

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

EDSON GIOVANNI KOCHINSKI

AJUSTE E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO WANG-ENGEL PARA ESTIMATIVA  
DOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS EM GENÓTIPOS DE TRIGO

PONTA GROSSA  
2020

EDSON GIOVANNI KOCHINSKI

AJUSTE E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO WANG-ENGEL PARA ESTIMATIVA  
DOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS EM GENÓTIPOS DE TRIGO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa

Co-Orientador: Pesquisador Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara

PONTA GROSSA  
2020

K76 Kochinski, Edson Giovanni  
Ajuste e parametrização do modelo Wang-Engel para estimativa dos estádios fenológicos em genótipos de trigo / Edson Giovanni Kochinski. Ponta Grossa, 2020.  
110 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa.  
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Yoiti Tsukahara.

1. Modelagem de sistemas agrícolas. 2. Temperatura do ar. 3. Fotoperíodo. 4. Fenologia do trigo. 5. Triticum aestivum. I. Barbosa, Eduardo Augusto Agnellos. II. Tsukahara, Rodrigo Yoiti. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Agricultura. IV.T.

CDD: 633



## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Ajuste e parametrização do modelo Wang-Engel para estimativa dos estádios fenológicos em genótipos de trigo.”**

Nome: **Edson Giovanni Kochinski**

Orientador: **Eduardo Augusto Agnellos Barbosa**

### **Aprovado pela Comissão Examinadora:**

Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa

Prof. Dr. Luis Miguel Schiebelbein

Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Ponta Grossa 24, de abril, de 2020



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Augusto Agnellos Barbosa, Professor(a)**, em 24/04/2020, às 19:05, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luiz Moretti de souza, Usuário Externo**, em 27/04/2020, às 08:03, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Luis Miguel Schiebelbein, Professor(a)**, em 27/04/2020, às 11:15, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

---



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **0205894** e o código CRC **F8A007D3**.

---

20.000015069-2

0205894v7

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela concretização de mais este objetivo, por me conceder saúde e sabedoria para seguir sempre em frente.

Aos meus pais, que auxiliaram na formação do meu caráter, me apontando a direção certa, meu eterno agradecimento pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus familiares e amigos, por apoiarem e compreenderem o meu isolamento em inúmeras tardes de domingo.

Ao meu orientador, professor Eduardo Augusto Agnellos Barbosa, que, com muita sabedoria, me conduziu até as últimas linhas. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável e por me guiar nos primeiros passos da pós-graduação. Ao meu coorientador, pesquisador Rodrigo Yoiti Tsukahara, pela oportunidade de realizar esta etapa e por ter contribuído para meus conhecimentos com os seus ensinamentos, fazendo-me chegar até onde cheguei.

À minha esposa Viviane, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em todos os momentos desta caminhada. Obrigado por estar ao meu lado. A minha filha Giovanna, meu bem maior, chegada recentemente em nossas vidas e com quem, em breve, desfrutarei cada momento junto com nossa família.

Agradeço à empresa da qual faço parte, Fundação ABC - Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, por ter me concedido a liberação para a concretização de mais uma etapa em minha carreira profissional. Em especial aos setores de Agrometeorologia e Fitopatologia que me ofereceram total apoio, sendo compreensíveis nos momentos em que necessitei me ausentar das atividades.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, pelos recursos físicos, educacionais e humanos.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

KOCHINSKI, Edson Giovanni. **Modificação e parametrização do modelo Wang-Engel para previsão dos estádios fenológicos em genótipos de trigo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2020.

## RESUMO

Simulações do desenvolvimento e crescimento do trigo são ferramentas importantes nas decisões de manejo, planejamento agrícola e intensificação dos sistemas de cultivo. A temperatura do ar e o fotoperíodo são elementos meteorológicos que exercem influência no crescimento e desenvolvimento do trigo, sendo fundamentais nas simulações de desenvolvimento das plantas. O objetivo do trabalho foi ajustar e parametrizar o modelo fenológico proposto por Wang e Engel (WE) para predição da fenologia do trigo. O modelo WE simula o desenvolvimento da planta considerando os efeitos não lineares da temperatura média diária do ar e o fotoperíodo, sendo o mesmo multiplicativo. As informações fitotécnicas e agrometeorológicas foram obtidas pelo setor de Agrometeorologia da Fundação ABC, nas safras de 2007 a 2017, para diferentes localidades do Estado do Paraná e uma em São Paulo, obtidas para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo. Os estádios fenológicos do trigo foram avaliados semanalmente de acordo com a escala de Zadoks, para a simulação da fenologia. A base de dados totalizou 1248 observações, sendo 904 (72,4%) utilizadas na calibração e 344 (27,6%) observações independentes para validar o modelo WE ajustado. As fenologias estimadas foram comparadas às observadas, por meio de análises de regressão linear simples, raiz do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c). O ajuste do modelo WE pelo acréscimo dos estádios fenológicos simulou com ótimo desempenho, obtendo índice “d” e “c” com valores superiores a 0,95. Os genótipos apresentam diferenças estatísticas significativas nos coeficientes do modelo, pelo teste t de Student’s  $p < 0,05$ . O REQM com o modelo WE ajustado foi de 4,48 dias para Quartzo, 3,67 dias para Supera e 3,64 dias para Sinuelo, considerando todos os estágios de desenvolvimento. O modelo fenológico calibrado e validado utilizando 152 ambientes cultivo, três genótipos e cinco locais, demonstra acurácia e precisão na predição dos estádios fenológicos do trigo para a região dos Campos Gerais e sul do estado de São Paulo. Constatou-se que o modelo tem potencial de uso em outros genótipos, como observado para o genótipo Toruk.

**Palavras-chave:** Modelagem de sistemas agrícolas; temperatura do ar; fotoperíodo; fenologia do trigo; *Triticum aestivum*

KOCHINSKI, E. G. **Modification and parameterization of the Wang-Engel model for forecasting phenological stages in wheat genotypes.** 2020. Dissertation (Master Science in Agronomy) – Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2020.

## ABSTRACT

Simulations of wheat development and growth are important tools in management decisions, agricultural planning and intensification of farming systems. The air temperature and the photoperiod are meteorological elements that influence the growth and development of wheat, being fundamental in the simulations of plant development. The objective of the work was to adjust and parameterize the phenological model proposed by Wang and Engel (WE) to predict wheat phenology. The WE model simulates the development of the plant considering the non-linear effects of the average daily air temperature and the photoperiod, being the same multiplicative. The phytotechnical and agrometeorological information was obtained by the Agrometeorology sector of the ABC Foundation, in the 2007 to 2017 harvests, for different locations in the state of Paraná and one in São Paulo, obtained for the genotypes Quartzo, Supera and Sinuelo. The phenological stages of wheat were evaluated weekly according to the Zadoks scale, for the simulation of phenology. The database totaled 1248 observations, 904 (72.4%) of which were used in the calibration and 344 (27.6%) independent observations to validate the adjusted WE model. The estimated phenologies were compared to those observed, through simple linear regression analysis, the root of the mean square error (RMSE), determination coefficient ( $R^2$ ), agreement index (d) and performance index (c). The adjustment of the WE model by the addition of the phenological stages simulated with excellent performance, obtaining index “d” and “c” with values greater than 0.95. The genotypes present statistically significant differences in the model's coefficients, using Student's t test  $p < 0.05$ . The RMSE with the adjusted WE model was 4.48 days for Quartzo, 3.67 days for Supera and 3.64 days for Sinuelo, considering all stages of development. The calibrated and validated phenological model using 152 cultivation environments, three genotypes and five locations, demonstrates accuracy and precision in the prediction of the phenological stages of wheat for the region of Campos Gerais and the south of the state of São Paulo. It was found that the model has potential for use in other genotypes, as observed for the Toruk genotype.

**Keywords:** Modeling of agricultural systems; air temperature; photoperiod; wheat phenology; *Triticum aestivum*



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Temperatura média do ar anual, entre os anos de 1970 e 2000, dados obtidos World Climate, região de atuação das cooperativas do grupo ABC. .... 30
- Figura 2 – Diagrama esquemático indicando as fases de desenvolvimento utilizadas no modelo de WE Streck e os estádios fenológicos adotados no modelo modificado, sendo, EM = emergência; EL = alongação; AN = antese; CO = colheita. Estádios fenológicos de: Emergência; Perfilhamento; Alongação; Emborrachamento; Espigamento; Antese; Enchimento Grãos; Maturação fisiológica; Colheita, adotados no WE modificado. .... 38
- Figura 3 – Temperatura Mínima do ar (TMIN °C), Temperatura Média do ar (TMED °C) e Temperatura Máxima do ar (TMAX °C) evapotranspiração de referência estimada com o método Penman-Monteith (ETP.PM em mm), precipitação pluvial (PREC em mm), observados nos municípios: Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi-PR e Itaberá-SP. Barras verticais representam intervalo de confiança (IC = 95%,  $\alpha = 0,05$ )..... 47
- Figura 4 – Boxplot das observações obtidas com a calibração dos coeficientes do modelo Wang Engel (WE), genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo. Fenologia: Emer. = Emergência; Perf. = Perfilhamento; Elong. = Alongação; Embor. = Emborrachamento; Espig. = Espigamento; Ench. G. = Enchimento Grãos; Matur. = Maturação fisiológica; Colh. = Colheita..... 57
- Figura 5 – Dia Juliano observado vs. estimado da emergência a colheita, para (a) resumo dos três genótipos, (b) Quartzo, (c) Supera e (d) Sinuelo. Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP..... 64
- Figura 6 – Dia Juliano observado vs. estimado para os três genótipos, (a) emergência (Zadoks 10), (b) perfilhamento (Zadoks 22), (c) alongação (Zadoks 31) e (d) emborrachamento completo (Zadoks 45).Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP..... 66
- Figura 7 – Dia Juliano observado vs. estimado para os três genótipos, (a) espigamento (Zadoks 54), (b) antese (Zadoks 64) e (c) início de enchimento de grãos (Zadoks 71). Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação;

REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP..... 68

Figura 8 – Dia Juliano observado vs. estimado para os três genótipos, (a) maturação fisiológica (Zadoks 87) e (b) colheita (Zadoks 90). Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP..... 69

Figura 9 – Média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo WE ajustado. Dia Juliano observado vs. estimado da emergência a colheita, para (a) resumo dos três genótipos, (b) Quartzo, (c) Supera e (d) Sinuelo, utilizando a. Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP..... 71

Figura 10 – Aplicação do modelo WE Streck. Dia Juliano observado vs. estimado da emergência, alongação, antese e maturação fisiológica, para (a) resumo dos três genótipos, (b) Quartzo, (c) Supera e (d) Sinuelo. Linha (--) linha 1:1, (x) dados estimados pela equação de regressão obtidos pela modificação do modelo WE proposto neste trabalho. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP..... 73

Figura 11 – Dia Juliano observado vs. estimado da emergência a colheita, (a) resumo do genótipo Toruk, utilizando a média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo (Tabela 5 e Tabela 6), (b) resumo do genótipo Toruk, com aplicação do modelo WE Streck. Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2015 e 2017, nos municípios de Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP. .... 76

Figura 12 – Comparação entre a fenologia estimada e observada para o genótipo Toruk, utilizando a média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes o modelo (Tabela 5 e Tabela 6). Emerg. = Emergência; Perf. = Perfilhamento; Elong. = Alongação; Embor. = Emborrachamento; Espig. = Espigamento;

Ench. G. = Enchimento Grãos; Matur. = Maturação fisiológica;  
Colh. = Colheita. Experimento conduzido no município  
de Ponta Grossa - PR, semeadura realizada em 22/07/2015, dia juliano 203. ....77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características edafoclimáticas das Estações Experimentais da Fundação ABC, localizadas nos municípios de Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR, Tibagi-PR e Itaberá-SP.....	31
Tabela 2 – Características agronômicas de qualidade Industrial referentes aos genótipos Quartzo, Supera, Sinuelo e Toruk. ....	32
Tabela 3 – Escala fenológica Zadoks com valores decimais e descrição dos estádios de crescimento avaliados no estudo.....	34
Tabela 4 – Temperaturas cardinais e Vernalização (mínima = $TC_{min}$ , ótima = $TC_{ot}$ e máxima = $TC_{max}$ ), parâmetros de entrada $R_{max}$ (taxa máxima de desenvolvimento da fase, $dia^{-1}$ ), $\omega$ (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo, $h^{-1}$ ) e $Pc$ (fotoperíodo crítico, h) para os genótipos de trigo nas fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET), espiguetas terminal a antese (ET-AN) e antese a Maturação fisiológica (AN-MF), utilizadas como parâmetros de entrada do modelo WE Streck.....	38
Tabela 5 – Valores dos parâmetros de cultivares utilizados na parametrização do modelo WE ajustado, para os genótipos avaliados Quartzo, Supera, Sinuelo e média dos genótipos. Temperaturas cardinais (mínima = $TC_{min}$ , ótima = $TC_{ot}$ e máxima = $TC_{max}$ ), $Pc$ (fotoperíodo crítico, h), $\omega$ (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo, $h^{-1}$ ) e $R_{max}$ (taxa máxima de desenvolvimento, $dia^{-1}$ ).....	51
Tabela 6 – Médias e intervalo de confiança (IC) dos coeficientes de Wang Engel ajustado (Coef. WE) obtidos nas diferentes fases fenológicas do genótipo Quartzo, Supera e Sinuelo. Comparação de Student's entre os genótipos: <sup>1</sup> Quartzo e Supera, <sup>2</sup> Supera e Sinuelo e <sup>3</sup> Sinuelo e Quartzo, usando teste t de Student's. <sup>4</sup> Média dos coeficientes dos três genótipos. ....	55
Tabela 7 – Valores dos parâmetros estatísticos avaliados na parametrização do modelo WE ajustado, para os estádios fenológicos: Emergência; Perfilhamento; Elongação; Emborrachamento; Espigamento; Antese; Enchimento Grãos; Maturação Fisiológica e Colheita, para os genótipos avaliados. ....	58
Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de validação entre os valores estimados e observados de fenologia, por meio coeficiente de determinação ( $R^2$ ), número de observações (n), raiz do erro quadrático médio (REQM) em dias, índice de concordância (d), desempenho do modelo (c), em cada fase fenológica, para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo. ....	62
Tabela 9 – Parâmetros estatísticos de validação entre os valores estimados e observados por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ); número de observações (n); raiz do erro quadrático médio (REQM); índice de concordância (d); desempenho do modelo (c); em cada fase fenológica do genótipo Toruk. ....	75

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>HIPÓTESE E OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1	HIPÓTESE .....	15
2.2	OBJETIVO GERAL.....	15
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1	A CULTURA DO TRIGO .....	16
3.2	FENOLOGIA DO TRIGO .....	18
3.3	CONDICIONANTES AGROMETEOROLÓGICAS CULTURA DO TRIGO .....	22
3.4	MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS DE DESENVOLVIMENTO EM PLANTAS .....	24
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
4.1	LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....	30
4.2	DETERMINAÇÃO DOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS .....	33
4.3	DADOS AGROMETEOROLÓGICOS .....	34
4.4	DESCRIÇÃO DO MODELO FENOLÓGICO DE WANG ENGEL (WE) .....	34
4.4.1	Modelo WE Streck .....	37
4.4.2	Modelo WE ajustado .....	38
4.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS.....	40
4.6	PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO .....	41
4.6.1	Parametrização do modelo WE ajustado .....	42
4.6.2	Calibração dos coeficientes modelo WE ajustado.....	43
4.6.3	Avaliação dos parâmetros e coeficientes modelo WE ajustado .....	43
4.7	VERIFICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO.....	43
4.8	APLICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO COM A MÉDIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA .....	44
4.9	APLICAÇÃO DO MODELO WE STRECK .....	44
4.10	VALIDAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO PARA O GENÓTIPO TORUK .....	45
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AMBIENTES DE PRODUÇÃO .....	46
5.2	PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO .....	51
5.2.1	Parametrização do modelo WE ajustado .....	51
5.2.2	Calibração dos coeficientes modelo WE ajustado.....	54
5.2.3	Avaliação dos parâmetros e coeficientes modelo WE ajustado .....	58

5.3	VERIFICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO.....	61
5.4	APLICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO COM A MÉDIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA.....	71
5.5	APLICAÇÃO DO MODELO WE STRECK.....	73
5.6	VALIDAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO PARA O GENÓTIPO TORUK.....	75
6	CONCLUSÃO.....	78
	REFERÊNCIAS .....	79
	<b>APÊNDICE A - ESCALA DECIMAL DE DESENVOLVIMENTO DOS CEREAIS SEGUNDO ZADOKS et al. (1974).</b> .....	90
	<b>APÊNDICE B – SÉRIE TEMPORAL DOS DADOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO</b> .....	94
	<b>APÊNDICE C – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO QUARTZO. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2007 A 2017, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI – PR, CASTRO – PR, PONTA GROSSA – PR, TIBAGI – PR E ITABERÁ – SP.</b> .....	99
	<b>APÊNDICE D – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO SUPERA. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2007 A 2017, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI – PR, CASTRO – PR, PONTA GROSSA – PR, TIBAGI – PR E ITABERÁ – SP</b> .....	102
	<b>APÊNDICE E – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO SINUELO. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2007 A 2017, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI – PR, CASTRO – PR, PONTA GROSSA – PR E ITABERÁ – SP.</b> .....	105
	<b>APÊNDICE F – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO TORUK. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2015 E 2017, NOS MUNICÍPIOS DE PONTA GROSSA – PR E ITABERÁ – SP, UTILIZANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E DOS COEFICIENTES O MODELO</b> .....	108

## 1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é amplamente cultivado em todo o mundo, sendo o terceiro cereal de maior importância econômica global (BOUAZZAMA et al., 2017). É o alimento básico mais importante para cerca de dois bilhões de pessoas (36% da população mundial), fornecendo cerca de 55% dos carboidratos e 20% das calorias dos alimentos consumidos globalmente (MANSOUR; ABU-NASER, 2019). No Paraná, é o cereal de inverno de maior importância econômica, atingindo cerca de 1.023,7 mil hectares de área plantada na safra 2019, com produção de 2.191,7 mil toneladas (CONAB, 2019).

A produção do trigo exige a interação entre os fatores associados ao genótipo, em resposta à variação dos processos ambientais decorrentes, dentre outros fatores, da data e local de semeadura. Em um contexto de variabilidade climática, as previsões de safra são úteis para simular o potencial de rendimento do trigo (CHENU et al., 2017).

No planejamento agrícola, o ajuste da fenologia do trigo por meio do uso de séries históricas de probabilidade de ocorrências de geadas, excesso e déficit hídrico, por exemplo, se torna fundamental para alcançar o rendimento potencial dos grãos, pois resulta na utilização ótima dos determinantes primários do crescimento (radiação solar e suprimento de água), minimizando os riscos climáticos em estádios sensíveis do desenvolvimento (FLOHR et al., 2017). A combinação entre o planejamento da data de semeadura e a escolha dos genótipos cultivados é importante para conseguir uma “janela” de floração ideal, equilibrando os riscos de geada (imediatamente antes e durante a floração), altas temperaturas, estresse hídrico na floração e excesso de chuva na colheita (HUNT et al., 2019).

Modelos são representações matemáticas de sistemas reais, assim como uma maneira eficiente de estudar sistemas biofísicos complexos (HOLZWORTH; HUTH; DEVOIL, 2011). A aplicação quantitativa do modelo baseado em culturas é denominada modelagem de simulação de culturas. A modelagem pode ser explicada como representações matemáticas ou estatísticas de qualquer meio biológico. A modelagem de culturas facilita o desenvolvimento de estratégias inovadoras de manejo de culturas e sustentabilidade agrícola, pois expressa a resposta das culturas a fatores meteorológicos, edáficos e biológicos (MARTÍN; OLESEN; PORTER, 2014). A modelagem das culturas auxilia na tomada de decisão, previsão do crescimento e desenvolvimento das plantas, minimizando as diferenças de produtividade, seleção de genótipos adequados e datas apropriadas de semeadura para a produção sustentável das culturas sob cenários climáticos variáveis.

A temperatura do ar e o fotoperíodo são os dois elementos meteorológicos que exercem maior influência no desenvolvimento de plantas de trigo (CASTRO; COSTA; FERRARI NETO, 2012). Todo processo biológico, incluindo as alterações morfofisiológicas das plantas, responde em função de três temperaturas cardinais: mínima, ótima e máxima (KARANDISH; MOUSAVI; TABARI, 2017).

O modelo WE (WANG; ENGEL, 1998) simula o desenvolvimento da planta considerando os efeitos não-lineares da temperatura do ar e fotoperíodo, sendo composto pelas funções temperatura, fotoperíodo e resposta de vernalização. Os genótipos de trigo cultivados na região dos Campos Gerais do Paraná e sul de São Paulo são classificados como trigo de primavera, em que a transição entre as fases vegetativa e reprodutiva não apresenta resposta (ou é pouco afetada) pela vernalização. Logo, não necessitam de um período de exposição a temperaturas do ar relativamente baixas (processo de vernalização) para florescer. Modelos de desenvolvimento multiplicativos parecem ser mais realistas sob o ponto de vista biológico, pois descrevem as interações existentes entre temperatura do ar, fotoperíodo e vernalização em ambientes controlados e a campo (GONZÁLEZ; SLAFER; MIRALLES, 2002).



## **2 HIPÓTESE E OBJETIVOS**

### **2.1 HIPÓTESE**

Os genótipos de trigo cultivados nas regiões dos Campos Gerais do Paraná e sul de São Paulo apresentam parâmetros e coeficientes específicos do modelo fenológico de Wang e Engel, para os estádios fenológicos de emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, antese, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita. O estabelecimento desses coeficientes permitirá estimativas de desenvolvimento do trigo com maior precisão e acurácia em cada uma dessas regiões.

### **2.2 OBJETIVO GERAL**

Modelar o desenvolvimento e a ocorrência dos distintos estádios fenológicos de genótipos de trigo, submetidos a diferentes épocas de semeadura, nos municípios de Arapoti, Castro, Ponta Grossa e Tibagi, localizados na região dos Campos Gerais do Paraná, e em Itaberá, situado no sul do estado de São Paulo.

### **2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Ajustar o modelo de desenvolvimento do trigo proposto por Wang e Engel (1998), por meio de acréscimo dos estádios fenológicos de emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, antese, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita e retirada da função de vernalização.

Parametrização e calibração dos coeficientes do modelo WE para os genótipos de trigo Quartzo, Supera e Sinuelo em quatro localidades da região dos Campos Gerais do Paraná, e uma no sul do Estado de São Paulo.

Avaliação do modelo WE modificado e WE Streck quanto à capacidade de simular os estádios fenológicos de diferentes genótipos de trigo.

Validação do modelo modificado em outro genótipo (Toruk), com aplicação dos valores médios dos parâmetros de entrada e coeficientes obtidos dos genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo, utilizados para obtenção dos parâmetros e coeficientes do WE modificado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A CULTURA DO TRIGO

O trigo pertencente à família *Gramineae* e ao gênero *Triticum*. É uma planta de ciclo anual, cujo cultivo ocorre durante o inverno e primavera (POUR-ABOUGHADAREH et al., 2018). A palavra trigo provém do vocábulo latino *triticum*, que significa quebrado, triturado, numa referência à atividade que se deve realizar para separar o grão de trigo da camada que o reveste (VERMA; PATHAK; VERMA, 2019). O termo trigo destina-se tanto à planta como às sementes comestíveis dela originada. As principais espécies cultivadas são *Triticum monococcum*, *Triticum durum* e *Triticum aestivum*. O trigo Comum (*Triticum aestivum*) é o mais cultivado, também conhecido como “trigo para pão” (LEÓN et al., 2007).

O grão de trigo é utilizado como alimento. Quando a qualidade do mesmo não é atingida para consumo humano, o trigo é utilizado como ração animal (CUNHA, 2009). Possui carboidratos, fibras e altos teores de glúten e proteína, sendo o endosperma responsável por mais de quatro quintos da produção mundial, adequado para a panificação. O glúten é uma proteína presente no grão. Quando encontrado em quantidades elevadas no trigo, o glúten apresenta características cruciais à panificação, pois oferece elasticidade e extensibilidade (SCHEUER et al., 2011). O grão de trigo é composto pela epiderme (10% da massa de grão) aleurona (6%) endosperma (81%) e gérmen (3%). A extração de farinha no processo de moagem é de aproximadamente 74%, considerando a farinha integral e branca (KEHL, 2013).

Além do cultivo principal para a alimentação humana, o trigo é importante fonte de alimentação animal, não só pela produção de grãos para ração, mas também para o fornecimento de forragem, na forma de feno, ensilagem ou naturalmente em pastejo (ZIMMERMANN et al., 2009). No Brasil, aproximadamente 94,5% do trigo produzido é destinado para o processamento industrial, 2,5% para reserva de semente e 3% é destinado a alimentação animal (DE MORI; IGNACZAK, 2011).

As primeiras lavouras de trigo surgiram no Oriente Próximo e no Oriente Médio, bem como foram disseminadas posteriormente em toda a Europa. O trigo tem se destacado por ser um dos principais cereais cultivados no mundo. É uma das culturas mais antigas cultivadas que se tem registro, foi essencial para o desenvolvimento da agricultura e da civilização atual. O centro de origem e a domesticação do trigo vai do Irã até a Turquia e ao sudoeste do Mar Mediterrâneo (VAVILOV, 1949).

O grão se espalhou pelo mundo 2000 a.C. e sua utilização era principalmente para a obtenção de farinha para pão, massa e pastéis. As sementes de trigo chegaram no Brasil em 1534 e foram cultivadas em São Vicente - SP, mas só obtiveram importância econômica no século XVII, quando foram semeadas em São Paulo e no Rio Grande do Sul (BORÉM; SCHEEREN, 2015).

No Brasil, a cultura do trigo apresenta crescimento em produtividade, área plantada e, conseqüentemente, na sua produção (KOLLING; TROGELLO; MODOLO, 2015). Entretanto, a produção nacional de trigo é insuficiente para atender toda a demanda nacional, devido ao uso de cultivares não recomendadas para regiões produtoras (BAUMGRATZ, 2017) e, em alguns casos, devido ao objetivo do plantio, que visa formar cobertura do solo para o sistema plantio direto. O Brasil possui grande dependência na importação do trigo, principalmente para utilização da farinha de alta qualidade. Com os planejamentos estratégicos, o país vem melhorando a situação para atender a demanda de consumo (BAUMGRATZ, 2017).

No Paraná, a semeadura do trigo é caracterizada pelo uso do plantio direto, sendo mecanizado e sem uso de irrigação. Os produtores que o cultivam são, em sua vasta maioria, altamente tecnificados. Esses produtores são atentos em relação à correção do solo, aquisição de sementes específicas para a região, uso de fertilizantes, além do combate a pragas e doenças – essas majoritariamente de origem fúngica. Ressalta-se que o cultivo do trigo normalmente é antecedido pela semeadura de soja na safra de verão (CONAB, 2017).

O plantio do trigo paranaense é fundamental para o sistema de produção, que exerce a rotação de culturas e a cobertura do solo durante o inverno, fatores primordiais no sistema plantio direto (BRUM; MÜLLER, 2008). Com o aumento da população nas próximas décadas e, conseqüentemente, com a maior demanda por alimentos, no que tange à cultura do trigo, deve-se destacar que se busca no Brasil um aumento da produtividade com qualidade para a indústria, especificamente os grãos destinados à panificação.

O incremento na produtividade e a qualidade do trigo é dependente dos fatores edafoclimáticos, manejo cultural e processos de pós colheita (NUTTALL et al., 2017). Para Costa et al. (2008) a qualidade do grão de trigo para os diversos fins é resultado da interação das condições de cultivo (interferência do solo, clima, pragas, manejo da cultura e do cultivar), bem como os processos de colheita e pós-colheita.

O rendimento e qualidade de grãos do trigo podem sofrer modificações conforme as condições meteorológicas reinantes, número de espigas por planta, número de grãos por espiga e por espiguetas, peso médio dos grãos, além de outros componentes de rendimento (PIRES et al., 2011). Os elementos do clima, como temperatura do ar acima de 30 °C, associado ao

excesso de precipitação ou déficit hídrico e ocorrência de geadas após o espigamento, são os principais riscos para a perda de rendimento (EMBRAPA, 2014).

De acordo com Cunha e Pires (2004), a diminuição na qualidade depende de muitos fatores, como a temperatura do ar, duração e intensidade das chuvas, taxa de secagem do grão e características morfofisiológicas do genótipo. Os autores destacam que os efeitos dos eventos meteorológicos na promoção dos danos mais intensos na qualidade dos grãos do trigo ocorrem no estágio de maturação da cultura, podendo também acarretar na germinação pré-colheita do grão de trigo.

### 3.2 FENOLOGIA DO TRIGO

A fenologia é um ramo da botânica que estuda as fases de crescimento e desenvolvimento das plantas (CÂMARA, 2006). Normalmente, as fases são divididas em três, sendo a vegetativa, reprodutiva e maturação, caracterizadas por alterações morfofisiológicas nas plantas. Estas são controladas pelas variáveis agrometeorológicas, como temperatura do ar, radiação solar, precipitação e fotoperíodo (HUNT et al., 2018). O conhecimento da fenologia de uma cultura e a possibilidade de previsão de ocorrência de determinado estágio de desenvolvimento é algo importante para o planejamento agrícola, bem como para a tomada de decisões e recomendações técnicas (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Crescimento e desenvolvimento das plantas são processos distintos, relacionados entre si, com ocorrência frequente e simultânea durante a maior parte do tempo de vida das plantas. O crescimento pode ser definido de diversas maneiras. Na definição clássica, consiste no aumento irreversível de qualquer dimensão física como comprimento, volume ou massa seca de alguma parte ou de toda planta, sendo um conceito que, em última análise, implica no aumento de tamanho da planta (REICHARDT; TIMM, 2004). O desenvolvimento, por sua vez, é um termo mais complexo, já que representa um conjunto de processos orgânicos e morfogênicos, pelos quais a planta passa durante todo seu ciclo, desde a diferenciação celular, dormência até sua senescência.

O desenvolvimento de uma planta pode ser quantificado pelo número de partes, ou seja, pelo número de folhas, número de nós, número de ramificações, surgimento de órgãos como flores, legumes e grãos (ZANON et al., 2018). Assim, o termo desenvolvimento é usado para descrever como a planta passa por alterações fisiológicas ao longo do seu ciclo de vida (REICHARDT; TIMM, 2004). Crescimento e desenvolvimento são processos motivados por

fatores genéticos, ambientais e de manejo, sendo a produtividade potencial da cultura resultado dessa interação.

A simulação precisa da fenologia é fundamental para criar um modelo de sucesso, pois a fenologia regula a partição de carbono, o desenvolvimento das folhas e, por fim, o rendimento (PAFF; ASSENG, 2018). Além disso, estuda os fenômenos biológicos como a brotação, floração e maturação que estão relacionadas às alterações sazonais e ao clima a que as plantas estão submetidas. Dessa forma, permite prever como será a resposta da cultura a um determinado microclima (CEGLAR et al., 2019).

Na cultura do trigo, mudanças na morfologia externa e interna das plantas ocorrem simultaneamente ao longo do processo de crescimento e desenvolvimento da cultura. Em termos gerais, da semeadura até a colheita, com base na mudança de funcionamento do meristema apical (ponto de crescimento), define-se o tipo de órgão que vai ser diferenciado.

Conhecer os estádios fenológicos permite que ocorra melhor adequação no tempo e espaço das práticas de manejo que contribuam positivamente com o rendimento e a qualidade dos grãos (RODRIGUES et al., 2011). A escala fenológica de Zadoks proporciona melhor detalhamento para cada estágio do trigo, sendo ela dividida em dez etapas, cada uma com dez sub-etapas. Devido ao seu detalhamento, a escala Zadoks é mais indicada quando se procura maior precisão dos estádios fenológicos (BECHE et al., 2018).

