

# Modelagem do desenvolvimento de trigo considerando diferentes temperaturas cardinais e métodos de cálculo da função de resposta à temperatura

Cleber Maus Alberto<sup>(1)</sup>, Nereu Augusto Streck<sup>(2)</sup>, Lidiane Cristine Walter<sup>(2)</sup>, Hamilton Telles Rosa<sup>(2)</sup>, Nilson Lemos de Menezes<sup>(2)</sup> e Arno Bernardo Heldwein<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade Federal do Pampa, CEP 97650-000 Itaqui, RS. E-mail: cleberalb@yahoo.com.br <sup>(2)</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: nstreck2@yahoo.com.br, lidianewalter@gmail.com, a1000tontr@gmail.com, nlmenezes@smail.ufsm.br, heldwein@ccr.ufsm.br

Resumo—O objetivo deste trabalho foi melhorar a estimativa dos estádios de desenvolvimento de genótipos brasileiros de trigo (*Triticum aestivum*) realizada por meio do modelo WE-Streck. Foram avaliadas diferentes combinações de temperaturas cardinais e métodos de cálculo da função de resposta à temperatura. Dados referentes às datas da emergência, da emissão da espiguetta terminal, da antese e da maturidade fisiológica de seis genótipos brasileiros de trigo semeados em 11 datas ao longo de três anos (2005, 2006 e 2007) em Santa Maria, RS, foram usados para estimar os coeficientes do modelo WE-Streck modificado e testar as diferentes combinações de temperaturas cardinais e métodos de cálculo da função de resposta à temperatura. Para os genótipos BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era, a simulação do desenvolvimento com o modelo de WE-Streck é melhor quando são usados maiores valores de temperaturas cardinais ótima e máxima, em comparação às usadas originalmente no modelo. Para o genótipo BRS Tarumã, devem ser utilizadas as temperaturas cardinais do modelo WE-Streck original. É recomendável usar as temperaturas mínimas e máximas diárias para calcular a função de resposta à temperatura quando o modelo WE-Streck for usado para simulação do desenvolvimento de genótipos brasileiros de trigo.

Termos para indexação: *Triticum aestivum*, fenologia, simulação do desenvolvimento.

## Modeling wheat development considering different cardinal temperatures and methods for the temperature response function calculation

Abstract – The objective of this work was to improve the prediction of developmental stages of Brazilian wheat (*Triticum aestivum*) genotypes made using the WE-Streck model. Different combinations of cardinal temperatures and methods of calculating the temperature response function were evaluated. Data regarding the dates of emergence, terminal spikelet, anthesis, and physiological maturity of six Brazilian wheat genotypes sown on 11 dates during three years (2005, 2006, and 2007) at Santa Maria, RS, Brazil, were used to estimate the WE-Streck model coefficients and to evaluate the different combinations of cardinal temperatures and methods for calculating the temperature response function. For the genotypes BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52, and Nova Era, the simulation of the development with the WE-Streck model is better with higher values of optimum and maximum cardinal temperatures compared to those originally used in the model. For the genotype BRS Tarumã, the cardinal temperatures from the original version of the WE-Streck model should be used. It is recommended that the minimum and maximum daily temperatures be used to calculate the temperature response function when the WE-Streck model is selected for simulating the development of Brazilian wheat genotypes.

Index terms: *Triticum aestivum*, phenology, development simulation.

### Introdução

Modelos de simulação do desenvolvimento das culturas constituem ferramentas úteis no planejamento de práticas culturais (aplicação de fertilizantes, fungicidas etc.) e na seleção de genótipos adaptados a uma região (Streck et al., 2007, 2008a). A diferença na duração do ciclo de desenvolvimento das culturas é resultado de diferenças genotípicas em resposta a fatores

ambientais que variam com a data, o local e a estação do ano da semeadura (Kirby et al., 1999; Jame & Cutforth, 2004). Entre os fatores ambientais, a temperatura do ar é o principal fator abiótico que afeta o desenvolvimento vegetal, que é influenciado pelas três temperaturas cardinais: mínima ( $TC_{\min.}$ ), ótima ( $TC_{ót.}$ ) e máxima ( $TC_{\max.}$ ) (Porter & Gawith, 1999; Yan & Hunt, 1999).

O modelo de desenvolvimento de Wang & Engel (1998), aqui referido como modelo WE, é um

modelo multiplicativo que considera os efeitos da temperatura do ar, do fotoperíodo e da vernalização sobre o desenvolvimento do trigo. A função de temperatura [ $f(T)$ ] no modelo WE é descrita por uma das versões da função beta, que tem três coeficientes com significado biológico e definição operacional baseada nas temperaturas cardinais. O modelo WE foi posteriormente modificado por Streck et al. (2003a), mas até agora foi testado apenas com trigos de inverno. Faltam testes e adaptações para condições brasileiras, onde predominam trigos de primavera.

Os valores das temperaturas cardinais em trigo são dependentes da fase de desenvolvimento (Xue, 2000; Streck et al., 2003a). Porter & Gawith (1999) revisaram a literatura buscando reunir esses valores e observaram pequena variação na  $TC_{min.}$  e grande variação nos valores de  $TC_{ót.}$  e  $TC_{máx.}$  para uma mesma fase de desenvolvimento, o que dificulta a modelagem. Além disso, as cultivares de trigo atualmente usadas no Brasil são adaptadas a condições subtropicais e tropicais, em que as temperaturas são mais elevadas que em regiões temperadas. Assim, é pertinente testar a hipótese de que  $TC_{ót.}$  e  $TC_{máx.}$  de genótipos brasileiros de trigo, por serem trigos de primavera, são maiores que as de trigos de inverno apresentadas em Porter & Gawith (1999).

