

Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN: 1981-1160

editorgeral@agraria.pro.br

Universidade Federal Rural de
Pernambuco
Brasil

Tagliari Lazzaretti, Alexandre; Fernandes, José Maurício; Pavan, Willingthon
Calibração do cropsim-wheat para simulação do desenvolvimento e rendimento de grão
de trigo no Sul do Brasil

Revista Brasileira de Ciências Agrárias, vol. 10, núm. 3, 2015, pp. 356-364

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pernambuco, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119041746004>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Calibração do *cropsim-wheat* para simulação do desenvolvimento e rendimento de grão de trigo no Sul do Brasil

Alexandre Tagliari Lazzaretti¹, José Maurício Fernandes², Willingthon Pavan³

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Riograndense, Estrada Perimetral Leste, 150, Centro, CEP 99064-440, Passo Fundo-RS, Brasil. E-mail: alexandre.lazzaretti@passofundo.ifsul.edu.br

² Embrapa Trigo, BR 285, Km 294, Arredores, CEP 99001-970, Passo Fundo-RS, Brasil. Caixa Postal 451. E-mail: mauricio.fernandes@embrapa.br

³ Universidade de Passo Fundo, Instituto de Ciências Exatas e Geociências, Curso de Ciência da Computação, BR 285, km 171, São José, CEP 99001-970, Passo Fundo-RS, Brasil. Caixa Postal 611. E-mail: pavan@upf.br

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo realizar a calibração dos parâmetros do modelo *Cropsim-Wheat*, especialmente, aqueles relacionados ao desenvolvimento fenológico e rendimento de grãos. Os dados dos experimentos de campo foram obtidos para um grupo de cultivares indicadas para cultivo no Sul do Brasil. Os ensaios de campo foram realizados nos anos de 2010 e 2011, em Passo Fundo, RS. Os parâmetros foram estimados para corresponder ao rendimento final e estádios fenológicos. Os estádios fenológicos são: duplo anel, espiguetas terminal, antese e maturação fisiológica. A calibração foi obtida através da pesquisa do conjunto ótimo de parâmetros num espaço de parâmetros multidimensional. Os resultados mostraram que os valores dos parâmetros selecionados para o modelo *Cropsim-Wheat* obtiveram uma projeção fiel para o desenvolvimento da planta e o rendimento final de grãos.

Palavras-chave: fenologia, modelos, rendimento

Calibration of cropsim-wheat in the development of wheat in southern Brazil

ABSTRACT

This study aims to perform the calibration of a set of parameters for the crop model *Cropsim-Wheat*, especially, those related to phenological development and yield. Field experimental data was obtained for a group of wheat cultivars adapted for cultivation in southern of Brazil. The field experiments were established in years 2010 and 2011, Passo Fundo, RS. Parameters were estimated to match final grain yield and phenological stages. The latter were double ridges, terminal spikelet, anthesis and physiological maturity. Calibration was achieved by searching the optimal set of parameters in a multidimensional parameter space. The results showed that the selected set of parameters values for the *Cropsim-wheat* model provide a faithful projection in terms of both plant development and final grain yield.

Key words: phenology, models, yield

Introdução

O trigo (*Triticum aestivum*), entre as culturas de grãos existentes, destaca-se como um alimento importante para a humanidade, sendo cultivado em várias partes do mundo. Por isso, possui relevância econômica e social. No Brasil, a maior parte do cultivo do trigo localiza-se na Região Sul, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

A previsão de riscos e benefícios decorrentes das práticas de manejo usadas ao sistema agrícola, em especial aquela que visa à minimização do impacto dos problemas fitossanitários e que também resulta na previsão do rendimento de grãos das culturas, tem sido demanda constante do setor do agronegócio. A geração de informações, de base racional, para orientar tomadas de decisão no processo produtivo, é papel da pesquisa com enfoque sistêmico, onde o detalhado conhecimento sobre alternativas de manejo e de seus efeitos positivos e limitações assume papel fundamental. Em muitos casos, a informação quantitativa sobre a produção da cultura é possível de ser realizada pelo uso de modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas (Bannayan et al., 2003; Boote et al., 1996; Calvero & Teng, 1997; Graves et al., 2002; Hayman & Easdown, 2002; Thornthorn & Wilkens, 1998).

Os modelos de simulação de culturas agrícolas são programas computacionais que representam, matematicamente, o crescimento das plantas em relação ao ambiente (Graves et al., 2002). A utilidade prática desses modelos se dá através da sua integração em sistemas de suporte à tomada de decisão no contexto agrícola. Esse é o caso do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), que engloba, além dos modelos de simulação de culturas, um sistema gerenciador de base de dados e um módulo de aplicativos para a avaliação de estratégias tecnológicas, via simulações de longo prazo (Boote et al., 1996).

No Brasil, os trabalhos com modelagem iniciaram na década de 1990, com a família de modelos CERES, principalmente com trigo, milho, soja, arroz e feijão (Anunciação & Liu, 1991). Desde então, foram conduzidos experimentos de campo, sob diversas condições, com a finalidade de calibrar e ajustar os modelos para as condições da agricultura no Brasil (Faria & Bowen, 2003). A abordagem de simulação na agricultura vem sendo empregada, basicamente, para estudar os problemas relacionados com a variabilidade climática. Os resultados obtidos têm fornecido informações fundamentais às atividades de zoneamento e planejamento agrícola, como por exemplo: cenários de épocas de semeadura (Grossi, 2012); estimativas de controles biológicos (Calvero & Teng, 1997); gerenciamento do uso da água (Thorpe et al., 2010).

No entanto, para que novas aplicações que utilizem modelos de simulação de culturas agrícolas sejam realizadas, faz-se necessário que os resultados, oriundos do modelo de simulação, representem a realidade da cultura no campo. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo realizar a calibração do modelo *Cropsim-Wheat* em relação a aspectos que interferem na predição dos estádios fenológicos e no rendimento de grãos para um grupo de cultivares de trigo indicadas para cultivo na região sul do Brasil. O processo de calibração foi baseado em

dados obtidos a partir de experimentos de campo executados nos anos de 2010 e 2011.

Material e Métodos

Experimentos de campo

Os dados de campo foram obtidos a partir de experimentos realizados nas áreas experimentais do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo (CNPT), na cidade de Passo Fundo. No ano de 2010, o experimento foi realizado no campo experimental com as coordenadas: -52,2442 (longitude), -28,1414 (latitude) e 643 m (altitude). No ano de 2011, o experimento foi realizado no campo com as coordenadas: -52,4061 (longitude), -28,2269 (latitude) e 679 m (altitude).

O delineamento experimental usado nos experimentos foi o de blocos ao acaso, com parcelas divididas e três repetições para cada bloco. Na parcela principal foi colocado o fator nível de tecnologia, que possui três categorias: N1, N2 e N3, que se diferenciam pelas atividades relacionadas à adubação de base, à adubação de cobertura, ao controle de pragas e ao controle de doenças.