De acordo com Beche et al. (2018), Pires et al. (2011) e Rodrigues et al. (2011), o ciclo do trigo é dividido em três fases: vegetativa, reprodutiva e enchimento de grãos. Em cada uma delas, estádios específicos determinam acontecimentos importantes na formação do rendimento final da cultura, tanto sob o ponto de vista da quantidade produzida quanto das características de qualidade tecnológica (CUNHA, 2009). A fase vegetativa é definida como uma etapa em que, do ponto de vista de crescimento, são diferenciados primórdios foliares, determinados o número de plantas por m<sup>2</sup> e o número de folhas por planta. Inicia-se com a semeadura, uma vez que, tão logo ocorre a embebição da semente no embrião (que já conta com 3 a 4 folhas iniciadas), começa a diferenciação de novos primórdios foliares (entre 2 e 3, até a emergência), a par do crescimento dos órgãos responsáveis pela emergência das plântulas (epicótilo e coleótilo). O coleótilo cresce até alcançar a superfície do solo e perceber sinal de luminosidade, momento em que define o subperíodo semeadura-emergência. O nó de afilamento, situado entre o coleótilo e o epicótilo, forma-se abaixo da superfície do solo (CASTRO; KLUGE, 1999; SILVA, 2008).

O estágio de crescimento da plântula inicia-se com o surgimento da primeira folha, com o coleótilo, e finaliza com até nove ou mais folhas abertas, mas com a presença de uma

única planta. O afilhamento é iniciado do momento em que aparece um afilho no interior das bainhas foliares até o ponto em que ocorre o alongamento (pseudocolmo ereto) e a competição inibe a formação de novos afilhos posteriores (BORÉM; SCHEEREN, 2015; HUNT et al., 2018). No crescimento inicial, o perfilho é enclausurado na bainha da folha superior adjacente, inteiramente dependente da parte aérea, então existente, para seu suprimento de carboidratos e nutrientes. Os perfilhos se tornam independentes após desenvolverem três folhas maduras, quando as raízes nodais se formam na sua base e são favorecidos pela disponibilidade de radiação solar, nutrição adequada e temperaturas próximas a 25 °C (BACALTCHUK, 1999; CASTRO; KLUGE, 1999). Em resumo, a fase vegetativa, segundo a escala de Zadocks, corresponde aos estádios de germinação, crescimento da plântula e afilhamento.

O estágio de duplo anel caracteriza-se com final da fase vegetativa, dando início à fase reprodutiva. O estágio de duplo anel, para a maioria dos genótipos de trigo cultivados na região sul do Brasil, frequentemente coincide com um a três perfilhos da planta de trigo (RODRIGUES et al., 2011).

Ao final do estágio de afilhamento há o encerramento da fase vegetativa do trigo, com início da fase reprodutiva. Segundo a classificação de Zadocks et al. (1974), a fase reprodutiva é caracterizada pela ocorrência dos estádios fenológicos de alongamento do colmo, emborrachamento, emergência da inflorescência, antese e desenvolvimento do grão. Na fase reprodutiva, do duplo anel a antese, são determinados o número de espiguetas por espiga e o número de grãos por espiga (BECHE et al., 2018). A fase inicia-se com a diferenciação dos primórdios das espiguetas, na parte central, a espiga, e depois para as extremidades, terminando com o aparecimento da espiguetas terminal na ponta, chamado de estágio de duplo anel (BECHE et al., 2018; PIRES et al., 2011).

O crescimento dos entrenós da planta, no estágio do alongamento do colmo, promove aumento na estrutura da planta, cujas espigas ainda não são visíveis e a inflorescência encontra-se envolta na bainha da folha bandeira, caracterizando o estágio do emborrachamento. Após esse período, a planta começa o estágio do espigamento. No início, as primeiras espigas ficam recém-visíveis e, ao final, todas as espigas já se apresentam fora das bainhas (RODRIGUES et al., 2011).

A formação dos primórdios foliares e o crescimento da espiga ocorre com a alongação da planta. O processo ocorre até a floração (antese), quando o colmo termina o seu alongamento. Posteriormente, ocorre a fase de enchimento de grãos. Desta forma, é possível observar a expansão da área foliar nas fases vegetativa a reprodutiva (PIRES et al., 2011; RODRIGUES et al., 2011).

No trigo, o número de flor por espiguetas e o de espiguetas por espiga dependem de fatores nutricionais e ambientais, além de fatores inerentes ao genótipo (AUDE et al., 1994). A maior disponibilidade de fotoassimilados próximos à antese pode representar mais flores férteis, e conseqüentemente maior número e tamanho de grãos, com aprimorada capacidade de enchimento e produtividade mais significativa (CUNHA; BACALTCHUK, 2000). O trigo é altamente eficiente em remobilizar assimilados armazenados na pré-antese (STRECK; ROSA, 2009). A partir do momento que o óvulo é fecundado, ocorre intensa divisão celular. Somente após essa fase, iniciam-se a deposição de fotossintatos nas células do endosperma e o desenvolvimento das estruturas do embrião (AUDE et al., 1994).

A fase de enchimento de grãos ocorre até a maturação fisiológica e a senescência foliar é acelerada. O grão atinge o acúmulo máximo de matéria seca e inicia intensa multiplicação foliar para a formação do endosperma, para que em seguida ocorra o enchimento efetivo com as fases de grão leitoso, pastoso, duro e maduro (PIRES et al., 2011; SLAFER, 2012).

No estágio de enchimento dos grãos se inicia o processo de deposição de reservas. No início, os grãos possuem aspecto leitoso e ao final da maturação endurecem, possibilitando a colheita. Condições de elevadas temperaturas do ar, baixa disponibilidade hídrica, baixa umidade do solo, aliados há dias longos e ensolarados, reduzem o período entre a maturação fisiológica e a colheita (JUNGES et al., 2010; LARGE, 1954).

Os avanços tecnológicos em melhoramento genético, aplicados na produção de trigo no Brasil, têm ganhado destaque nos últimos anos, possibilitando o desenvolvimento de novas cultivares, com características para agroindústria, sanidade de plantas e desempenho agrônômico, favorecendo o cultivo e produção de trigo (BECHE et al., 2018; CAIERÃO et al., 2014).

A adaptabilidade e a estabilidade de genótipos de trigo auxiliam os melhoristas no momento da recomendação de novas variedades, sendo de suma importância, devido ao Brasil possuir inúmeras regiões com ampla diversidade de ambientes em que o cereal é cultivado (CAIERÃO et al., 2006). Desta forma, entender o comportamento fenológico de genótipos de trigo cultivados nas diferentes condições climáticas é fundamental para o sucesso da atividade nas principais regiões tritícolas do país.

### 3.3 CONDICIONANTES AGROMETEOROLÓGICAS CULTURA DO TRIGO

As condições agrometeorológicas reinantes no decorrer das fases de desenvolvimento de uma lavoura, como a cultura do trigo, influenciam diretamente seu desenvolvimento, rendimento e a qualidade dos produtos obtidos (PIRES et al., 2011). Ribas et al. (2018) destacam que o efeito da temperatura do ar sobre a produção depende do genótipo semeado e os resultados serão positivos ou negativos dependendo dos estádios fenológicos. Além de influenciar nos processos internos das plantas, as variáveis climáticas são responsáveis por controlar a ocorrência de fenômenos favoráveis ou prejudiciais ao desenvolvimento do trigo. Como a exemplo, a temperatura do ar controla a taxa de desenvolvimento vegetativo. Já a radiação solar é a fonte de energia primária para o processo fotossintético, influenciando na produção de fitomassa e fotoassimilados, responsáveis pelos demais processos internos das plantas (BERNARDES, 2013).

A celeridade dos processos metabólicos na cultura do trigo depende da temperatura do ar, que governa dentro de certos limites a duração das fases fenológicas. De acordo com Rodrigues (2001), a temperatura do ar atua na ativação do sistema enzimático que controla as alterações morfofisiológicas do trigo. Nesse contexto, a taxa de desenvolvimento é diretamente proporcional à temperatura do ar na faixa entre 2 °C e 26 °C. A relação entre temperatura média do ar e taxa de desenvolvimento permite quantificar a duração de determinadas fases em unidades de tempo térmico ou graus dias acumulados, independentemente da temperatura de crescimento (faixa de temperatura entre a basal e ótima). Para Bergamaschi e Matzenauer (2014), a temperatura do ar é um dos principais fatores determinantes da fenologia das plantas. Por isso, ela exerce papel fundamental na distribuição espaço-temporal das espécies. A interação das condições térmicas com a duração dos dias (fotoperíodo) também é considerada importante para inúmeras espécies cultivadas.

A germinação das sementes de trigo ocorre entre 4 e 37 °C, sendo a temperatura do ar ideal entre 20 e 25 °C, e umidade do solo na emergência próximo à capacidade de campo. O crescimento pode ser retardado em temperaturas abaixo de 15 °C e aceleradas acima de 20 °C e temperaturas maiores que 25 °C podem reduzir o número de grãos (CASTRO; KLUGE; SESTARI, 2008). O aumento significativo da temperatura do ar no período de antese do trigo reduz o número de grãos por espiga na maturidade e o rendimento dos grãos.

A taxa de desenvolvimento em todos os estádios fenológicos da cultura do trigo é diretamente relacionada a temperaturas elevadas e, dentro de certos limites, tendem a acelerar o desenvolvimento da planta (BECHE et al., 2018; FLOHR et al., 2017; WANG et al., 2013).



De acordo com Rodrigues et al. (2011), a temperatura do ar e o fotoperíodo são os principais componentes meteorológicos que afetam o desenvolvimento da cultura.

A temperatura do ar é influenciada pela altitude, com decréscimo com a elevação da altitude. Dependendo dos processos fisiológicos da cultura, o impacto será diferente (ALVES, 2019). Quanto maior a altitude, menor a temperatura, o que afeta significativamente os processos fisiológicos da cultura (FRITZSONS ET AL., 2008; WREGGE et al., 2018). Locais com menor temperatura do ar tendem a apresentar melhores condições ao desenvolvimento da triticultura.

A vernalização do trigo é função da temperatura do ar, que se caracteriza pelo processo de induzir o florescimento da planta por submissão das sementes ou plântulas a baixas temperaturas, não congelantes. Segundo Ribeiro et al. (2009), a temperatura do ar (efeitos vernalizantes principalmente) e o fotoperíodo são as principais variáveis meteorológicas que afetam o desenvolvimento do trigo. Porém, a ação das duas variáveis não é perceptível ao longo do ciclo da cultura, pois há subperíodos no qual o trigo é incapaz de perceber os sinais, a exemplo do enchimento de grãos. As fases sensíveis à vernalização são a vegetativa e alguns genótipos apresentam resposta no início da reprodutiva. Para a vernalização, observa-se também que alguns genótipos apresentam baixa sensibilidade ou são insensíveis. Após a floração, plantas de trigo não são responsivas à vernalização (ALBERTO, 2008).

A vernalização tem reflexos na indução da floração, sendo que seu efeito irá depender da combinação de fatores. Como a temperatura vernalizante, características intrínsecas do genótipo, fase fenológica e duração do período de vernalização. As plantas respondem à vernalização devido à diminuição do tempo para atingir o florescimento, reduzindo o número de primórdios foliares e número final de folhas (OLIBONI, 2018).

Os genótipos de “trigo de inverno” são fortemente responsivos (sensíveis) à vernalização, enquanto os genótipos que florescem sem vernalização são chamados de “tipos de primavera”. De Mori et al. (2016) constataram que os trigos sensíveis à vernalização (trigos de inverno) são aqueles que não possuem alelos dominantes da série de genes *Vrn-1* (*Vrn-A1*, *Vrn-B1* e *Vrn-D1*), necessitando de tempo de exposição a temperaturas relativamente baixas (processo de vernalização) para florescer, ainda que sob condição de dias longos. Nos trigos de primavera, a transição entre as fases vegetativa e reprodutiva não é acelerada (ou pouco afetada) pela vernalização. (DE MORI et al., 2016; NAZIM UD DOWLA et al., 2018; RODRIGUES et al., 2014; TREVASKIS et al., 2007).

No Brasil, há predominância do cultivo do “trigo de primavera”, espécie *Triticum aestivum* L., os quais não apresentam ou têm pouca resposta à vernalização (DE MORI et al.,

2016). Assim, acredita-se que a função de vernalização para as condições de cultivo e os genótipos de trigo utilizados em regiões tropicais ou subtropicais têm pouca ou nenhuma influência na previsão dos estádios fenológicos.

Com relação ao requerimento em horas-luz necessárias para induzir o início da fase reprodutiva (fotoperíodo) em trigo, a necessidade é quantitativa de dias longos, acelera o seu desenvolvimento com a elevação do fotoperíodo até o limite de 20 horas por dia (DE MORI et al., 2016; NAZIM UD DOWLA et al., 2018). Assim, se as necessidades térmicas tiverem sido atendidas, quanto mais rapidamente forem satisfeitas as eminências fotoperiódicas, menor será a duração do período vegetativo (CUNHA, 2009).

O efeito do fotoperíodo pode alterar a duração do subperíodo de alongação do colmo (GONZÁLEZ; SLAFER; MIRALLES, 2005). De acordo com Serrago et al. (2008), o impacto do fotoperíodo estendido durante a alongação do colmo pode alterar o número de flores férteis, devido aos fotoassimilados disponibilizados para o desenvolvimento das flores.

O fotoperíodo exerce influência no ciclo de muitas espécies, efeito denominado fotoperiodismo. Em cultivos agrícolas, o maior interesse do fotoperiodismo decorre, sobretudo, da indução ao florescimento, que interfere no crescimento das plantas e na duração do ciclo, para muitas espécies. Em diversas culturas (como a soja), o fotoperíodo pode ser fator determinante da distribuição regional de cultivares e do próprio calendário de cultivo (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Os genótipos de trigo respondem de modo diferente ao comprimento do dia (fotoperíodo). Da mesma forma, a diferença nas respostas ao fotoperíodo nas diversas fases de desenvolvimento da cultura (SLAFER et al., 2001; SLAFER; RAWSON, 1994). A duração da fase vegetativa e reprodutiva ocorre de acordo com a necessidade de vernalização, precocidade e sensibilidade ao fotoperíodo (HERNDL et al., 2008).

Para obter altos rendimentos em lavouras de trigo são necessários em torno de 445 mm a 660 mm de água, bem distribuídos ao longo do ciclo (PEREIRA, 2018). Invernos com temperaturas amenas, com suprimento de água suficientes e sem chuvas fortes são favoráveis ao desenvolvimento (CASTRO; KLUGE, 1999; MCMASTER et al., 2019; XIE et al., 2017). A quantidade de água disponível no solo para as plantas influencia a maioria dos processos físicos e fisiológicos no sistema solo-planta-atmosfera. Em condições de baixa disponibilidade de água no solo, ocorre diminuição do teor hídrico foliar, acarretando em déficit hídrico que limita a assimilação de CO<sub>2</sub> nas folhas e, conseqüentemente, inibição da fotossíntese e crescimento da planta (OSAKABE et al., 2014). Dessa forma, conhecer a ocorrência dos veranicos associada às fases fenológicas do trigo é fundamental para o bom planejamento

agrícola. Os valores do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico para cada fase de desenvolvimento da cultura do trigo (ky), referentes à fase vegetativa, reprodutiva e maturação fisiológica são de 0,2, 0,6 e 0,0, respectivamente (STEDUTO et al., 2012).

O cultivo de trigo na região sul do Brasil enfrenta problemas climáticos como: alta umidade relativa do ar durante os meses de setembro a outubro em que ocorre a maturação e colheita, além da ocorrência de geadas no momento do espigamento e déficit hídrico no florescimento (CUNHA, 2009). Pinto et al. (2019) constataram que os déficits hídricos mais severos para a cultura do trigo semeada no início de junho em Ponta Grossa-PR ocorre entre o 8° e 10° decêndio após a semeadura, ou seja, quando a planta encontra-se na fase reprodutiva. Quando a precipitação é maior que a evapotranspiração, o solo fica úmido devido ao elevado teor de água, reduzindo aeração e diminuindo o teor de proteína e rendimento do trigo (TUZZIN DE MORAES; DEBIASI; FRANCHINI, 2018).

A simulação do desenvolvimento fenológico são importantes ferramentas para avaliar o impacto das condições ambientais no crescimento e desenvolvimento do trigo. Condições meteorológicas desfavoráveis, como estresse por calor e seca durante o período de floração e enchimento de grãos, podem reduzir substancialmente o potencial de produção. As altas temperaturas do ar também afetam os rendimentos finais de maneira diferente durante os estádios fenológicos, reduzindo o período de enchimento dos grãos, afetando a taxa fotossintética, minimizando a eficiência do uso da água, favorecendo pragas e doenças e, eventualmente, danificando as células vegetais (LOBELL; GOURDJI, 2012).

### 3.4 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS DE DESENVOLVIMENTO EM PLANTAS

As adversidades climáticas são responsáveis por causar impactos e prejuízos econômicos. A relação entre o clima e a produtividade explica influências do clima e fornece planejamento agrícola. Existem relações entre o clima e a produção, pois o desenvolvimento da cultura é afetado por inúmeros fatores ambientais (GOMES et al., 2013).

Dessa forma, modelos agrometeorológicos vêm sendo desenvolvidos para expressar os efeitos das variações climáticas sob o desenvolvimento e crescimento das culturas. Para Bernardes (2013), os modelos buscam integrar matematicamente os fatores ambientais e biológicos para explicar a produtividade.

Modelos matemáticos de planta-clima têm objetivos de explicar os processos físicos e fisiológicos de acordo com uma ou mais variáveis meteorológicas no crescimento, desenvolvimento e até no rendimento da cultura. Os modelos estatísticos empíricos são

construídos com dados de rendimento e meteorológicos de determinada região, relacionando amostras de produtividade e variáveis de uma área em análise de regressão. O potencial dos modelos propostos depende da representatividade dos dados de entrada e da seleção das variáveis e concepção do modelo (SIEBER et al., 2017).

Para avaliar a influência de variáveis no desenvolvimento e produtividade do trigo, podem ser aplicados modelos matemáticos mais simples até os mais complexos, em que os diferentes parâmetros são considerados. De acordo com Cruz et al. (2011), os modelos são classificados em modelos de simulação de crescimento, modelos de análise entre a relação planta-clima e modelos estatísticos empíricos. Nos modelos de simulação de crescimento, é considerado o impacto das variáveis meteorológicas sobre os processos da cultura, como a fotossíntese, respiração ou transpiração.

Para Chenu et al. (2017), os modelos de desenvolvimento de trigo permitem que produtores, pesquisadores e assistência técnica avaliem potenciais ganhos e riscos de novas técnicas agronômicas, prevejam o resultado da expansão de culturas em novas áreas, investiguem a adaptação de novas cultivares e respondam aos desafios relacionados à produtividade do cereal, qualidade dos alimentos e sustentabilidade.

Os modelos matemáticos são utilizados para simplificar a realidade, pois apresentam resultados de interações existentes. Um exemplo de modelo linear é um método da soma térmica, que leva em consideração somente o efeito da temperatura do ar. Um modelo é classificado como não linear se pelo menos uma das derivadas parciais da função não linear em relação aos parâmetros depende de pelo menos um dos parâmetros do modelo (ZAREEF et al., 2020). O modelo não-linear descreve o efeito do desenvolvimento vegetal em relação à temperatura do ar e fotoperíodo, descrita pela função beta, responsável por apresentar os fatores abióticos sobre o desenvolvimento vegetal (STRECK, 2003a; STRECK et al., 2003b), sendo o modelo desenvolvido por Wang e Engel (1998) um exemplo.

Os modelos permitem descrever as interações entre planta-ambiente e são ferramentas úteis para diversas finalidades, como época de plantio, aplicação de fertilizantes, defensivos e hormônios, dentre outras práticas de manejo. Os modelos também são úteis para avaliar as respostas de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos em relação ao clima, pois podem quantificar as mudanças no ciclo do trigo em inúmeros cenários climáticos (NEREU AUGUSTO STRECK, 2002; WALTER; ROSA; STRECK, 2010). Os modelos estão relacionados ao crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, sendo possível monitorar e prever as safras, além de identificar o ciclo da cultura e os impactos gerados

(DOORENBOS; KASSAM, 1979; RUDORFF; BATISTA, 1990). Nesse sentido, os modelos são desenvolvidos para serem aplicados na relação planta-clima.

Os modelos matemáticos que levam em consideração a relação planta-clima procuram explicar os processos biofísicos e o efeito das variáveis meteorológicas sobre a resposta das plantas. Utilizam dados de conteúdo de água no solo ou evapotranspiração, radiação solar, temperatura do ar, fotoperíodo, dentre outros elementos do clima. Relaciona-as com informações de desenvolvimento morfológico, crescimento vegetativo e reprodutivo ou rendimento das culturas (SIEBER et al., 2017). Monteith (1996) define modelos de simulação como um conjunto de equações relacionadas à processos biofísicos para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura utilizando de coeficientes genéticos e variáveis ambientais.

As mudanças nos estádios fenológicos do trigo estão intimamente relacionadas às condições agrometeorológicas, condicionando o crescimento das culturas, produção de massa seca e grãos. Grande parte dos modelos fenológicos apresenta diferenças na definição de fases, número de fases, temperatura cardinal e função de resposta de temperatura, função de resposta do fotoperíodo e metodologia usada para definir a duração da fase (WU et al., 2017). Os módulos de fenologia têm sido amplamente incorporados em modelos de produtividade de ecossistemas e modelos de processos de superfícies terrestres.

As relações entre produção agrícola e fatores meteorológicos, muitas vezes, são complexos, devido ao crescimento e o desenvolvimento fenológico da cultura, podendo ser afetados pelo ambiente (MORAES et al., 1998).

Doorenbos; Kassam (1979) desenvolveram um modelo para estimar a produtividade de culturas agrícolas que se baseia na produtividade máxima, em função da disponibilidade de água no solo dada pela evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima. Assim, a produtividade real pode ser obtida penalizando-se a produtividade potencial em função do déficit de água.

Na literatura, são encontrados diversos modelos agrometeorológicos para simulação da fenologia do trigo, com destaque para os modelos de Wang Engel, Cropsim-Wheat, Wofost, Ceres-Wheat, APSIM-Wheat, SPASS e WheatSM. Wu et al. (2017) estudando os últimos cinco modelos supracitados, em diferentes datas de semeadura, genótipos de trigo e localidade no norte da China, concluíram que os todos poderiam reproduzir diferentes fases de crescimento com diversas datas de semeadura em diferentes genótipos. Quanto ao desempenho dos modelos, o mesmo foi insatisfatório, especialmente em datas de semeadura tardia. Os cinco modelos

produziram melhores previsões em condições de crescimento, quando a temperatura foi mais elevada em relação às condições mais frias.

O modelo de Wang e Engel (WE) é multiplicativo e emprega função de resposta não-linear (WANG; ENGEL, 1998). Simulações têm apresentado boa predição da fenologia do trigo em diferentes situações e regiões de cultivo, uma vez que consideram as temperaturas cardinais no desenvolvimento da cultura (STRECK et al., 2003b), resultando em bom desempenho quando relacionado ao crescimento de culturas agrícolas como o trigo (XUE; WEISS; BAENZIGER, 2004b).

O modelo fenológico WE (WANG; ENGEL, 1998) simula o desenvolvimento da planta considerando os efeitos não lineares da temperatura. A função de temperatura  $[f(T)]$  no modelo WE varia de 0 a 1, sendo descrito pela função beta de temperatura. A função beta de temperatura tem três coeficientes de significado biológico, sendo as temperaturas cardinais mínima ( $TC_{min}$ , °C), ótima ( $TC_{ot}$ , °C) e máxima ( $TC_{max}$ , °C) para o desenvolvimento da planta. Não há desenvolvimento quando a temperatura está abaixo da  $TC_{min}$  ou acima da  $TC_{max}$ , e o desenvolvimento é máximo quando a temperatura é igual a  $TC_{ot}$ . O modelo WE, é multiplicativo e utiliza fatores genéticos (coeficiente do modelo) e ambientais (WANG; ENGEL, 1998).

O modelo de WE tem sido utilizado para simular o desenvolvimento de muitas culturas (trigo, milho e aveia), por propor uma relação não linear entre a temperatura e o desenvolvimento vegetal (STRECK et al., 2008), pois associa de forma multiplicativa respostas à temperatura com a taxa de aparecimento de folhas e a temperatura do ar é dada por uma função beta (MARTINS; STRECK, 2007; STRECK et al., 2008; WANG; ENGEL, 1998; XUE; WEISS; BAENZIGER, 2004b).

O modelo não-linear ou multiplicativo é considerado mais realístico quando comparado aos lineares. Diversos estudos estão sendo realizados em culturas anuais (EVERS et al., 2007; STRECK; ROSA, 2009; STRECK et al., 2008) e perenes (MARTINS; STRECK, 2007) para simular o desenvolvimento de plantas. Os experimentos realizados compararam o melhor modelo para simular o desenvolvimento das culturas anuais e perenes.

O desenvolvimento de modelos agrometeorológicos e sua utilização na tomada de decisão, em substituição à intuição e/ou experiência prática, fornece a possibilidade de realização de cenários e operações na antecedência necessária. Trazem o diferencial competitivo e melhoria no planejamento agrícola, além da implementação em sistemas de monitoramento e previsão de doenças, pragas, zoneamento agrícola e intensificação no uso do solo.

Streck et al. (2003b) propuseram uma modificação no modelo original WE, dividindo a fase vegetativa entre emergência à antese (EM-AN) em duas sub-fases, emergência à espiguetta terminal (EM-ET) e da espiguetta terminal à antese (ET-AN), diferenciando as temperaturas cardinais para cada subfase. As modificações apresentaram melhoria significativa na simulação dos estágios de desenvolvimento, quando comparado ao modelo WE original (ALBERTO et al., 2009).

A capacidade de prever o desenvolvimento das plantas é crucial para o uso bem-sucedido da simulação de culturas nos estudos de adaptabilidade e estabilidade genética das plantas cultivadas. A simulação do desenvolvimento das plantas é uma parte importante de muitos modelos de simulação de culturas e uma ferramenta para o manejo das mesmas (STRECK et al., 2007). Estudos indicam que assumir que o acúmulo de tempo térmico como uma constante não é razoável, pois esse é o principal motivo da subestimação da fenologia em simulações de plantas com ciclo longo em dias (ZHANG; ZHU; YANG, 2008). A fenologia das culturas tem o papel principal no desenvolvimento e, conseqüentemente, no rendimento das plantas. A abordagem do uso de graus dias assume uma relação linear entre temperatura e desenvolvimento, que não é completamente realista do ponto de vista biológico. A abordagem multiplicativa usada no método Wang-Engel é mais biologicamente realista, representando as interações entre o desenvolvimento da planta e outros fatores ambientais (STRECK et al., 2007).

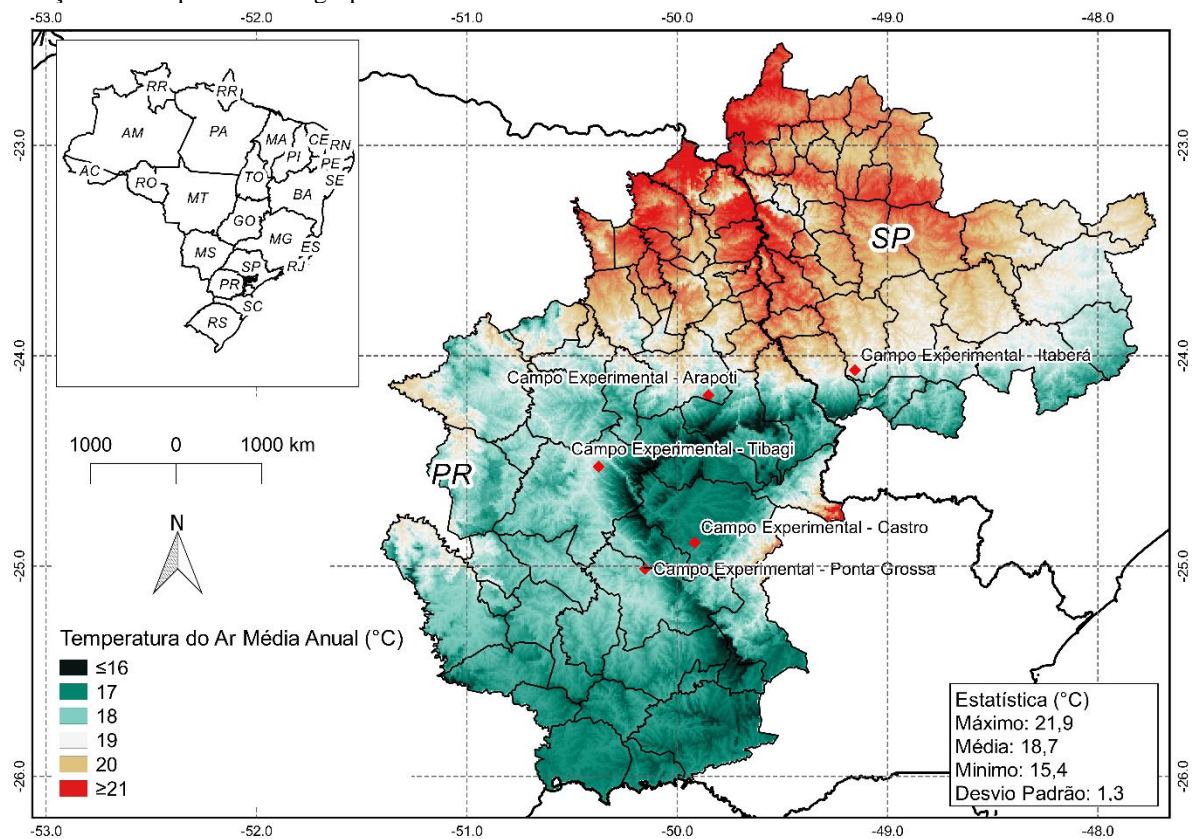
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a predição da fenologia de genótipos de trigo foram utilizados experimentos e avaliações de campo observadas pelo setor de Agrometeorologia da Fundação ABC, nas safras de 2007 a 2017, para diferentes localidades do Estado do Paraná e uma em São Paulo. Foi adotada uma abordagem empírica no desenvolvimento do modelo fenológico do trigo, uma vez que não foram coletados dados sobre os diversos processos fisiológicos envolvidos na mudança das diferentes fases fenológicas que permitam abordagem mecanística.

### 4.1 LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram conduzidos nos campos experimentais da Fundação ABC, localizados nos municípios de Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR, Tibagi-PR e Itaberá-SP (Figura 1), durante as safras de inverno de 2007 a 2017, utilizando os genótipos Quartzo, Supera, Sinuelo e Toruk, (Tabela 1).

Figura 1 – Temperatura média do ar anual, entre os anos de 1970 e 2000, dados obtidos World Climate, região de atuação das cooperativas do grupo ABC.



Fonte: World Climate.

Nota: coletado pelo autor (2020)



Tabela 1 – Características edafoclimáticas das Estações Experimentais da Fundação ABC, localizadas nos municípios de Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR, Tibagi-PR e Itaberá-SP.

Local	Localização	Altitude	Tipo de Solo	Classe textural	Classificação Climática <sup>(1)</sup>	Temperatura média do ar anual (°C)	Precipitação média anual (mm)	Safras
Arapoti - PR	24°11'41"S, 49°52'34"W	887 m	Latossolo Vermelho Distrófico típico	Franco Argilo- arenosa	Cfa/Cfb <sup>(2)</sup>	18,81	1624,27	2009, 2010 e 2012
Castro - PR	24°51'49"S, 49°56'08"W	1.109 m	Latossolo Vermelho distrófico típico	Argilosa	Cfb	17,22	1566,00	2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014
Ponta Grossa - PR	25°00'48"S, 50°09'07"W	880 m	Latossolo Vermelho Distrófico típico	Argilosa a Franco Argilo- arenosa	Cfb	18,31	1474,62	2008, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017
Tibagi - PR	24°31'31"S, 50°22'02"W	802 m	Latossolo Vermelho distrófico típico	Argilosa	Cfb	18,76	1609,2	2013
Itaberá - SP	24°04'S, 49°09'W	735 m	Latossolo Vermelho- Escuro	Argilosa	Cfa	19,49	1438,36	2010, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017

<sup>(1)</sup> Classificação Climática de Köppen-Geiger; <sup>(2)</sup> Local de transição climática.

Fonte: O autor.