A temperatura diária do ar é o dado de entrada no cálculo da  $f(T)$  no modelo WE. Dispondo-se de valores diários de temperatura mínima e máxima ou de valores horários de temperatura do ar, pode-se incorporar o efeito da temperatura na  $f(T)$  de duas maneiras: por meio do uso da média aritmética das temperaturas mínimas e máximas ou das 24 leituras diárias (Streck et al., 2003a, 2007); ou por meio do cálculo da  $f(T)$  para cada valor de temperatura mínima e máxima ou das 24 leituras horárias. A partir desses valores, obtém-se, então, a  $f(T)$  média do dia (Xue et al., 2004; Streck et al., 2008b). A segunda opção resulta em melhoria da simulação do número de folhas em trigos de inverno em algumas épocas de semeadura (Xue et al., 2004), mas ainda não foi testada para simular os estádios de desenvolvimento de trigo. No Brasil, em muitas estações meteorológicas, os dados disponíveis de temperatura do ar são os valores diários de mínimas e máximas. Neste caso, valores intermediários podem ser estimados com equações como a utilizada por Cao & Moss (1997), que estima seis valores intermediários de temperatura entre a mínima e a máxima e resulta em oito valores

diários, a cada três horas. No entanto, ainda não foi testada a hipótese de que há melhoria na simulação dos estádios de desenvolvimento do trigo quando a  $f(T)$  é calculada com base nas temperaturas mínima e máxima diárias ou com base nas oito temperaturas diárias (Cao & Moss, 1997), em comparação com a  $f(T)$  calculada com base na temperatura média diária do ar.

O objetivo deste trabalho foi melhorar a estimativa dos estádios de desenvolvimento de genótipos brasileiros de trigo realizada com o modelo WE modificado por Streck et al. (2003a) usando diferentes combinações de temperaturas cardinais e diferentes maneiras de cálculo da  $f(T)$ .

## Material e Métodos

Os dados usados neste estudo são provenientes de um experimento com várias datas de semeadura realizado durante três anos (2005, 2006 e 2007) no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS (29°43'S, 53°43'W e altitude de 95 m). Em 2005, foram usadas quatro datas de semeadura (24/6/2005, 4/8/2005, 7/9/2005 e 21/12/2005); em 2006, cinco datas de semeadura (6/2/2006, 21/3/2006, 12/5/2006, 4/9/2006 e 25/10/2006); e em 2007, duas datas de semeadura (18/4/2007 e 6/6/2007). Essas datas são referentes a períodos antes, durante e após o período recomendado para a semeadura do trigo na região de Santa Maria, que é de 11/5 a 20/6. Os genótipos de trigo utilizados foram CEP 51, CEP 52 e Nova Era, da Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa (Fundacep), e BRS Louro, BRS 177 e BRS Tarumã, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Esses genótipos são recomendados para o Rio Grande do Sul e foram selecionados por serem de ciclo de desenvolvimento precoce (CEP 51 e BRS Louro), médio (CEP 52 e BRS 177) e tardio (Nova Era e BRS Tarumã). O genótipo BRS Tarumã é classificado como de duplo propósito (Wendt et al., 2006), ou seja, serve para a produção de forragem e de grãos.

A área experimental foi preparada de forma convencional, com duas gradagens. Após análise química do solo, na adubação de base, foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 5–20–20 no sulco de semeadura, segundo as recomendações de adubação e calagem, para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Sociedade Brasileira de Ciência do

Solo, 2004). A adubação nitrogenada em cobertura foi realizada com 80 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, parcelada em duas épocas: a primeira no início do perfilhamento e a segunda no estágio de espiguetas terminal.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com seis tratamentos (genótipos) e quatro repetições. A densidade de semeadura foi de 330 sementes por metro quadrado. Cada parcela foi constituída de quatro fileiras de plantas espaçadas em 0,20 m, com 2,40 m de comprimento e área de 1,92 m<sup>2</sup>. O controle de insetos, doenças e plantas invasoras foi realizado sempre que necessário. Não foi usada irrigação, exceto nas datas de semeadura de 21/12/2005 e 6/2/2006, quando as parcelas foram irrigadas por aspersão algumas vezes nos meses de dezembro de 2005, fevereiro de 2006 e março de 2006, para manter o teor de água no solo acima de 50% da fração de água transpirável (Alberto, 2008) e, assim, permitir o crescimento e o desenvolvimento das plantas sem restrição hídrica no solo, já que nessas duas épocas a demanda evaporativa do ar foi alta e a precipitação pluviométrica foi de apenas 101,9 mm em dezembro de 2005, 45,5 mm em fevereiro de 2006 e 80,2 mm em março de 2006.

A data da emergência (EM) foi considerada quando 50% das plântulas em 0,5 m de cada fileira da parcela estavam visíveis acima do nível do solo. A contagem do número de plântulas foi feita diariamente, até que fosse observado um número constante de plantas emergidas. Uma semana após a emergência, seis plântulas de trigo de cada parcela foram selecionadas ao acaso e marcadas. As plantas selecionadas foram utilizadas para determinar os estádios de antese (AN) e de maturidade fisiológica (MF). A data da AN foi considerada quando 50% das plantas marcadas estavam com pelo menos uma flor aberta (Zadoks et al., 1974), e a data de MF foi considerada quando 50% das plantas marcadas estavam com 100% da folha-bandeira amarela (Streck et al., 2003a). Foram coletadas, diariamente, duas plantas por parcela, as quais foram dessecadas e, com o auxílio de lupa, utilizadas para visualização do estágio de espiguetas terminal (ET) com base na descrição de Porter et al. (1987). A data da ET foi considerada quando 50% das plantas coletadas estavam nesse estágio.