Para a realização da calibração do modelo *Cropsim-Wheat*, foram considerados os dados obtidos nos blocos de nível tecnológico classificado como alto (N3). Este nível de tecnologia se caracteriza por usar 12,5 kg ha⁻¹ (no ano de 2010) e 20 kg ha⁻¹ (no ano de 2011) de nitrogênio, e 62,5 kg ha⁻¹ e 100 kg ha⁻¹ de fósforo na adubação de base, respectivamente, para os anos de 2010 e 2011. Na adubação de cobertura, para o fator N3, foram usados 60 kg ha⁻¹ de nitrogênio para o ano de 2010 e 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio para o ano de 2011. O controle químico usado para o nível N3 foi: 5 aplicações de Engeo Pleno (50, 50, 50, 150 e 150 mL ha⁻¹), 4 aplicações de PioriXtra de 300 mL ha⁻¹ e 1 aplicação de Nativo de 750 mL ha⁻¹. Para a avaliação do rendimento de grãos, foi considerado o melhor rendimento de grãos (kg ha⁻¹) dentre as repetições. Nas subparcelas foi alocado o fator à cultivar, sendo avaliadas oito cultivares: BRS 177, BRS 194, BRS 276, BRS 296, BRS Louro, BRS Guabiju, BRS Guamirim e BRSTimbaúva.

Realizaram-se medidas dos estádios fenológicos da cultura do trigo. As variáveis avaliadas foram: data do duplo anel, data da espiguetta terminal, data da antese e data da maturação fisiológica. Também foi realizada a colheita e foram medidos os dados de rendimento de grãos das cultivares. Algumas informações gerais sobre os experimentos de campo, relativos aos anos de 2010 e 2011, são mostradas na Tabela 1.

Modelo de simulação *Cropsim-Wheat*

Para a realização de simulações foi utilizado o modelo de crescimento e desenvolvimento da cultura do trigo *Cropsim-*

Tabela 1. Informações sobre os experimentos realizados no campo, contendo as datas de semeadura, datas e valores de adubação, espaçamento entre linhas e número de plantas por m², para os respectivos anos de 2010 e 2011

Variável	2010	2011
Data de semeadura	24/06	06/06
Nitrogênio na base (kg ha ⁻¹)	12,5	20
Fósforo na base (kg ha ⁻¹)	62,5	100
Nitrogênio cobertura (kg ha ⁻¹)	60	80
Data de adubação de cobertura	19/08	28/07
Espaçamento entre linhas (cm)	0,20	0,20
Plantas por m ²	300	300

Wheat integrado ao sistema DSSAT (Hunt & Pararajasingham, 1995). O modelo *Cropsim-Wheat* permite a sua parametrização de dados de entrada e a obtenção dos resultados das simulações através de arquivos no formato texto (Fernandes et al., 2004; Delponte et al., 2005). Para a utilização do modelo, foram usados os seguintes arquivos, identificados por suas extensões:

- .WTH: arquivo de entrada do modelo com os dados meteorológicos. Os dados são descritos em passo diário, e possuem os seguintes dados: latitude - LAT, longitude - LON, altitude - ELEV, concentração de CO₂ na atmosfera (ppm) - CO₂, data (formato juliano) - DATE, radiação solar global (MJ m⁻²), temperatura máxima do ar (°C) - TMAX, temperatura mínima do ar (°C) - TMIN e precipitação pluvial (mm) - RAIN.
- .SOIL: arquivo de entrada do modelo com os dados de solo.
- .WHX: arquivo que gerencia a execução da simulação. Cada cabeçalho do arquivo, identificado pelo asterisco "*", indica um controle. Os principais controles são: informações sobre os tratamentos (*TREATMENTS), cultivares (*CULTIVARS), arquivos com dados de clima e solo (*FIELDS), condições iniciais do solo - água, amônio e nitrato - por camada (*INICIAL CONDITIONS), adubação de base e de cobertura - nitrogênio e fósforo (*FERTILIZERS (INORGANIC)), resíduos e fertilizantes orgânicos - matéria orgânica e nitrogênio (*RESIDUES AND ORGANIC FERTILIZER) e parâmetros de controle do modelo - gerenciamento de água, nitrogênio, controle de doenças, módulo de cálculo da matéria orgânica, dentre outros (*CONTROLS).
- .CUL: arquivo que contém as variáveis genéticas associadas às cultivares.

- .ECO: arquivo que contém os coeficientes de resposta da planta em relação ao ambiente (ecotipo).
- .SPE: arquivo que caracteriza a espécie. Possui variáveis que caracterizam a composição dos tecidos e processos da planta, como fotossíntese, respiração, assimilação de nitrogênio, partição de fotoassimilados, senescência, fenologia e crescimento;

Os resultados gerados pelo modelo *Cropsim-Wheat* são armazenados em arquivos textuais, com formatos pré-definidos, caracterizados pela extensão .OUT. No arquivo OVERVIEW.OUT são colocados os principais resultados das simulações, como por exemplo: os estádios da fenologia da planta (*Double ridges*, *Terminal spikeled*, *Anthesis*, *Maturity*), déficit de nitrogênio por estádios fenológicos da planta (NSPAV) e o rendimento de grãos (*Grain wt*).

As variáveis do desenvolvimento da planta são determinadas pela unidade: dias após a semeadura (*Days After Planting* - DAP). Em relação ao rendimento de grãos (*Grain wt*), a unidade de medida usada foi kg ha⁻¹. O rendimento de grãos simulado é gerado sem a correção de umidade de grãos, portanto, usou-se o fator de correção de 13% para que o rendimento de grãos simulado seja semelhante ao rendimento de grãos dos experimentos de campo.

Experimentos simulados

Os experimentos observados no campo foram reproduzidos de maneira a serem simulados, com o uso do computador, usando o modelo de simulação da cultura do trigo *Cropsim-Wheat*. Os dados, nesta seção, são descritos no formato padrão do modelo.

Os dados de solo arquivo .SOIL do *Cropsim-Wheat*, para os anos de 2010 e 2011 já adaptados ao formato do *Cropsim-Wheat* são mostrados, respectivamente, na Figura 1A e Figura 1B.

A.

*0000003451	EBPF201017		CNPT (com N)		LVd															
@SITE	COUNTRY		LAT		LONG		SCS Family													
-99	Brazil		-28.227		-52.410		LAT05SOL VERMEL													
@	SCOM	SALB	SLU1	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE										
-99	0.1	6	0.6	60	0.8	1	IB00	IB00	IB00											
@	SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCE	SLNI	SLHW	SLHB	SCEC	SADC			
10	-99	0.233	0.403	0.496	1	-99	1.34	1.75	54	22	-99	0.32	5	-99	12	-99				
20	-99	0.23	0.408	0.523	0.45	-99	1.26	1.34	57	18	-99	0.17	4.8	-99	14	-99				
40	-99	0.249	0.425	0.503	0.1	-99	1.32	1.23	59	17	-99	0.09	4.8	-99	13	-99				
70	-99	0.238	0.422	0.596	0.01	-99	1.07	1.05	70	14	-99	0.03	4.8	-99	13	-99				
100	-99	0.219	0.444	0.599	0.01	-99	1.06	0.88	65	16	-99	0.03	4.8	-99	16	-99				

B.