Os experimentos de campo foram conduzidos em sistema de semeadura direta, com rotação de culturas, abordou-se para todos os experimentos: espaçamento entre linhas de 0,17 m, população inicial de 300 plantas m<sup>2</sup> e unidade experimental de 14,45 m<sup>2</sup> (17 linhas de 5 m), critérios obedecidos em todos os ensaios. As sementes foram tratadas com fungicidas e inseticidas no dia da semeadura, seguindo as recomendações técnicas. A adubação de base e cobertura variaram de acordo com os resultados da análise de solo e a expectativa de rendimento de grãos. Os demais tratamentos culturais (controle de plantas daninhas, doenças, insetos e pragas) foram realizados conforme recomendações técnicas, de forma a evitar o estresse por esses fatores bióticos.

Em cada combinação de safra e época foram semeados 3 genótipos de trigo (Quartzo, Supera e Sinuelo), escolhidos em função da sua representatividade regional e das características relativas a qualidade industrial, processos agrônômicos e produtividade (Tabela 2).

Tabela 2 – Características agrônômicas de qualidade Industrial referentes aos genótipos Quartzo, Supera, Sinuelo e Toruk

(continua)

<b>Genótipos</b>	<b>Quartzo</b>	<b>Supera</b>	<b>Sinuelo</b>	<b>Toruk</b>
<b><u>Qualidade Industrial</u></b>				
Classificação	Trigo Pão	Trigo Pão de Farinha Branqueadora	Trigo Pão	Trigo Pão
Força de Glúten (W médio)	245	-	269	320
Estabilidade (minutos)	7 - 30	Varia de 10 a 30	16,7	29
Dureza do Grão	Duro	Duro	Duro	Duro
Peso de Mil Sementes (g)	35	34	36	33
Germinação na Espiga	MR/R	MR	R/MR	R/MR

Tabela 2 – Características agronômicas de qualidade Industrial referentes aos genótipos Quartzo, Supera, Sinuelo e Toruk

(conclusão)

Genótipos	Quartzo	Supera	Sinuelo	Toruk
<b><u>Características Agronômicas</u></b>				
Ciclo	Médio	Precoce	Médio-Tardio	Médio
Altura média da planta	Médio/Alto	Média	Média/Baixa	Baixa
Comp. a geada na fase vegetativa	MR	S/I	MR	MR/MS
Comportamento ao acamamento	MR	MR	R/MR	MR
Comportamento a debulha	MR	MR	MR	MR
Crestamento	MR	MR	MR	MR

R = Resistente; MR = moderadamente resistente; SI = Sem Informação. Informações: detentores dos genótipos.  
Fonte: O autor.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS

Os estádios fenológicos do trigo foram avaliados semanalmente conforme a escala de Zadoks, Chang e Konzak (1974) apresentada na Tabela 3. Considerou-se a obtenção dos estádios de perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento e enchimento de grãos quando 50% das plantas de cada parcela estavam no respectivo estágio fenológico. Desta forma, a data de emergência foi considerada quando 50% das plântulas de cada parcela experimental estavam visíveis acima do solo.

A data de ocorrência da antese foi considerada quando, pelo menos, 50% das plantas de cada parcela apresentavam metade da espiga com anteras retidas (ZIMMERMANN et al., 2009). O estágio de maturidade fisiológica, na escala de Zadoks, Chang e Konzak, (1974) refere-se ao estágio 87 (PASK et al., 2012), descrito como grão em estado massa dura, com umidade entre 35 % e 30%, caracterizado pela facilidade de ser dividido ao meio com a unha, pelo amarelecimento de 50% dos pedúnculos e perda de coloração das glumas. A colheita foi realizada quando a umidade do grão de trigo apresenta valores inferiores a 25%.

Tabela 3 – Escala fenológica Zadoks com valores decimais e descrição dos estádios de crescimento avaliados no estudo.

<b>Decimal</b>	<b>Descrição</b>
0	Semeadura
10	Emergência
22	Perfilhamento
31	Elongação, primeiro nó visível
45	Emborrachamento completo
54	Espigamento
64	Metade da antese completa
71	Cariopse aquosa
87	Maturação fisiológica
90	Colheita

Fonte: Adaptado de Zadoks; Chang; Konzak, (1974).

Nota: Elaborado pelo autor (2020)

#### 4.3 DADOS AGROMETEOROLÓGICOS

Para a obtenção dos elementos agrometeorológicos, foram instalados sensores em cada local de estudo: temperatura e umidade relativa do ar, modelo HygroClipS3 (Rotronic AG, Bassersdorf, Zurique, Suíça); radiação solar global, modelo LI-200X (Li-Cor, Lincoln, NE, EUA); velocidade e direção do vento a 2,0 m de altura, modelo 3002 (Young, Traverse, MI, EUA) e pluviômetro de báscula, com resolução de 0,245 mm, modelo ECRN-100 (Decagon, Hopkins, MN, EUA). Os sensores foram acoplados a uma plataforma de coleta de dados, com leitura a intervalos de 60 segundos e aquisição de dados médios, máximos, mínimos e totais, em intervalos de 15 minutos. Os registros agrometeorológicos foram sumarizados em escala diária e decendial no período de estudo.

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO MODELO FENOLÓGICO DE WANG ENGEL (WE)

O modelo fenológico WE (WANG; ENGEL, 1998) simula o desenvolvimento da planta, considerando os efeitos não-lineares da temperatura média diária do ar e fotoperíodo local, sendo o mesmo multiplicativo. A função temperatura  $[f(T)]$  no modelo WE é descrito pela função beta (Equação 4).

O uso do modelo WE inicia-se com o cálculo da taxa diária de desenvolvimento da planta ( $r$ ). O estágio de desenvolvimento (ED) calculado acumulando os valores da taxa de desenvolvimento diário (equação 1). No modelo original WE a emergência de plantas possui valor de desenvolvimento = 0,0, antese com valor = 1,0 e maturação fisiológica = 2,0.

$$ED = \sum_{i=1}^n r_i \quad (1)$$

Sendo: ED é o estágio de desenvolvimento,  $r$  é a taxa diária de desenvolvimento da planta.

A forma geral do modelo WE para a fase vegetativa (emergência – antese) é:

$$r = R_{max,v} f(T) f(P) f(V) \quad (2)$$

Para a fase reprodutiva (antese – maturação):

$$r = R_{max,r} f(T) \quad (3)$$

Sendo:  $r$  é a taxa diária de desenvolvimento (por dia),  $R_{max,v}$  e  $R_{max,r}$  é a taxa de desenvolvimento máximo (por dia) durante as fases vegetativas e reprodutivas, e  $f(T)$ ,  $f(P)$  e  $f(V)$  são funções de temperatura, fotoperíodo e resposta de vernalização, variando de 0 e 1.

A função de temperatura do ar [ $f(T)$ ] foi calculada utilizando a função beta (WANG; ENGEL, 1998):

$$\left\{ \begin{array}{ll} f(T) = 0, & T < TC_{min} \\ f(T) = \frac{2(T-TC_{min})^\alpha (TC_{ot} - TC_{min})^\alpha - (T-TC_{min})^{2\alpha}}{(TC_{ot} - TC_{min})^{2\alpha}}, & TC_{min} \leq T \leq TC_{max} \\ f(T) = 0, & T > TC_{max} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln \left[ \frac{TC_{max} - TC_{min}}{TC_{ot} - TC_{min}} \right]} \quad (5)$$

Sendo:  $TC_{min}$ ,  $TC_{ot}$  e  $TC_{max}$  são as temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) para o desenvolvimento, e  $T$  a temperatura do ar, registrada pelas estações agrometeorológicas.

A função de fotoperíodo,  $f(P)$  (WANG; ENGEL, 1998) é calculada por:

$$f(P) = 1 - \exp[-\omega(P - P_c)] \quad (6)$$

Sendo  $P$  é o fotoperíodo atual (h),  $P_c$  é o fotoperíodo crítico (h) abaixo do qual o desenvolvimento não ocorre, e  $\omega$  é o coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo ( $h^{-1}$ ).

O fotoperíodo ( $P$ ) foi calculado pela seguinte expressão:

$$P = \frac{2}{15} \arccos(-tg\varphi * tg\delta) \quad (7)$$

Sendo:  $P$  é fotoperíodo,  $\varphi$  latitude local,  $\delta$  declinação da terra, calculado pela equação 7.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left( \frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (8)$$

Onde,  $n$  dia do ano, em dias Julianos.

A função de vernalização  $f(V)$  é uma função de resposta não linear, que para trigos de inverno foi proposta por Streck et al. (2003a) como:

$$f(v) = \frac{(VD)^n}{(X_{0,5})^n + (VD)^n} \quad (9)$$

Sendo:  $VD$  são os dias efetivos de vernalização e os coeficientes  $X_{0,5}$  e  $n$  são dependentes do genótipo, assumidos como 46,0 (ALBERTO, 2008).

O número de dias efetivos de vernalização ( $VD$ ) é calculado pelo acúmulo da taxa diária de vernalização:

$$VD = \sum f(vn) \quad (10)$$

Sendo:  $f(vn)$  a taxa diária de vernalização, calculada pela função beta (STRECK et al.,2003a):

A função de vernalização  $f(vn)$  é calculada pela equação 11.

$$\left\{ \begin{array}{ll} f(vn) = 0, & T < TC_{min} \\ f(vn) = \frac{2(T-TC_{min})^\alpha (TC_{ot} - TC_{min})^\alpha - (T-TC_{min})^{2\alpha}}{(TC_{ot} - TC_{min})^{2\alpha}}, & TC_{min} \leq T \leq TC_{max} \\ f(vn) = 0, & T > TC_{max} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln \left[ \frac{TC_{max} - TC_{min}}{TC_{ot} - TC_{min}} \right]} \quad (12)$$

Sendo:  $f(vn)$  é a taxa diária de vernalização,  $TC_{min}$ ,  $TC_{ot}$  e  $TC_{max}$  são as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de vernalização assumidos como - 1,3 °C; 4,9 °C e 15,7 °C, respectivamente (PORTER; GAWITH, 1999; STRECK et al., 2003b), e  $T$  a temperatura do ar, registrada pelas estações agrometeorológicas.

#### 4.4.1 Modelo WE Streck

Neste trabalho, a modificação do modelo WE realizada por Streck et al. (2003b) será denominado WE Streck, sendo a fase vegetativa dividida (emergência a antese) nas subfases “emergência a espiguetas terminal” e “espiguetas terminal a antese”. A forma geral do modelo WE Streck para a fase vegetativa é:

$$r = R_{max,v1} f(T) f(P) f(V) \quad (13)$$

$$r = R_{max,v2} f(T) f(P) \quad (14)$$

Sendo:  $r$  é a taxa diária de desenvolvimento,  $R_{max,v1}$  e  $R_{max,v2}$  é a taxa de desenvolvimento máximo (por dia) nas sub-fases emergência-espiguetas terminal e espiguetas terminal-antese na fase vegetativa, respectivamente.

A forma geral do modelo WE durante a fase reprodutiva (Equação 3) não foi modificada. Para a simulação do desenvolvimento do trigo utilizando o modelo WE Streck,

utilizou-se os parâmetros de entrada (Tabela 4), e coeficientes do modelo sendo: 0,0 para a fase de emergência; 0,4 espiguetas terminal; 1,0 para antese e 2,0 para maturidade fisiológica.

Tabela 4 – Temperaturas cardinais e de Vernalização (mínima =  $TC_{min}$ , ótima =  $TC_{ot}$  e máxima =  $TC_{max}$ ), parâmetros de entrada  $R_{max}$  (taxa máxima de desenvolvimento da fase,  $dia^{-1}$ ),  $\omega$  (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo,  $h^{-1}$ ) e  $Pc$  (fotoperíodo crítico, h) para os genótipos de trigo nas fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET), espiguetas terminal a antese (ET-AN) e antese a Maturação fisiológica (AN-MF), utilizadas como parâmetros de entrada do modelo WE Streck.

Temperatura Cardinais			Temperatura Cardinais Vernalização			Coeficientes		
$TC_{min}$ (°C)	$TC_{ot}$ (°C)	$TC_{max}$ (°C)	$TC_{min}$ (°C)	$TC_{ot}$ (°C)	$TC_{max}$ (°C)	$R_{max}$ ( $dia^{-1}$ )	$\omega$ ( $h^{-1}$ )	$Pc$ (h)
<b>Sub-fase EM-ET</b>								
0,0	19,0	30,0	-1,3	4,9	15,7	0,0220	0,2500	8,3
<b>Sub-fase ET-AN</b>								
4,0	24,0	35,0	-	-	-	0,0322	0,2500	8,3
<b>Fase AN-MF</b>								
8,0	24,0	35,0	-	-	-	0,03810	-	-

Fonte: Streck et al. (2003b).

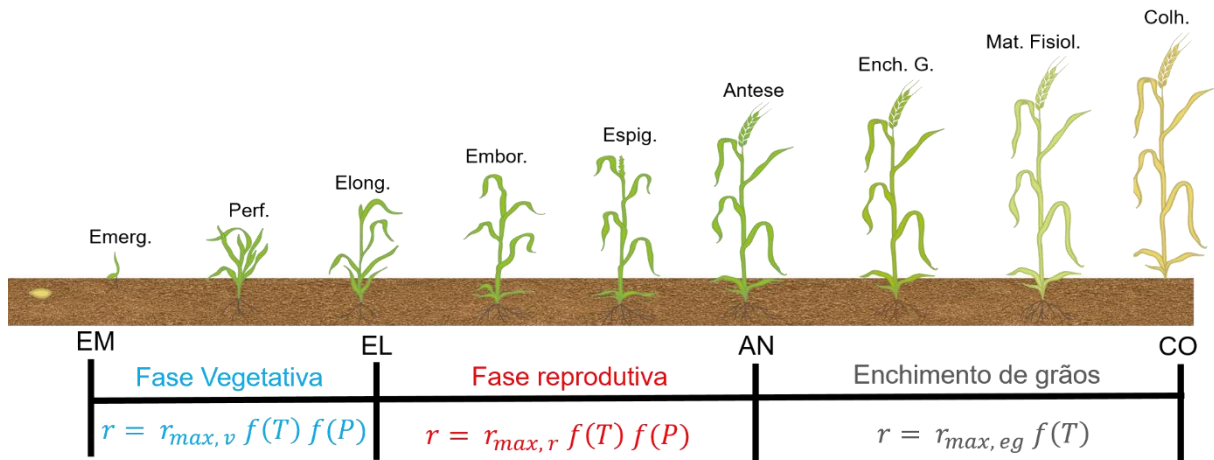
Nota: Adaptado pelo autor (2020)

#### 4.4.2 Modelo WE ajustado

O modelo WE foi ajustado no presente estudo retirando o cálculo de vernalização, uma vez que os genótipos estudados não apresentam ou têm pouca resposta à vernalização (DE MORI et al., 2016; NAZIM UD DOWLA et al., 2018; RODRIGUES et al., 2014; TREVASKIS et al., 2007). Outra modificação do modelo foi o ajuste dos coeficientes para os estádios fenológicos, em vez do uso das fases de desenvolvimento (Figura 2). Aplicou-se o ajuste aos seguintes estádios fenológicos: Emergência (Zadoks 10); Perfilhamento (Zadoks 22); Elongação - primeiro nó visível (Zadoks 31); Emborrachamento completo (Zadoks 45); Espigamento (Zadoks 54); Antese (Zadoks 64); Início de enchimento de grãos (Zadoks 71); Maturação fisiológica (Zadoks 87); Colheita (Zadoks 90), uma vez que os mesmos foram observados a campo.



Figura 2 – Diagrama esquemático indicando as fases de desenvolvimento utilizadas no modelo de WE Streck e os estádios fenológicos adotados no modelo modificado, sendo, EM = emergência; EL = alongação; AN = antese; CO = colheita. Estádios fenológicos de: Emergência; Perfilhamento; Alongação; Emborrachamento; Espigamento; Antese; Enchimento Grãos; Maturação fisiológica; Colheita, adotados no WE modificado.



Fonte: Streck et al. (2003b).

Nota: Adaptado pelo autor (2020)

A forma geral do modelo WE modificado é descrita com a Equação 15 para os estádios fenológicos de sementeira-emergência, sementeira-perfilhamento, sementeira-elongação e sementeira-emborrachamento, sementeira-espigamento, sementeira-antese.

$$r = r_{max,v} f(T) f(P) \quad (15)$$

Sendo:  $r_{max,v}$  representa a taxa máxima de desenvolvimento durante a fase vegetativa de sementeira-elongação em condições ótimas de temperatura do ar e fotoperíodo, e  $f(T)$  e  $f(P)$  são as funções de resposta à temperatura e fotoperíodo, variando de zero a um (equação 15).

$$r = r_{max,r} f(T) f(P) \quad (16)$$

Sendo,  $r_{max,r}$  é a taxa máxima de desenvolvimento durante a fase reprodutiva, alongação-antese em condições ótimas de temperatura e fotoperíodo (equação 16).

Para a fase de enchimento de grãos (antese-colheita), somente a  $f(T)$  é considerada (equação 17):

$$r = r_{max,eg} f(T) \quad (17)$$

Sendo,  $r_{max, eg}$  é a taxa máxima de desenvolvimento para a fase de enchimento de grãos, antese-colheita, em condições ótimas de temperatura.

#### 4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS

O desempenho do ajuste dos coeficientes do modelo WE ajustado foi avaliado baseando-se em gráficos, índices e coeficientes recomendados na literatura. Para comparar a fenologia “Observada versus Estimada” realizou-se análises de regressão linear simples ( $y = ax + b$ ), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice “ $d$ ” de concordância (WILLMOTT, 1982) e índice “ $c$ ” de desempenho (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Para verificar a proporção da variância total dos dados observados, que pode ser explicado pelo modelo, aplicou-se a análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o qual apresenta valores entre 0 e 1, sendo que mais próximo de “1” indica melhor a concordância entre os dados observados e estimados. O  $R^2$  foi estabelecido por meio da equação 18.

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQTotal} \quad (18)$$

Sendo:  $R^2$  - coeficiente de determinação (adimensional),  $SQReg$  – soma dos quadrados da regressão,  $SQTotal$  – soma de quadrados total.

De forma geral, erro é a diferença entre o resultado de um valor estimado e o valor observado de determinada grandeza. O erro das estimativas foi avaliado por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), que expressa a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que REQM apresenta valores nas mesmas dimensões da variável analisada. Quanto mais próximo de zero, melhor é o modelo. A raiz do erro quadrático médio foi estabelecida por meio da equação 19.

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum (Yr_i - YS_i)^2}{n}} \quad (19)$$

A acurácia dos modelos de desenvolvimento foi avaliada por meio do Índice de concordância de Willmott ( $d$ ), o qual mensura a distância com que os pontos Observados e

Estimados estão afastados da reta 1:1. Quanto maior o valor (aproximadamente 1,0), melhor a concordância entre o Estimado e o Observado. Índice “d” apresentado na equação 20.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ys_i - Ys)^2}{\sum_{i=1}^n (|Ys_i - \bar{Yr}| + |Ys_i - \bar{Yr}|)^2} \quad (20)$$

O índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997) quantifica o desempenho do método, sintetizando de forma conjunta o resultado dos índices de concordância de Willmott (d) e correlação de Pearson (r) equação 17. Índice “c” apresentado na equação 21.

$$c = d * r \quad (21)$$

O desempenho do modelo foi classificado pelo valor obtido para o índice “c”, caracterizado como: “ótimo” (“c” > 0,85); “muito bom” (0,76 ≤ “c” ≤ 0,85); “bom” (0,66 ≤ “c” ≤ 0,75); “mediano” (0,61 ≤ “c” ≤ 0,65); “sofrível” (0,51 ≤ “c” ≤ 0,60); “mau” (0,41 ≤ “c” ≤ 0,50); ou, “péssimo” (“c” ≤ 0,40).

O coeficiente de correlação de Pearson é apresentado na equação 22.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Yr_i - \bar{Yr}) * (Ys_i - \bar{Ys})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Yr_i - \bar{Yr})^2 * \sum_{i=1}^n (Ys_i - \bar{Ys})^2}} \quad (22)$$

Sendo: REQM – raiz quadrada do erro médio (dia<sup>-1</sup>); d – índice “d” (adimensional); Yr<sub>i</sub> – valores médios de Dia Juliano da fenologia observada no i-ésimo experimento;  $\bar{Yr}$  média dos valores observados de todas as fenologias (Dia Juliano); Ys<sub>i</sub> – valor estimado de fenologia i-ésimo experimento (Dia Juliano);  $\bar{Ys}$  média dos valores de fenologia estimada nos experimentos (Dia Juliano); n – número de observações (adimensional); c – índice “c” (adimensional).

#### 4.6 PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO

O banco de dados de fenologia utilizado neste estudo foi constituído pelos genótipos de trigo Quartzo, Supera e Sinuelo, semeados em Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR, Tibagi-PR e Itaberá-SP, nas safras 2007 a 2017, referente aos estádios fenológicos de emergência; perfilhamento; alongação; emborrachamento completo; espigamento; pleno

florescimento; início de enchimento de grãos; maturação fisiológica e colheita, totalizando 1.248 observações em 154 ambientes de cultivo.

A base de dados de fenologia composta por 1.248 observações (nove estádios fenológicos em três genótipos, cinco locais e onze safras), foi dividida em duas, sendo a primeira, chamada de “Calibração”, com 904 observações (72,4%) utilizadas na parametrização, obtenção dos coeficientes e avaliação do modelo e a segunda, chamada de “Validação”, com 344 (27,6%) observações independentes para a verificação do modelo WE modificado.

O critério utilizado para a seleção dos dados para validação consistiu em segregar por genótipo, local e safra, por meio de sorteio de, aproximadamente, 28% das observações (dados independentes) foram separados para compor a base de dados de validação. Portanto, três quartos dos dados para calibração dos coeficientes do modelo WE foram modificados. Antes do sorteio, aplicou-se análise preliminar da ocorrência dos eventos ENOS; posteriormente, realizou-se amostragem estratificada considerando como subgrupos as safras com predomínio da situação de neutralidade, El Niño e La Niña (Apêndice B).

Compreendem os parâmetros de entrada do modelo WE, as temperaturas cardinais (mínima =  $TC_{min}$ , ótima =  $TC_{ot}$  e máxima =  $TC_{max}$ );  $R_{max}$  (taxa máxima de desenvolvimento da fase,  $dia^{-1}$ );  $\omega$  (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo,  $h^{-1}$ ) e  $Pc$  (fotoperíodo crítico, h).

No presente estudo, foram realizadas alterações nas temperaturas cardinais, taxa máxima de desenvolvimento, coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo e fotoperíodo crítico para os estádios de: emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, antese, enchimento grãos, maturação fisiológica e colheita, as quais foram modificadas do modelo original (STRECK et al., 2003), a fim de melhorar os coeficientes do modelo e, conseqüentemente, a estimativa da data de ocorrência dos estágios de desenvolvimento.

#### 4.6.1 Parametrização do modelo WE ajustado

A parametrização contou com a base de dados chamada de “Calibração”, e utilizou-se da ferramenta Solver (do Microsoft Excel) com objetivo de otimizar os valores dos parâmetros de entrada (temperaturas cardinais;  $Pc$ ;  $\omega$  e  $R_{max}$ ). Foram aplicadas restrições no campo “restringir”, para obter melhor ajuste do modelo para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo. Os valores dos parâmetros foram definidos com base no menor valor da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM).

O Solver é um suplemento do Microsoft Excel que pode ser usado para testar hipóteses. O uso do Solver para encontrar um valor ideal (máximo ou mínimo) para uma fórmula em uma célula — conforme restrições, ou limites sobre os valores de outras células de fórmula em uma planilha. O Solver trabalha com um grupo de células chamadas “variáveis de decisão”, ou células variáveis, usadas no cálculo das fórmulas nas células de objetivo e de restrição. O Solver ajusta os valores nas células variáveis de decisão para satisfazer aos limites sobre células de restrição e produzir o resultado desejado para a célula objetiva (MICROSOFT, 2020).

#### 4.6.2 Calibração dos coeficientes modelo WE ajustado

A obtenção e calibração dos coeficientes do modelo WE ajustado para predição dos estádios fenológicos do trigo foi realizada utilizando a base de dados chamada de “Calibração”. O procedimento de calibração minimiza a diferença entre os dados simulados e estimados pelos parâmetros de entrada do modelo. Para verificar, em cada estágio de desenvolvimento do trigo, se os valores médios dos coeficientes do modelo WE ajustado diferem entre os genótipos, foi realizado o teste t de Student a  $p > 0,05$ . As médias do coeficiente do modelo WE ajustado foram submetidas aos testes de homocedasticidade das variâncias e normalidade dos erros pelos métodos de Levene e Shapiro-Wilks.

#### 4.6.3 Avaliação dos parâmetros e coeficientes modelo WE ajustado

O modelo foi validado avaliando-se os dados “Observados *versus* Estimado” dos diferentes estádios fenológicos do trigo dos genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo, utilizando os parâmetros de entrada e coeficientes do modelo ajustado neste estudo, com uso da base de dados chamada de “Calibração”.

Para verificação da qualidade da parametrização e coeficientes do modelo, foi utilizada a análise de regressão linear e índices  $R^2$  e “d” de Wilmott (1982), como também a raiz do erro quadrático médio (REQM).

### 4.7 VERIFICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO

A verificação do modelo WE Ajustado foi realizada fazendo a avaliação dos dados “Observados *versus* Estimado” dos diferentes estádios fenológicos do trigo dos genótipos

Quartzo, Supera e Sinuelo, utilizou os parâmetros de entrada e coeficientes do modelo ajustado neste estudo, fazendo uso da base de dados chamada de “Validação”.

Para verificação da qualidade do ajuste do modelo WE ajustado, foi utilizada a análise de regressão linear e índices  $R^2$  e “d” de Wilmott (1982), índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997), como também a raiz do erro quadrático médio (REQM).

#### 4.8 APLICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO COM A MÉDIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

A verificação da aplicação do modelo WE ajustado utilizou a média dos parâmetros de entrada dos três genótipos estudados, foi realizada fazendo a avaliação dos dados “Observados *versus* Estimado” dos diferentes estádios fenológicos, fazendo o uso da média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo ajustado neste estudo, fazendo uso da base de dados chamada de “Validação”.

Para verificação da qualidade do ajuste do modelo WE ajustado com a média dos parâmetros de entrada, foi utilizada a análise de regressão linear e índices  $R^2$  e “d” de Wilmott (1982), índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997), como também a raiz do erro quadrático médio (REQM).

#### 4.9 APLICAÇÃO DO MODELO WE STRECK

A verificação da aplicação do modelo WE Streck utilizou os parâmetros de entrada descritos na Tabela 4, situada no item 4.4.1, fazendo a avaliação dos dados “Observados *versus* Estimado”, das diferentes fases fenológicas (emergência a alongação; alongação a floração; floração a maturação fisiológica), fazendo uso da base de dados chamada de “Validação”.

Para verificação da qualidade do ajuste do modelo WE Streck, foi utilizada a análise de regressão linear e índices  $R^2$  e “d” de Wilmott (1982), índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997), como também a raiz do erro quadrático médio (REQM).

#### 4.10 VALIDAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO PARA O GENÓTIPO TORUK

A inquirição da validação do modelo WE ajustado em outro genótipo, não parametrizado neste trabalho para obter os coeficientes, modelou o genótipo Toruk. Foi

realizada utilizando a média dos parâmetros de entrada dos três genótipos estudados, e fazendo a avaliação dos dados “Observados versus Estimado” dos diferentes estádios fenológicos, fazendo o uso da média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo ajustado neste estudo, as simulações para a previsão da fenologia do genótipo Toruk foram realizadas para as safras 2015 e 2017 obtidas nas localidades de Ponta Grossa – PR e Itaberá – SP.

Para averiguação da qualidade do ajuste do modelo WE ajustado com a média dos parâmetros de entrada, foi utilizada a análise de regressão linear e índices  $R^2$  e “d” de Wilmott (1982), índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997), como também a raiz do erro quadrático médio (REQM).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AMBIENTES DE PRODUÇÃO

As condições meteorológicas observadas durante as 152 datas de semeadura apresentaram variabilidade nos cinco locais de cultivo (Arapoti-PR, Castro-PR, Ponta Grossa-PR, Tibagi-PR e Itaberá-SP), fornecendo um rico conjunto de dados para proposição do ajuste, calibração e validação do modelo de desenvolvimento WE ajustado, apresentadas na Figura 3.

Para caracterizar os diferentes ambientes de produção, os registros meteorológicos obtidos em cada safra (2009, 2010 e 2012) foram sumarizados entre os meses de maio a outubro para o município de Arapoti - PR (Figura 3). A safra 2009 teve predominância do fenômeno El Niño com ONI (Oceanic Niño Index) de 0,54 °C; na safra 2010, predominou o evento La Niña (ONI -0,96 °C); e 2012, ano Neutro (ONI 0,08 °C) (CLIMATE PREDICTION CENTER, 2020) (APÊNDICE B).

A safra 2009 se destacou tanto pelos maiores valores de precipitação pluvial (PREC), e menores valores de evapotranspiração referência ( $ET_0.PM$ ), temperatura do ar média (TMED °C) e temperatura máxima do ar (TMAX °C) quando comparados às safras 2010 e 2012.

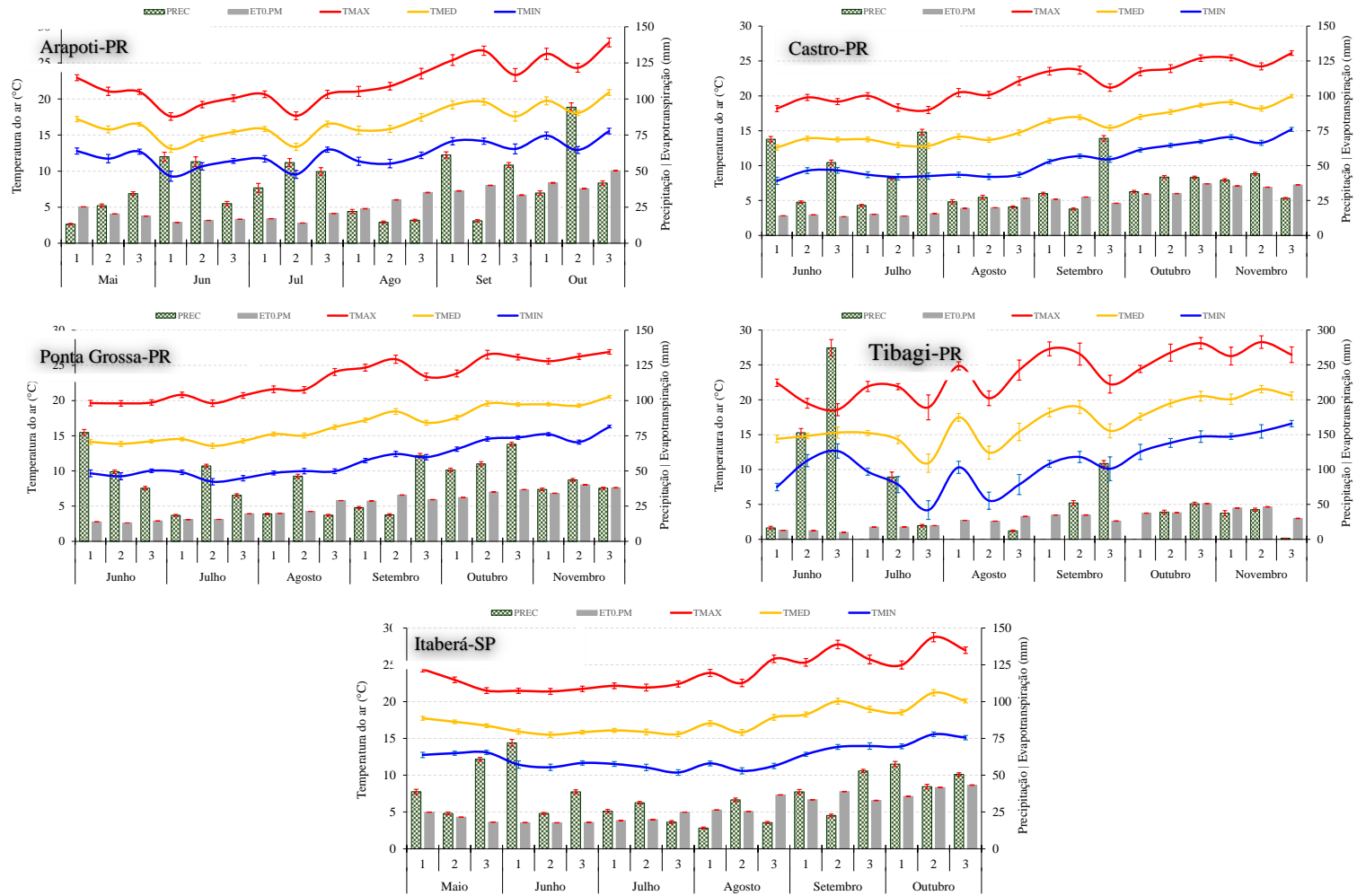
A temperatura do ar média para os meses de maio a outubro permaneceu dentro da normal climatológica (16,3 - 17,2 °C) conforme Atlas Climático Paraná (NITSCHKE et al., 2019), com valores médios observados de 16,8 °C e intervalo de confiança (95%,  $\alpha = 0,05$ ) de 0,92 °C, no período em Arapoti-PR.