Os valores diários de temperatura mínima e máxima do ar (°C) foram coletados na Estação Climatológica Principal, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada a aproximadamente 150 m da área experimental.

No modelo WE modificado por Streck et al. (2003a), a partir daqui referido como modelo WE-Streck, a fase EM-AN é dividida em duas fases: EM-ET e ET-AN. A taxa diária de desenvolvimento ( $r$ ) é calculada na escala de um dia, e o estágio de desenvolvimento (DS) é calculado por meio do acúmulo dos valores de  $r$ , ou seja,  $DS = \sum r$ . O DS é zero na emergência, 0,4 na ET, 1 na AN e 2 na MF. A forma geral do modelo WE-Streck para a fase EM-ET, é:

$$r = r_{\text{máx},v1} \cdot f(T) \cdot f(P) \cdot f(V), \quad (1)$$

em que  $r_{\text{máx},v1}$  é a taxa diária máxima de desenvolvimento (dia<sup>-1</sup>), durante a fase EM-ET, em condições ótimas de temperatura, fotoperíodo e vernalização, e  $f(T)$ ,  $f(P)$  e  $f(V)$  são as funções de resposta à temperatura, fotoperíodo e vernalização, respectivamente, que variam de zero a um. Na fase ET-AN o efeito da vernalização no desenvolvimento da cultura é desprezível (González et al., 2002) e, assim, a forma geral do modelo WE-Streck nessa fase é:

$$r = r_{\text{máx},v2} \cdot f(T) \cdot f(P), \quad (2)$$

em que  $r_{\text{máx},v2}$  é a taxa diária máxima de desenvolvimento durante a fase ET-AN em condições ótimas de temperatura e fotoperíodo. Na fase AN-MF, a forma geral do modelo WE-Streck é:

$$r = r_{\text{máx},r} \cdot f(T), \quad (3)$$

em que  $r_{\text{máx},r}$  é a taxa máxima de desenvolvimento durante a fase AN-MF, em condições ótimas de temperatura.

Para testar a hipótese de que genótipos brasileiros de trigo, por serem trigos de primavera, apresentam  $TC_{\text{ót}}$  e  $TC_{\text{máx}}$  maiores que as de trigos de inverno, foram usados diferentes arranjos de temperaturas cardinais. Foram usados os valores originais do modelo WE-Streck e aumentadas as temperaturas cardinais  $TC_{\text{ót}}$  e  $TC_{\text{máx}}$  para as fases EM-ET, ET-AN e AN-MF (Tabela 1). O aumento na  $TC_{\text{ót}}$  foi de 5, 6 e 6°C, para as fases de EM-ET, ET-AN e AN-MF, respectivamente, e de 5°C na  $TC_{\text{máx}}$  em todas as fases do desenvolvimento da cultura do trigo (Tabela 1). Esses aumentos foram selecionados com base na revisão de Porter & Gawith (1999).

Para testar a hipótese de que há melhoria da simulação dos estádios de desenvolvimento do trigo quando são usadas as temperaturas mínimas e máximas para os cálculos da  $f(T)$  e  $f(V)$ , foram considerados três métodos: método  $WE_{T_{\text{média}}}$ , em que  $f(T)$  e  $f(V)$  são calculadas com base na temperatura média diária do ar; método  $WE_{T_{\text{mín}}}$ , em que  $f(T)$  e  $f(V)$  são calculadas

com base nas temperaturas mínima e máxima diárias; e método  $WE_{TCM}$ , em que  $f(T)$  e  $f(V)$  são calculadas com base nas oito temperaturas diárias (Cao & Moss, 1997).

No método  $WE_{Tmédias}$ , a temperatura do ar foi calculada pela média aritmética entre as temperaturas mínima e máxima diárias do ar, e foi utilizada para calcular a  $f(T)$  e a  $f(V)$ . No método  $WE_{Tmm}$ , foram calculadas a  $f(T)$  e a  $f(V)$  para as temperaturas mínima e máxima diárias do ar e, então, a média dessas duas funções de temperatura. O método  $WE_{TCM}$  consistiu em calcular a  $f(T)$  para oito valores de temperaturas (em intervalos diários de três horas), estimadas pelo método de Manrique & Hodges descrito em Cao & Moss (1997), para, então, calcular a média das oito funções de temperatura.

No modelo WE-Streck, a  $f(V)$  foi desenvolvida para trigos de inverno (Streck et al., 2003b), que, na ausência de temperaturas vernalizantes menores que 15,7°C (Porter & Gawith, 1999; Streck et al., 2003a, 2003b), não atingem a antese e, portanto, não passam pela fase reprodutiva. Trigos de primavera, mesmo quando não submetidos a temperaturas vernalizantes durante seu ciclo de desenvolvimento, atingem a antese (Kirby et al., 1999). Para representar matematicamente essa situação, a seguinte condição foi imposta para a  $f(V)$ , na fase EM–ET:

$$f(TV) = f(T) \cdot [1 + f(V)], \text{ enquanto } f(TV) \leq 1; \quad (4)$$

$$\text{e } f(TV) = 1, \text{ enquanto } f(TV) > 1, \quad (5)$$

em que  $f(TV)$  é a função resultante da interação entre  $f(T)$  e  $f(V)$  e substitui  $f(T)$  e  $f(V)$  na equação (1) para os genótipos de resposta intermediária à vernalização (BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era). As equações (4) e (5) possibilitam que a simulação do desenvolvimento de plantas de trigos de primavera atinja a antese quando