*0000003452	EBPF201117		CNPT (com N)		LVd															
@SITE	COUNTRY		LAT		LONG		SCS Family													
-99	Brazil		-28.227		-52.410		LAT05SOL VERMEL													
@	SCOM	SALB	SLU1	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE										
-99	0.1	6	0.6	60	0.8	1	IB00	IB00	IB00											
@	SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCE	SLNI	SLHW	SLHB	SCEC	SADC			
10	-99	0.233	0.403	0.496	1	-99	1.34	1.75	54	22	-99	0.65	5	-99	12	-99				
20	-99	0.23	0.408	0.523	0.45	-99	1.26	1.34	57	18	-99	0.45	4.8	-99	14	-99				
40	-99	0.249	0.425	0.503	0.1	-99	1.32	1.23	59	17	-99	0.41	4.8	-99	13	-99				
70	-99	0.238	0.422	0.596	0.01	-99	1.07	1.05	70	14	-99	0.25	4.8	-99	13	-99				
100	-99	0.219	0.444	0.599	0.001	-99	1.06	0.88	65	16	-99	0.15	4.8	-99	16	-99				

Figura 1. Configurações dos arquivos, formato *Cropsim-Wheat*, de solo (.SOL) usadas nos experimentos simulados nos anos de 2010 (A) e 2011(B)

Os dados meteorológicos, arquivo .WHT do *Cropsim-Wheat*, foram obtidos da estação automática, de código A839, nas coordenadas latitude -28,2294, longitude -52,4039 e altitude 684 m, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As variáveis necessárias para o modelo *Cropsim-Wheat* foram data (formato dia do ano), radiação solar global (MJ m^{-2}), temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$) e precipitação pluvial (mm), além da quantidade de CO_2 (ppm).

As informações sobre a adubação (nitrogênio na base - FAMN, fósforo na base - FAMP, nitrogênio na cobertura - FAMN e as datas de aplicação da adubação - FDATE) e matéria orgânica na superfície (RAMT) do solo usadas nos experimentos simulados de 2010 (Figura 2A) e 2011 (Figura 2B) são informadas no arquivo com a extensão .WHX.

Para que o modelo de simulação *Cropsim-Wheat* crie um cenário de ambiente (clima, solo) anterior à semeadura, foi necessário informar a data de início da simulação. Sendo assim, foram consultados os dados meteorológicos de precipitação pluvial, e escolhidas como datas de início da simulação, para cada ano, dias após a ocorrência chuva, sendo para o ano de 2010, dia 20/05, após uma precipitação pluvial acumulada de 82,4 milímetros. No ano de 2011, dia 16/05, após uma precipitação pluvial acumulada de 44,4 mm.

Calibração do modelo *Cropsim-Wheat*

Para a realização da calibração, foi adotado um método empírico, onde se alteravam os valores dos coeficientes das variáveis e executava-se o modelo e analisavam-se os resultados. A análise foi realizada através da comparação dos valores observados nos experimentos de campo em relação aos valores simulados pelo *Cropsim-Wheat*.

Em relação aos estádios fenológicos, foram alterados os valores dos coeficientes genéticos das cultivares de trigo (Tabela 2), usadas como dados de entrada para *Cropsim-Wheat* e armazenadas no arquivo .CUL. Também foram demonstrados e avaliados o erro médio absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE); o erro médio padrão (*Mean Standard Error* - MSE) e o erro médio quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error*).

Em relação ao rendimento de grãos, foram usadas duas configurações diferentes de ecotipos (arquivo .ECO

Tabela 2. Coeficientes genéticos de cultivares de trigo usadas no modelo *Cropsim-Wheat* e seus valores de coeficientes calibrados, em relação aos estádios da fenologia da planta e ao rendimento de grãos, para as cultivares de trigo testadas

Cultivar/ Coeficiente	1	2	3	4	5	6	7	8
P1V	0	0	0	0	0	0	0	0
P1V0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1D	25	25	25	25	25	0	25	25
P2D	50	50	50	50	50	0	50	50
P1	680	680	680	650	650	820	680	680
P2	110	80	140	150	140	110	80	160
P3	100	120	100	150	100	110	120	110
P4	150	120	100	60	100	110	120	100
P5	140	120	130	100	50	50	120	100
P6	35	35	35	35	10	45	35	35
P7	175	175	175	175	175	175	175	175
P8	500	500	500	500	500	500	500	500
GNUMW	25	25	28	33	34	38	30	32
GWTX	34	36	34	39	38	38	38	40
SWTS	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
PHINT	90	90	90	90	90	90	90	90

Coeficientes: P1V: Dias de temperatura do ar ótima para completar a vernalização; P1V0: Fator de vernalização quando germinada (0-1); P1D: Porcentagem de redução na taxa de desenvolvimento na fase um num fotoperíodo de 10 horas; P2D: Porcentagem de redução na taxa de desenvolvimento na fase dois num fotoperíodo de 10 horas; P1: Duração do final da fase juvenil para a fase de espiguetas terminal; P2: Duração da fase de espiguetas terminal para pseudocaule; P3: Duração da fase de pseudocaule ereto terminando com o crescimento da folha; P4: Duração da fase do crescimento da folha até o pico do crescimento da planta; P5: Duração do pico do crescimento da planta até a antese; P6: Duração da fase de antese; P7: Atraso nos grãos; P8: Duração da fase de enchimento de grãos; GNUMW: Número de grãos por peso de massa na antese; GWTX: Número máximo de grãos em condições ótimas (mg); SWTS: padrão, sem estresse peso seco (incluindo grão) da parte aérea madura no final do ciclo; PHINT: Intervalo de filocron (aparecimento de uma folha e uma sucessiva)
Cultivares: 1-BRS 177; 2-BRS 194, 3-BRS 276; 4-BRS Louro; 5-Guabiju; 6-Guamirim; 7-Timbaúva; 8-BRS 296

do *Cropsim-Wheat*). O que diferencia uma configuração de ecotipo para outra são os valores dos coeficientes das variáveis: LAWS (*Leaf Area to Weight*) e HTSTD (*Standard canopy height (cm)*). A primeira configuração foi usada para as cultivares com porte de 90 cm de altura e área foliar de 50 cm^2 (Figura 3A). Essa configuração foi usada para as cultivares: BRS 177, BRS 194, BRS 276, BRS Louro, BRS Guabiju, BRS Timbaúva e BRS 296. Uma segunda configuração foi usada para a cultivar BRS Guamirim, sendo o porte de 80 cm e área foliar de 40 cm^2 (Figura 3B).