A temperatura do ar tem relação direta com a taxa de desenvolvimento do trigo em todos os seus estádios fenológicos. A temperatura do ar acima da basal superior acelera o desenvolvimento do trigo (BECHE et al., 2018; FLOHR et al., 2017; WANG et al., 2013). A temperatura do ar absoluta registrada no abrigo meteorológico em Arapoti-PR, foi de 1,1°C em 03/06/2009 e 36,9°C em 31/10/2012, sendo valor mínimo e máximo. O modelo WE ajustado foi exposto a diversas condições de amplitude térmica.

No início da janela de semeadura do trigo, nos meses de maio e junho, foram observados valores de precipitação abaixo da média histórica para Arapoti (220 – 270 mm, NITSCHKE et al., 2019). A distribuição da precipitação foi mais concentrada no primeiro e segundo decêndio do mês de junho, condições importantes ao estabelecimento de estande inicial do trigo semeado no terceiro decêndio de maio e no mês de junho.



Figura 3 – Temperatura Mínima do ar (TMIN °C), Temperatura Média do ar (TMED °C) e Temperatura Máxima do ar (TMAX °C) evapotranspiração de referência estimada com o método Penman-Monteith (ETP.PM em mm), precipitação pluvial (PREC em mm), observados nos municípios: Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi-PR e Itaberá-SP. Barras verticais representam intervalo de confiança (IC = 95%,  $\alpha = 0,05$ ).



Fonte: O Autor.

A precipitação acumulada média no mês de agosto correspondeu a 52,6 mm ( $\pm 9,2$  mm), abaixo do normal climatológica para a região (60 – 80 mm). O mês de agosto normalmente coincide com o período de floração e enchimento de grão, estádios fenológicos com maior demanda por água pelo trigo (DRECCER et al., 2018).

No município de Castro – PR, foram cultivadas sete safras de trigo, sendo uma com o predomínio do fenômeno El Niño ONI 0,54 °C safra 2009, La Niña nas safras 2007, 2010 e 2011 ONI -0,78 °C, -0,96 °C e -0,73 °C respectivamente e anos Neutros nas safras de 2012 (ONI 0,08 °C), 2013 (0,29 °C) e 2014 (0,24 °C).

O termômetro de bulbo seco registrou as menores médias de temperatura do ar nas safras 2011 e 2010 ( $14,5 \pm 0,54$  °C e  $14,9 \pm 0,51$  °C, respectivamente) e as maiores médias nas safras 2007 ( $17,2 \pm 0,51$  °C), considerando o período entre os meses de junho a novembro.

As menores médias de temperatura mínima do ar (Figura 3) foram observadas no segundo decêndio do mês de julho ( $8,3 \pm 0,88$  °C), período que coincide com o estágio de perfilhamento e alongação do trigo na região. De acordo com Mota (1989), na ocorrência de temperaturas do ar inferiores a 5 °C nos estádios de perfilhamento e alongação, haverá prolongamento do ciclo em dias, o trigo desenvolverá mais afilhos, sistema radicular mais abundante, possibilitando maior exploração dos nutrientes do solo (SCHEEREN et al., 2000).

As baixas temperaturas, com ocorrência de geada nos estádios de espigamento/florescimento, têm potencial de promover danos severos ao desenvolvimento da cultura do trigo, com redução no número de grãos por espiguetas e, conseqüentemente, por espiga, provocando redução na produtividade de grãos. Nuttall et al. (2019) ao avaliar a resposta em produtividade do trigo aos eventos de geada no estágio de antese, constatou que o número de grãos ( $m^2$ ) e rendimento ( $Kg\ ha^{-1}$ ) reduziram em 8,8% e 7,2%, respectivamente, para cada grau Celsius abaixo de zero (até -4 °C).

Ao analisar os dados meteorológicos no período de estudo para o município de Castro-PR, constata-se a frequência de geadas nessa localidade. Uma vez observada a temperatura mínima do ar no abrigo meteorológico for  $< 3^{\circ}C$  ar (WREGGE et al., 2018), pode ser considerado como um possível evento de geada. Nas safras 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2014 somam 62 possíveis eventos, sendo 16 eventos no mês de junho, 26 no mês de julho, 15 em agosto e 5 em setembro. Das 62 possíveis geadas, 11 ocorreram com temperatura mínima do ar  $\leq 0$  °C (5 geadas no mês de junho, 3 nos meses de julho e agosto).

Embora os danos causados pela geada possam ocorrer a qualquer momento após a emergência do trigo, os danos causados pela geada no trigo durante o período de emergência da espiga e antese são considerados os mais prejudiciais ao rendimento de grãos (PERRY et al.,

2017). A geada pode causar a morte de anteras e embriões (FITZGERALD et al., 2019), resultando na esterilidade de flores e espiguetas inteiras (AL-ISSAWI et al., 2013), afetando assim o rendimento.

Nos meses de junho e julho (Figura 3) foi caracterizada a regularidade de precipitação, em média 280 mm ( $\pm 2,10$  mm) e temperatura média do ar 13,3 °C ( $\pm 0,29$  °C), o que favorece o desenvolvimento inicial da cultura do trigo. Os valores observados de precipitação ao longo do ciclo de cultivo apresentam boa distribuição no volume e no tempo (Figura 3). Decêndios de junho 1 e 3, julho 3 e setembro 3, com os volumes de precipitação superiores a 50 mm em 10 dias. Entretanto, no segundo decêndio de setembro a precipitação ficou abaixo de 20 mm, com evapotranspiração de referência de 27,5 mm no mesmo período.

Nas oito safras cultivadas em Ponta Grossa – PR, constatou-se uma com o predomínio do fenômeno El Niño ONI 1,66 °C safra 2015 (El Niño classificado como muito forte, segundo Climate Prediction Center (2020), La Niña nas safras 2008 (ONI -0,53 °C) e 2010 (-0,96 °C), anos Neutros nas safras de 2012, 2013, 2014, 2016 e 2017 ONI 0,08 °C, 0,29 °C, 0,24 °C, -0,19 °C e -0,10 °C respectivamente.

Os meses de junho e julho são caracterizados pelas lâminas de precipitação ( $269 \pm 2,17$  mm), temperatura média do ar de 14 °C ( $\pm 0,25$  °C), fotoperíodo mais curto que os demais meses do ano, e por consequência, menores valores de evapotranspiração ( $91 \pm 0,4$  mm) (Figura 3).

O mês de outubro e junho apresentam as maiores lâminas de precipitação,  $175 \pm 3,25$  e  $164 \pm 3,14$  mm respectivamente. O mês de junho, época preferencial de semeadura do trigo, foi marcado pela adequada distribuição de precipitação, principalmente no segundo e terceiro decêndio do mês, favorecendo a germinação e garantindo estande inicial de plantas de trigo.

Para o mês de outubro, as lavouras semeadas no início do mês de junho estão próximas da colheita. A ocorrência de grandes volumes de precipitação, distribuídas no tempo e espaço, acaba por prejudicar a colheita e qualidade do trigo (CUNHA; PIRES, 2004). Na média das safras, o volume de precipitação dos meses de junho a novembro apresenta valores próximos a  $750 \pm 1,20$  mm, com boa distribuição ao longo do ciclo de cultivo, favorecendo a produção dos cereais de inverno.

Em Tibagi-PR, foi cultivada apenas uma safra de trigo. Safra essa, caracterizada pela neutralidade do ENOS, com valor de -0,29°C de ONI, marcada pela má distribuição das chuvas, aliada à grande variação de temperatura do ar entre os decêndios (Figura 3).

O final do mês de julho e os dois primeiros decêndios do mês de agosto foram marcados pela variação da temperatura do ar, com a temperatura do ar absoluta registrada no

abrigo meteorológico de 0,5 °C, -2,3°C -0,7 °C, observado nos dias 23/07/2013, 24/07/2013 e 25/07/2013, respectivamente. Nos dias 03, 04 e 05 de agosto, foram registrados valores de temperatura máxima do ar na casa dos 25,5 °C, já no dia 15/08/2013 uma frente fria atinge a região, reduzindo as temperaturas do ar para 0,3°C.

Vale destacar a irregularidade na distribuição das chuvas nessa safra. O mês de junho apresentou valores de precipitação ao redor de 443 mm, quatro vezes superior à normal climatológica (100 – 120 mm). Para o mês de julho, a precipitação ficou dentro da média histórica do mês (108 mm), com precipitações concentradas no segundo e terceiro decêndio.

No mês de agosto, o volume de precipitação foi 5,8 vezes inferior à normal climatologia, com apenas 12 mm no dia 26/08/2013, após 35 dias sem registros de chuva. Após esse evento (12 mm em 26/08), mais 19 dias sem precipitação no final do decêndio de agosto e o início do mês de setembro. A resposta mais proeminente das plantas ao déficit hídrico, segundo Taiz e Zeiger (2017), consiste no decréscimo da produção e área foliar, fechamento dos estômatos, aceleração da senescência e abscisão das folhas. Bergamaschi e Matzenauer (2014) relatam o efeito do déficit hídrico sobre a produção das culturas sendo vinculado ao período de ocorrência do stress durante o desenvolvimento das plantas. Santos et al. (2012) caracterizam a fase de pré-antese do trigo, como a mais sensível à deficiência hídrica.

Os registros meteorológicos obtidos em cada safra (2010, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017) foram sumarizados entre os meses de maio a outubro, para o município de Itaberá - SP (Figura 3). A safra de 2010 teve a predominância do fenômeno La Niña com ONI de -0,96°C, na safra 2015, predominou o evento El Niño ONI 1,66°C, safras 2013, 2014, 2016 e 2017 ano Neutro ONI -0,29°C, 0,24°C, -0,19°C e -0,10°C respectivamente.

As precipitações entre os meses de maio e outubro somaram  $662 \pm 1,25$  mm durante as safras ocorridas nesse mesmo período. A evapotranspiração de referência apresentou valores de  $495 \pm 0,07$  mm. Os valores decendiais de precipitação no período de cultivo do trigo alcançaram seus mínimos e máximos no primeiro decêndio de agosto ( $14 \pm 2,96$  mm) e outubro 1 ( $57 \pm 7,95$  mm), respectivamente.

As maiores médias de temperatura máxima do ar (Figura 3) foram observadas no segundo decêndio do mês de outubro ( $28,7 \pm 1,25$  °C), período que coincide com a colheita do trigo. A ocorrência de dias consecutivos com precipitação, aliado a temperaturas elevadas, vem a favorecer o processo de germinação do grão de trigo na espiga. Franceschi et al. (2009), apontam a escolha do genótipo, a ocorrência de temperaturas do ar máximas, médias, mínimas, e a distribuição da precipitação pluvial como os principais fatores que devem ser observados

durante a pré-colheita do trigo, em função da influência desses elementos meteorológicos, sobre a qualidade tecnológica do trigo.

O excesso de chuvas no período que antecede a colheita do trigo vem a favorecer o desenvolvimento de algumas micotoxinas, sendo mais frequentemente encontrada, a desoxinivalenol, mais conhecida por DON. Hernandez Nopsa et al. (2012) observaram que durante a safra de 2009, ocorreram chuvas contínuas desde antes da antese até a maturação. O acúmulo de DON em duas cultivares de trigo de inverno foi muito maior do que em outra safra, com as precipitações ocorrendo de forma frequente até a antese, com posterior período seco até a maturação fisiológica dos grãos.

## 5.2 PARAMETRIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO

### 5.2.1 Parametrização do modelo WE ajustado

Um dos objetivos do presente trabalho foi a parametrização do modelo WE ajustado sob as condições ambientais de cinco locais experimentais, bem como três genótipos de trigo localizados nos Campos Gerais do Paraná e sul de São Paulo, para simular o desenvolvimento e determinar os coeficientes dos genótipos com base nas características observadas das culturas. A Tabela 5 mostra os valores das temperaturas cardinais, fotoperíodo crítico, coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo e a taxa máxima de desenvolvimento por genótipo obtido durante a análise de parametrização. Em geral, os valores dos parâmetros de entrada do modelo são específicos para cada genótipo.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros de cultivares utilizados na parametrização do modelo WE ajustado, para os genótipos avaliados Quartzo, Supera, Sinuelo e média dos genótipos. Temperaturas cardinais (mínima =  $TC_{min}$ , ótima =  $TC_{ot}$  e máxima =  $TC_{max}$ ),  $P_c$  (fotoperíodo crítico, h),  $\omega$  (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo,  $h^{-1}$ ) e  $R_{max}$  (taxa máxima de desenvolvimento,  $dia^{-1}$ ).

(continua)

Estádio fenológico	Temperaturas Cardinais	Quartzo	Supera	Sinuelo	Média
	TCmin (°C)	0	0	0	0,0
	TCot (°C)	14	7	16	12,3
Emergência	TCmax (°C)	30	33	28	30,3
Perfilhamento	$P_c$ (h)	7	6	8	7,0
Elongação	$\omega$ ( $h^{-1}$ )	0,17390	0,17390	0,17390	0,17390
	$R_{max,vi}$ ( $dia^{-1}$ )	0,03310	0,03310	0,03310	0,03310

Tabela 5 – Valores dos parâmetros de cultivares utilizados na parametrização do modelo WE ajustado, para os genótipos avaliados Quartzo, Supera, Sinuelo e média dos genótipos. Temperaturas cardinais (mínima =  $TC_{min}$ , ótima =  $TC_{ot}$  e máxima =  $TC_{max}$ ),  $P_c$  (fotoperíodo crítico, h),  $\omega$  (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo,  $h^{-1}$ ) e  $R_{max}$  (taxa máxima de desenvolvimento,  $dia^{-1}$ ).

(conclusão)

Estádio fenológico	Temperaturas Cardinais	Quartzo	Supera	Sinuelo	Média
Emborrachamento Espigamento Antese	$TC_{min}$ (°C)	4	0	5	3,0
	$TC_{ot}$ (°C)	20	15	22	19,0
	$TC_{max}$ (°C)	34	33	36	34,3
	$P_c$ (h)	7	6	8	7,0
	$\omega$ ( $h^{-1}$ )	0,17390	0,17390	0,17390	0,17390
	$R_{max,vi}$ ( $dia^{-1}$ )	0,03928	0,03928	0,03928	0,03928
Enchimento Grãos Maturação Fisiológica Colheita	$TC_{min}$ (°C)	6	1	8	5,0
	$TC_{ot}$ (°C)	24	22	24	23,3
	$TC_{max}$ (°C)	37	38	38	37,7
	$P_c$ (h)	-	-	-	-
	$\omega$ ( $h^{-1}$ )	-	-	-	-
	$R_{max,vi}$ ( $dia^{-1}$ )	0,04545	0,04545	0,04545	0,04545

Fonte: O autor.

Para a fase inicial de desenvolvimento do trigo, compreendendo os estádios fenológicos de emergência, perfilhamento e alongação, em que as plantas de trigo em desenvolvimento são expostas a temperaturas amenas nos meses de inverno, nessa fase é justificável temperatura cardinal mínima de 0°C, ótima média de 12,3 °C e máxima não ultrapassando 33°C. Esses resultados concordam com os estudos de Mota (1989) e Scheeren (2000), em que o desenvolvimento de plantas de trigo expostas a temperaturas do ar inferior a 5 °C nos estádios de perfilhamento e alongação, promoverá o prolongamento do ciclo em dias, desenvolvimento abundante de perfilhos, sistema radicular mais farto, possibilitando maior exploração dos nutrientes do solo.

A geada durante os primeiros estádios de crescimento do trigo afeta a sobrevivência das plântulas (FULLER et al., 2007), além de causar danos nas folhas, resultando no aparecimento abrasado das folhas (SHROYER; MIKESSELL; PAULSEN, 1995). Embora exista um impacto distinto no rendimento do trigo com a morte das plântulas, outros danos causados pela geada durante os estágios vegetativos têm um pequeno impacto potencial no rendimento, pois o ponto de crescimento do trigo está localizado no solo, tipicamente protegendo-o dos danos (BARLOW et al., 2015).

Temperaturas acima da ideal, especialmente durante o enchimento do grão, impactam no rendimento, tanto pelo número quanto pelo peso de grãos (PRADHAN et al., 2012), com o peso do grão o componente de rendimento mais sensível (STONE; NICOLAS, 1994; WARDLAW; MONCUR, 1995). O desenvolvimento acelerado da colheita, devido ao aumento da temperatura, limita a duração do período de enchimento dos grãos (LOBELL; SIBLEY; ORTIZ-MONASTERIO, 2012; SHAH; PAULSEN, 2003; WARDLAW; MONCUR, 1995). Embora altas temperaturas possam aumentar o suprimento de assimilado durante o enchimento de grãos, a planta de trigo é incapaz de compensar totalmente a menor duração do período de enchimento de grãos (LOBELL; SIBLEY; ORTIZ-MONASTERIO, 2012; PRADHAN et al., 2012).

Os dados observados a campo demonstram que o genótipo Supera floresce antes que os genótipos Quartzo e Sinuelo. Uma das razões para essa diferença nos padrões de desenvolvimento são as diferentes taxas de desenvolvimento nos estádios de perfilhamento até a antese (Figura 4) entre os genótipos (variando de 0,8303 a 1,2903), e não nos estádios de enchimento de grãos até a colheita. O comprimento medido da fase reprodutiva foi o mesmo para os três genótipos. O fotoperíodo também desempenha um papel importante na determinação da taxa de desenvolvimento da planta. Quartzo e Supera são mais sensíveis ao fotoperíodo, com fotoperíodo crítico mais alto quando comparado ao Supera.

Para o parâmetro modelo  $\omega$  (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo), não foi observado diferenças nos valores entre os genótipos e estádios fenológicos (0,1739 h<sup>-1</sup>). A obtenção de um único valor para um parâmetro facilita a utilização do modelo para outros genótipos com características semelhantes, contribuindo para abrangência das simulações no cultivo de trigo.

Nos valores dos parâmetros de entrada do  $R_{max}$  (taxa máxima de desenvolvimento) apresentando na Tabela 5, obtidos com a base de dados de “Calibração”, não foram observadas diferenças entre genótipos nos respectivos parâmetros. O valor de  $R_{max,v1}$  que compreende os estádios fenológicos de emergência, perfilhamento e alongação foi de 0,0331 dia<sup>-1</sup>. Já para os estádios de emborrachamento, espigamento e antese, o valor de  $R_{max,v2}$  foi de 0,039275 dia<sup>-1</sup>. O valor de  $R_{max,r}$  obtido para os estádios de enchimento grãos, maturação fisiológica e colheita foi de 0,04545 dia<sup>-1</sup>. Observa-se que o parâmetro  $R_{max,v2}$  e  $R_{max,r}$ , aumentou em aproximadamente 19% e 16% respectivamente em relação ao  $R_{max,v1}$ , tendência de aumento no parâmetro que corrobora com Alberto (2008) que também encontrou valores para este parâmetro em torno de 25% e 30% maior que o  $R_{max,v1}$ , para o genótipo CEP 52.

### 5.2.2 Calibração dos coeficientes modelo WE ajustado

A calibração dos coeficientes do modelo WE ajustado para predição dos estádios fenológicos do trigo, obtidos por meio dos parâmetros de entradas descritos na Tabela 5, assim como os parâmetros estatísticos expressos pelo intervalo de confiança ( $p > 0,05$ ) e significância estatística pelo teste t de Student ( $p > 0,05$ ), são descritos na Tabela 6.

Na comparação entre os genótipos Quartzo e Supera observou-se nos estádios fenológicos emergência, perfilhamento e alongação que os coeficientes do modelo não diferenciaram estatisticamente pelo teste t de Student (Tabela 6). Apesar dos parâmetros de entrada do modelo (temperaturas cardeais e fotoperíodo crítico) na subfase de emergência à alongação serem diferentes, constatou-se que os coeficientes são adequados para estimar os estádios fenológicos para ambos os cultivares. Nos demais estádios fenológicos (emborrachamento até colheita) os coeficientes do modelo ajustado apresentaram diferença estatística pelo teste t de Student a  $p > 0,05$ . Resultados de ausência de significância pelo teste t de Student entre os coeficientes foram observados também na fase de enchimento de grão e colheita ao comparar os genótipos Sinuelo e Quartzo.

Existem diferenças nos valores médios dos coeficientes do modelo Wang Engel ajustado, para os genótipos estudados. Como esperado, a cultivar de ciclo precoce (Supera) teve os maiores valores do coeficiente WE ajustado (2,1929), o genótipo Quartzo de ciclo médio um valor intermediário (1,8988) e o Sinuelo com ciclo médio-tardio, com menor valor (1,7796). Quanto à variação nos estádios de desenvolvimento estudados, os maiores valores de intervalo de confiança a 95% de probabilidade ocorreram no estágio de colheita, independente do genótipo, devido ao fato da colheita estar relacionada às condições meteorológicas reinantes. Dias de chuva ou imediatamente à ocorrência de precipitação levam ao atraso na data efetiva de colheita, promovendo maior incerteza na simulação.

A média dos coeficientes do modelo Wang Engel ajustado entre todos os genótipos foi obtida (Tabela 6) para aplicação em cultivares não utilizadas na geração dos respectivos coeficientes. Com os valores médios foi possível ajustar o modelo para outro genótipo (Toruk). Os resultados foram apresentados e discutidos no Tópico 5.6.



Tabela 6 – Médias e intervalo de confiança (IC) dos coeficientes de Wang Engel ajustado (Coef. WE) obtidos nas diferentes fases fenológicas do genótipo Quartzo, Supera e Sinuelo. Comparação de Student's entre os genótipos: <sup>1</sup>Quartzo e Supera, <sup>2</sup>Supera e Sinuelo e <sup>3</sup>Sinuelo e Quartzo, usando teste t de Student's. <sup>4</sup>Média dos coeficientes dos três genótipos. Intervalo de confiança a 95% de probabilidade; p-Value = probabilidade pelo teste t de Student. \*Código decimal da escala de Zadoks. \*\*Valor médio referente ao primeiro dia de ocorrência do estágio fenológico. Emer. = Emergência; Perf. = Perfilhamento; Elong. = Elongação; Embor. = Emborrachamento; Espig. = Espigamento; Ench. G. = Enchimento Grãos; Matur. = Maturação fisiológica; Colh. = Colheita.

Fenologia	*Zadoks	Coef. WE Quartzo**	IC	p-Value <sup>1</sup>	Coef. WE Supera*	IC	p-Value <sup>2</sup>	Coef. WE Sinuelo*	IC	p-Value <sup>3</sup>	Média <sup>4</sup>	IC
Emerg.	10	0,1047	0,0033	0,0960	0,1090	0,0052	<0,0001	0,0792	0,0018	<0,0001	<b>0,0976</b>	0,0035
Perf.	22	0,5514	0,0210	0,9947	0,5512	0,0235	<0,0001	0,3942	0,0213	<0,0001	<b>0,4989</b>	0,0177
Elong.	31	0,7949	0,0204	0,2915	0,8138	0,0328	<0,0001	0,6237	0,0348	<0,0001	<b>0,7441</b>	0,0203
Embor.	45	1,2007	0,0213	<0,0001	1,5096	0,0475	<0,0001	0,8929	0,0174	<0,0001	<b>1,2011</b>	0,0442
Espig.	54	1,3718	0,0197	<0,0001	1,6792	0,0495	<0,0001	1,0329	0,0226	<0,0001	<b>1,3613</b>	0,0459
Antese	64	1,5811	0,0218	<0,0001	1,8975	0,0293	<0,0001	1,2079	0,0335	<0,0001	<b>1,5622</b>	0,0479
Ench. G.	71	3,0236	0,0478	<0,0001	3,5749	0,0761	<0,0001	3,1133	0,0806	0,0734	<b>3,2373</b>	0,0637
Mat. Fisiol.	87	4,0209	0,0509	<0,0001	4,6032	0,0776	<0,0001	4,1432	0,0929	0,0199	<b>4,2558</b>	0,0614
Colh.	90	4,4399	0,0631	<0,0001	4,9971	0,0842	<0,0001	4,5294	0,0998	0,1354	<b>4,6555</b>	0,0638

Fonte: O autor.

As médias dos coeficientes do modelo WE ajustados diferiram dos propostos por Wang e Engel (1998), onde o mesmo propõe os coeficientes sendo 0,0 para emergência de plantas, 0,20 para duplo anel, 0,45 na espiguetta terminal, 1,00 na antese, 1,15 para o estágio de grão leitoso e 2,0 na maturação. Ao utilizar o modelo WE original na predição da fenologia dos genótipos de trigo de inverno Arapahoe, Karl 92 e NE92458 na Universidade de Nebraska (Lincoln USA), Xue et al. (2004a) observaram nas três cultivares, raiz do erro quadrático médio de 3,9 dias considerando a simulação dos estádios de emergência, antese e maturação.

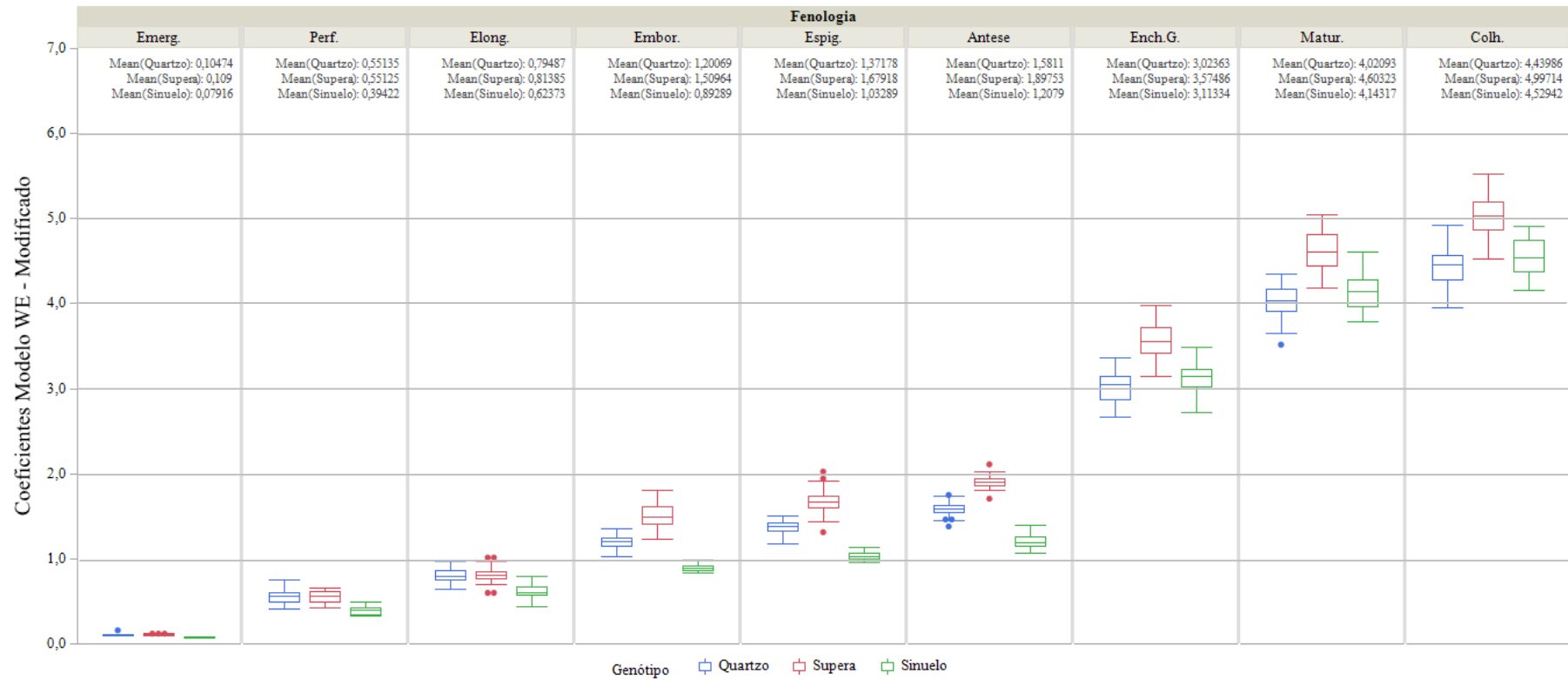
Ao estudar o modelo WE modificado por Streck et al. (2003b) utilizando os coeficientes do modelo WE original para a cultura do trigo no Rio Grande do Sul, Alberto (2008) observou valores dos coeficientes de taxa máxima de desenvolvimento, durante a subfase semeadura-elongação variando entre 0,0135 para o genótipo BRS Louro e 0,0189 para CEP 52. Os valores foram quarenta e seis vezes inferiores à média observada no presente estudo (0,7441).

O intervalo entre os limites superiores e inferiores dos boxplots para os coeficientes do modelo WE ajustado (Figura 4), obtidos para o genótipo Supera apresentou o maior distanciamento entre os genótipos nos estádios fenológicos de emborrachamento, espigamento, antese, enchimento de grão, maturação fisiológica e colheita, resultando em maior variabilidade entre os diferentes genótipos, independente de local e safra.

Posterior à ocorrência da antese, a amplitude dos valores dos coeficientes do modelo WE ajustado (Figura 4) evidencia que a mediana do genótipo Supera é bastante semelhante ao valor máximo para os genótipos Quartzo e Sinuelo. Portanto, 50% dos valores dos coeficientes do Supera são expressivamente maiores quando comparados aos outros dois genótipos. No estágio de perfilhamento, os valores dos coeficientes são distribuídos em menor intervalo (0,3319 a 0,7457), com indicativo de curtose com curva leptocúrtica ( $K = -0,5170$ ). Nos demais estádios fenológicos, a mediana cruzou as caixas perto do centro. No entanto, a distribuição é apenas um pouco simétrica para Quartzo nos estádios de perfilhamento (assimetria 0,2461) e elongação (assimetria 0,3815). O Sinuelo nos estádios de perfilhamento, emborrachamento e antese mostram “bigodes” com tamanhos diferentes, revelando uma distribuição assimétrica.

Por meio da análise dos boxplot, constatou-se a ocorrência de valores extremos nos genótipos Supera e Quartzo nos estádios de emergência, elongação, espigamento, antese e colheita (Figura 4). Os outliers observados no conjunto de dados provavelmente ocorreram devido às safras com restrição hídrica no início do ciclo e períodos de estresse por temperatura do ar (ROSA; SOUZA; TSUKAHARA, 2020), como apresentado no Tópico 5.1 do presente trabalho.

Figura 4 – Boxplot das observações obtidas com a calibração dos coeficientes do modelo Wang Engel (WE), genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo. Fenologia: Emer. = Emergência; Perf. = Perfilhamento; Elong. = Elongação; Embor. = Emborrachamento; Espig. = Espigamento; Ench. G. = Enchimento Grãos; Matur. = Maturação fisiológica; Colh. = Colheita.



Fonte: O Autor.

A parametrização é um aspecto importante da modelagem agrometeorológicas, pois uma boa estimativa dos estádios fenológicos implica na utilização de modelos que considerem os efeitos ambientais aos processos fisiológicos determinantes da produção (MONTEIRO et al., 2017). Para os usuários do modelo, esse é um dos aspectos mais difíceis e demorados da modelagem, mas também um dos mais importantes, pois os valores dos parâmetros e coeficientes têm efeito importante na capacidade do modelo realizar previsões com acurácia e precisão.