não ocorrerem temperaturas vernalizantes durante o ciclo de desenvolvimento das plantas e que, quando submetidas a temperaturas vernalizantes, essas plantas sejam induzidas ao florescimento mais rapidamente. Não foi utilizada  $f(V)$  no modelo de desenvolvimento para o genótipo BRS Louro, que não apresenta resposta à vernalização (Alberto, 2008). Para o cálculo da  $f(V)$  no modelo WE-Streck, são necessários os valores dos coeficientes  $X_{0,5}$  (tempo necessário para a metade da vernalização completa) e  $n$  (coeficiente que dá forma à curva de resposta à vernalização), os quais são dependentes do genótipo. O genótipo BRS Tarumã apresenta características semelhantes a trigos de inverno e não atinge a antese quando não há temperaturas vernalizantes (Alberto, 2008). Assim, optou-se por usar, para esse genótipo, a mesma  $f(V)$  usada para trigos de inverno (Streck et al., 2003a, 2003b). Para os outros quatro genótipos utilizados neste estudo, os coeficientes  $X_{0,5}$  e  $n$  da  $f(V)$  foram aqueles estimados por Alberto (2008).

Os valores de fotoperíodo crítico ( $P_c$ , em horas) e índice de sensibilidade ao fotoperíodo ( $\omega$ ), necessários para o cálculo da  $f(P)$ , e  $r_{\max.,v1}$ ,  $r_{\max.,v2}$  e  $r_{\max.,r}$  são específicos para cada genótipo (Wang & Engel, 1998; Streck et al., 2003a). Esses coeficientes foram estimados pelo método Marquardt e o procedimento SAS-NLIN (SAS Institute, 2002) a partir dos dados de EM, ET, AN e MF coletados em cinco datas de semeadura (6/2/2006, 21/3/2006, 12/5/2006, 4/9/2006 e 18/4/2007).

Para a avaliação dos modelos, foram usadas seis datas de semeadura (24/6/2005, 4/8/2005, 7/9/2005, 21/12/2005, 25/10/2006 e 6/6/2007). Para o genótipo BRS Tarumã, em razão de este ter completado o ciclo

**Tabela 1.** Arranjos de temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima para o desenvolvimento do trigo nas fases de emergência até espiguetas terminal (EM–ET), espiguetas terminal até antese (ET–AN) e antese até maturidade fisiológica (AN–MF) utilizadas no modelo de desenvolvimento de trigo de WE-Streck.

Arranjos de temperatura <sup>(1)</sup>	Temperatura cardinal mínima (TC <sub>min.</sub> , °C)	Temperatura cardinal ótima (TC <sub>ót.</sub> , °C)	Temperatura cardinal máxima (TC <sub>máx.</sub> , °C)
Fase EM–ET			
TC <sub>original</sub>	0	19	30
TC <sub>máxima</sub>	0	19	35
TC <sub>ót.máx.</sub>	0	24	35
Fase ET–AN			
TC <sub>original</sub>	4	24	35
TC <sub>máxima</sub>	4	24	40
TC <sub>ót.máx.</sub>	4	30	40
Fase AN–MF			
TC <sub>original</sub>	8	24	35
TC <sub>máxima</sub>	8	24	40
TC <sub>ót.máx.</sub>	8	30	40

<sup>(1)</sup>TC<sub>original</sub>, temperaturas cardinais do modelo original; TC<sub>máx.</sub>, aumento na temperatura cardinal máxima; TC<sub>ót.máx.</sub>, aumento nas temperaturas cardinais ótima e máxima.

de desenvolvimento em poucas datas de semeadura, foram utilizadas quatro datas (21/3/2006, 12/5/2006, 18/4/2007 e 6/6/2007) para a estimativa dos coeficientes, e seis datas de semeadura (24/6/2005, 4/8/2005, 7/9/2005, 21/12/2005, 6/2/2006 e 25/10/2006) para a avaliação dos modelos.

A estatística utilizada para avaliar o desempenho dos modelos, consideradas as diferentes combinações de cálculo da  $f(T)$  e de temperaturas, foi a raiz do quadrado médio do erro (RQME), calculada de acordo com Janssen & Heuberger (1995):

$$RQME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}, \quad (6)$$

em que  $S_i$  é o valor simulado;  $O_i$  é o valor observado;  $N$  é o número de observações. Quanto menor a RQME, melhor foi considerado o modelo.

## Resultados e Discussão

As várias datas de semeadura utilizadas para estimativa dos coeficientes e avaliação das diferentes versões do modelo de desenvolvimento WE durante os três anos de coleta de dados (2005, 2006 e 2007) possibilitaram que as plantas de trigo fossem submetidas a grande variação de precipitação, temperatura e fotoperíodo nas

diferentes fases do ciclo de desenvolvimento. Durante esses anos, a menor precipitação mensal observada foi de 45,5 mm (fevereiro de 2006) e a maior, de 284,3 mm (outubro de 2005). A temperatura média mensal variou de 11,8 (julho de 2007) a 26,3°C (janeiro de 2006), a maior temperatura máxima diária foi 38,6°C (8/1/2006) e a menor temperatura mínima diária foi -1,1°C (29/7/2007). O fotoperíodo variou de 11,1 horas no solstício de inverno (21 de junho) a 14,9 horas no solstício de verão (21 de dezembro) (Kiesling, 1982). Essas distintas condições de ambiente a que as plantas de trigo estiveram expostas são importantes para a estimativa dos coeficientes e a avaliação de modelos de desenvolvimento (Streck et al., 2007).