Na calibração do *Cropsim-Wheat* foram estabelecidas as condições iniciais do solo para a realização das simulações (Figura 4). As variáveis determinadas, para cada camada de solo (ICBL), foram: a quantidade de água (SH_2O), a quantidade de amônio (NH_4) e nitrato (NO_3). Essas configurações fazem parte do arquivo .WHX e são descritas na Figura 4A para o ano de 2010 e Figura 4B para o ano de 2011.

Os parâmetros de controle do modelo *Cropsim-Wheat* são descritos no arquivo .WHX. Para efeitos de calibração foram considerados três aspectos de controle: (i) controle de ocorrência de doenças (DISES='N'); (ii) controle do déficit de água (WATER='Y'); (iii) controle do déficit de nitrogênio (NITRO='Y').

Resultados

As variáveis planta identificadas como influentes na fenologia das cultivares e ajustadas foram: P1 (duração do final da fase juvenil para a fase de espiguetas terminal), P2 (duração

A.										
*FERTILIZERS (INORGANIC)										
@F	FDATE	FMCD	FACD	FDEP	FAMN	FAMP				
1	10175	1	-99	5	12.5	62.5				
1	10231	1	-99	1	60	-99				
*RESIDUES AND ORGANIC FERTILIZER										
@R	RDATE	RCOD	RAMT	RESN	RESP	RESK	RINP	RDEP	RMET	RENAME
1	10140	-99	3000	0.53	-99	-99	-99	5	-99	-99
B.										
*FERTILIZERS (INORGANIC)										
@F	FDATE	FMCD	FACD	FDEP	FAMN	FAMP				
1	11157	1	-99	5	20	100				
1	11209	1	-99	1	80	-99				
*RESIDUES AND ORGANIC FERTILIZER										
@R	RDATE	RCOD	RAMT	RESN	RESP	RESK	RINP	RDEP	RMET	RENAME
1	11136	-99	3000	0.53	-99	-99	-99	5	-99	-99

Figura 2. Configurações usadas nos experimentos simulados, para os anos de 2010 (A) e 2011 (B), sobre a adubação de base e cobertura (*FERTILIZERS...) e sobre a adubação orgânica (*RESIDUES ...)

A.
\$ECOTYPES:WHCRP060

```
@ECOTYPE:WHCRP060
@ECONO ECONAME..... PARUE LA1S LAXS LAWS LSENS LSENS AWNS TI1LF TIFAC HTSTD GRPS RSPAT LT50H
! 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
BRWH01 BRAZIL 2.3 2.0 50.0 280 .003 8.5 5.0 3.0 1.0 090 12.0 10 -10
```

B.
\$ECOTYPES:WHCRP060

```
@ECOTYPE:WHCRP060
@ECONO ECONAME..... PARUE LA1S LAXS LAWS LSENS LSENS AWNS TI1LF TIFAC HTSTD GRPS RSPAT LT50H
! 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
BRWH02 BRAZIL 2.3 2.0 40.0 320 .003 8.5 5.0 3.0 1.0 080 12.0 10 -10
```

Figura 3. Configurações dos ecotipos, formato DSSAT, utilizadas para a calibração das cultivares. A configuração (A) foi usada em todas as cultivares de trigo testadas, exceto a cultivar de trigo Guamirim, na qual foi usada a configuração (B)

A.
*INITIAL CONDITIONS

```
@C PCR ICDAT ICRT ICND ICRN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP IC RIP ICRID ICNAME
1 WH 10140 1200 0 1.00 1.00 -99.0 6500 1.14 0.00 100 15 -99
@C ICBL SH20 SNH4 SNO3
1 10 0.1 1.7 4.9
1 20 0.08 1.6 3.65
1 40 0.04 1.25 2.55
1 70 0.03 1.1 2.35
1 100 0.02 1.35 2.15
```

B.
*INITIAL CONDITIONS

```
@C PCR ICDAT ICRT ICND ICRN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP IC RIP ICRID ICNAME
1 WH 11136 1200 0 1.00 1.00 -99.0 6500 1.14 0.00 100 15 -99
@C ICBL SH20 SNH4 SNO3
1 10 0.41 6.8 19.6
1 20 0.34 6.4 14.6
1 40 0.184 5 10.2
1 70 0.13 4.4 9.4
1 100 0.122 5.4 8.6
```

Figura 4. Configurações das condições iniciais do solo (água - SH2O, amônio - SNH4 e nitrato - SNO3), especificadas no formato do arquivo .WHX do *Cropsim-Wheat*, para os anos de 2010, configuração (A), e 2011 configuração (B)

da fase de espiguetas terminal para pseudocaule), P3 (duração da fase de pseudocaule ereto terminando com o crescimento da folha), P4 (duração da fase do crescimento da folha até o pico do crescimento da planta), P5 (duração do pico do crescimento da planta até a antese) e P6 (duração da fase de antese).

A seguir são mostrados os resultados comparativos entre experimentos de campo e os respectivos experimentos simulados, para os estádios fenológicos do trigo. Para cada cultivar, em cada estágio fenológico da planta, no respectivo ano, são primeiramente descritos os valores observados nos experimentos de campo e depois os valores simulados pelo modelo *Cropsim-Wheat*. Nos gráficos, para cada estágio fenológico, os primeiros marcadores representam o ano de 2010 e os segundos marcadores representam o ano de 2011.

Na cultivar BRS 177 para o estágio duplo anel obteve-se, para o ano de 2010, os valores 43 e 45 DAP (Figura 5A). Em 2011, os valores foram: 49 e 48 DAP. Os resultados para o estágio de espiguetas terminal, no ano de 2010, foram 63 e 66 DAP. Em 2011 obteve-se 74 e 71 DAP. Em relação ao estágio

de antese, para o ano de 2010, obteve-se 98 e 101 DAP. Em 2011, os valores foram 113 e 112 DAP. Por fim, em relação ao estágio de maturação fisiológica, os resultados para o ano de 2010, foram 141 e 142 DAP. Já em 2011, os números obtidos foram de 148 e 150 DAP.

Para cultivar de trigo BRS 194 obteve-se para o ano de 2010, no estágio de duplo anel, 41 e 45 DAP (Figura 5B). Em 2011, obteve-se 49 e 48 DAP. No estágio de espiguetas terminal, no ano de 2010, os valores foram: 63 e 66 DAP. Para o ano de 2011, os resultados obtidos foram 72 e 71 DAP. Em relação ao estágio de antese, no ano de 2010, os resultados foram: 91 e 97 DAP. No ano de 2011, obteve-se 107 e 108 DAP. Para o estágio de maturação fisiológica, em 2010, os resultados foram 141 e 138 DAP. Em 2011 os valores obtidos foram: 148 e 146 DAP.