### 5.2.3 Avaliação dos parâmetros e coeficientes modelo WE ajustado

Após a parametrização e calibração dos coeficientes de entrada do modelo para os três genótipos de trigo foi realizada uma avaliação do modelo parametrizado com a finalidade de validá-lo, utilizando a base de dados “Calibração” e considerando 904 observações de fenologia. A Tabela 7 apresenta os índices estatísticos da previsão dos estádios fenológicos estudados. No geral, as simulações de fenologia capturam a maior parte da variação no desempenho do modelo WE ajustado com um coeficiente de determinação  $R^2$  superior 0,91 e RQME inferior a 5,5 dias.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros estatísticos avaliados na parametrização do modelo WE ajustado, para os estádios fenológicos: Emergência; Perfilhamento; Elongação; Emborrachamento; Espigamento; Antese; Enchimento Grãos; Maturação Fisiológica e Colheita, para os genótipos avaliados.

(continua)

Parâmetro <sup>(1)</sup>	Quartzo	Supera	Sinuelo
		Emergência	
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,996	0,988	0,994
RQME	1,452	2,138	1,719
d	0,999	0,997	0,998
		Perfilhamento	
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,933	0,942	0,973
RQME	5,261	4,379	4,095
d	0,981	0,985	0,990

Tabela 7 – Valores dos parâmetros estatísticos avaliados na parametrização do modelo WE ajustado, para os estádios fenológicos: Emergência; Perfilhamento; Elongação; Emborrachamento; Espigamento; Antese; Enchimento Grãos; Maturação Fisiológica e Colheita, para os genótipos avaliados.

(continuação)

Parâmetro <sup>(1)</sup>	Quartzo	Supera	Sinuelo
Elongação			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,934	0,918	0,936
RQME	4,779	5,138	4,647
d	0,983	0,978	0,983
Emborrachamento			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,941	0,942	0,983
RQME	4,236	4,369	2,576
d	0,984	0,982	0,995
Espigamento			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,952	0,928	0,988
RQME	3,871	4,793	3,112
d	0,987	0,976	0,992
Antese			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,942	0,913	0,966
RQME	4,188	4,986	4,156
d	0,984	0,974	0,984
Enchimento Grãos			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,935	0,925	0,953
RQME	5,283	5,464	4,805
d	0,978	0,972	0,984

Tabela 7 – Valores dos parâmetros estatísticos avaliados na parametrização do modelo WE ajustado, para os estádios fenológicos: Emergência; Perfilhamento; Elongação; Emborrachamento; Espigamento; Antese; Enchimento Grãos; Maturação Fisiológica e Colheita, para os genótipos avaliados.

(conclusão)

Parâmetro <sup>(1)</sup>	Quartzo	Supera	Sinuelo
Maturação Fisiológica			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,936	0,930	0,957
RQME	5,050	5,102	4,810
d	0,983	0,976	0,982
Colheita			
n	56	35	22
R <sup>2</sup>	0,966	0,960	0,976
RQME	4,416	4,199	3,989
d	0,987	0,982	0,988

<sup>(1)</sup>n, número de observações; R<sup>2</sup>, coeficiente de determinação; REQM, Raiz do Erro Quadrático Médio; d, índice “d” de concordância.

Fonte: Willmott (1982).

Nota: Elaborado pelo autor.

Os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo apresentaram ótimos resultados de parametrização para a variável perfilhamento, tendo sido obtidos R<sup>2</sup> de 0,933, 0,942 e 0,973 e valores de índice “d” de 0,981, 0,985 e 0,990, respectivamente. Os dados do genótipo Sinuelo apresentaram o menor RQME de 4 dias, seguidos pelo genótipo Supera com RQME de 4,3 dias. O genótipo Quartzo apresentou o maior RQME com 5,2 dias.

Quanto à variável de emergência de plantas, os três genótipos apresentaram ótimos resultados da parametrização. O genótipo Supera apresentou valores de R<sup>2</sup> e “d” maiores (0,998 e 0,997, respectivamente), Quartzo com R<sup>2</sup> de 0,996 e “d” com 0,99 e o Sinuelo índices mais baixos (0,994 e 0,998).

O estágio fenológico de antese para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo apresentou relação com os dados validados (Tabela 7), gerando valores de R<sup>2</sup> (0,942, 0,913 e 0,966, respectivamente) superior a 0,90, e com RQME inferior a 5 dias (4,188, 4,986 e 4,156, respectivamente). Tais resultados foram superiores ao obtido por Alberto (2008), utilizando o modelo WE modificado por Streck et al. (2003b), com RQME variando entre 3,3 a 8,1 dias para seis genótipos cultivados no Rio Grande do Sul.

Para os estádios fenológicos de alongação, emborrachamento e espigamento, os índices estatísticos indicaram boa correlação e concordância entre o observado e estimado pelo

modelo WE ajustado com  $R^2$  superior a 0,91, com precisão 2,5 dias e acurácia média 0,98 para os genótipos estudados.

Na avaliação do modelo parametrizado, os estádios finais no desenvolvimento do trigo, enchimento grãos, maturação fisiológica e colheita apresentaram RQME superior a 4,2 dias. Os valores dos índices estatísticos  $R^2$  e índice “d” mostraram que os dados observados e estimados apresentam boa concordância entre si. Os resultados obtidos com o modelo WE ajustado foram robustos na simulação dos estágios críticos de crescimento fenológico (enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita) da cultura do trigo.

Os resultados da simulação do modelo WE ajustado do presente trabalho demonstram robustez na predição da fenologia e podem ser usados como ferramenta na seleção de genótipos adequados à época e local, orientar práticas de manejo e épocas de semeadura contribuindo na maximização da produtividade do trigo. A fenologia do trigo tem forte influência no desenvolvimento e no rendimento de grãos da cultura (CEGLAR et al., 2011). Ao estimar com precisão a fenologia das culturas, os modelos são capazes de capturar as variações genotípicas que contribuem no desenvolvimento da área foliar, produção de biomassa e produção de grãos (WU et al., 2019). A fenologia do trigo pode ser modificada pelo manejo, como a escolha de genótipos adaptados ao local de cultivo (maturação precoce, média e tardia), uso de regulador de crescimento, o que ajudaria a maximizar o rendimento da mesma. As simulações do modelo WE ajustado calibrado e validado para região dos Campos Gerais do Paraná e sul do estado de São Paulo indicaram boas previsões para os estádios fenológicos de emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, antese, enchimento grãos, maturação fisiológica e colheita dos genótipos de trigo, conforme indicado por diferentes índices estatísticos de avaliação Tabela 7.

Esses resultados indicam que o modelo WE ajustado descreveu bem os diferentes padrões de desenvolvimento dos genótipos estudados.

### 5.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO

O desempenho do modelo WE ajustado foi avaliado com dados independentes obtidos de trigo cultivado em cinco locais durante as safras de 2007 a 2017. Os coeficientes de determinação, raiz do erro quadrático médio, índice de concordância e desempenho do modelo são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de validação entre os valores estimados e observados de fenologia, por meio coeficiente de determinação ( $R^2$ ), número de observações (n), raiz do erro quadrático médio (REQM) em dias, índice de concordância (d), desempenho do modelo (c), em cada fase fenológica, para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo.

(continua)

<b>Genótipo</b>	<b>Fenologia</b>	<b>n</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>REQM (dias)</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
Quartzo	Emergência	20	0,99	2,12	1,00*	0,99	Ótimo
Quartzo	Perfilhamento	18	0,95	4,79	0,99	0,96	Ótimo
Quartzo	Elongação	16	0,97	3,51	0,99	0,98	Ótimo
Quartzo	Emborrachamento	19	0,95	4,03	0,99	0,96	Ótimo
Quartzo	Espigamento	20	0,94	4,65	0,98	0,96	Ótimo
Quartzo	Antese	20	0,95	4,02	0,99	0,96	Ótimo
Quartzo	Enchimento Grãos	19	0,96	4,77	0,98	0,96	Ótimo
Quartzo	Maturação Fisiológica	19	0,93	5,59	0,98	0,94	Ótimo
Quartzo	Colheita	18	0,93	5,79	0,98	0,95	Ótimo
Supera	Emergência	12	0,98	2,61	0,99	0,99	Ótimo
Supera	Perfilhamento	11	0,94	4,92	0,98	0,95	Ótimo
Supera	Elongação	11	0,97	3,18	0,99	0,98	Ótimo
Supera	Emborrachamento	12	0,95	4,13	0,98	0,96	Ótimo
Supera	Espigamento	11	0,96	3,80	0,98	0,96	Ótimo
Supera	Antese	11	0,96	3,90	0,98	0,96	Ótimo
Supera	Enchimento Grãos	10	0,98	2,45	0,99	0,99	Ótimo
Supera	Maturação Fisiológica	12	0,96	3,62	0,99	0,97	Ótimo
Supera	Colheita	13	0,95	3,76	0,99	0,96	Ótimo
Sinuelo	Emergência	8	0,98	2,18	1,00	0,99	Ótimo
Sinuelo	Perfilhamento	8	0,95	3,66	0,98	0,96	Ótimo



Tabela 8 – Parâmetros estatísticos de validação entre os valores estimados e observados de fenologia, por meio coeficiente de determinação ( $R^2$ ), número de observações (n), raiz do erro quadrático médio (REQM) em dias, índice de concordância (d), desempenho do modelo (c), em cada fase fenológica, para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo.

(conclusão)

Genótipo	Fenologia	n	$R^2$	REQM (dias)	d	c	Desempenho
Sinuelo	Elongação	8	0,85	5,43	0,96	0,88	Ótimo
Sinuelo	Emborrachamento	8	0,92	3,89	0,98	0,93	Ótimo
Sinuelo	Espigamento	8	0,97	2,55	0,99	0,97	Ótimo
Sinuelo	Antese	8	0,98	2,12	0,99	0,98	Ótimo
Sinuelo	Enchimento Grãos	8	0,96	4,80	0,97	0,94	Ótimo
Sinuelo	Maturação Fisiológica	8	0,97	3,32	0,99	0,97	Ótimo
Sinuelo	Colheita	8	0,95	3,43	0,99	0,96	Ótimo

\*valor aproximado de 1,00 pela 3ª casa decimal.

Fonte: O Autor.

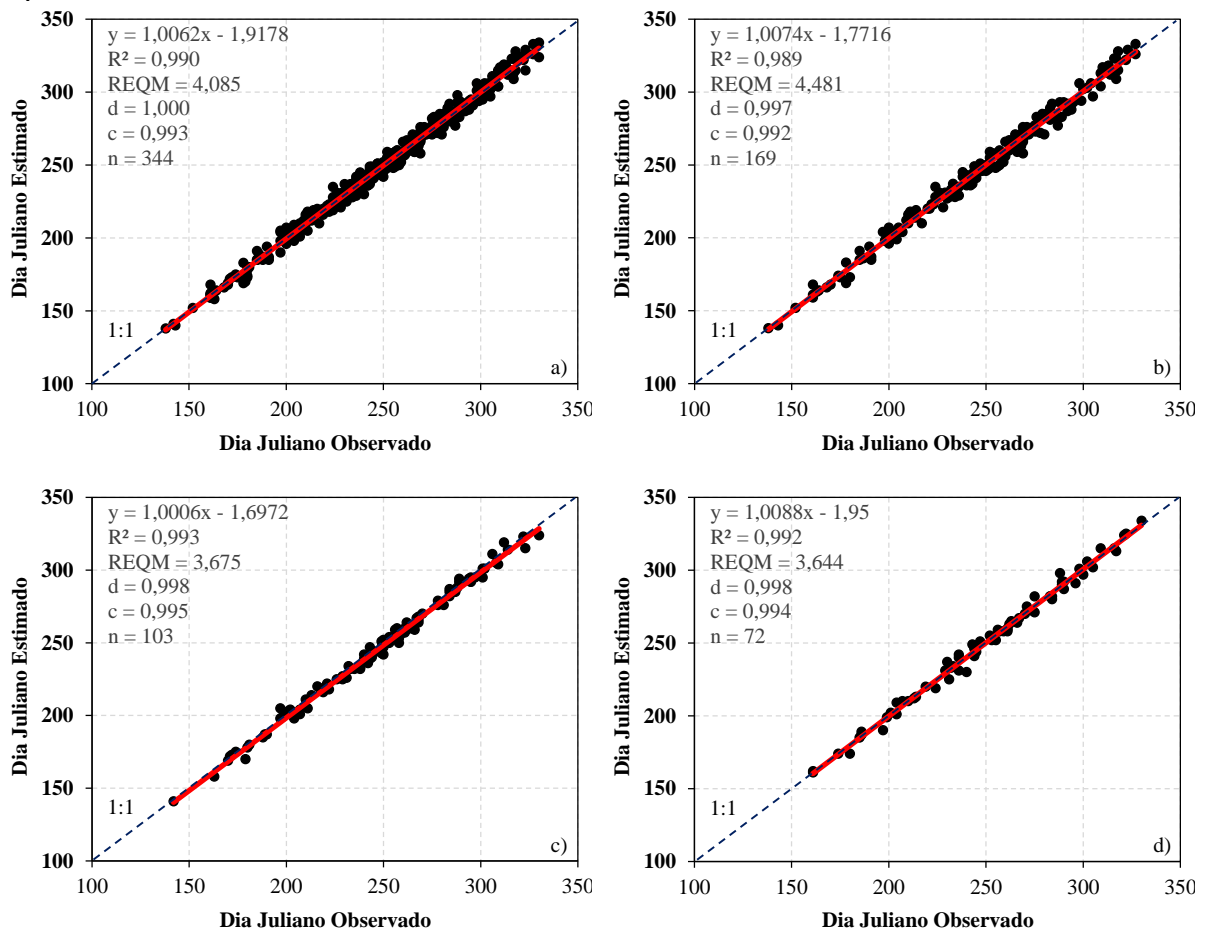
O modelo WE ajustado apresentou adequada simulação dos estádios fenológicos para os três genótipos estudados, com ótimo desempenho e concordância do modelo em relação aos dados observados, conforme resultados do índice “c” e “d” (Tabela 8). Por meio da REQM, constatou-se que os estádios relativos à fase de maturação para o genótipo Quartzo apresentaram os maiores erros, com valores de 5,59 dias para a maturação fisiológica e 5,79 dias para a colheita. Xue et al. (2004a) relataram que os maiores valores de REQM ocorrem nos estádios iniciais de desenvolvimento do trigo, com valores de 7,3 a 7,1 dias para os estádios de duplo anel e espiguetas terminal, conforme observado para os genótipos Supera no perfilhamento (4,92 dias) e Sinuelo no estágio de alongação (5,43 dias). Alberto (2008) ao realizar a simulação utilizando o modelo WE Streck et al. (2003b), para seis genótipos de trigo cultivados no Rio Grande do Sul, observaram valores médios de REQM = 8,5 dias na simulação da maturação fisiológica do trigo, valores acima do constatado para os três genótipos do presente estudo.

Destaca-se também que, no trabalho de Xue et al. (2004a), as REQM foram decrescentes ao longo dos estádios, fato não observado no presente estudo, sendo que a REQM não seguiu um padrão lógico entre os estádios. Os maiores REQM na fase inicial de desenvolvimento observado no estudo de Xue et al. (2004a) ocorreram possivelmente pela resposta da função linear da vernalização, conforme indicado pelo autor.

Valores relativamente elevados da REQM na fase inicial do trigo também foram constatados por Streck et al. (2003b), com valores entre 6 a 10 dias. No presente estudo os valores da REQM foram proporcionalmente inferiores aos observados pelos autores supracitados ao aplicar o modelo WE. A modificação do modelo WE com a retirada da função de vernalização não resultou em redução da qualidade da modelagem fenológica para os genótipos testados, indicando que a função pode ser retirada do modelo WE para as condições e genótipos cultivados na região dos Campos Gerais do Paraná e sul do estado de São Paulo.

O agrupamento dos estádios fenológicos dos três genótipos, sendo a emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, antese, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita está ilustrado na Figura 5a, para comparação entre o dia juliano observado e estimado dos estádios de desenvolvimento para o modelo WE ajustado.

Figura 5 – Dia Juliano observado vs. estimado da emergência a colheita, para (a) resumo dos três genótipos, (b) Quartzo, (c) Supera e (d) Sinuelo. Linha (--) linha 1:1. Respective erros e índices estatísticos:  $y$  = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio;  $d$  = índice de Willmott; e  $c$  = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá - SP.



Fonte: O Autor.

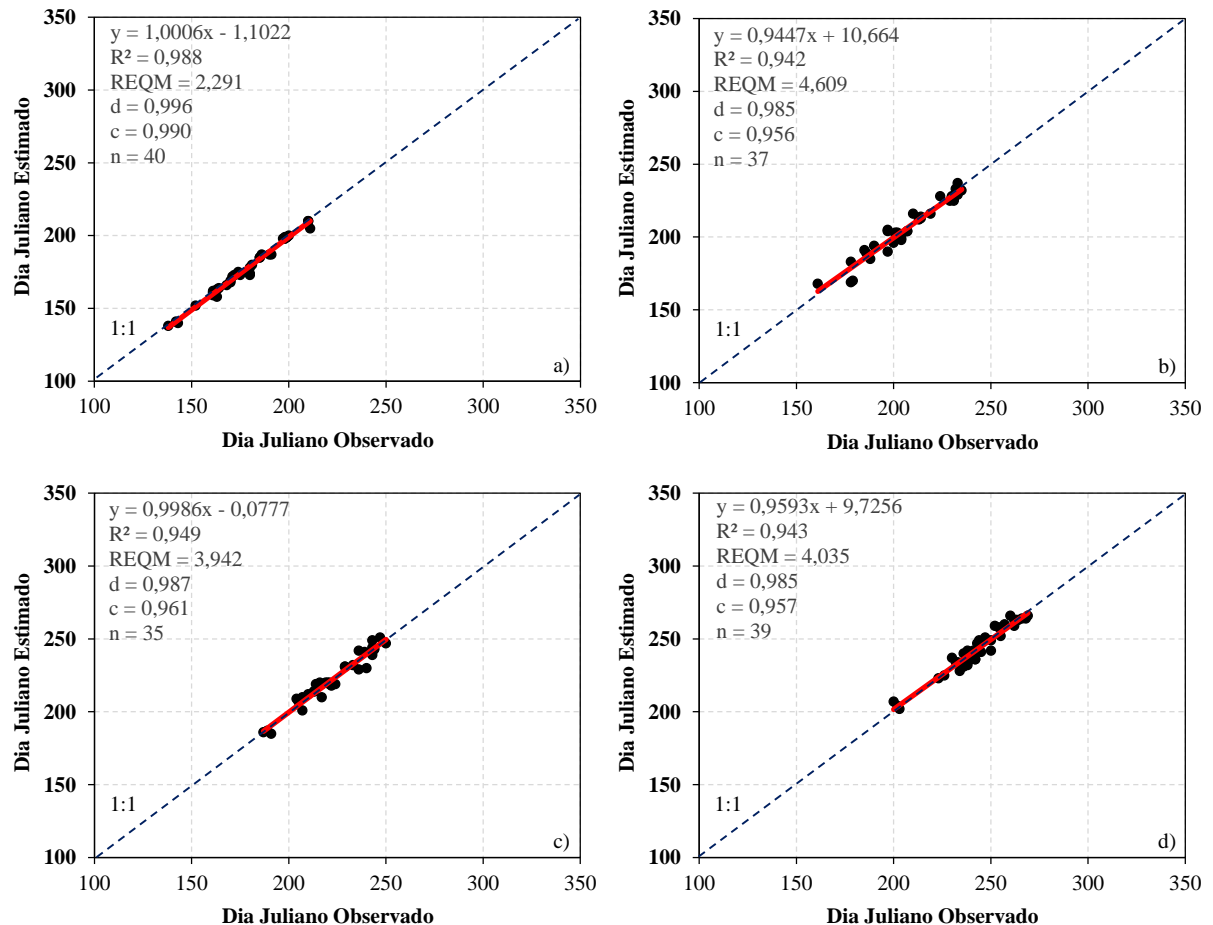
Por meio do diagrama de dispersão da relação entre os dias observados e estimados (Figura 5), constatou-se que o modelo proposto estimou com acurácia e precisão o desenvolvimento fenológico dos genótipos de trigo, conforme fundamentado pelos parâmetros estatísticos. Para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), aproximadamente 78% dos dados foram iguais ou maiores de que 0,95, o que demonstra um ótimo ajuste dos valores aplicados ao modelo WE. Para a REQM, aproximadamente 89% dos dados foram iguais ou menores que 5 dias, demonstrando pequeno erro de estimativa do modelo WE ajustado, independente da região na área de estudo e das condições edafoclimáticas.

O modelo WE ajustado apresentou exatidão satisfatória ( $d \geq 0,96$ ), no qual o índice de Willmott ( $d$ ) quantifica matematicamente a dispersão dos dados obtidos pelo modelo versus os dados observados em campo. Aproximadamente 93% dos valores do índice “ $d$ ” foram iguais ou superiores a 0,98, demonstrando acurácia do modelo e dos coeficientes estabelecidos no presente trabalho (Tabela 8).

Com a distância entre os pontos e a reta 1:1 tem-se a magnitude dos valores estimados e observados. Dessa forma, verificaram-se concentrações de pontos em torno da reta, para os três genótipos (Figura 5a), reforçando as características de alta precisão e acurácia da modelagem, conforme observado pelos altos valores de  $R^2$ , “ $d$ ” e “ $c$ ”. A modelagem se mostrou mais eficaz na predição da fenologia para os cultivares Supera e Sinuelo (Figura 5c, Figura 5d) com REQM próximos a 3,6 dias, enquanto que, para o cultivar Quartzo (Figura 5b), o erro aumentou para 4,4 dias. O valor do índice “ $d$ ” e “ $c$ ”, ficou próximo de 0,90 para os três genótipos, ratificando a ótima acurácia do modelo em prever os nove estádios fenológicos do trigo, independente de safra e local.

O desempenho do modelo WE ajustado em relação aos dados fenológicos de emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento é ilustrado na Figura 6. A emergência de plantas, apresentou ótimas condições de simulação, com  $R^2 = 0,98$ , REQM = 2,2 dias, índice “ $c$ ” e “ $d$ ” acima de 0,99. Os ótimos resultados se devem ao curto período entre a semeadura e a emergência, na média de 7 dias (Figura 6a). A data simulada de alongação, emborrachamento apresentou valores REQM próximos a 4 dias, índice “ $c$ ” e “ $d$ ” superior a 0,96. De maneira geral, o modelo apresentou os maiores erros no estágio de perfilhamento com REQM = 4,6 dias,  $R^2 = 0,94$  e índice “ $c$ ” de 0,95. Os resultados indicam que o modelo WE ajustado, uma vez calibrado, é capaz de capturar as mudanças fenológicas do trigo em resposta às variações das condições climáticas.

Figura 6 – Dia Juliano observado vs. estimado para os três genótipos, (a) emergência (Zadoks 10), (b) perfilhamento (Zadoks 22), (c) alongação (Zadoks 31) e (d) emborrachamento completo (Zadoks 45). Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos:  $y$  = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio;  $d$  = índice de Willmott; e  $c$  = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP.



Fonte: O Autor.

Durante o crescimento inicial do trigo, o perfilho é inteiramente dependente da parte aérea que o supre de carboidratos e nutrientes (PILBEAM, 2018), e só se torna independente após desenvolver três folhas maduras, quando as raízes nodais se formam na base (SANTOS et al., 2017). O perfilhamento, em gramíneas anuais, é favorecido por alta intensidade luminosa (FAN et al., 2015) e a taxa de perfilhamento é máxima a 25 °C (CASTRO; KLUGE, 1999). Verificou-se nas Figura 6a e b, que o modelo WE ajustado foi capaz de integrar esses elementos meteorológicos, com ótima previsão nos estádios fenológicos da fase vegetativa do trigo, as quais apresentaram valores de REQM de 2,3 a 4,6 dias e índices “c” e “d” acima de 0,95. Dessa forma, a estimativa do desenvolvimento inicial do trigo com o modelo agrometeorológico pode ser utilizado como ferramenta de suporte à decisão pelos agricultores e técnicos.

Para o estágio fenológico de alongação (Figura 6c), o modelo WE ajustado apresentou ótimo desempenho, com REQM de 3,9 dias e inclinação da linha de regressão muito próxima de 1,0 (0,9986) e interceptação em y muito pequena (0,0777). O estágio de alongação inicia-se primeiro, seguido da iniciação floral que geralmente causa a cessação do perfilhamento. A estrutura floral do trigo é considerada altamente especializada. As inflorescências são constituídas por uma série de ramos floridos, chamados de espiguetas, que estão sempre arranjadas na forma de espiga suportada pelo colmo do cereal (BECHE et al., 2018; RODRIGUES et al., 2011). Alguns componentes de rendimento são definidos no estágio de alongação: número de flores, número de espigas por metro quadrado e o potencial de rendimento de grãos (RODRIGUES, 2000).

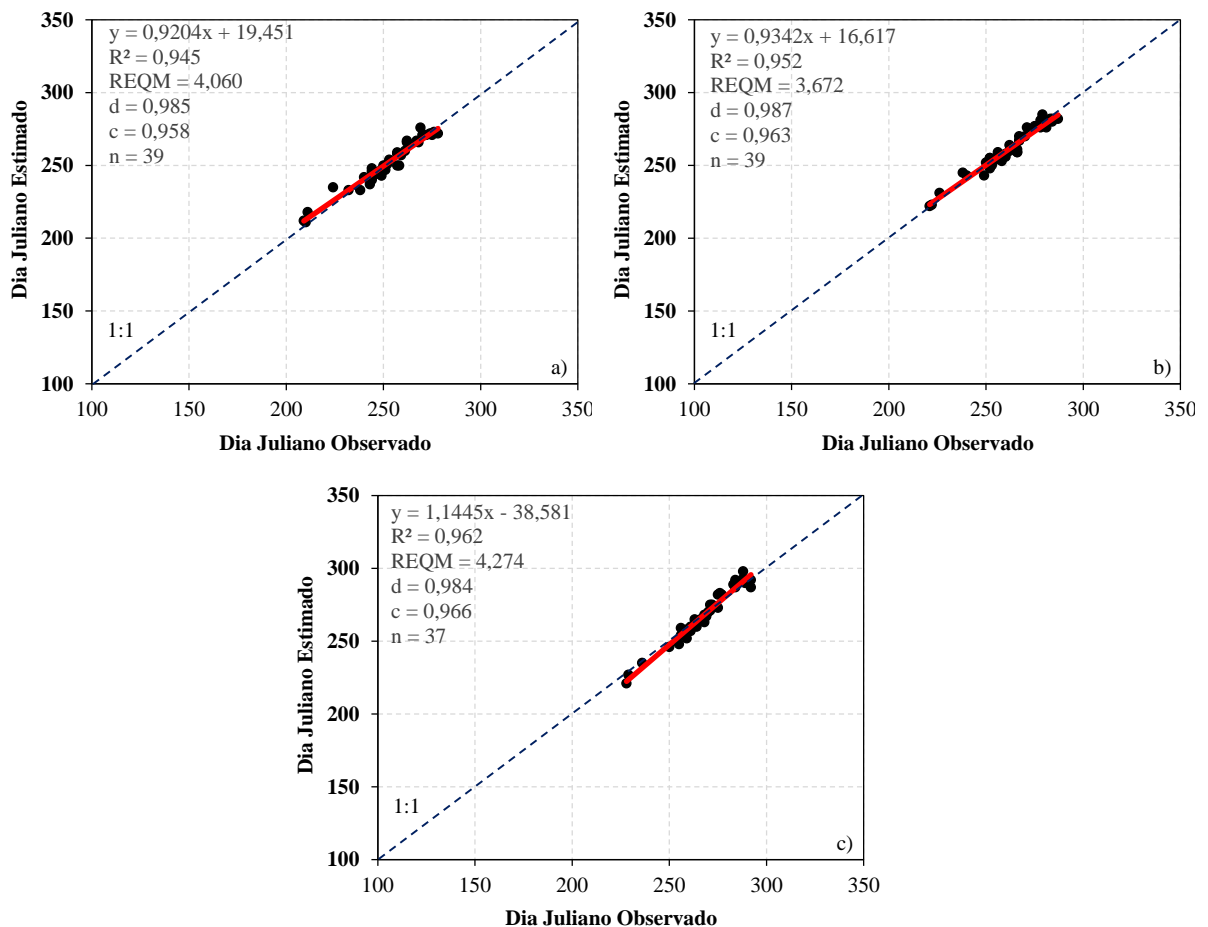
A determinação do rendimento de grãos no trigo depende muito do número de grãos por área do solo (FISCHER, 1985, 2008; FISHER, 1973; PEDRÓ; SAVIN; SLAFER, 2012; REYNOLDS et al., 2009; SLAFER, 2003). O número potencial de grãos está sendo determinado durante todo o período de pré-floração (estádio de alongação), durante o qual partes da inflorescência capazes de produzir grãos são primeiro geradas e depois degeneradas em grande parte (FERRANTE; SAVIN; SLAFER, 2010). A maioria dos processos ocorre quando a espiga ainda se encontra no interior do colmo da planta de trigo. Devido à importância do estágio fenológico de emborrachamento (Figura 6d), foi realizada a simulação com o modelo WE ajustado com REQM de 4,0 dias, índices “c” e “d” 0,95 e 0,98, respectivamente.

O modelo WE ajustado apresenta diversas aplicações devido ao ótimo desempenho na predição dos estádios iniciais da cultura do trigo, como a aplicação de defensivos agrícolas, reguladores de crescimento e herbicidas hormonais (PENCKOWSKI; ZAGONEL; FERNANDES, 2010), aplicação de nitrogênio em cobertura (FONTOURA; BARTH, 2015), planejamento e tomada da decisão sobre melhor época de semeadura e colheita (TSUKAHARA et al., 2015), planejamento e manejo de irrigação, dentre outras práticas agrícolas.

Considerando os ajustes estatísticos na validação do modelo WE ajustado, os melhores desempenhos obtidos foram para os estádios fenológicos de espigamento e início de enchimento de grão. No espigamento (Figura 11a), constatou-se REQM de 4 dias para o estágio de antese e REQM de 3,6 dias para o início de enchimento de grão REQM de 4,2 dias. Os três estádios de desenvolvimento apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índices “d” e “c” superior a 0,94 (Figura 7). Comparando cinco modelos fenológicos do trigo, em diferentes datas de semeadura e genótipos no norte da China, Wu et al. (2017) relatam que o modelo World Food Studies (WFOST V7.1) apresentou valores de REQM 5,7 dias, superestimando o estágio de floração na calibração do modelo. O valor do erro médio indicou que o modelo foi capaz de

reproduzir 79% dos dados observados. Para o ajuste dos coeficientes propostos, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indicou mais de 95% da variação total dos dias estimados com o modelo WE ajustado.

Figura 7 – Dia Juliano observado vs. estimado para os três genótipos, (a) espigamento (Zadoks 54), (b) antese (Zadoks 64) e (c) início de enchimento de grãos (Zadoks 71). Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos:  $y$  = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio;  $d$  = índice de Willmott; e  $c$  = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá - SP.



Fonte: O Autor.

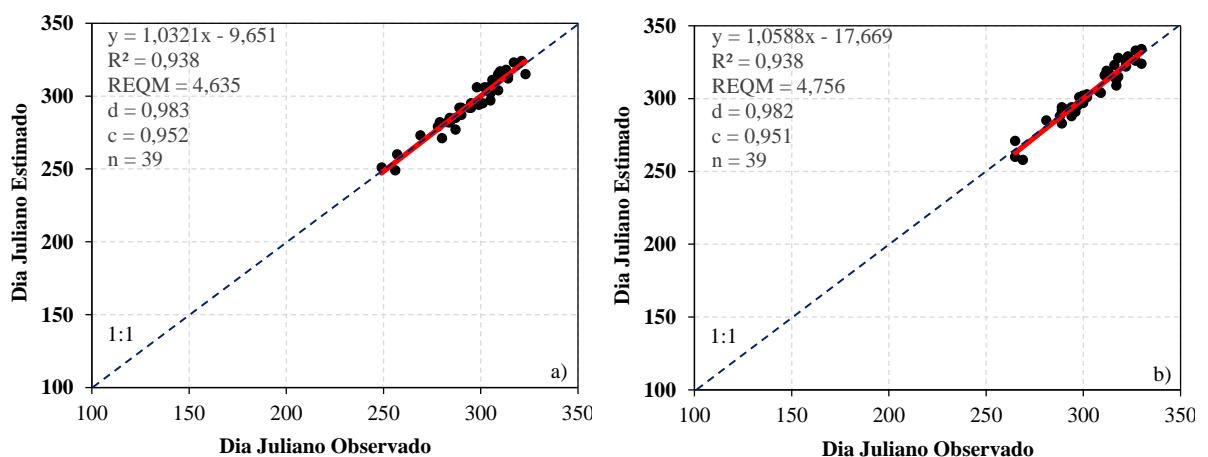
A partir 1985, o trabalho do fisiologista australiano Tony Fischer (FISCHER, 1985) explicou a variação no número de grãos por metro quadrado como uma consequência da acumulação de recursos e alocação dos mesmos durante um curto subperíodo de desenvolvimento da cultura do trigo, mais especificamente, de poucas semanas imediatamente antes (e talvez uma semana depois) da ocorrência da floração (CUNHA, 2009). Nesse sentido, o modelo WE ajustado simulou a data da antese com REQM de 3,6 dias (Figura 7b).