Os valores de  $r_{\text{máx.,v1}}$  variaram entre 0,0110 e 0,0291  $\text{dia}^{-1}$ , e os de  $r_{\text{máx.,v2}}$  variaram entre 0,0260 e 0,0384  $\text{dia}^{-1}$  (Tabela 2), valores próximos aos relatados para trigos de inverno por Streck et al. (2003a), que estimaram valores de  $r_{\text{máx.,v1}}$  de 0,0198  $\text{dia}^{-1}$  para o genótipo Arapahoe, 0,0241  $\text{dia}^{-1}$  para o genótipo Karl 92, e valores de  $r_{\text{máx.,v2}}$  de 0,0489  $\text{dia}^{-1}$  e 0,0241  $\text{dia}^{-1}$  para os genótipos Arapahoe e Karl 92, respectivamente. Os valores de  $r_{\text{máx.,r}}$  variaram entre 0,0459 e 0,0637  $\text{dia}^{-1}$  e são maiores que os estimados por Streck et al. (2003a) para os mesmos genótipos (0,0381  $\text{dia}^{-1}$ ).

**Tabela 2.** Valores estimados dos coeficientes  $r_{\text{máx.,v1}}$  ( $\text{dia}^{-1}$ ),  $r_{\text{máx.,v2}}$  ( $\text{dia}^{-1}$ ),  $r_{\text{máx.,r}}$  ( $\text{dia}^{-1}$ ), índice de sensibilidade ao fotoperíodo ( $\omega$ ,  $\text{h}^{-1}$ ), fotoperíodo crítico ( $P_c$ , em horas) e temperaturas cardinais ( $TC_{\text{min.}}$ ,  $TC_{\text{ót.}}$  e  $TC_{\text{máx.}}$ ) para seis genótipos de trigo, com as melhores combinações de métodos de cálculo de  $f(T)$  e  $f(V)$  para o modelo de desenvolvimento de trigo de WE-Streck, nas fases de emergência à espiguetta terminal (EM-ET), espiguetta terminal à antese (ET-AN) e antese à maturidade fisiológica (AN-MF)<sup>(1)</sup>.

Coeficientes e métodos de cálculo	Genótipo					
	BRS Louro	CEP 52	CEP 51	BRS 177	Nova Era	BRS Tarumã
Fase EM-ET						
Método de cálculo de $f(T)$ e $f(V)$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{média}}}$	$WE_{T_{\text{média}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$
$r_{\text{máx.,v1}}$ ( $\text{dia}^{-1}$ )	0,0160	0,0128	0,0110	0,0110	0,0110	0,0291
$\omega$ ( $\text{h}^{-1}$ )	2,5900	0,4034	0,3110	0,2460	1,3902	0,8843
$P_c$ (h)	10,7	8,6	0	0	10,4	10,0
$TC_{\text{min.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0	0	0	0	0	0
$TC_{\text{ót.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	24	19	24	24	24	19
$TC_{\text{máx.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	35	35	35	35	35	30
Fase ET-AN						
Método de cálculo de $f(T)$ e $f(V)$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{média}}}$	$WE_{T_{\text{média}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$
$r_{\text{máx.,v2}}$ ( $\text{dia}^{-1}$ )	0,0384	0,0260	0,0310	0,0310	0,0354	0,0327
$\omega$ ( $\text{h}^{-1}$ )	2,5900	0,4034	0,3110	0,2460	1,3902	0,8843
$P_c$ (h)	10,7	8,6	0	0	10,4	10,0
$TC_{\text{min.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	4	4	4	4	4	4
$TC_{\text{ót.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	24	30	30	30	24
$TC_{\text{máx.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	40	40	40	40	40	35
Fase AN-MF						
Método de cálculo de $f(T)$ e $f(V)$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{média}}}$	$WE_{T_{\text{média}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$	$WE_{T_{\text{mm}}}$
$r_{\text{máx.,r}}$ ( $\text{dia}^{-1}$ )	0,0547	0,0637	0,0597	0,0637	0,0615	0,0459
$TC_{\text{min.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	8	8	8	8	8	8
$TC_{\text{ót.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	30	30	30	30	24
$TC_{\text{máx.}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	40	40	40	40	40	35

<sup>(1)</sup> $WE_{T_{\text{média}}}$ , cálculo da  $f(T)$  com a temperatura média diária do ar;  $WE_{T_{\text{mm}}}$ , cálculo da  $f(T)$  com as temperaturas mínima e máxima diárias do ar.

Esses resultados indicam que os genótipos brasileiros de trigo usados neste estudo diferem dos genótipos de trigo de inverno americanos Arapahoe e Karl 92, que têm desenvolvimento mais rápido durante a fase reprodutiva.

Os valores de  $\omega$  (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo) variaram entre 0,3110 e 2,59 h<sup>-1</sup> (Tabela 2) e, na maioria das vezes, foram superiores aos encontrados por Streck et al. (2003a) para os genótipos de trigo de inverno Arapahoe (0,34 h<sup>-1</sup>) e Karl 92 (0,16 h<sup>-1</sup>). Já os valores de fotoperíodo crítico ( $P_c$ ), que variaram entre 8,6 e 10,7 horas (Tabela 2), são semelhantes aos valores estimados por Streck et al. (2003a) para os genótipos Arapahoe (9,5 h<sup>-1</sup>) e Karl 92 (7,0 h<sup>-1</sup>). Esses resultados indicam que os genótipos brasileiros usados neste trabalho apresentam sensibilidade ao fotoperíodo.