Na Figura 5C, são apresentados os resultados da calibração da cultivar de trigo BRS-276. No estágio de duplo anel, para o ano de 2010, obteve-se 41 e 45 DAP. Para o ano de 2011, os valores foram: 52 e 48 DAP. Para o estágio de espiguetas terminal, os resultados de 2010 foram 63 e 66 DAP. No ano de

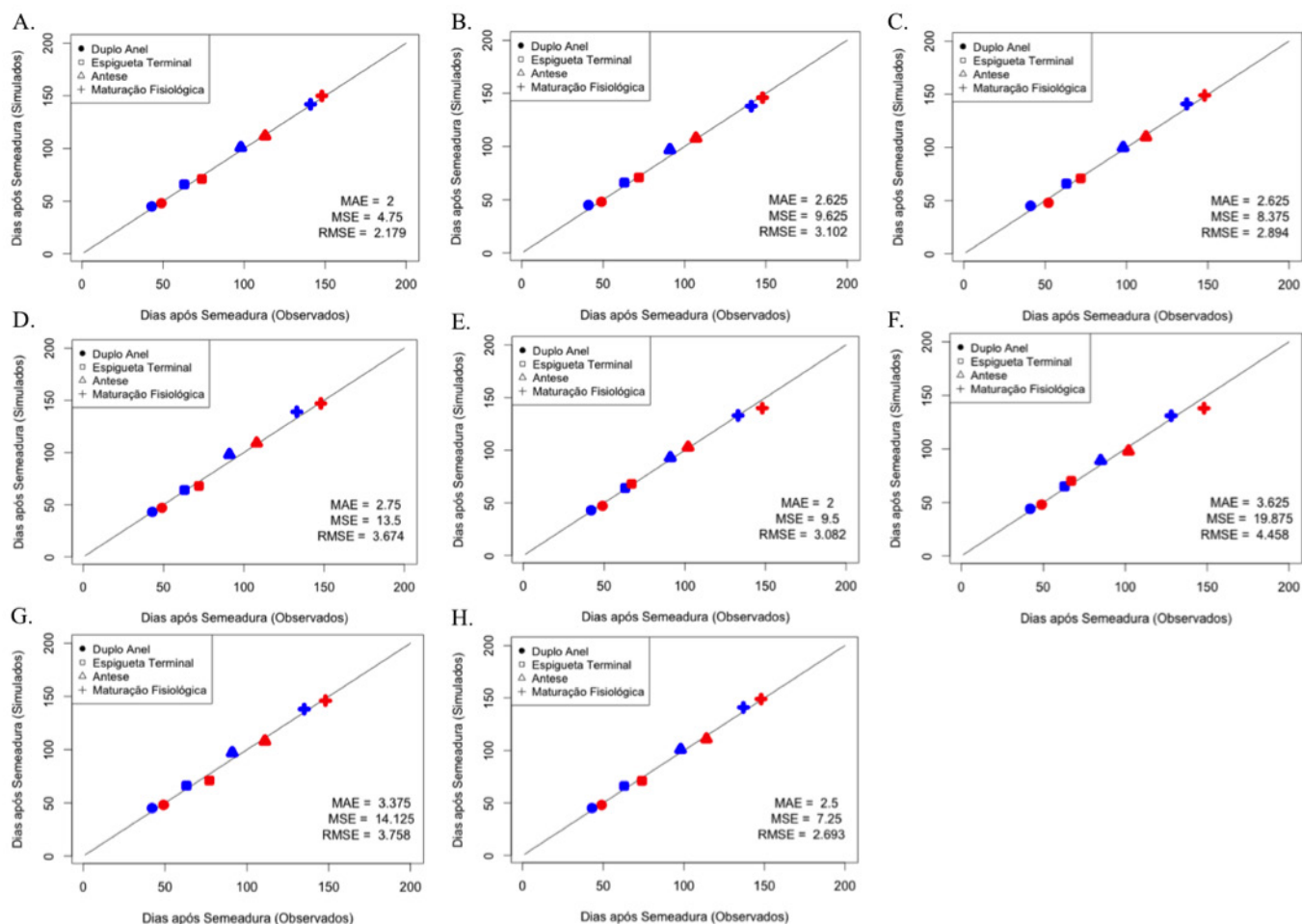


Figura 5. Gráficos comparativos dos resultados dos experimentos, simulados e observados, para os anos 2010 e 2011 da fenologia das cultivares de trigo: BRS 177(A), BRS 194 (B), BRS 276 (C), BRS Louro (D), BRS Guabiju (E), BRS Guamirim (F), BRS Timbaúva (G) e BRS 296 (H)

2011, 72 e 71 DAP. No estágio de antese, os valores de 2010 foram 98 e 100 DAP. Em relação a 2011, obteve-se 112 e 110 DAP. Para a maturação fisiológica, em 2010 os valores obtidos foram 137 e 141 DAP. No ano de 2011, os valores foram 148 e 149 (DAP).

Em relação aos resultados obtidos para a cultivar de trigo BRS Louro (Figura 5D) para o estágio de duplo anel, os resultados do ano de 2010 corresponderam a 43 e 43 DAP. Em 2011, os valores foram 49 e 47 DAP. Em relação ao estágio de espiguetas terminal, em 2010, obtiveram-se os valores 63 e 64 DAP. Para o ano de 2011, os valores foram 72 e 68 DAP. No estágio de antese, para 2010, os valores corresponderam a 91 e 98 DAP. Já em 2011, os valores foram 108 e 109 DAP. Em 2010, os valores para a fase de maturação fisiológica foram 133 e 139 DAP. Para 2011 os valores corresponderam a 148 e 149 DAP.

Em relação à cultivar de trigo BRS Guabiju (Figura 5E), os valores obtidos para o estágio de duplo anel, em 2010, obteve-se 42 e 43 DAP. Em 2011, os valores foram 49 e 47 DAP. Para estágio da fenologia de espiguetas terminal, em 2010, os valores foram 63 e 64 DAP. Para o ano de 2011, 67 e 68 DAP. No estágio de antese, em 2010, os valores corresponderam a 91 e 93 DAP. Em 2011 os valores foram 102 e 103 DAP. Por fim, para o estágio de maturação fisiológica em 2010, os valores foram 133 e 133 DAP. Já em 2011, os resultados obtidos foram 148 e 140 DAP.

Na Figura 5F são mostrados os resultados da calibração realizada para a cultivar de trigo BRS Guamirim. No estágio de duplo anel, obteve-se os valores 42 e 44 DAP para o ano de 2010. Os valores 49 e 48 DAP foram obtidos no ano de 2011. Para o estágio de espiguetas terminal, no ano de 2010, os resultados obtidos foram 63 e 65 DAP. Já para o ano de 2011, os resultados foram: 67 e 70 DAP. Em relação ao estágio fenológico de antese, os valores 85 e 89 DAP foram obtidos para o ano de 2010. Já os valores 102 e 98 DAP foram os resultados obtidos para o ano de 2011. Para o estágio de maturação fisiológica, os valores 128 e 131 DAP correspondem aos resultados obtidos para o ano de 2010. Já para o ano de 2011, os valores dos resultados foram 148 e 138 DAP.