Cunha (2009) considera a existência de período crítico de aproximadamente 30 dias, concentrados entre 20 dias pré-floração (espigamento) e 10 dias pós-floração (ASLAM et al., 2017). As condições meteorológicas (radiação solar e temperatura do ar) nesse período são essenciais, o número de afilhos que produzirão espigas (número de espigas por unidade de área) e primórdios florais que sobreviverão dentro das espiguetas, estabelecendo-se flores que efetivamente produzirão grãos (CUNHA, 2009; GARCÍA et al., 2016; PRIETO et al., 2018). O uso de modelos preditivos da fenologia pode auxiliar no zoneamento agrícola, visando a máxima produção agrícola nas diferentes regiões tritícolas do estado do Paraná e São Paulo.

A relação positiva entre massa de espigas na floração e o número de flores férteis demonstra a quantidade de recursos alojados na espiga, sendo fundamental para o aumento no número elevado de grãos (MANGINI et al., 2018). Condições meteorológicas desfavoráveis no período crítico de 30 dias (CUNHA, 2009) refletem negativamente na definição do número de flores férteis, no momento da antese e, condições pouco favoráveis, nos 10 dias pós-floração, reduzem a capacidade de estabelecimento dos grãos (PRIETO et al., 2018).

O diagrama de dispersão entre dias julianos observados e estimados com o modelo WE ajustado para os cinco municípios, os estádios fenológicos de maturação fisiológica e colheita para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Dia Juliano observado vs. estimado para os três genótipos, (a) maturação fisiológica (Zadoks 87) e (b) colheita (Zadoks 90). Linha (--) linha 1:1. Respective erros e índices estatísticos:  $y$  = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio;  $d$  = índice de Willmott; e  $c$  = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá - SP.



Fonte: O Autor.

Os valores simulados dos estádios fenológicos do trigo foram próximos dos observados com pequenos REQM e “ótimo” desempenho (índice “ $c$ ” > 0,85). Os índices

estatísticos para o estágio de maturação fisiológica,  $R^2 = 0,93$ , “d” e “c” superior a 0,95 com  $REQM = 4,6$  dias. A data da colheita foi simulada com precisão, com  $R^2 = 0,93$  índice “d” = 0,98 e “c” = 0,95 e  $REQM = 4,7$  dias.

Em estudo de simulação do período de maturação fisiológica, a colheita do trigo no estado do Colorado EUA, McMaster et al. (2019) constataram diferentes respostas entre os modelos Soil Water Assessment Tool (SWAT), Wind Erosion Prediction System (WEPS) e Unified Plant Growth Model (UPGM). O modelo UPGM apresentou  $REQM$  de 6,1 dias e índice “d” de 0,70; na sequência constataram que o modelo WEPS obteve valores de  $REQM$  próximo ao do modelo UPGM com 6,3 dias e redução no índice “d” (0,63). O modelo SWAT foi o que demonstrou pior simulação da fenologia do trigo, com  $REQM$  de 18,4 dias e índice “d” igual a 0,34. Os resultados obtidos pelos autores foram inferiores ao modelo WE ajustado, pois, conforme ilustrado na Figura 8, o modelo WE simulou a porção final do ciclo de desenvolvimento do trigo com valores próximos de  $REQM$  a 4,6 dias e índice “d” superior a 0,98 nas condições do estudo, evidenciando robustez nas previsões geradas com o modelo.

A simulação da fase de enchimento dos grãos com o modelo WE ajustado ganha importância considerando o relato apresentado por Cunha (2009), Prieto et al. (2018) e Martínez et al. (2018), o quais destacam o enchimento de grãos de trigo iniciando imediatamente após a floração e finalizando na maturação fisiológica, quando fica determinado o peso final de cada grão e seu respectivo rendimento.

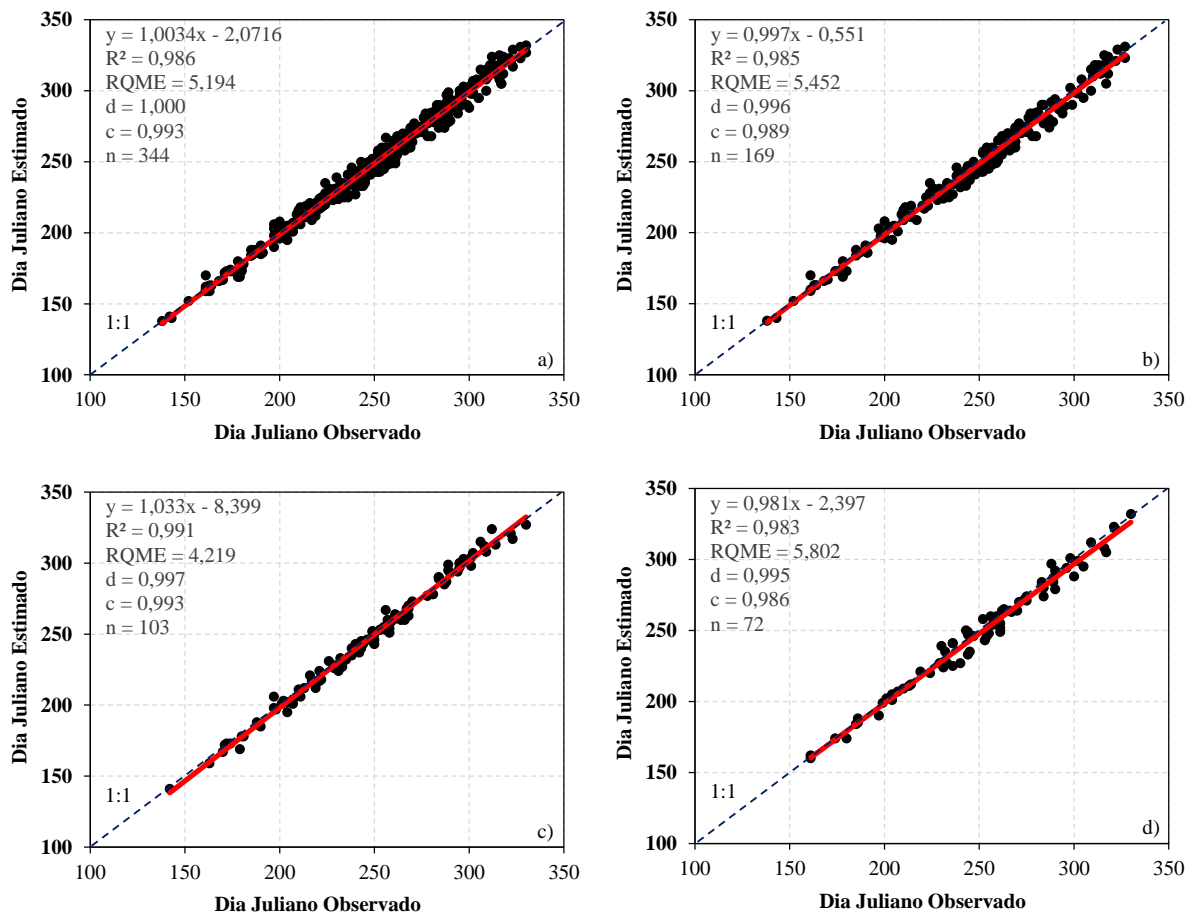
O período tem forte influência sobre a qualidade tecnológica, sendo diretamente relacionado às interações entre genótipo e ambiente (clima e manejo), tendo influência sobre a relação gliadina/glutenina e o tipo de amido formado, servindo para explicar por que certas regiões do mundo prestam-se melhor à produção de determinados tipos de trigo (CUNHA, 2009; PRIETO et al., 2018). No início do enchimento de grãos ocorre maior acúmulo de proteínas no grão. A proteína presente no grão de trigo é um produto de concentração cumulativa de nitrogênio absorvido pela planta durante os estádios vegetativo e reprodutivo, a velocidade a qual ocorre o processo de deposição da proteína no grão dependendo da temperatura do ar (MARTÍNEZ et al., 2018).



## 5.4 APLICAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO COM A MÉDIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

As análises entre a fenologia observada e estimada na validação do modelo WE ajustado, considerando a média dos parâmetros de entrada do modelo (Tabela 5) e média coeficientes dos estádios fenológicos dos genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo (Tabela 6), conforme exposto na Figura 13, produziu resultados similares aos das análises utilizando os parâmetros e coeficientes específicos para cada genótipo (Tabela 8).

Figura 9 – Média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo WE ajustado. Dia Juliano observado vs. estimado da emergência a colheita, para (a) resumo dos três genótipos, (b) Quartzo, (c) Supera e (d) Sinuelo, utilizando a linha (--) linha 1:1. Respetivos erros e índices estatísticos:  $y$  = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio;  $d$  = índice de Willmott; e  $c$  = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP.



Fonte: O Autor.

Ao comparar o desempenho dos três genótipos combinados (Figura 5a e Figura 9a), constatou-se “ótimo” desempenho em ambas simulações, aumento da raiz do quadrado médio

do erro em 1 dia. A RQME foi de 4 dias para aplicação dos parâmetros e coeficientes individuais e próximo a 5 dias com aplicação dos parâmetros e coeficientes médios. O índice “d” e “c” foram superiores a 0,99 com a utilização da média da temperatura basal, ótima e máxima dos genótipos, bem como seus coeficientes (Figura 9a). Esses resultados indicaram que os parâmetros e coeficientes médios do modelo obtidos possuem potencial de uso em outros genótipos.

Os dados considerando a média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo WE ajustado proporcionaram valores de  $R^2$  superiores aos observados na literatura para outros genótipos, locais e modelos, a exemplo de Rezaei et al. (2018), que obtiveram  $R^2$  variando entre 0,91 a 0,94, ao modelar a fenologia do trigo em duas safras no oeste da Alemanha. Christy et al. (2020), ao modelarem a fenologia do trigo baseado em graus dias corrigido pelo fotoperíodo (sudeste e sul da Austrália), simularam a espiguetta terminal do trigo com  $R^2$  de 0,93. Ao comparar a performance de cinco modelos para a simulação da fenologia do trigo em diferentes datas e genótipos no norte da China, Wu et al. (2017) constataram na simulação da floração o maior  $R^2$  de 0,97 para o modelo WheatSM e o menor  $R^2$  de 0,86 para o modelo WOFOST.

O genótipo Sinuelo apresentou a maior diferença na previsão da fenologia, quando realizadas as simulações utilizando a média dos parâmetros e coeficientes do modelo. O REQM passou de 3,6 dias para 5,8 dias. Isso ocorreu em resposta às maiores alterações na temperatura cardinal mínima, fase de antese e na maturação fisiológica (8 °C Sinuelo para 5 °C média). O genótipo Sinuelo possui ciclo diferente dos genótipos Quartzo e Supera e seus coeficientes foram os mais discrepantes entre os genótipos, especialmente entre os estádios de emergência à antese (Figura 4). Foram observadas diferenças significativas em relação ao genótipo Quartzo nos estádios da fase vegetativa (Tabela 6), mesmo assim o modelo WE ajustado simulou com razoável eficiência sua fenologia.

Na Figura 9a os valores dos estádios fenológicos simulados correspondem muito bem aos valores observados. A inclinação da linha de regressão é próxima de 1,0 (1,0034), ressaltando a ótima estimativa dos dias de ocorrência de determinado estágio fenológico. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que mais de 98% da variação total dos dias estimados, foi explicada pelo modelo de regressão.

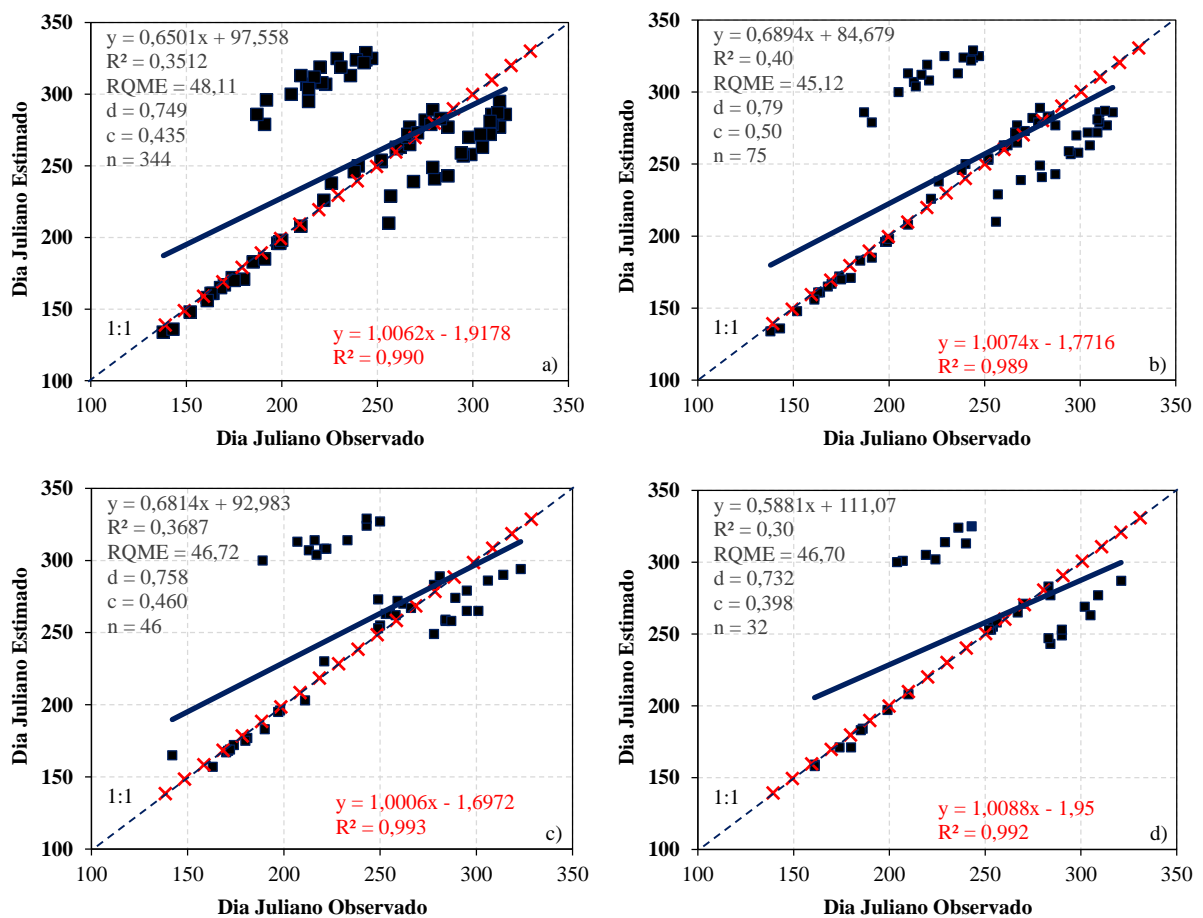
A possibilidade de estimar a fenologia do trigo, com registro diário da temperatura do ar, facilmente obtida em estações agrometeorológicas automáticas de superfície, e calculando o fotoperíodo local, associado ao conhecimento dos parâmetros de entrada e coeficiente do modelo, de cada genótipo ou valores médios apresentados neste estudo, pode-se realizar a

previsão de manejos técnicos e econômicos no cultivo de trigo na região dos Campos Gerais do Paraná e Sul de São Paulo (TSUKAHARA, 2016; TSUKAHARA et al., 2016).

### 5.5 APLICAÇÃO DO MODELO WE STRECK

O uso do modelo WE Streck para estabelecer os estádios fenológicos de desenvolvimento, emergência, alongação, antese e maturação fisiológica para os genótipos Quartzo, Supera e Sinuelo, bem como os testes estatísticos de avaliação do modelo, encontram-se na Figura 10.

Figura 10 – Aplicação do modelo WE Streck. Dia Juliano observado vs. estimado da emergência, alongação, antese e maturação fisiológica, para (a) resumo dos três genótipos, (b) Quartzo, (c) Supera e (d) Sinuelo. Linha (--) linha 1:1, (x) dados estimados pela equação de regressão obtidos pela modificação do modelo WE proposto neste trabalho. Respectivos erros e índices estatísticos:  $y$  = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio;  $d$  = índice de Willmott; e  $c$  = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2007 a 2017, nos municípios de Arapoti - PR, Castro-PR, Ponta Grossa - PR e Itaberá - SP.



Fonte: O Autor.

As estimativas dos estádios fenológicos de emergência a antese, utilizando o modelo WE Streck, com dados aproximando da reta de 1:1. Os coeficientes do modelo WE Streck para os estádios de emergência de plantas e antese são próximos ao obtido no presente trabalho (emergência = 0,976 e antese = 1,5622). A predição dos estádios fenológicos apresentou REQM de 5,9 dias para a emergência e REQM de 8,2 dias para antese.

A REQM calculada utilizando todos os estádios de desenvolvimento para o modelo WE Streck e WE ajustado, diminuiu de 45,12 para 4,48 dias para Quartzo (respectivamente), de 46,72 para 3,6 dias para o Supera e 46,7 dias para 3,64 dias para o cultivar Sinuelo. Comparando observações de diferentes estádios de desenvolvimento ao longo das safras com as previsões do modelo WE Streck, as estimativas foram piores nos estádios de alongação com REQM de 89,6 dias e maturação fisiológica REQM de 31,9 dias. Importante salientar a calibração do modelo nas condições edafoclimáticas e nos genótipos a serem modelados.

A precisão na simulação do desenvolvimento do trigo é o primeiro passo para a simulação acurada dos componentes de produção de grãos de trigo (BANNAYAN; HOOGENBOOM; CROUT, 2004). Características genéticas dos genótipos, fotoperíodo e temperatura do ar são os principais determinantes dos estádios de desenvolvimento da cultura. A temperatura é um dos principais determinantes dos estádios fenológicos (SQUIRE, 1990). Asseng et al. (2015) relatam que a fenologia do trigo é regulada, principalmente, pela temperatura do ar. A retirada da função de vernalização do modelo WE ajustado não implicou na redução da qualidade da predição da fenologia. A comparação do modelo WE Streck e ajustado no presente estudo, evidenciaram a importância do estabelecimento dos coeficientes do modelo, devendo ser obtidos com resultados de experimentos conduzidos em diferentes condições edafoclimáticas.

Ao estudar a fenologia dos genótipos Lasani-2008, Punjab-2011 e Galaxy-2013, em diferentes locais e épocas de semeadura, com aplicação dos modelos CROPSIM-Wheat, CERES-Wheat, Nwheat, e APSIM-Wheat, Hussain (2018) obteve REQM normalizado variando de 12,3 a 35,8% e 11,1 a 59,6%, respectivamente para os genótipos. O autor constatou que a variação da fenologia simulada em relação a observada, deve-se aos diferentes ajustes nos parâmetros de entrada dos modelos utilizados na simulação. Grande variação nos resultados dos modelos, deve-se às diferentes suposições para funções dos parâmetros de entrada do modelo (BOOTE et al., 2013) como temperatura cardinal e fotoperíodo crítico.

## 5.6 VALIDAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO PARA O GENÓTIPO TORUK

No tópico 5.4, a capacidade do modelo WE ajustado em simular os estádios fenológicos de genótipos testados (Quartzto, Supera e Sinuelo) na cultura do trigo foi evidenciada. Com os resultados, buscou-se investigar então a capacidade do modelo WE ajustado, em simular os estádios propostos para um genótipo independente, ao utilizado na parametrização do modelo. Assim, aplicaram-se as modificações propostas no genótipo Toruk, cultivado no município de Ponta Grossa – PR e Itaberá – SP (Apêndice F).

Na Tabela 9 encontra-se os parâmetros estatísticos da comparação entre o dia juliano observado e estimado dos estádios de desenvolvimento de emergência, perfilhamento, alongação, emborrachamento, espigamento, antese, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita, com o modelo WE ajustado aplicado ao modelo Toruk. Nas simulações foram utilizadas as médias dos parâmetros de entrada (Tabela 5), coeficientes dos estádios fenológicos dos genótipos Quartzto, Supera e Sinuelo (Tabela 6), para simular o desenvolvimento do genótipo Toruk.

Tabela 9 – Parâmetros estatísticos de validação entre os valores estimados e observados por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ); número de observações (n); raiz do erro quadrático médio (REQM); índice de concordância (d); desempenho do modelo (c); em cada fase fenológica do genótipo Toruk.

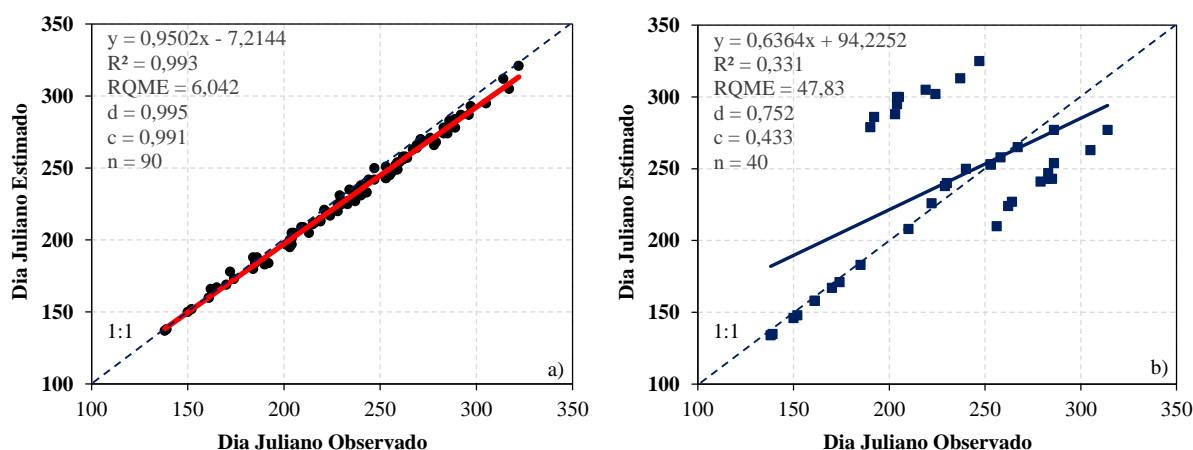
<b>Fenologia</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>n</b>	<b>REQM</b>	<b>D</b>	<b>c</b>	<b>Desempenho</b>
Emergência	0,9997	10	0,89	1,00	1,00	Ótimo
Perfilhamento	0,98	10	3,66	0,99	0,98	Ótimo
Elongação	0,95	10	6,49	0,97	0,95	Ótimo
Emborrachamento	0,99	10	5,49	0,98	0,97	Ótimo
Espigamento	0,97	10	5,76	0,98	0,96	Ótimo
Antese	0,97	10	5,78	0,97	0,96	Ótimo
Enchimento Grãos	0,98	10	7,39	0,96	0,95	Ótimo
Maturação Fisiológica	0,97	10	7,79	0,95	0,94	Ótimo
Colheita	0,96	10	7,76	0,96	0,94	Ótimo

Fonte: O Autor.

Considerando os ajustes estatísticos para a simulação do genótipo Toruk, os melhores desempenhos obtidos foram para os estádios fenológicos de emergência (REQM = 0,89 dias) e perfilhamento (REQM = 3,66 dias). O desempenho obtido foi “ótimo” para todos os estádios de desenvolvimento, com coeficiente de determinação  $R^2 > 0,95$ , índice “d”  $> 0,95$  e índice “c”  $> 0,94$  (Tabela 9). Os resultados demonstram que o ajuste dos parâmetros no processo de calibração foi adequado para o genótipo, safra e local simulado. O maior valor de REQM foi de 7,8 dias, observado no estágio de maturação fisiológica. O resultado foi superior ao obtido por Zhang e Tao (2019), na China (REQM = 3,6 dias), para predição da maturação do arroz, utilizando o modelo MCWLA-Rice acoplado a função de resposta à temperatura proposta por Wang-Engel.

Os dados de todas as datas de semeadura, safras, locais e estágio fenológicos, oriundos da simulação do genótipo Toruk foram agrupados e apresentados na Figura 11. Análises entre a fenologia observada e estimada na validação do modelo WE ajustado, considerando todos os estádios fenológicos, indicam “ótimo” desempenho, com  $R^2 = 0,99$ , REQM = 6,0 dias, índice “c” e “d” = 0,99.

Figura 11 – Dia Juliano observado vs. estimado da emergência a colheita, (a) resumo do genótipo Toruk, utilizando a média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes do modelo (Tabela e Tabela 6), (b) resumo do genótipo Toruk, com aplicação do modelo WE Streck. Linha (--) linha 1:1. Respectivos erros e índices estatísticos: y = equação de regressão;  $R^2$  = coeficiente de determinação; REQM = raiz do erro quadrático médio; d = índice de Willmott; e c = índice de desempenho. Experimentos conduzidos nas safras de inverno de 2015 e 2017, nos municípios de Ponta Grossa - PR e Itaberá – SP.



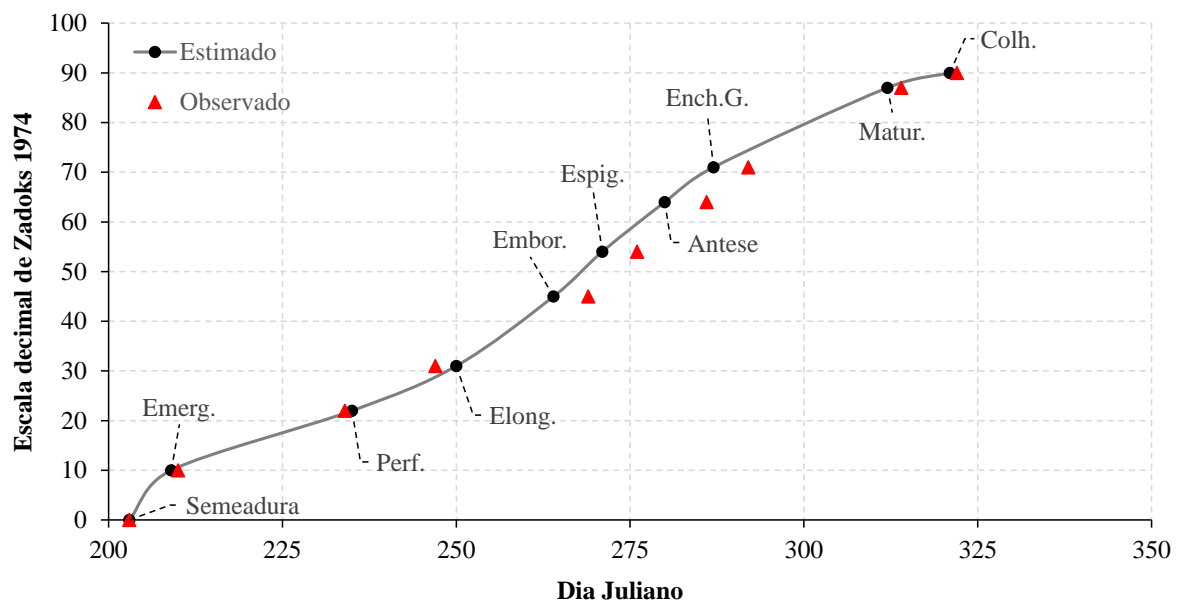
Fonte: O Autor.

O REQM para os diferentes estádios de desenvolvimento com o modelo WE ajustado obtido no presente estudo foi semelhante e, em alguns casos, se mostrou adequado que o REQM relatado em outros estudos, com diferentes cultivares e modelos de desenvolvimento.

Andarzian et al. (2015) simularam o cultivo de trigo semeado na região tropical do Irã obtendo REQM de 3,5 dias para data da antese e maturação fisiológica com um REQM de 3,0 dias. Christy et al (2020) desenvolveram um modelo de graus dias corrigido pelo fotoperíodo para prever a fenologia usando dados de mais de 200 genótipos de trigo cultivados em sete locais, abrangendo o sudeste e sul da Austrália. O modelo foi capaz de prever a espiguetta terminal e antese do trigo com REQM = 8,2 e 6,6 dias, respectivamente. Ceglar et al., (2019) ao calibrar o modelo fenológico WOFOST, conseguiram reproduzir as datas de antese e maturidade fisiológica de maneira mais confiável em zonas localizadas na Europa central, norte da França e regiões ocidentais do mar Negro, obtendo REQM inferior a 12 dias.

O modelo simulou com precisão os estádios de desenvolvimento do genótipo Toruk (Figura 12), fazendo uso da média dos parâmetros e coeficientes estudados nos cultivares Quartzo, Supera e Sinuelo, nos Campos Gerais e sul do Estado de São Paulo. Os resultados indicam que o modelo WE ajustado tem potencial de uso em outros genótipos, não é específico para um dado local e pode ser usado em diferentes condições edafoclimáticas.

Figura 12 – Comparação entre a fenologia estimada e observada para o genótipo Toruk, utilizando a média dos parâmetros de entrada e dos coeficientes o modelo (Tabela 5 e Tabela 6). Emerg. = Emergência; Perf. = Perfilhamento; Elong. = Elongação; Embor. = Emborrachamento; Espig. = Espigamento; Ench. G. = Enchimento Grãos; Matur. = Maturação fisiológica; Colh. = Colheita. Experimento conduzido no município de Ponta Grossa - PR, semeadura realizada em 22/07/2015, dia juliano 203.



Fonte: O Autor.

## 6 CONCLUSÃO

A modificação do modelo de Wang e Engel pelo acréscimo dos estádios fenológicos e retirada da função de vernalização simulou com ótimo desempenho a ocorrência dos estádios fenológicos dos genótipos de trigo cultivados na região dos Campos Gerais no Paraná e sul de São Paulo.

Os genótipos de trigo Quartzo, Supera e Sinuelo apresentam diferentes parâmetros de entrada e coeficientes do modelo WE ajustado. Entretanto, a aplicação de coeficientes obtidos dos três genótipos supracitados prevê com desempenho satisfatório os distintos estádios fenológicos.

A Avaliação do modelo fenológico WE ajustado, calibrado e validado utilizando 154 ambientes cultivo, três genótipos e cinco locais, demonstra robustez na predição dos estádios fenológicos do trigo para a região dos Campos Gerais e sul do Estado de São Paulo.

Os resultados deste estudo são aplicáveis às regiões tritícolas dos Campos Gerais – PR e sul de São Paulo, e legitimados em outros genótipos de primavera não parametrizados, conforme constatado para o genótipo Toruk.