Ainda na Tabela 2, é possível observar que as melhores simulações ocorreram com uso do modelo WE-Streck com os mesmos coeficientes de  $f(P)$  das fases (EM-ET e ET-AN), durante a fase vegetativa do desenvolvimento do trigo. Para os genótipos BRS Louro, CEP 52, CEP 51, BRS 177 e Nova Era, as simulações mais precisas foram as que utilizaram temperaturas cardinais maiores ( $TC_{ót.,máx.}$ ) que as utilizadas no modelo original, para todas as fases de desenvolvimento do trigo. Já para o genótipo BRS Tarumã, só foi possível o ajuste dos coeficientes com o uso das temperaturas cardinais do modelo WE original ( $TC_{original}$ ).

Os valores observados e simulados de ET, AN e MF com o melhor método de cálculo da  $f(T)$  e  $f(V)$  e com as melhores combinações de temperaturas cardinais para cada genótipo descrito na Tabela 2 estão representados na Figura 1. Os valores de RQME variaram de 1,2 (Nova Era) a 7,3 dias (BRS Tarumã) para o estágio ET, de 3,5 (BRS Louro) a 8,1 dias (BRS 177) para o estágio AN e de 6,3 (CEP 52) a 12 dias (BRS 177) para o estágio MF. Valores de RQME que variam de 1,2 a 12 dias são menores ou maiores que os relatados por Streck et al. (2003a) para trigos de inverno, que variaram de três a oito dias.

Aumentos nas temperaturas cardinais ótima e máxima possibilitaram melhoria na estimativa das datas de ocorrência dos estádios de desenvolvimento (Tabela 2 e Figura 1), o que confirma a hipótese de que genótipos brasileiros de trigo, por serem trigos de primavera, apresentam  $TC_{ót.}$  e  $TC_{máx.}$  maiores que

as de trigos de inverno. Isso pode ser explicado pelo fato de os trigos de primavera serem mais adaptados a condições de temperatura mais elevada que os trigos de inverno. Corrobora esses resultados o fato de que, para a cultivar BRS Tarumã, que necessita de maior exposição ao frio para vernalização (Alberto, 2008), só foi possível estimar os coeficientes do modelo para a fase ET-AN utilizando as temperaturas cardinais do modelo original (temperaturas cardinais para trigos de inverno).

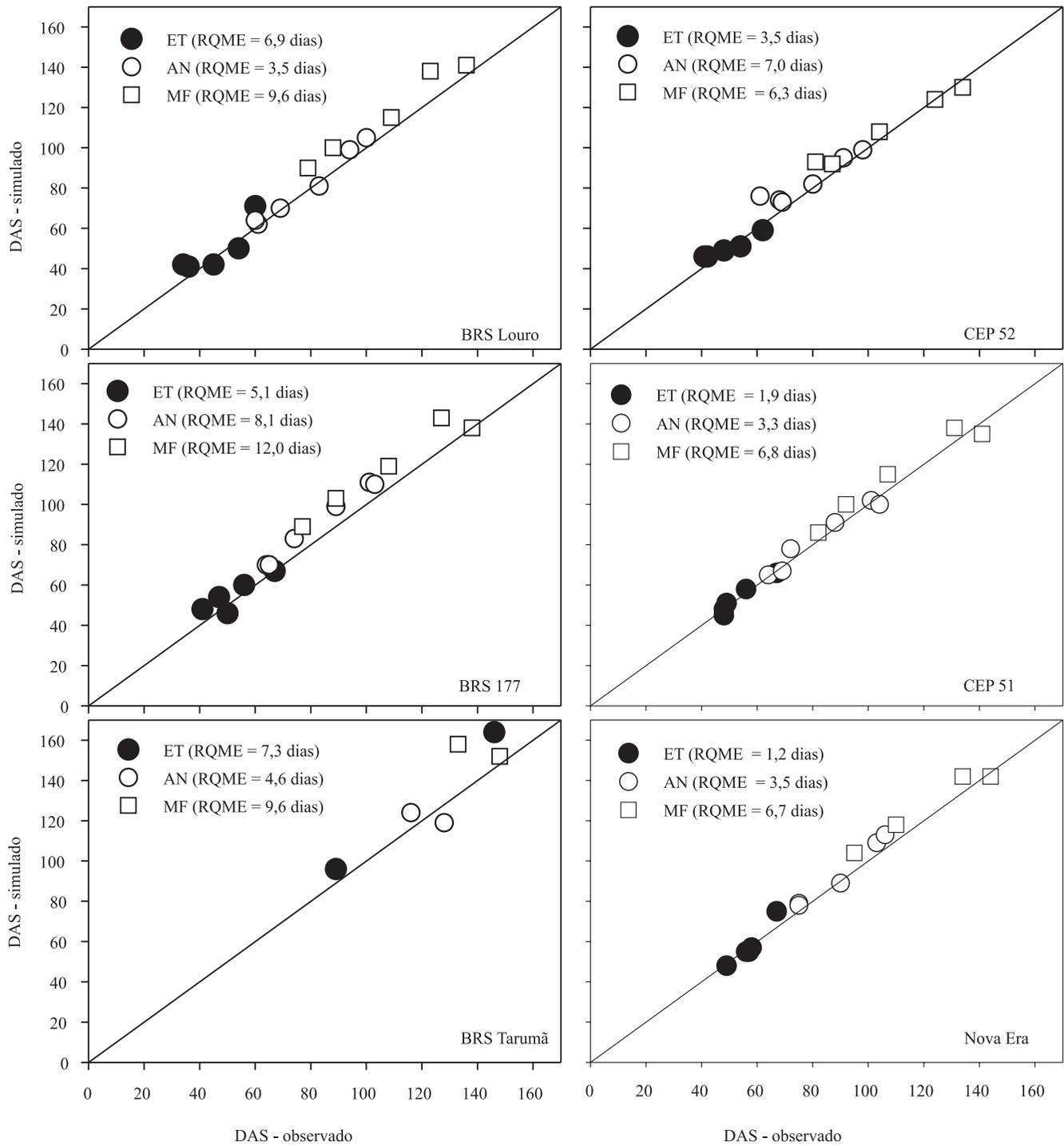
A Figura 1 mostra que há somente dois valores para cada estágio de desenvolvimento (ET, AN e MF). Esse pequeno número de pontos ocorreu porque, das seis datas de semeadura selecionadas para a avaliação do modelo, em somente três datas as plantas atingiram o estágio de espiguetas terminal (24/6/2005, 4/8/2005 e 6/2/2008), em apenas duas (24/6/2005 e 4/8/2005) as plantas apresentaram antese e maturação fisiológica e porque, na semeadura de 24/6/2005, não foi determinada a data de ocorrência da espiguetas terminal.