Os resultados dos estádios fenológicos obtidos para a cultivar de trigo BRS Timbaúva são mostrados na Figura 5G. Para o estágio de duplo anel, apurou-se 42 e 45 DAP, referente o ano de 2010. No entanto, os valores 49 e 48 DAP correspondem ao ano de 2011. Para o estágio de espiguetas terminal, no ano de 2010, obteve-se 63 e 66 DAP. Para o ano de 2011, os valores foram 77 e 71 DAP. Em relação ao estágio de antese, obteve-se como resultados 91 e 97 DAP, correspondendo ao ano de 2010. Os valores, 111 e 108 DAP, correspondem aos resultados do ano de 2011. Em relação à maturação fisiológica da cultivar de trigo BRS Timbaúva, para o ano de 2010, os resultados obtidos

foram: 135 e 138 DAP. Já para o ano de 2011, os resultados obtidos foram de: 148 e 149 DAP.

Em relação aos resultados obtidos para a cultivar de trigo BRS 296 (Figura 5H), para o estágio fenológico de duplo anel, obteve-se 43 e 45 DAP, para o ano de 2010. Já para 2011 os valores foram 49 e 48 DAP. Para o estágio de espiguetas terminal, os resultados correspondem a 63 e 66 DAP, para o ano de 2010. Os valores 74 e 71 DAP correspondem aos resultados obtidos para o ano de 2011. Para o estágio de antese, os valores de 2010 correspondem a 98 e 101 DAP. Em 2011, os valores do estágio de antese correspondem a 114 e 111 DAP. Em relação ao estágio de maturação fisiológica, em 2010, os valores correspondem a 137 e 141 DAP. Para o ano de 2011, os valores foram 148 e 149 DAP.

Em relação ao rendimento de grãos, os coeficientes das variáveis das cultivares ajustadas foram: GNUMW (Número de grãos por peso de massa na antese) e SWTS (padrão, sem estresse peso seco (incluindo grão) da parte aérea madura no final do ciclo). A seguir são mostrados os resultados obtidos, fazendo um comparativo com os resultados dos experimentos observados no campo em relação aos experimentos simulados pelo modelo *Cropsim-Wheat*, para as oito cultivares de trigo avaliadas.

Na Figura 6A são mostrados os resultados, para a cultivar de trigo BRS 177, para os anos de 2010 e 2011. Em 2010, o rendimento de grãos observado foi de 4.721 kg ha⁻¹ e o simulado 5.199,13 kg ha⁻¹. Para o ano de 2011, o rendimento de grãos observado foi de 5.185,42 kg ha⁻¹ e o simulado de 5.595,76 kg ha⁻¹.

Em relação aos resultados obtidos para a cultivar de trigo BRS 194 (Figura 6B), para o ano de 2010, o valor do rendimento

de grãos do experimento observado foi de 3.299 kg ha⁻¹, sendo que o rendimento de grãos do experimento simulado foi de 5.604,80 kg ha⁻¹. No ano de 2011, os rendimentos de grãos, do experimento observado e do experimento simulado, foram respectivamente 5.701,62 kg ha⁻¹ e 5.865,83 kg ha⁻¹.

Para a cultivar de trigo BRS 276 (Figura 6C), no ano de 2010, os resultados obtidos, para os experimentos observados e simulados, de rendimento de grãos, foram respectivamente: 3.500 kg ha⁻¹ e 4.967,48 kg ha⁻¹. Já no ano de 2011 os resultados, para o rendimento de grãos foram 5.443,63 (rendimento de grãos do experimento observado) e 5.426,26 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento simulado).

Na Figura 6D são mostrados os resultados obtidos para a cultivar de trigo BRS Louro. No ano de 2010 obteve-se um valor de rendimento de grãos do experimento observado de 3.643 kg ha⁻¹, sendo para o experimento simulado de 4.983,30 kg ha⁻¹. Em 2011, os resultados obtidos foram de 5.329,03 (rendimento de grãos do experimento observado) e 4.87,28 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento simulado).

Para a cultivar de trigo BRS Guabiju (Figura 6E), obteve-se para o ano de 2010 o rendimento de grãos do experimento observado de 3.289 kg ha⁻¹. Já o valor obtido no experimento simulado foi de 4.290,61 kg ha⁻¹. Em 2011, os rendimentos de grãos, experimentos observados e experimentos simulados foram, respectivamente, 4.201,08 e 4.804,76 kg ha⁻¹.

Para a cultivar de trigo BRS Guamirim, os resultados obtidos de rendimentos de grãos, dos experimentos observados e simulados, são mostrados na Figura 6F. No ano de 2010, obteve-se 2.869 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento observado) e 5.247,72 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento simulado). No ano de 2011, o rendimento de grãos

