–1779, 2002.

SMALE, M. et al. Estimating the economic impact of breeding non-specific resistance to leaf rust in modern wheat breads. *Plant Disease*, v. 82, p. 1055–1061, 1998.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A computerised system for matching climates in ecology. *Agricultural Ecosystem Enu.*, v. 13, p. 281–299, 1985.

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.

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, H. et al. Identification of wheat streak mosaic virus and its vector *aceria tosichella keifer* in México. *Plant Disease*, v. 85, p. 13–17, 2001.

TALBERT, L.; SMITH, L.; BLAKE, M. More than one origin of hexaploid wheat is indicated by sequence comparison of lowcopy dna. *Genome*, v. 41, p. 402–407, 1998.

TEH, B. C. *Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth. How the Equations are Derived and Assembled into a Computer Model*. Florida: Brown Walker Press, 2006. 256 p.

THOME, G. *Genética e análise molecular da resistência parcial á ferrugem da folha em aveia*. Tese (Doutorado) — UFRGS, Porto Alegre, 1999.

VALE, F.; JUNIOR, W.; ZAMBOLIM, L. *Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas*. Belo Horizonte, MG, Brasil: Perfil, 2004. ISBN 85-89800-02-4.

VALLAVIEILLE-POPE, C. d. et al. Assessment of epidemiological parameters and their use in epidemiological and forecasting models of cereal airborne diseases. *Agronomie*, v. 20, p. 715–727, 2000.

VERHAGEN, A.; CONIJN, S.; SCHAPENDONK, A. *Quicksan of simulations models*. [S.l.]: Plant Research International, 2001. Disponível em: http://library.wur.nl/wasp/bestanden/LUWPUBRD_00121624_A502_001.pdf. Acesso em 01/12/2006.

WAGGONER, P.; BERGER, R. Defoliation, disease, and growth. *Phytopathology*, American Phytopathological Society, v. 77, n. 3, p. 393–398, 1987. ISSN 0031-949X.

WAGGONER, P.; HORSFALL, J. Epidem, a simulator of plant disease written for a computer. *Conn. Agric. Exp. Stn. Bull.*, v. 698, n. 1, p. 1–80, 1969.

WAGGONER, P.; HORSFALL, J.; LUKENS, R. Epimay, a simulator of southern corn leaf blight. *Conn. Agric. Exp. Stn. Bull.*, p. 729, 1972.

WIESE, M. V. *Compendium of wheat diseases*. [S.l.]: Wiese, M. V., 1977. 106 p.

WIESE, M. V. *Compendium of wheat diseases*. [S.l.]: Wiese, M. V., 1987. 112 p.

WILCOXSON, R.; RASMUSSEN, D.; MILES, M. R. Development of barley resistant to spot blotch and genetics of resistance. *Plant Disease*, v. 74, p. 207–210, 1990.

WILDERMUTH, G. B.; TINLINE, R. D.; MCNAMARA, R. B. Assessment of yield loss caused by common root rot in wheat cultivars in Queensland. *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 43, p. 43–58, 1992.

WILLIAMS, J. R.; JONES, D. G. Effect of time of initial infection on disease development and grain yield in spring wheats. In: *Epidemiology of Septoria tritici and Septoria nodorum*. VI. [S.l.]: Trans. Mycol. Soc., 1972. v. 59, p. 273–283.

WILLOCQUET, L.; SAVARY, S. An epidemiological simulation model with three scales of spatial hierarchy. *Phytopathology*, v. 94, p. 883–891, 2004.

WIT, C. D. *Coordination of models*. In: *PENNING DE VRIES, F.W.T. AND Van LAAR, H.H. (Ed.)*. [S.l.]: Wageningen: PUDOC, 1982.

YANG, X. B.; DOWLER, W. M.; TSCHANZ, A. T. A simulation model for assessing soybean rust epidemics. *Journal of phytopathology*, Blackwell, Berlin, ALLEMAGNE (1986) (Revue), v. 133, n. 3, p. 187–200, 1991. ISSN 0931-1785.

ZADOCKS, J. Systems analysis and the dynamics of epidemic. *Phytopathology*, v. 61, p. 600–610, 1971.

ZILLINSKI, F. J. Common diseases of small grain cereals: a guide to identification. *Mexico: Cymmyt*, p. 141, 1983.

ZOLDAN, S. *Identificação de genes de resistência a ferrugem da folha em cultivar brasileiras de trigo (Triticum aestivum L.)*. Dissertação (Mestrado) — UPF, Passo Fundo, 1998.