Em quatro genótipos usados neste estudo (BRS Louro, CEP 52, Nova Era e BRS Tarumã), o método de  $WE_{T_{mm}}$  apresentou os menores valores de RQME, o que confirma a hipótese de que a simulação dos estádios de desenvolvimento apresenta melhoria quando é usada uma  $f(T)$  para a temperatura mínima e outra para a temperatura máxima do ar, em comparação ao cálculo de  $f(T)$  e  $f(V)$  que usa a temperatura média diária do ar ( $WE_{T_{média}}$ ). Para os genótipos em que o modelo  $WE_{T_{média}}$  foi melhor (BRS 177 e CEP 51), é possível usar o modelo  $WE_{T_{mm}}$  na estimativa dos estádios de desenvolvimento, pois, quando foi utilizado o modelo  $WE_{T_{mm}}$  para os genótipos BRS 177 ( $r_{máx.,v1} = 0,0134$ ,  $r_{máx.,v2} = 0,0310$ ,  $r_{máx.,r} = 0,0671$ ,  $\omega = 0,62$  e  $P_c = 8,6$ ) e CEP 51 ( $r_{máx.,v1} = 0,0160$ ,  $r_{máx.,v2} = 0,0425$ ,  $r_{máx.,r} = 0,0549$ ,  $\omega = 0,1160$  e  $P_c = 0$ ), a perda de precisão na estimativa dos estádios de desenvolvimento (ET, AN e MF) foi de, no máximo, cinco dias. O método de cálculo da  $f(T)$  que utiliza a estimativa de seis temperaturas intermediárias às temperaturas mínima e máxima diárias ( $WE_{TCM}$ ) teve precisão intermediária quando comparado aos outros dois métodos ( $WE_{T_{média}}$  e  $WE_{T_{mm}}$ ) para os genótipos BRS Louro, CEP 52, BRS Tarumã e Nova Era, enquanto para os genótipos BRS 177 e CEP 51 esse método apresentou o pior desempenho.

Em geral, nas semeaduras tardias, realizadas após a época recomendada, as diferenças entre os dados observados e simulados de datas de ocorrência dos

estádios de desenvolvimento foram maiores. Nessas datas, o modelo WE-Streck superestima a data observada, o que indica que o modelo foi mais lento

para simular a taxa de desenvolvimento. Uma possível explicação para esses resultados é a ocorrência de déficit hídrico na planta nas horas mais quentes



**Figura 1.** Dias após a semeadura (DAS), até o aparecimento da espigueta terminal (ET), o início da antese (AN) e a maturidade fisiológica (MF), observados x simulados com uso do modelo de desenvolvimento de trigo de WE-Streck para os genótipos BRS Louro, CEP 52, BRS 177, CEP 51, BRS Tarumã e Nova Era, em seis datas de semeadura, com uso de temperaturas cardinais e métodos de cálculo da  $f(T)$  mais adequados para cada genótipo (Tabela 2).

do dia, o que promove o fechamento estomático e causa diminuição da transpiração, levando a um aumento da temperatura da folha e do dossel vegetal principalmente durante a fase vegetativa (Siddique et al., 2000). Em trigo, Ehrlér et al. (1978) constataram uma elevação da temperatura do dossel de até 9°C em relação à temperatura do ar em plantas submetidas a déficit hídrico. A maior temperatura do dossel vegetal pode acelerar o desenvolvimento das plantas e resultar em antecipação da data de ocorrência da antese e da maturidade fisiológica em trigo (McMaster & Wilhelm, 2003; McMaster et al., 2005), e esse efeito não é levado em conta no modelo de desenvolvimento de WE-Streck.