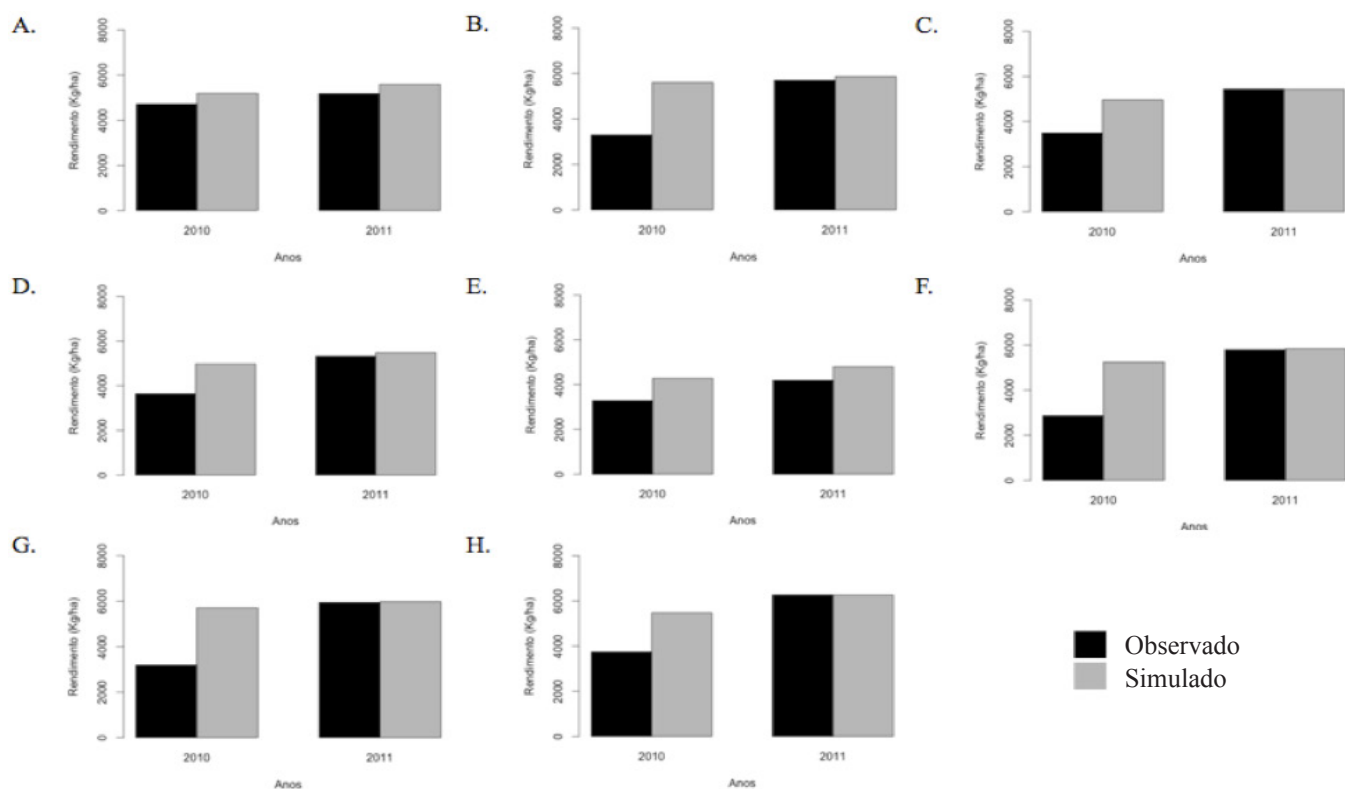


Figura 6. Gráficos que mostram os resultados dos experimentos, simulados e observados, anos 2010 e 2011, do rendimento de grãos para as cultivares de trigo: BRS 177(A), BRS 194 (B), BRS 276 (C), BRS Louro (D), BRS Guabiju (E), BRS Guamirim (F), BRS Timbaúva (G) e BRS 296 (H)

do experimento observado foi de 5.796,26 kg ha⁻¹ e o rendimento de grãos do experimento simulado de 5.836,45 kg ha⁻¹.

Em relação à cultivar de trigo BRS Timbauva, os resultados do rendimento de grãos dos experimentos observado e simulado são mostrados na Figura 6G. Obteve-se para o ano de 2010, 3.189 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento observado) e 5.716,67 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento simulado). No ano de 2011, obtiveram-se os valores 5.945,86 (rendimento de grãos do experimento observado) e 5.977,70 kg ha⁻¹ (rendimento de grãos do experimento simulado).

Finalmente, com relação aos resultados obtidos para a cultivar de trigo BRS-296 (Figura 6H), no ano de 2010, os rendimentos de grãos, experimento observado e experimento simulado, alcançaram os seguintes índices: 3.746 e 5.480,50 kg ha⁻¹. Em 2011, obteve-se 6.270,04 kg ha⁻¹ como rendimento e grãos do experimento observado e 6.264,72 kg ha⁻¹ como valor de rendimento de grãos do experimento simulado.

Discussão

Os resultados obtidos, em relação aos estádios da fenologia do trigo (duplo anel, espiguetas terminal, antese e maturação fisiológica), demonstraram que a calibração do modelo *Cropsim-Wheat* pode ser realizada ajustando os valores dos coeficientes das variáveis genéticas: P1 - duração do final da fase juvenil para a fase de espiguetas terminal; P2 - duração da fase de espiguetas terminal para pseudocaule; P3 - duração da fase de pseudocaule ereto terminando com o crescimento da folha; P4 - duração da fase do crescimento da folha até o pico do crescimento da planta; P5 - duração do pico do crescimento da planta até a antese; P6 - duração da fase de antese.

Dentre as variáveis genéticas, a mais influente, cuja alteração de seu coeficiente de valor interferiu em todos os estádios da fenologia da planta, foi a P1 (duração do final da fase juvenil para a fase de espiguetas terminal). Nesse caso, sugere-se que esta seja a primeira variável a ter o coeficiente ajustado em calibrações futuras, para, após, ajustar os coeficientes das outras variáveis genéticas que influenciam no desenvolvimento da planta (P2, P3, P4, P5 e P6).

Os valores de rendimento de grãos obtidos para as cultivares de trigo dos experimentos simulados, no ano de 2011, foram maiores que os valores obtidos para o ano de 2010. Essa situação, também ocorreu com os resultados de rendimentos de grãos dos experimentos observados.

O modelo *Cropsim-Wheat* possibilita relacionar as cultivares ao seu ecotipo. Dessa forma, na realização da calibração foi possível, baseado no tamanho da planta e na área foliar, criar um ecotipo de acordo com as características da cultivar. Essa situação foi aplicada para a cultivar de trigo BRS Guamirim e esse tipo de calibração possibilitou um melhor ajuste no rendimento de grãos em relação aos dados observados. Como ilustração, ao realizar a simulação com o ecotipo que caracteriza a planta (BRWH02), obtiveram-se os valores de rendimento de grãos de 5.247,72 (2010) e 5.836,45 kg ha⁻¹ (2011). Caso a simulação ocorresse com o ecotipo das outras cultivares (BRWH01) os valores seriam: 5.176,53 kg ha⁻¹ (2010) e 5.711,02 kg ha⁻¹ (2011).

As condições iniciais do solo (água, amônio e nitrato) constituem-se como um dos fatores de configurações do

modelo *Cropsim-Wheat* que interferem no rendimento final de grãos da cultura do trigo.

O baixo rendimento de grãos da cultivar BRS Guamirim nos dados observados do ano de 2010 pode ser explicado pela colheita tardia. A colheita foi realizada em 18/11/2010 e o início da maturação fisiológica foi em 25/09/2010, tendo recebido chuvas em espera.

Também se realizaram simulações alterando as condições iniciais do resíduo da matéria orgânica. Os valores iniciais eram de 3.000 kg ha⁻¹ de matéria orgânica e 0,53 kg ha⁻¹ de nitrogênio. No entanto, para o cenário simulado (1.000 kg ha⁻¹ de matéria orgânica e 0,27 kg ha⁻¹ de nitrogênio), não se verificou alteração no resultado final do rendimento de grãos para as oito cultivares de trigo testadas.

Um fator identificado como influente no resultado da variável rendimento de grãos foi o nitrogênio. Em simulações realizadas com diferentes valores de nitrogênio, tanto a quantidade usada na adubação de base, quanto na adubação cobertura, influenciaram diretamente o rendimento final das cultivares. Quando se aumentou os valores do nitrogênio, foram alcançados melhores rendimentos de grãos. Quando os valores de nitrogênio foram menores, também menor foi o rendimento de grãos.

No ano de 2010 ocorreu uma menor precipitação pluvial nos meses de julho e agosto, em relação ao ano de 2011, sendo, respectivamente, 212,6 e 29,6 mm acumulados no mês. Já em 2011, a precipitação acumulada para os meses de julho e agosto foi, respectivamente, 304,6 e 216,2 mm. Esses meses corresponderam ao período fenológico da planta, entre a espiguetas terminal e o final do surgimento das folhas, conforme resultados obtidos dos estádios do desenvolvimento da planta. Esses também foram os períodos com maior déficit de nitrogênio e menor área foliar gerado pelo modelo *Cropsim-Wheat*. Essas informações indicam que o modelo *Cropsim-Wheat* deve estar computando perda de nitrogênio por lixiviação, tendo por consequência um valor menor no rendimento final de grãos.