## REFERÊNCIAS

- ALBERTO, Cleber Maus. **Simulação do balanço de água no solo cultivado com trigo com modificação de dois modelos**. 2008. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- AL-ISSAWI, M. et al. Frost Hardiness Expression and Characterisation in Wheat at Ear Emergence. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 1, p. 66–74, fev. 2013.
- ALVES, M. S. **Produtividade e qualidade de cultivares de trigo em resposta a épocas de semeadura e manejo do solo em região de clima tropical de altitude**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. 2019.
- ANDARZIAN, B. et al. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 189–199, jun. 2015.
- ASLAM, M. A. et al. Can Growing Degree Days and Photoperiod Predict Spring Wheat Phenology? **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, 25 set. 2017.
- ASSENG, S. et al. Rising temperatures reduce global wheat production. **Nature climate change**, v. 5, n. 2, p. 143, 2015.
- AUDE, M. I. S. et al. Taxa de acúmulo de matéria seca e duração do período de enchimento de grão do trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 10, p. 1533–1539, 1994.
- BACALTCHUK, B. **Qualidade dos alimentos exigida pelos consumidores no século XXI**. . In: 1 Conferência Brasileira de Pós-Colheita. AbrapósCesaEmbrapa Trigo Passo Fundo, 1999
- BANNAYAN, M.; HOOGENBOOM, G.; CROUT, N. M. J. Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. **Ecological Modelling**, v. 180, n. 2–3, p. 277–290, dez. 2004.
- BARLOW, K. M. et al. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. **Field Crops Research**, v. 171, p. 109–119, fev. 2015.
- BAUMGRATZ, Edilson Inácio. Produção de trigo A decisão por análise econômico-financeira. **Revista de Política Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 8-21, 2017.
- BECHE, E. et al. Improvement in Brazilian wheat breeding: changes in developmental phases and ecophysiological traits. **Euphytica**, v. 214, n. 3, p. 56, 2018.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. O milho e o clima. **Porto Alegre: Emater/RS-Ascar**, p. 84, 2014.
- BERNARDES, T. **Modelagem de dados espectrais e agrometeorológicos para estimativa da produtividade de café**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
- BOOTE, K. J. et al. Putting mechanisms into crop production models: Putting mechanisms into crop production models. **Plant, Cell & Environment**, v. 36, n. 9, p. 1658–1672, set. 2013.

BORÉM, A.; SCHEEREN, P. Trigo: do plantio à colheita. **Embrapa Trigo-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2015.

BOUZZAMA, B. et al. Triticum aestivum L. Growth and yield under different water regimes. p. 9, 2017. In: ROSA, S.L.K.; SOUZA, J.L.M. de; TSUKAHARA, R.Y. Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, e01238, 2020.

BRUM, A. L.; MÜLLER, P. K. A realidade da cadeia do trigo no Brasil: o elo produtores/cooperativas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, n. 1, p. 145–169, mar. 2008.

CAIERÃO, E. et al. Análise da adaptabilidade e da estabilidade de genótipos de trigo como ferramenta auxiliar na recomendação de novas cultivares. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1112–1117, 2006.

CAIERÃO, E. et al. Use of Embrapa's germplasm in Brazilian wheat breeding programs. **Ciência Rural**, v. 44, n. 1, p. 57–63, 2014.

CÂMARA, G. M. DE S. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção. **Visão Agrícola**, v. 3, n. 5, p. 63–66, 2006.

CAMARGO, A. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Ecofisiologia da Aveia Branca. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, n. 3, p. 1–15, 30 set. 2012.

CASTRO, P. R. DE C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos. 2008.

CASTRO, P. R.; KLUGE, R. A. **Ecofisiologia de cultivos anuais**. [s.l.] NBL Editora, 1999.

CEGLAR, A. et al. The simulation of phenological development in dynamic crop model: The Bayesian comparison of different methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 1, p. 101–115, jan. 2011.

CEGLAR, A. et al. Improving WOFOST model to simulate winter wheat phenology in Europe: Evaluation and effects on yield. **Agricultural Systems**, v. 168, p. 168–180, jan. 2019.

CHENU, K. et al. Contribution of Crop Models to Adaptation in Wheat. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 6, p. 472–490, jun. 2017.

CHRISTY, B. et al. An allelic based phenological model to predict phasic development of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Field Crops Research**, p. 107722, jan. 2020.

CLIMATE PREDICTION CENTER. **National Weather Service Climate Prediction Center**, 2020. Disponível em: <<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>>. Acesso em: 4 jan. 2020

- CONAB. Acompanhamento de Safra Brasileira de Grãos. **Safra 2016/2017**, Dez. 2017.
- CONAB. Acompanhamento de Safra Brasileira de Grãos. **Safra 2019**, Dez. 2019.
- COSTA, M. DAS G. DA et al. Qualidade tecnológica de grãos e farinhas de trigo nacionais e importados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 220–225, mar. 2008.
- CRUZ, P. G. DA et al. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 7, p. 675–681, jul. 2011.
- CUNHA, G. R. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Curitiba. Sophos. 2009.
- CUNHA, G. R.; BACALTCHUK, B. Tecnologia para produzir trigo no Rio Grande do Sul. **Embrapa Trigo-Livro científico (ALICE)**, 2000.
- CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F. **Germinação pré-colheita em trigo**. [s.l.] Embrapa Trigo, 2004.
- DE MORI, C. et al. Trigo: o produtor pergunta, a Embrapa responde. **Embrapa Trigo-Col Criar Plantar ABC 500P/500R Saber (INFOTECA-E)**, 2016.
- DE MORI, C.; IGNACZAK, J. C. Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo. **Embrapa Trigo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2011.
- DOORENBOS; KASSAM. “Yield response to water.” **Irrigation and drainage paper 33**, 1979.
- DRECCER, M. F. et al. Comparison of sensitive stages of wheat, barley, canola, chickpea and field pea to temperature and water stress across Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 275–294, jan. 2018.
- EMBRAPA, T. **Trigo em números**. Socioeconomia. Janeiro, 2014.
- EVERS, J. B. et al. An architectural model of spring wheat: Evaluation of the effects of population density and shading on model parameterization and performance. **Ecological Modelling**, v. 200, n. 3–4, p. 308–320, jan. 2007.
- FAN, Y. et al. Winter night warming improves pre-anthesis crop growth and post-anthesis photosynthesis involved in grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Field Crops Research**, v. 178, p. 100–108, jul. 2015.
- FAROOQ, M. et al. Heat Stress in Wheat during Reproductive and Grain-Filling Phases. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 30, n. 6, p. 491–507, nov. 2011.
- FERRANTE, A.; SAVIN, R.; SLAFER, G. A. Floret development of durum wheat in response to nitrogen availability. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 15, p. 4351–4359, 1 out. 2010.
- FISCHER, R. A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. **The Journal of Agricultural Science**, v. 105, n. 2, p. 447–461, out. 1985.

FISCHER, R. A. The importance of grain or kernel number in wheat: A reply to Sinclair and Jamieson. **Field Crops Research**, v. 105, n. 1–2, p. 15–21, jan. 2008.

FISHER, J. E. Developmental morphology of the inflorescence in hexaploid wheat cultivars with and without the cultivar norin 10 in their ancestry. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 53, n. 1, p. 7–15, 1 jan. 1973.

FITZGERALD, G. J. et al. Frost Damage Assessment in Wheat Using Spectral Mixture Analysis. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, p. 2476, 24 out. 2019.

FLOHR, B. M. et al. Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia. **Field Crops Research**, v. 209, p. 108–119, 2017.

FONTOURA, S. M. V.; BARTH, G. Recomendação de adubação para altos rendimentos (Soja, Milho, Trigo e Feijão). 2015.

FRANCESCHI, L. DE et al. Fatores pré-colheita que afetam a qualidade tecnológica de trigo. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1625–1632, 3 abr. 2009.

FRITZSONS et al. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no Estado do Paraná. v. 10, n. 1, p. 49–64, 2008.

FULLER, M. P. et al. The freezing characteristics of wheat at ear emergence. **European Journal of Agronomy**, v. 26, n. 4, p. 435–441, maio 2007.

GARCÍA, G. A. et al. Post-anthesis warm nights reduce grain weight in field-grown wheat and barley. **Field Crops Research**, v. 195, p. 50–59, ago. 2016.

GOMES, A. C. DOS S. et al. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 44, n. 1, p. 43–49, 1 nov. 2013.

GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A.; MIRALLES, D. J. Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. **Field Crops Research**, v. 74, n. 2–3, p. 183–195, 2002.

GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A.; MIRALLES, D. J. Floret development and survival in wheat plants exposed to contrasting photoperiod and radiation environments during stem elongation. **Functional Plant Biology**, v. 32, n. 3, p. 189, 2005.

HAYS, D. B. et al. Heat stress induced ethylene production in developing wheat grains induces kernel abortion and increased maturation in a susceptible cultivar. **Plant Science**, v. 172, n. 6, p. 1113–1123, jun. 2007.

HERNANDEZ NOPSA, J. F. et al. Differential accumulation of deoxynivalenol in two winter wheat cultivars varying in FHB phenotype response under field conditions. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 34, n. 3, p. 380–389, jul. 2012.

HERNDL, M. et al. Field-based evaluation of vernalization requirement, photoperiod response and earliness per se in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Field Crops Research**, v. 105, n. 3, p. 193–201, fev. 2008.

HOLZWORTH, D. P.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G. Simple software processes and tests improve the reliability and usefulness of a model. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 4, p. 510–516, abr. 2011.

HUNT, J. et al. **Wheat phenology and the drivers for yield in the high rainfall zone**. Climate Science. London. 2018.

HUNT, J. R. et al. Early sowing systems can boost Australian wheat yields despite recent climate change. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 3, p. 244–247, 2019.

HUSSAIN, J. et al. Performance of four crop model for simulations of wheat phenology, leaf growth, biomass and yield across planting dates. **PLOS ONE**, v. 13, n. 6, p. e0197546, 14 jun. 2018.

JUNGES, A. H. et al. Avaliação das perdas de rendimento de trigo na safra de 2006 por meio da análise de temperaturas mínimas do ar e de superfície na região do norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 01, p. p-01, 2010.

KARANDISH, F.; MOUSAVI, S. S.; TABARI, H. Climate change impact on precipitation and cardinal temperatures in different climatic zones in Iran: analyzing the probable effects on cereal water-use efficiency. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 31, n. 8, p. 2121–2146, out. 2017.

KEHL, Kassiana. **Potencial de rendimento, qualidade industrial e fisiológica de sementes de trigo cultivado em diferentes regiões tritícolas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas. 2013.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação técnica e operacional de sistema de beneficiamento de trigo operando na região norte do Paraná. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 9, n. 2, p. 214–218, 2015.

LARGE, E. C. Growth stages in cereals illustration of the Feekes scale. **Plant pathology**, v. 3, n. 4, p. 128–129, 1954.

LEÓN, A. E. et al. **De tales harinas, tales panes**. Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica. [s.l.] ISEKI-Food, 2007.

LOBELL, D. B.; GOURDJI, S. M. The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1686–1697, dez. 2012.

LOBELL, D. B.; SIBLEY, A.; ORTIZ-MONASTERIO, J. I. Extreme heat effects on wheat senescence in India. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 3, p. 186–189, 2012.

MANGINI, G. et al. Genetic dissection of the relationships between grain yield components by genome-wide association mapping in a collection of tetraploid wheats. **PLOS ONE**, v. 13, n. 1, p. e0190162, 11 jan. 2018.

MANSOUR, A. I.; ABU-NASER, S. S. Expert System for the Diagnosis of Wheat Diseases. **International Journal of Academic Information Systems Research (IJAIRS)**. Vol. 3 Issue 4, April – 2019, Pages: 19-26. 2019.

MARTÍN, M. M.-S.; OLESEN, J. E.; PORTER, J. R. A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 187, p. 1–13, abr. 2014.

MARTÍNEZ, L. A. et al. TEMPERATURE EFFECTS ON PROTEIN AND CARBOHYDRATES METABOLISM AND THE VEGETATION INDEX IN WHEAT (*Triticum durum* L.). v. 39, n. 3, p. 10, 2018.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1091–1100, ago. 2007.

MCMMASTER, G. S. et al. Winter Wheat Phenology Simulations Improve when Adding Responses to Water Stress. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 5, p. 2350–2360, set. 2019.

MICROSOFT. **Definir e resolver um problema usando o Solver**. 18 de maio de 2020.

MONTEIRO, J. E. B. DE A. et al. Modeling of corn yield in Brazil as a function of meteorological conditions and technological level. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 3, p. 137–148, mar. 2017.

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

MORAES, A. V. D. C. et al. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, v. 57, n. 2, p. 393–406, 1998.

MOTA, F. DA. **Agrometeorologia do trigo no Brasil**. [s.l.] Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Brasília. 1989.

NAZIM UD DOWLA, M. A. N. et al. Developing Wheat for Improved Yield and Adaptation Under a Changing Climate: Optimization of a Few Key Genes. **Engineering**, v. 4, n. 4, p. 514–522, ago. 2018.

NITSCHKE, P. et al. Atlas Climático do Estado do Paraná. **Londrina, PR: IAPAR**, 2019.

NUTTALL, J. et al. Models of grain quality in wheat—A review. **Field Crops Research**, v. 202, p. 136–145, 2017.

NUTTALL, J. G. et al. Frost response in wheat and early detection using proximal sensors. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 205, n. 2, p. 220–234, abr. 2019.

OLIBONI, R. Caracterização de ambientes para seleção de genótipos de trigo no sul do Brasil. 2018.

OSAKABE, Y. et al. Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, 13 mar. 2014.

PAFF, K.; ASSENG, S. A review of tef physiology for developing a tef crop model. **European Journal of Agronomy**, v. 94, p. 54–66, mar. 2018.

PASK, A. et al. **Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping**. [s.l.] Cimmyt, 2012.

PEDRÓ, A.; SAVIN, R.; SLAFER, G. A. Crop productivity as related to single-plant traits at key phenological stages in durum wheat. **Field Crops Research**, v. 138, p. 42–51, out. 2012.

PENCKOWSKI, L. H.; ZAGONEL, J.; FERNANDES, E. C. Qualidade industrial do trigo em função do trinexapac-ethyl e doses de nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 6, p. 1492–1499, dez. 2010.

PEREIRA, R. A. DE A. **Balço de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste brasileiro**. São Paulo. Editora da USP. 2018.

PERRY, E. M. et al. In-field methods for rapid detection of frost damage in Australian dryland wheat during the reproductive and grain-filling phase. **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 6, p. 516, 2017.

PILBEAM, D. J. The Utilization of Nitrogen by Plants: A Whole Plant Perspective. In: ROBERTS, J. A. (Ed.). **Annual Plant Reviews online**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2018. p. 305–351.

PINTO, V. C. et al. DEFICIÊNCIA HÍDRICA PARA O TRIGO SEMEADO NO INÍCIO DE JUNHO EM PONTA GROSSA-PR. 2019.

PIRES, J. L. F. et al. Integração de práticas de manejo no sistema de produção de trigo. **Embrapa Trigo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2011.

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. **European Journal of Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 23–36, jan. 1999.

POUR-ABOUGHADAREH, A. et al. Insight into the genetic variability analysis and relationships among some *Aegilops* and *Triticum* species, as genome progenitors of bread wheat, using SCoT markers. **Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology**, v. 152, n. 4, p. 694–703, 4 jul. 2018.

PRADHAN, G. P. et al. Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 3, p. 190, 2012.

PRIETO, P. et al. Physiological determinants of fertile floret survival in wheat as affected by earliness per se genes under field conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 99, p. 206–213, set. 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. [s.l.] Manole Barueri, 2004.

REYNOLDS, M. et al. Raising yield potential in wheat. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 7, p. 1899–1918, maio 2009.

REZAEI, E. E. et al. Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 4891, 2018.

RIBAS et al. Estimativa das alterações de temperatura no ciclo de cultivo de trigo e cevada para o ano de 2050 em Guarapuava, Paraná - Brasil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 11, p. 41–49, 2018.

RODRIGUES, O. Manejo de trigo: bases ecofisiológicas. CUNHA, G. R.; BACALTCHUK, B. (Orgs). **Tecnologia para produzir trigo no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Assembléia Legislativa. Comissão de Agricultura, Pecuária e Cooperativismo/Passo Fundo: Embrapa Trigo, p. 120–155, 2000.

RODRIGUES, O. **Modelo para previsão de estádios de desenvolvimento em trigo**. [s.l.] Embrapa Trigo, 2001.

RODRIGUES, O. et al. Ecofisiologia de trigo: bases para elevado rendimento de grãos. **Embrapa Trigo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2011.

RODRIGUES, O. et al. Influence of Vernalization and Photoperiod on the Duration of Stem Elongation and Spikelet Fertility in Wheat. **Agricultural Sciences**, v. 5, n. 14, p. 1547, 2014.

ROSA, S. L. K.; SOUZA, J. L. M. DE; TSUKAHARA, R. Y. Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, 2020.

RUDORFF, B.; BATISTA, G. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 183–192, set. 1990.

SANTOS, D. DOS et al. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 836–842, ago. 2012.

SANTOS, M. E. R. et al. Estrutura do dossel e características de perfilhos em pastos de Capim-Piatã manejados com doses de nitrogênio e períodos de diferimento variáveis. **Ciência Animal Brasileira**, v. 18, n. 0, 21 ago. 2017.

SCHEEREN, P. L. et al. **Efeito do frio em trigo**. São Paulo. Editora Universitas, 2000.

SCHEUER, P. M. et al. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 2, p. 211–222, 2011.

SERRAGO, R. A.; MIRALLES, D. J.; SLAFER, G. A. Floret fertility in wheat as affected by photoperiod during stem elongation and removal of spikelets at booting. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 301–308, abr. 2008.

SHAH, N. H.; PAULSEN, G. M. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. **Plant and Soil**, v. 257, n. 1, p. 219–226, nov. 2003.

SHROYER, J. P.; MIKESELL, M. E.; PAULSEN, G. M. **Spring freeze injury to Kansas wheat**. [s.l.] Cooperative Extension Service, Kansas State University, 1995.

SIEBER, S. et al. Trans-SEC's food security research in Tanzania: principles, research models and assumptions. **Food Security**, v. 9, n. 6, p. 1147–1155, dez. 2017.

SILVA, E. P. DA. **Respostas de trigo à geada**. São Paulo. Editora Universitas. 2008.



SLAFER, G. Wheat development: its role in phenotyping and improving crop adaptation. **Physiological breeding I: interdisciplinary approaches to improve crop adaptation'**. (Eds MP Reynolds, AJD Pask, DM Mullan) pp, p. 107–121, 2012.

SLAFER, G. A. et al. Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. **Euphytica**, v. 119, n. 1/2, p. 191–197, 2001.

SLAFER, G. A. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. **Annals of Applied Biology**, v. 142, n. 2, p. 117–128, abr. 2003.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. **Functional Plant Biology**, v. 21, n. 4, p. 393–426, 1994.

SQUIRE, G. R. **The physiology of tropical crop production**. [s.l.] CAB International, 1990.

STEDUTO, P. et al. **Crop yield response to water**. [s.l.] fao Rome, 2012. v. 1028

STONE, P.; NICOLAS, M. Wheat Cultivars Vary Widely in Their Responses of Grain Yield and Quality to Short Periods of Post-Anthesis Heat Stress. **Functional Plant Biology**, v. 21, n. 6, p. 887, 1994.

STRECK, L. C. W. N. A.; ROSA, H. T. Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de cultivares de trigo e sua associação com a emissão de folhas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 8, p. 2320–2326, 2009.

STRECK, N. A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.), **Climate Journal**, v. 10, n. 1, p. 105–111, 2002.

STRECK, N. A. Incorporating a Chronology Response into the Prediction of Leaf Appearance Rate in Winter Wheat. **Annals of Botany**, v. 92, n. 2, p. 181–190, 2003a.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3–4, p. 139–150, 2003b.

STRECK, N. A. et al. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 1, p. 1–11, jan. 2007.

STRECK, N. A. et al. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 4, p. 449–455, abr. 2008.

TAGLIARI LAZZARETTI, A.; FERNANDES, J. M.; PAVAN, W. Calibração do cropsim-wheat para simulação do desenvolvimento e rendimento de grão de trigo no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2017.

TANAKA LIMA PARREIRA RIBEIRO et al. Respostas fenológicas de cultivares brasileiras de trigo à vernalização e ao fotoperíodo. v. 44, p. 1383–1390, 2009.

TASHIRO, T.; WARDLAW, I. The Response to High Temperature Shock and Humidity Changes Prior to and During the Early Stages of Grain Development in Wheat. **Functional Plant Biology**, v. 17, n. 5, p. 551, 1990.

TREVASKIS, B. et al. The molecular basis of vernalization-induced flowering in cereals. **Trends in Plant Science**, v. 12, n. 8, p. 352–357, ago. 2007.

TSUKAHARA, R. Y. et al. Pesquisa e divulgação técnica de informações agrometeorológicas aos associados das cooperativas ABC. **Agrometeoros**, v. 24, n. 1, 2015.

TSUKAHARA, R. Y. **Momento de colheita e tratamento fungicida na sanidade e produtividade de híbridos de milho em diferentes ambientes**. Tese de Doutorado. 134 p. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2016.

TSUKAHARA, R. Y. et al. Produtividade de soja em consequência do atraso da colheita e de condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 8, p. 905–915, ago. 2016.

TUZZIN DE MORAES, M.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. MODELAGEM DA DINÂMICA DA ÁGUA EM SISTEMAS DE PREPARO DE UM LATOSSOLO VERMELHO. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 142, 10 abr. 2018.

VAVILOV. Em The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. n. 13, 50 1949.

VERMA, S. P.; PATHAK, V. N.; VERMA, O. P. Interrelationship between Yield and its Contributing Traits in Wheat (*Triticum aestivum* L). **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 8, n. 02, p. 3209–3215, 20 fev. 2019.

WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. A. Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 11, p. 1237–1245, nov. 2010.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural systems**, v. 58, n. 1, p. 1–24, 1998.

WANG, J. et al. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 144, p. 135–144, 2013.

WARDLAW, I.; MONCUR, L. The Response of Wheat to High Temperature Following Anthesis. I. The Rate and Duration of Kernel Filling. **Functional Plant Biology**, v. 22, n. 3, p. 391, 1995.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309–1313, 1982.

WREGE, M. S. et al. RISCO DE OCORRÊNCIA DE GEADAS NA REGIÃO CENTRO-SUL DO BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

WU, L. et al. Comparison of Five Wheat Models Simulating Phenology under Different Sowing Dates and Varieties. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 4, p. 1280, 2017.

WU, Y. et al. Combine observational data and modelling to quantify cultivar differences of soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 111, p. 125940, nov. 2019.

XIE, Y. et al. Grain yield and water use of winter wheat as affected by water and sulfur supply in the North China Plain. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 614–625, mar. 2017.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting phenological development in winter wheat. **Climate Research**, v. 25, n. 3, p. 243–252, 2004a.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field-grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, v. 175, n. 3, p. 261–270, jul. 2004b.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed research**, v. 14, n. 6, p. 415–421, 1974.

ZANON, A. J. et al. **Ecofisiologia da Soja Visando Altas Produtividades**. [s.l.] Santa Maria: Santa Maria: Palloti/SM, 2018.

ZAREEF, M. et al. An Overview on the Applications of Typical Non-linear Algorithms Coupled With NIR Spectroscopy in Food Analysis. **Food Engineering Reviews**, p. 1–18, 2020.

ZHANG, S.; TAO, F. Improving rice development and phenology prediction across contrasting climate zones of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 224–233, abr. 2019.

ZHANG, T.; ZHU, J.; YANG, X. Non-stationary thermal time accumulation reduces the predictability of climate change effects on agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1412–1418, set. 2008.

ZIMMERMANN, L. DE O. G. et al. Avaliação físico-química e reológica das principais farinhas de trigo comercializadas em padarias do município de Cascavel. **Anais do I Seminário Internacional de Ciência, Tecnologia e Ambiente**. UNIOESTE, Cascavel–Paraná, 2009.

**APÊNDICE A - ESCALA DECIMAL DE DESENVOLVIMENTO DOS CEREAIS  
SEGUNDO ZADOKS et al. (1974).**

<b>Código</b>	<b>Estádio Fenológico</b>
<b>0</b>	<b>Germinação</b>
00	Semente seca
01	Início da embebição
02	-
03	Embebição completa
04	-
05	Emergência da radícula
06	-
07	Coleóptilo emergido
08	-
09	Folha no ápice do coleóptilo
<b>1</b>	<b>Primeira folha através do coleóptilo</b>
11	Primeira folha aberta
12	Duas folhas abertas
13	Três folhas abertas
14	Quatro folhas abertas
15	Cinco folhas abertas
16	Seis folhas abertas
17	Sete folhas abertas
18	Oito folhas abertas
19	Nove ou mais folhas abertas
<b>2</b>	<b>Afilhamento</b>
20	Somente o colmo principal
21	Colmo principal e um afilho
22	Colmo principal e dois afilhos
23	Colmo principal e três afilhos
24	Colmo principal e quatro afilhos
25	Colmo principal e cinco afilhos
26	Colmo principal e seis afilhos
27	Colmo principal e sete afilhos
28	Colmo principal e oito afilhos
29	Colmo principal e nove ou mais afilhos
<b>3</b>	<b>Alongamento</b>
30	Pseudocolmo ereto
31	Primeiro no visível
32	Segundo no visível
33	Terceiro no visível
34	Quarto no visível

35	Quinto no visível
36	Sexto no visível
37	Folha bandeira recém visível
38	-
39	Lígula da folha bandeira recém visível
<b>4</b>	<b>Emborrachamento</b>
41	Bainha da folha bandeira em extensão
42	-
43	Início do emborrachamento
44	-
45	Emborrachamento completo
46	-
47	Abertura da bainha da folha bandeira
48	-
49	Primeiras aristas visíveis
<b>5</b>	<b>Emergência da inflorescência</b>
50	Primeira espiguetta da inflorescência recém visível
51	-
52	Um quarto das inflorescências emergidas
53	-
54	Metade das inflorescências emergidas
55	-
56	Três quartos das inflorescências emergidas
57	-
58	Emergência completa das inflorescências
59	-
<b>6</b>	<b>Antese</b>
60	Início da antese
61	-
62	-
63	-
64	Metade da antese completa
65	-
66	-
67	-
68	Antese completa
69	-
<b>7</b>	<b>Desenvolvimento do grão leitoso</b>
71	Cariopse aquosa

72	-
73	Início do estado leitoso
74	-
75	Estado leitoso
76	-
77	Final do estado leitoso
78	-
79	-
<b>8</b>	<b>Desenvolvimento do grão em massa</b>
80	-
81	-
82	-
83	Início do estado de massa
84	-
85	Estado de massa mole
86	-
87	Estado de massa dura
88	-
89	-
<b>9</b>	<b>Maturação</b>
91	Cariopse dura (difícil dividir com a unha)
92	Cariopse dura (não pode ser dividida com a unha)
93	Cariopse soltando-se durante o dia
94	Sobre maturação, palha seca e quebradiça
95	Semente dormente
96	Semente viável com 50% de germinação
97	Semente não dormente
98	Dormência secundária induzida
99	Dormência secundária perdida

**APÊNDICE B – SÉRIE TEMPORAL DOS DADOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO  
E VALIDAÇÃO DO MODELO WE AJUSTADO.**



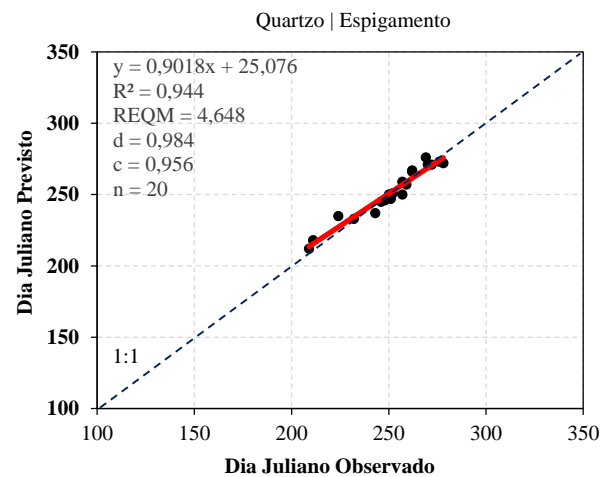
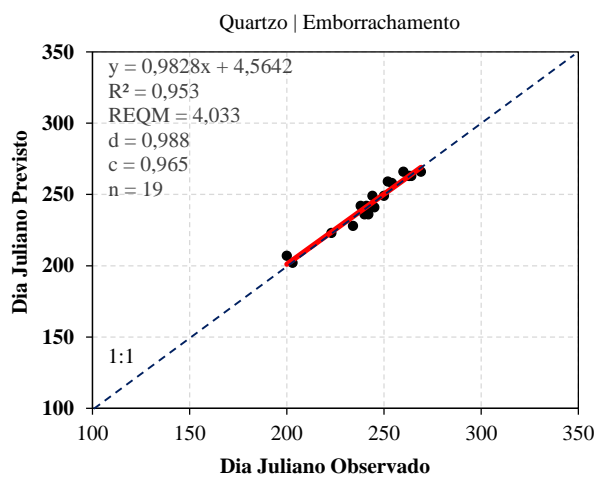
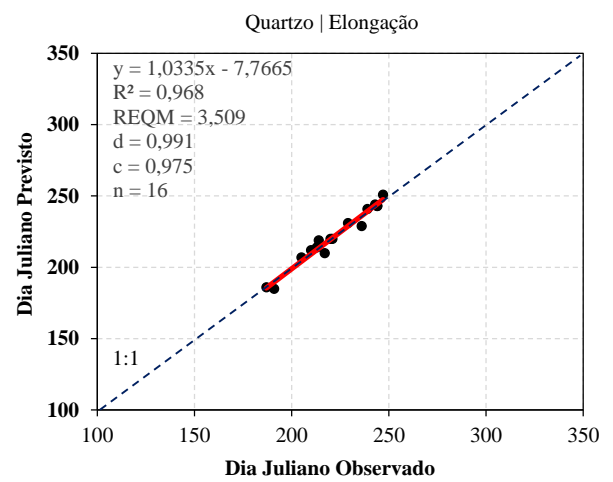
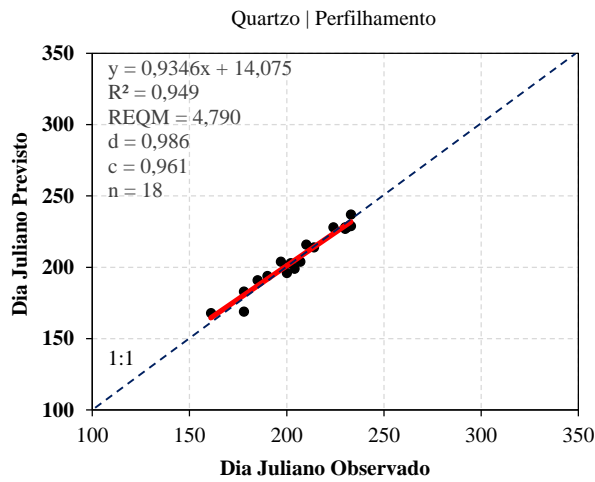
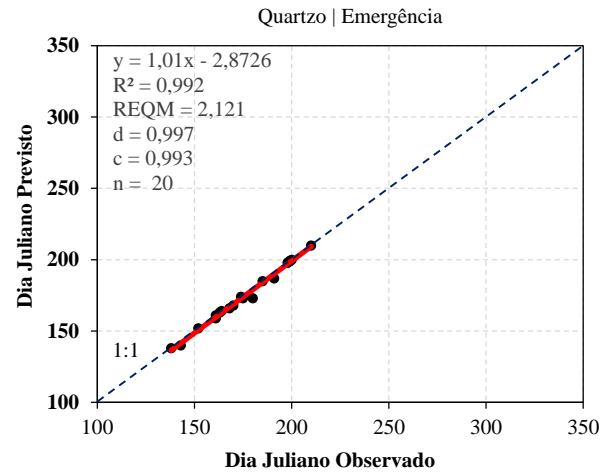
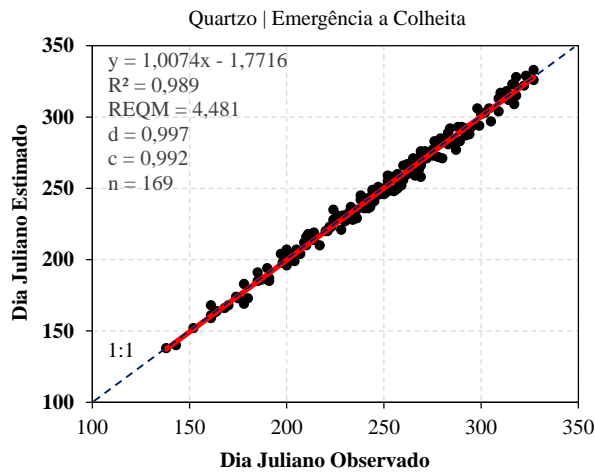
<b>Safra</b>	<b>Local</b>	<b>Genótipo</b>	<b>Data Semeadura</b>	<b>Condição ENOS</b>	<b>Proposito</b>
2007	Castro-PR	Supera	06/07/2007	La Niña	Calibração
2008	Ponta Grossa-PR	Supera	18/06/2008	Neutro	Calibração
2008	Ponta Grossa-PR	Supera	27/06/2008	Neutro	<b>Validação</b>
2008	Ponta Grossa-PR	Supera	07/07/2008	Neutro	Calibração
2008	Ponta Grossa-PR	Supera	17/07/2008	Neutro	Calibração
2009	Arapoti-PR	Supera	19/05/2009	Neutro	Calibração
2009	Castro-PR	Supera	19/06/2009	El Niño	<b>Validação</b>
2009	Castro-PR	Supera	08/07/2009	El Niño	Calibração
2009	Castro-PR	Supera	17/07/2009	El Niño	<b>Validação</b>
2010	Arapoti-PR	Quartzo	13/05/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Quartzo	13/05/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Arapoti-PR	Quartzo	31/05/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Quartzo	02/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Quartzo	18/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Supera	13/05/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Arapoti-PR	Supera	13/05/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Supera	31/05/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Supera	02/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Arapoti-PR	Supera	18/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Castro-PR	Quartzo	08/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Castro-PR	Quartzo	08/06/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Castro-PR	Quartzo	29/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Castro-PR	Quartzo	29/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Castro-PR	Quartzo	30/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Itaberá-SP	Quartzo	13/05/2010	La Niña	Calibração
2010	Itaberá-SP	Quartzo	01/06/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Ponta Grossa-PR	Quartzo	10/06/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Ponta Grossa-PR	Quartzo	10/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Ponta Grossa-PR	Quartzo	21/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Ponta Grossa-PR	Quartzo	30/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Ponta Grossa-PR	Supera	10/06/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Ponta Grossa-PR	Supera	10/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Ponta Grossa-PR	Supera	21/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Ponta Grossa-PR	Supera	21/06/2010	La Niña	Calibração
2010	Ponta Grossa-PR	Supera	21/06/2010	La Niña	<b>Validação</b>
2010	Ponta Grossa-PR	Supera	09/07/2010	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Quartzo	31/05/2011	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Quartzo	15/06/2011	La Niña	<b>Validação</b>