As condições de temperatura às quais os genótipos de trigo foram submetidos neste estudo foram desfavoráveis em algumas datas de semeadura (semeaduras de primavera e verão), quando comparadas a datas de semeadura situadas dentro da época recomendada. O desempenho de modelos de simulação das culturas deve ser satisfatório não apenas quando a cultura é semeada dentro do período recomendando, quando as condições meteorológicas são mais próximas das ótimas para a cultura, mas também em condições meteorológicas desfavoráveis, como foi o caso neste estudo. Os resultados indicam que os melhores modelos, apresentados na Tabela 2 e na Figura 1, são apropriados para ser usados na simulação do desenvolvimento do trigo em situações diferentes das atuais, como, por exemplo, em cenários de mudança climática. O modelo  $WE_{T_{mm}}$ , que utiliza o cálculo das funções de resposta para as temperaturas mínima e máxima do ar, é o mais recomendado para a simulação do desenvolvimento do trigo em cenários com aumentos assimétricos nas temperaturas mínima e máxima do ar, condição esperada nos cenários projetados para o final deste século (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

### Conclusões

1. As temperaturas cardinais ótima e máxima dos genótipos brasileiros de trigo são maiores que dos trigos de inverno; as exceções são os genótipos brasileiros de trigo com duplo propósito, que apresentam características típicas de trigos de inverno.

2. No cálculo da função de resposta à temperatura com modelo WE-Streck para simular o desenvolvimento de genótipos brasileiros de trigo deve-se usar as temperaturas mínima e máxima diárias.

### Agradecimentos

Ao Dr. Mauro Tadeu Braga da Silva, da Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa, e ao Dr. Gilberto Rocca Cunha, da Embrapa Trigo, pelo fornecimento das sementes usadas neste estudo; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Fundação de Amparo à Pesquisas do Estado do Rio Grande do Sul, pela concessão de bolsas.

### Referências

- ALBERTO, C.M. **Modelagem do desenvolvimento e do balanço de água no solo em trigo**. 2008. 122p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- CAO, W.; MOSS, D.N. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. **Journal of Agricultural Science**, v.129, p.163-172, 1997.
- EHLER, W.L.; IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. **Agronomy Journal**, v.70, p.251-256, 1978.
- GONZÁLEZ, F.G.; SLAFER, G.A.; MIRALLES, D.J. Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. **Field Crops Research**, v.74, p.183-195, 2002.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: the physical science basis: summary for policymakers**. Geneva: UNEP, 2007. 21p. Disponível em: <<http://www.meteo.bg/meteorology/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2008.
- JAME, Y.W.; CUTFORTH, H.W. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.124, p.207-218, 2004.
- JANSSEN, P.H.M.; HEUBERGER, P.S.C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v.83, p.55-56, 1995.
- KIESLING, T.C. Calculation of the length of the day. **Agronomy Journal**, v.74, p.758-759, 1982.
- KIRBY, E.J.M.; SPINK, J.H.; FROST, D.L.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; SCOTT, R.K.; FOULKES, M.J.; CLARE, R.W.; EVANS, E.J. A study of wheat development in the field: analysis by phases. **European Journal of Agronomy**, v.11, p.63-82, 1999.
- MCMMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: improving simulation models. **Journal of Agricultural Science**, v.141, p.129-147, 2003.
- MCMMASTER, G.S.; WILHELM, W.W.; FRANK, A.B. Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.56, p.1277-1288, 2005.

- PORTER, J.R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. **European Journal of Agronomy**, v.10, p.23-36, 1999.
- PORTER, J.R.; KIRBY, E.J.M.; DAY, W.; ADAM, J.S.; APPEYARD, M.; AYLING, S.; BAKER, C.K.; BEALE, P.; BELFORD, R.K.; BISCOE, P.V.; CHAPMAN, A.; FULLER, M.P.; HAMPSON, J.; HAY, R.K.M.; HOUGH, M.N.; MATTHEWS, S.; THOMPSON, W.J.; WEIR, A.H.; WILLINGTON, V.B.A.; WOOD, D.W. An analysis of morphological development stages in Avalon winter wheat crops with different sowing dates and at ten sites in England and Scotland. **Journal of Agricultural Sciences**, v.109, p.107-121, 1987.
- SAS INSTITUTE. **Getting started with the SAS® learning edition**. Cary: SAS Institute, 2002. 81p.
- SIDDIQUE, M.R.B.; HAMID, A.; ISLAM, M.S. Drought stress effects on water relations of wheat. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, v.41, p.35-39, 2000.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 394p.
- STRECK, N.A.; BOSCO, L.C.; LUCAS, D.D.P.; LAGO, I. Modelagem da emissão de folhas em arroz cultivado e em arroz-vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.559-567, 2008b.
- STRECK, N.A.; LAGO, I.; GABRIEL, L.F.; SAMBORANHA, F.K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.449-455, 2008a.
- STRECK, N.A.; PAULA, F.L.M. de; BISOGNIN, D.A.; HELDWEIN, A.B.; DELLAI, J. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, p.1-11, 2007.
- STRECK, N.A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P.S. A generalized vernalization response function for winter wheat. **Agronomy Journal**, v.95, p.155-159, 2003b.
- STRECK, N.A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, P.S. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.115, p.139-150, 2003a.
- WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, p.1-24, 1998.
- WENDT, W.; DEL DUCA, L.J.L.; CAETANO, V. da R. **Avaliação de cultivares de trigo de duplo propósito, recomendados para cultivo no Estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 4p. (Embrapa Clima Temperado. Comunicado técnico, 137).
- XUE, Q. **Phenology and gas exchange in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)**. 2000. 128p. Dissertation (Ph.D.) - University of Nebraska, Lincoln.
- XUE, Q.W.; WEISS, A.; BAENZIGER, P.S. Predicting leaf appearance in field-grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, v.175, p.261-270, 2004.
- YAN, W.K.; HUNT, L.A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, v.84, p.607-614, 1999.
- ZADOKS, J.C.; CHANG, T.T.; KONZAK, C.F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v.14, p.415-421, 1974.

---

Recebido em 14 de janeiro de 2009 e aprovado em 29 de maio de 2009