Para testar a hipótese de perda de nitrogênio por lixiviação, foram criados dois cenários meteorológicos. No Cenário 1 usou-se os dados meteorológicos de 2011. No Cenário 2, usou-se 50% da precipitação do Cenário 1. Na Tabela 3, são mostrados os valores de déficit de nitrogênio (%) e a área foliar (cm²) da cultivar de trigo BRS 177. Portanto, seria interessante realizar experimentos de campo que efetivassem medidas de perda de nitrogênio por lixiviação para poder comparar os resultados com os resultados do modelo *Cropsim-Wheat*.

Para os experimentos simulados, verificou-se que a data de início da simulação interfere nos resultados da variável rendimento de grãos. Realizou-se uma simulação, para o ano de 2010, alterando a data de início da simulação para dia 17/05, onde ocorreu precipitação pluvial de 20,8 mm. Para a cultivar de trigo BRS 177, esta simulação mostrou aumento no rendimento de grãos, de 5.199,13 para 5.590,11 kg ha⁻¹. No ano de 2011, alterando a data de início da simulação para 10/05, quando ocorreu uma precipitação pluvial de 58,8 mm, e realizando a simulação, obteve-se a diminuição do rendimento final de grãos de 5.595,76 para 5.361,85 kg ha⁻¹. Esse fato pode ser explicado em razão de o ano de 2011 ter sido mais chuvoso que o ano de 2010, comprovando a tese de perda por lixiviação.

Também, foram rodados os experimentos, para os anos de 2010 e 2011, informando ao modelo *Cropsim-Wheat*, em seu parâmetro de controle do nitrogênio, que não haveria ocorrência de déficit de nitrogênio. Dessa forma, os resultados mostraram que o ano de 2011 teve rendimentos superiores ao ano de 2010, da mesma forma que ocorreu com os dados observados no campo.

Tabela 3. Tabela que mostra os estádios fenológicos gerados pelo modelo *Cropsim-Wheat* e seus respectivos valores de área foliar e déficit de nitrogênio

Estádio fenológico	Área foliar/ Cenário		Déficit N/ Cenário	
	1	2	1	2
Germinação	0	0	0,02	0
Espiguetas Terminal	2,61	2,82	0,20	0,05
Pseudo Caule	3,61	4,24	0,25	0,12
Final colocação de folhas	3,72	5,01	0,25	0,17
Surgimento das anteras	3,31	4,47	0,23	0,17
Antese	3	4,11	0,23	0,17
Final antese	2,92	4,03	0,22	0,17
Início enchimento de grãos	2,63	3,67	0,32	0,18
Final enchimento de grãos	0,64	0,95	0,36	0,19

Conclusões

O modelo *Cropsim-Wheat* pode ser calibrado para simular os estádios fenológicos de desenvolvimento de cultivares brasileiras de trigo;

A calibração do modelo *Cropsim-Wheat* é dependente os valores de coeficientes específico para cada cultivar; e

A calibração do modelo *Cropsim-Wheat* para rendimento de grãos depende de fatores como as condições iniciais do solo, data de início da simulação, cultivares, ecotipos, a adubação orgânica e as condições meteorológicas.

Literatura Citada

- Anunciação, Y. M. T.; Liu, W. T. Estimativa da produtividade do trigo em campo experimental, utilizando o modelo fisiológico CERES trigo em condições de campo experimental. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 7., 1991, Viçosa-MG. Anais... Viçosa: SBA, 1991. p.22-25.
- Bannayan, M.; Crout, N. M. J.; Hoogenboom, G. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. *Agronomy Journal*, v.95, n.1, p.114-125, 2003. <<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.0114>>.
- Boote, K. J.; Jones, J. W.; Pickering, N. B. Potencial uses and limitations of crop model. *Agronomy Journal*, v.88, n.5, p.704-716, 1996. <<http://dx.doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>>.
- Calvero, S. B.; Teng, P. S. Use of simulation models to optimise fungicide use for managing tropical rice blast disease. In: Kropff, M. J.; Teng, P. S.; Aggarwal, P. K.; Bouma, J.; Bouman, B. A. M.; Jones, J. W.; van Laar, H. H. (Eds.). *Applications of systems approaches at the field level*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. p.305-320. (Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development, 6).
- Delponte, E. M.; Fernandes, J. M. C.; Pavan, W. A risk infection simulation model for fusarium head blight of wheat. *Fitopatologia Brasileira*, v.30, n.6, p.634-642, 2004. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-41582005000600011>>.
- Faria, R. T.; Bowen, W. T. Evaluation of DSSAT soil- water balance module under cropped and bare soil conditions. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v.46, n.4, p.489-498, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-89132003000400001>>.
- Fernandes, J. M.; Cunha, G. R.; Del Ponte, E.; Pavan, W.; Pires, J. L.; Baethgen, W.; Gimenez, A.; Magrin, G.; Travasso, M. I. Modelling fusarium head blight in wheat under climate change using linked process-based models. In: Canty, S. M.; Boring, T.; Wardwell, J.; Ward, R. W. (Eds.). *International Symposium on Fusarium Head Blight*, 2.; *European Fusarium Seminar*, 8., 2004, Orlando. *Proceedings...* Orlando: Michigan State University, 2004. p.441-444. <<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219230807142453.pdf>>. 22 Mar. 2015.
- Graves, A. R.; Mathews, H. T.; Stephens, R. B.; Middleton, W. T. Crop simulation models as tools in computer laboratory and classroom-based education. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*, v.31, p.48-54, 2002. <<http://r4d.dfid.gov.uk/PDF/Outputs/NatResSys/PD082Pap.pdf>>. 12 Mar. 2015.
- Grossi, C. M. Calibração do modelo CSM-CERES-SORGHUM para avaliação dos impactos de mudanças climáticas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012. 101p. Dissertação Mestrado. <http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/24/TDE-2012-06-04T093925Z-3768/Publico/texto%20completo.pdf>. 05 Mar. 2015.
- Hayman, P. T.; Easdown, W. J. An ecology of a DSS: reflections on managing wheat crops in the northeastern Australian grains region with WHEATMAN. *Agricultural Systems*, v.74, n.1, p.57-77, 2002. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00018-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00018-5)>.
- Hunt, L. A.; Pararajasingham, S. *Cropsim-wheat: A model describing the growth and development of wheat*. *Canadian Journal Plant Science*, v.75, n.3, p.612-632, 1995. <<http://dx.doi.org/10.4141/cjps95-107>>.
- Thornton, P. K.; Wilkens, P. W. Risk assessment and food security. In: Tsuji, G. Y.; Hoogenboom, G.; Thornton, P. K. (Eds.). *Understanding options for agricultural production*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. p.329-345. (Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development, 7).
- Thorp, K. R.; Hunsaker, D. J.; French, A. N.; White, J. W.; Clarke, T. R.; Pinter Jr., P. J. Evaluation of the CSM-CROPSIM-CERES-WHEAT model as a tool for crop water management. *Transactions of the ASABE*, v.53, n.1, p.87-102, 2010. <<http://dx.doi.org/10.13031/2013.29505>>.