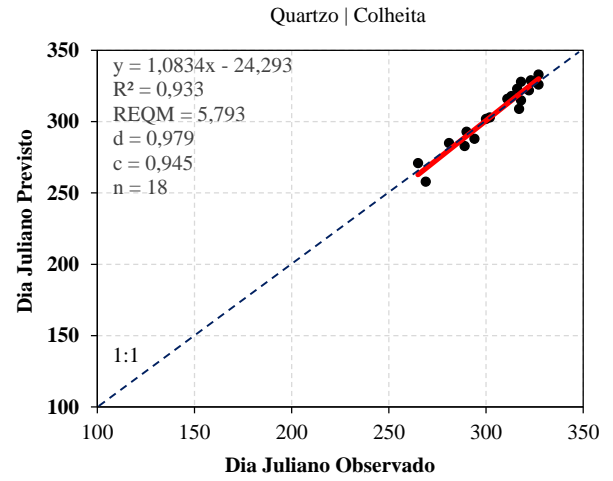
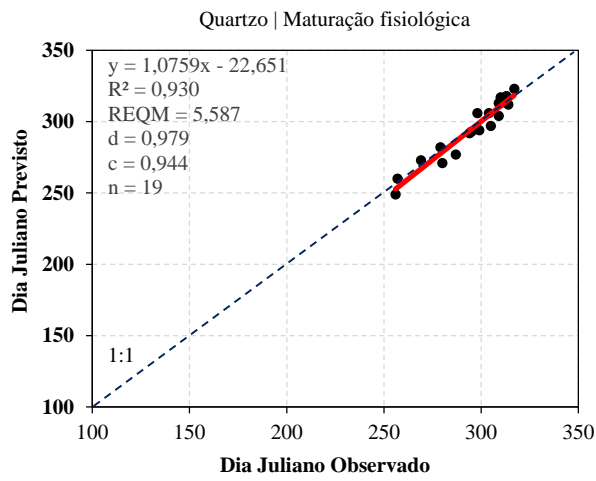
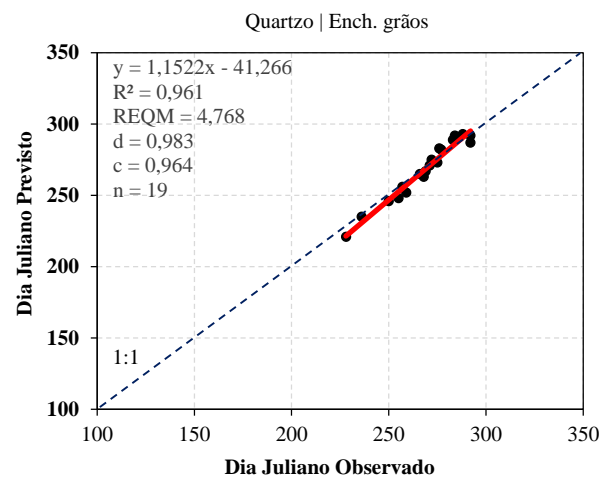
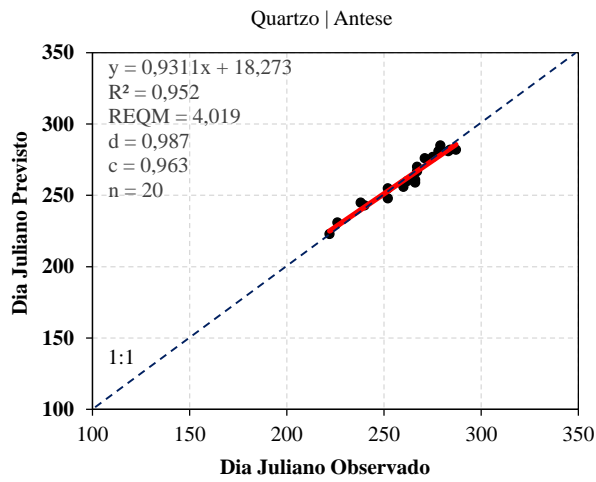
2011	Castro-PR	Quartzo	15/06/2011	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Quartzo	15/06/2011	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Quartzo	28/06/2011	La Niña	<b>Validação</b>
2011	Castro-PR	Quartzo	12/07/2011	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Supera	31/05/2011	La Niña	<b>Validação</b>
2011	Castro-PR	Supera	15/06/2011	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Supera	15/06/2011	La Niña	<b>Validação</b>
2011	Castro-PR	Supera	28/06/2011	La Niña	Calibração
2011	Castro-PR	Supera	12/07/2011	La Niña	Calibração
2012	Arapoti-PR	Quartzo	14/06/2012	Neutro	Calibração
2012	Arapoti-PR	Quartzo	14/06/2012	Neutro	<b>Validação</b>
2012	Castro-PR	Quartzo	29/06/2012	Neutro	Calibração
2012	Ponta Grossa-PR	Quartzo	18/05/2012	Neutro	Calibração
2012	Ponta Grossa-PR	Quartzo	18/05/2012	Neutro	Calibração
2012	Ponta Grossa-PR	Quartzo	15/06/2012	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Quartzo	05/06/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Castro-PR	Quartzo	12/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Quartzo	09/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Quartzo	10/07/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Castro-PR	Quartzo	16/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Quartzo	16/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Supera	05/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Supera	12/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Supera	09/07/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Castro-PR	Supera	10/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Castro-PR	Supera	16/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Quartzo	07/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Quartzo	13/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Quartzo	11/07/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Itaberá-SP	Quartzo	18/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Quartzo	18/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Supera	07/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Supera	13/06/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Itaberá-SP	Supera	11/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Itaberá-SP	Supera	18/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Ponta Grossa-PR	Quartzo	06/06/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Ponta Grossa-PR	Quartzo	06/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Ponta Grossa-PR	Quartzo	11/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Ponta Grossa-PR	Quartzo	10/07/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Ponta Grossa-PR	Quartzo	10/07/2013	Neutro	Calibração

2013	Ponta Grossa-PR	Quartzo	17/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Ponta Grossa-PR	Supera	06/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Ponta Grossa-PR	Supera	11/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Ponta Grossa-PR	Supera	10/07/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Ponta Grossa-PR	Supera	17/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Quartzo	04/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Quartzo	14/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Quartzo	12/07/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Tibagi-PR	Quartzo	25/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Quartzo	25/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Supera	04/06/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Supera	14/06/2013	Neutro	<b>Validação</b>
2013	Tibagi-PR	Supera	12/07/2013	Neutro	Calibração
2013	Tibagi-PR	Supera	25/07/2013	Neutro	Calibração
2014	Castro-PR	Quartzo	17/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Castro-PR	Quartzo	11/07/2014	Neutro	Calibração
2014	Castro-PR	Quartzo	11/07/2014	Neutro	<b>Validação</b>
2014	Castro-PR	Sinuelo	17/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Castro-PR	Sinuelo	11/07/2014	Neutro	<b>Validação</b>
2014	Itaberá-SP	Sinuelo	03/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	04/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	04/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	16/06/2014	Neutro	<b>Validação</b>
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	16/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	26/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	28/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	10/07/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Quartzo	10/07/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	04/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	04/06/2014	Neutro	<b>Validação</b>
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	16/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	16/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	26/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	28/06/2014	Neutro	<b>Validação</b>
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	10/07/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	10/07/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Supera	04/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Supera	16/06/2014	Neutro	<b>Validação</b>
2014	Ponta Grossa-PR	Supera	26/06/2014	Neutro	Calibração
2014	Ponta Grossa-PR	Supera	10/07/2014	Neutro	Calibração

2015	Itaberá-SP	Sinuelo	18/05/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	03/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	03/06/2015	El Niño	<b>Validação</b>
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	03/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	18/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	29/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	22/07/2015	El Niño	<b>Validação</b>
2015	Ponta Grossa-PR	Quartzo	22/07/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	03/06/2015	El Niño	<b>Validação</b>
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	03/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	03/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	18/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	29/06/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	22/07/2015	El Niño	Calibração
2015	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	22/07/2015	El Niño	<b>Validação</b>
2016	Itaberá-SP	Sinuelo	15/06/2016	Neutro	<b>Validação</b>
2016	Itaberá-SP	Sinuelo	13/07/2016	La Niña	Calibração
2016	Itaberá-SP	Supera	15/06/2016	Neutro	Calibração
2016	Itaberá-SP	Supera	13/07/2016	La Niña	Calibração
2016	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	04/07/2016	La Niña	Calibração
2017	Itaberá-SP	Quartzo	11/05/2017	Neutro	<b>Validação</b>
2017	Itaberá-SP	Quartzo	23/05/2017	Neutro	Calibração
2017	Itaberá-SP	Quartzo	16/06/2017	Neutro	Calibração
2017	Itaberá-SP	Quartzo	28/06/2017	Neutro	Calibração
2017	Itaberá-SP	Sinuelo	11/05/2017	Neutro	Calibração
2017	Itaberá-SP	Sinuelo	23/05/2017	Neutro	Calibração
2017	Itaberá-SP	Sinuelo	16/06/2017	Neutro	<b>Validação</b>
2017	Itaberá-SP	Sinuelo	28/06/2017	Neutro	Calibração
2017	Ponta Grossa-PR	Quartzo	12/05/2017	Neutro	Calibração
2017	Ponta Grossa-PR	Quartzo	25/05/2017	Neutro	<b>Validação</b>
2017	Ponta Grossa-PR	Quartzo	12/06/2017	Neutro	Calibração
2017	Ponta Grossa-PR	Quartzo	27/06/2017	Neutro	<b>Validação</b>
2017	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	12/05/2017	Neutro	Calibração
2017	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	25/05/2017	Neutro	Calibração
2017	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	12/06/2017	Neutro	Calibração
2017	Ponta Grossa-PR	Sinuelo	27/06/2017	Neutro	<b>Validação</b>

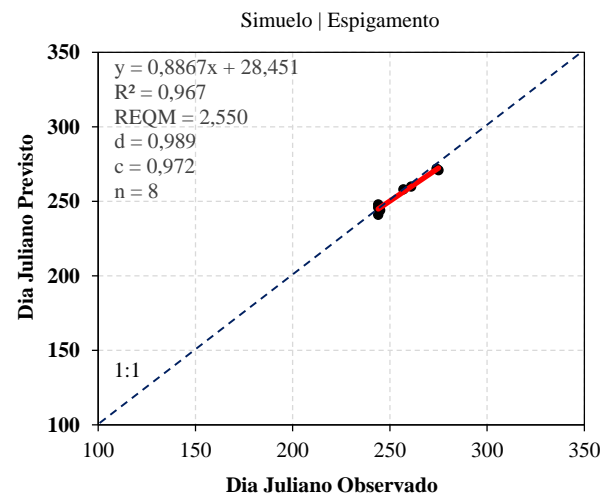
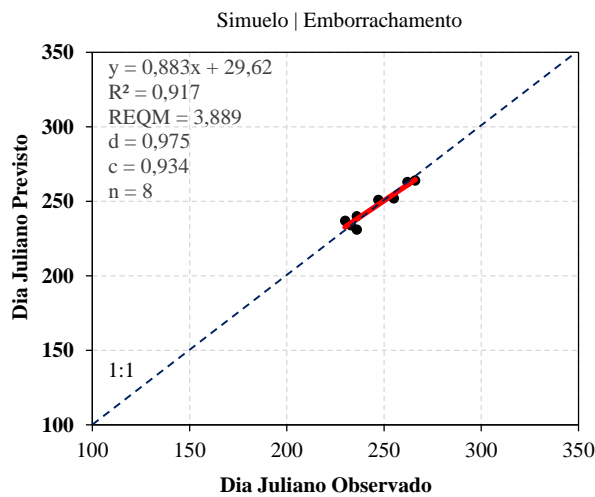
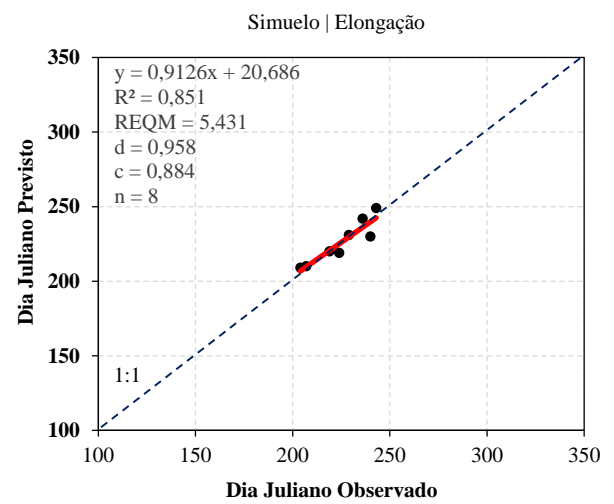
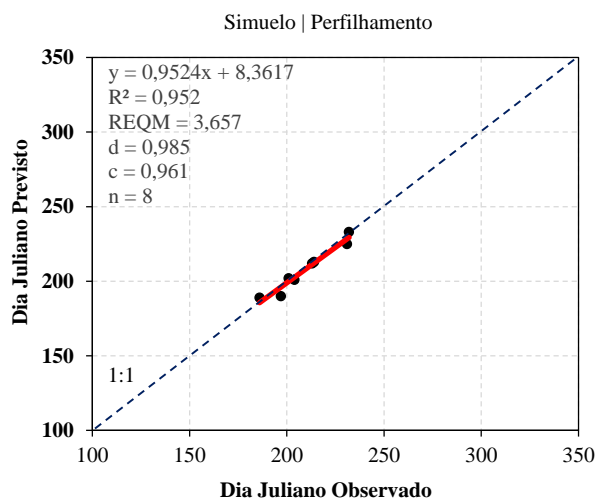
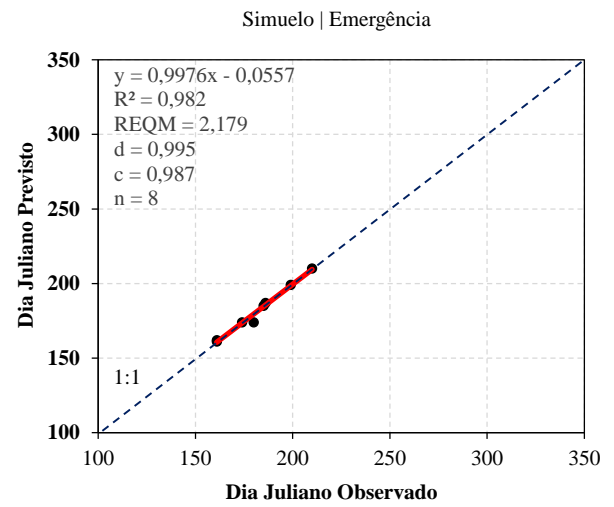
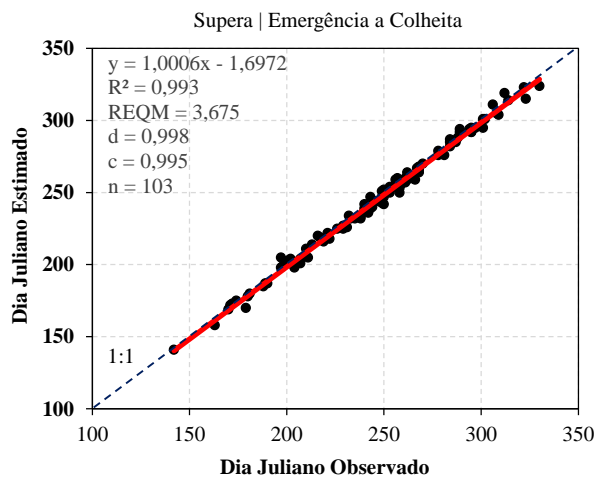
**APÊNDICE C – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO QUARTZO. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2007 A 2017, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI – PR, CASTRO – PR, PONTA GROSSA – PR, TIBAGI – PR E ITABERÁ – SP.**

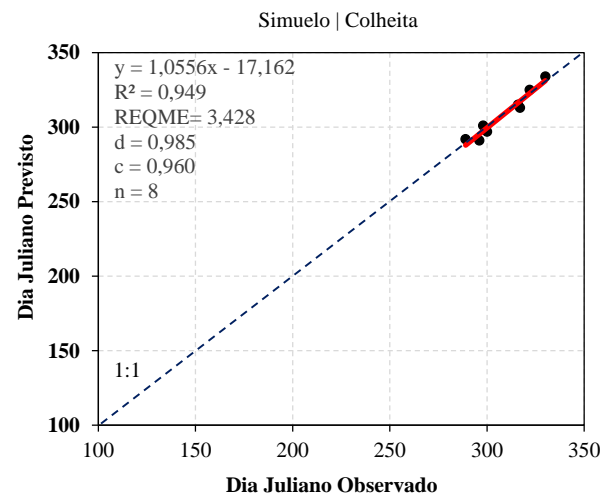
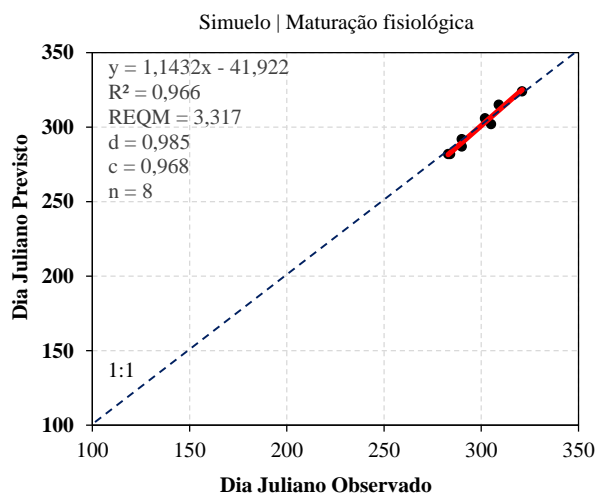
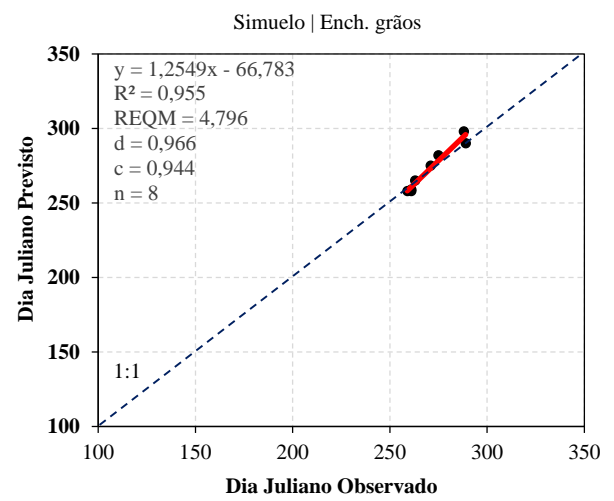
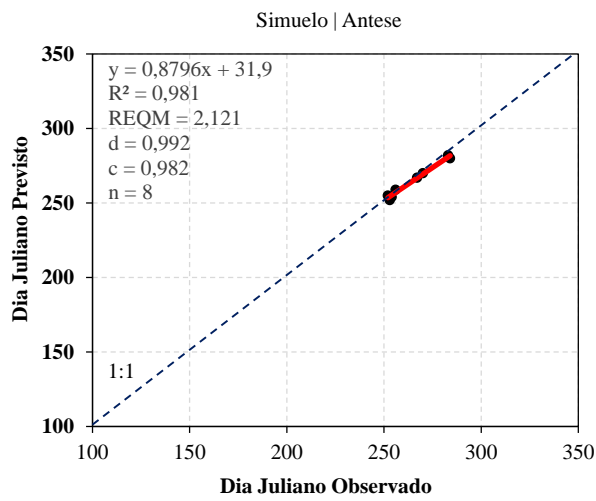




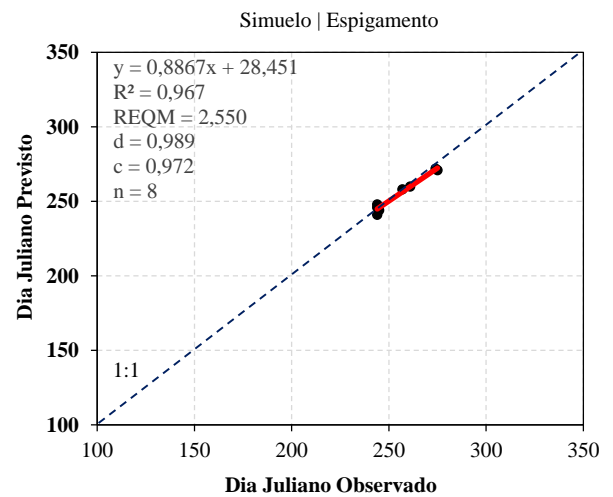
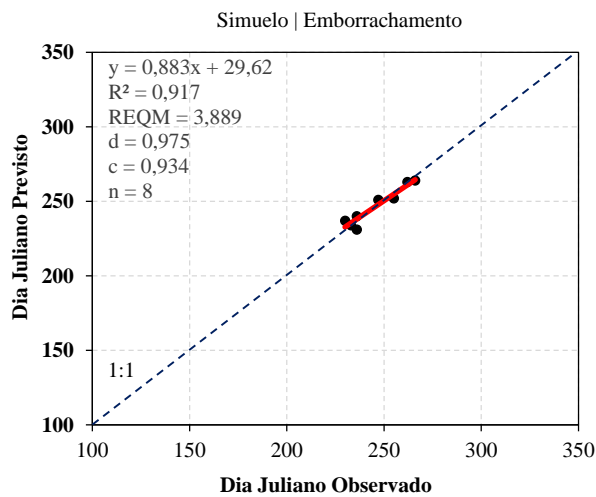
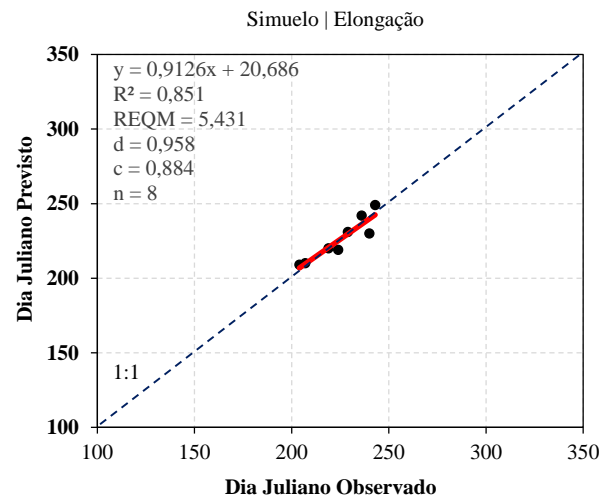
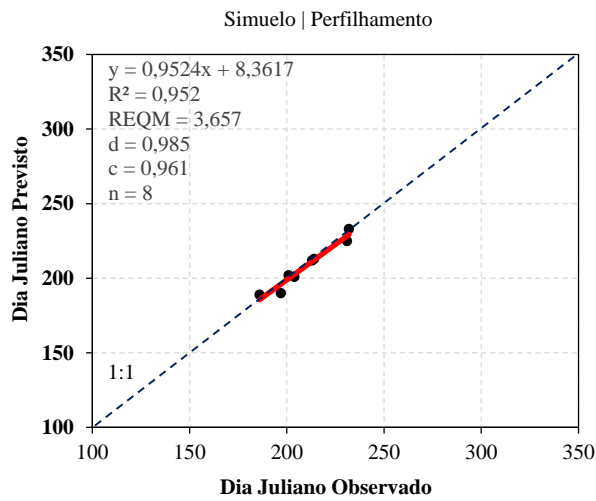
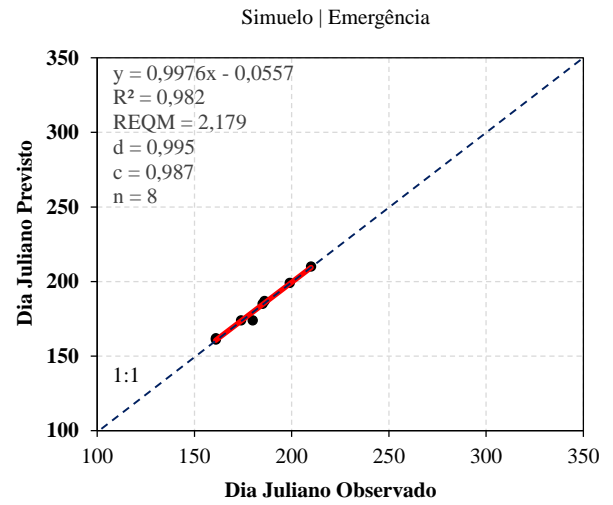
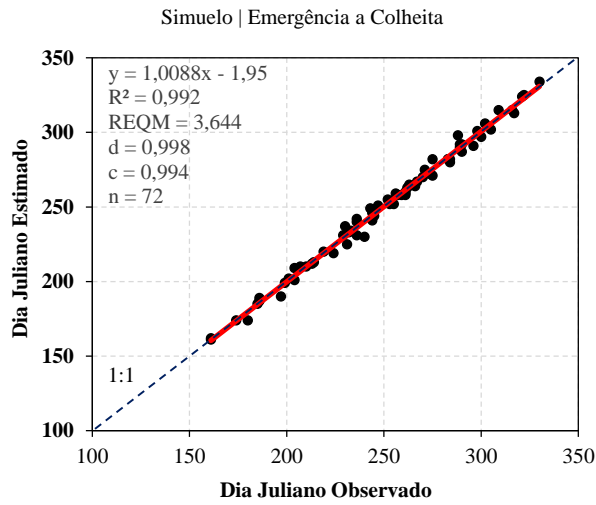
**APÊNDICE D – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO SUPERA. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2007 A 2017, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI – PR, CASTRO – PR, PONTA GROSSA – PR, TIBAGI – PR E ITABERÁ – SP.**

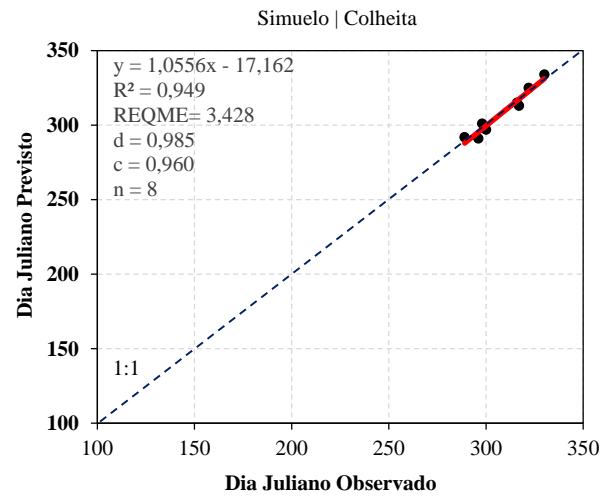
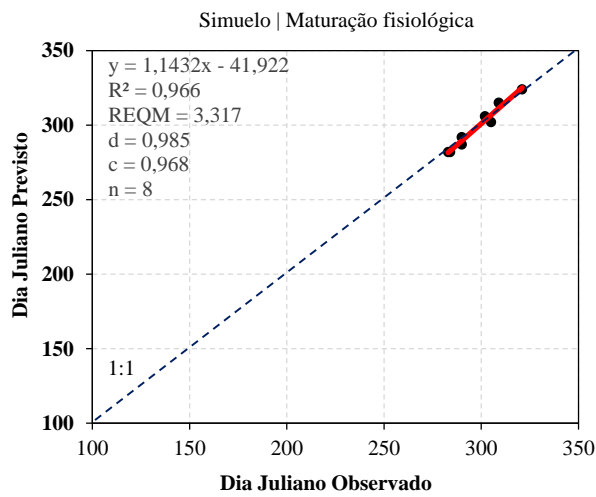
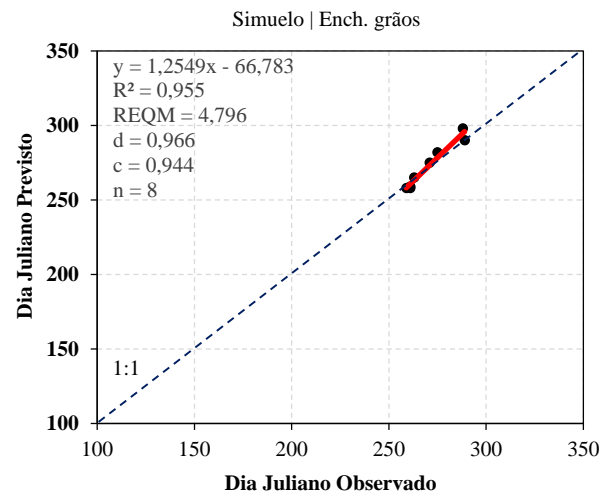
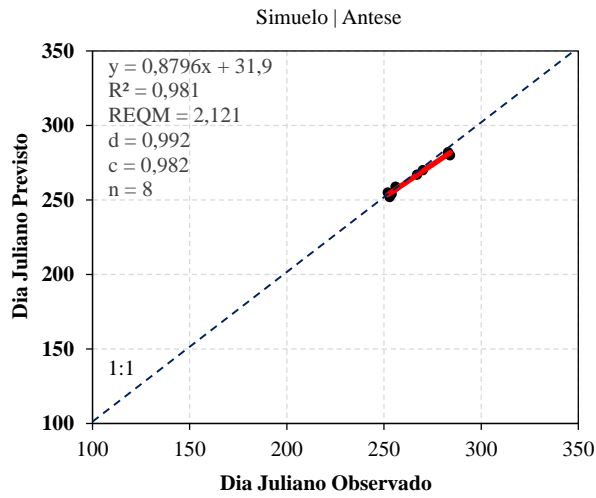






**APÊNDICE E – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO SINUELO. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2007 A 2017, NOS MUNICÍPIOS DE ARAPOTI – PR, CASTRO – PR, PONTA GROSSA – PR E ITABERÁ – SP.**





**APÊNDICE F – COMPARAÇÃO ENTRE O DIA JULIANO OBSERVADO E ESTIMADO DOS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO PARA O MODELO WE AJUSTADO GENÓTIPO TORUK. EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NAS SAFRAS DE INVERNO DE 2015 E 2017, NOS MUNICÍPIOS DE PONTA GROSSA – PR E ITABERÁ – SP, UTILIZANDO A MÉDIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E DOS COEFICIENTES O MODELO (Tabela 5 e Tabela 6).**

