

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO CSM-
CERES-MAIZE PARA CULTIVARES CRIOULAS E
MELHORADAS DE MILHO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Stefanía Dalmolin da Silva

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

**CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-
MAIZE PARA CULTIVARES CRIOULAS E MELHORADAS
DE MILHO**

Stefanía Dalmolin da Silva

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) com requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dalmolin da Silva, Stefania
Calibração e Avaliação do modelo CSM-Ceres-Maize para
cultivares crioulas e melhoradas de milho / Stefania
Dalmolin da Silva.-2015.
54 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck
Coorientadora: Simone Erotildes Teleginski Ferraz
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2015

1. Modelagem 2. Variedade Local 3. Estabilidade de
Produção 4. Zea Mays L. I. Streck, Nereu Augusto II.
Teleginski Ferraz, Simone Erotildes III. Título.

©2014

Todos os direitos autorais reservados a Stefania Dalmolin da Silva. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Campus Universitário – Centro de Ciências Rurais Prédio 77, Sala 02, CEP: 97105-900 – Santa Maria – RS – Brasil

Email: tefa.ds@hotmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

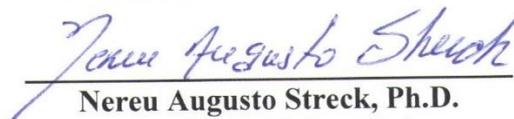
A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-MAIZE
PARA CULTIVARES CRIOULAS E MELHORADAS DE MILHO**

elaborada por
Stefanía Dalmolin da Silva

Com requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

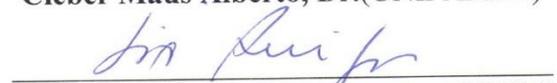
COMISSÃO EXAMINADORA:



Nereu Augusto Streck, Ph.D.
(Presidente/Orientador)



Cleber Máus Alberto, Dr.(UNIPAMPA)



Lia Rejane Silveira Reiniger, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 20 de fevereiro de 2015

*A todas as pessoas que estiveram
ao meu lado e a Associação
Guardiões das Sementes Crioulas
de Ibarama – Rio Grande do Sul*

Dedico...

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosilene e Paulo Roberto, e avós Rosa e Juliano, que sempre me deram muito amor, e me ensinaram a ser honesta e batalhar pelo que desejo.

Ao meu companheiro Dione, pelo companheirismo, incentivo e compreensão.

A Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao Professor e Orientador Nereu Augusto Streck, pela amizade, pelo aprendizado e orientação durante esta trajetória.

À Profa. Isabel Lago, Profa. Lia Reiniger e ao pesquisador da EMBRAPA Genei Dalmago, pelos esclarecimentos de dúvidas sobre experimentos e sobre a cultura de milho.

À amiga e colega Josana pelos anos de amizade e por tudo que aprendi durante esses anos. Também ao Anderson, Lúcio e Murilo pelo auxílio em experimentos a campo e manipulação dos dados.

À amiga e colega Jossana por ter conseguido o livro do modelo Ceres-Maize com o código matemático.

Aos meus amigos e colegas de graduação Daiane, Maurício, Fernando, Natalia e Felipe, pela amizade e pelo apoio em todas as horas.

Aos meus amigos anjos, Lincon e Mariana, pois sempre os tenho em meu pensamento e coração, lembrando dos ótimos momentos que passei com eles, que sempre me dão forças para continuar.

À todas as pessoas do Departamento de Fitotecnia, em especial aos colegas da Sala 2, agradeço pela amizade.

Aos meus amigos, que sempre comemoraram junto comigo minhas conquistas.

Enfim, à todos que de alguma forma contribuíram para o êxito deste trabalho o meu sincero obrigado.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO CSM-CERES-MAIZE PARA CULTIVARES CRIOULAS E MELHORADAS DE MILHO

AUTORA: Stefanía Dalmolin da Silva

ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Local e data da defesa: Santa Maria, 20 de fevereiro de 2015

O milho é uma importante cultura de cereais ao redor do mundo e um dos modelos matemáticos mais usados para simular o crescimento e desenvolvimento desta cultura é o modelo CSM-Ceres-Maize. No entanto, o uso deste modelo para cultivares de polinização aberta (crioulas e melhoradas) não foi observado na literatura. Os objetivos desta dissertação foram (a) calibrar o modelo CSM-Ceres-Maize disponível na plataforma DSSAT v4.5 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) para duas cultivares crioulas de milho ('Cinquentinha' e 'Bico de Ouro'), e duas melhoradas, uma variedade de polinização aberta ('BRS Missões') e um híbrido simples ('AS 1573PRO') e (b) aplicar o modelo CSM-Ceres-Maize no Rio Grande do Sul para simular a produtividade de grãos das quatro cultivares durante o período recomendado e comparar o desempenho agrônomico das cultivares de polinização aberta com o híbrido na condição sem restrição hídrica. A calibração do modelo CSM-Ceres-Maize na plataforma DSSAT foi realizada através do método dos mínimos quadrados, obtendo-se um total de sete parâmetros calibrados com um experimento de campo realizado em Santa Maria, RS, no ano agrícola 2013/14 (Semeadura: 04/11/2013). O teste do modelo foi realizado com dados independentes obtidos através do experimento de campo em Santa Maria, RS, com semeaduras em 20/08/2013, 03/02/2014 e 15/08/2014 e, também o modelo foi rodado para 15 locais no Rio Grande do Sul, com data de semeadura variando em um passo de tempo de 5 dias para analisar a diferença de produtividade entre as cultivares. O modelo foi capaz de simular a fenologia e produtividade das quatro cultivares, captando a evolução de cada uma no decorrer do seu ciclo. Também, foi possível comprovar a estabilidade na produtividade potencial de grãos das cultivares crioulas em comparação com o híbrido.

Palavras-chave: Modelagem, variedade local, estabilidade de produção

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

CALIBRATING AND EVALUATING THE CSM-CERES-MAIZE MODEL FOR LANDRACE AND IMPROVED MAIZE

AUTHOR: Stefanía Dalmolin da Silva

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Location and date of presentation: Santa Maria, February 20th, 2015

Maize is an important crop of cereals around the world and one of the most mathematical models used to simulate the growth and development of maize is the CSM-Ceres-Maize model. However, the use of this model for open pollination varieties (landraces and improved) was not found in the literature. The objectives of this dissertation were (a) Calibrate the CSM-Ceres-Maize model available on the DSSAT v4.5 platform (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) for two landrace maize cultivars ('Cinquentinha' and 'Bico de Ouro'), an improved variety ('BRS Missões') and a modern hybrid ('AS 1573PRO') and (b) Apply the CSM-Ceres-Maize model in Rio Grande do Sul State to simulate the kernel yield of the four cultivars for the recommended period and compare the agronomic performance of the open pollinated varieties with the hybrid in the condition without water restriction. The calibration of the CSM-Ceres-Maize model on the DSSAT platform was performed using the trial and error approach, obtaining a total of 7 parameters calibrated with a field experiment conducted in Santa Maria, in the 2013/14 growing seasons (Sowing date: 11/04/2013). The test of the model was performed with independent data obtained from the field experiment in Santa Maria, RS, with sowings dates in 08/20/2013, 02/03/2014 and 08/15/2014, and also the model was run for 15 locations in Rio Grande do Sul State, with sowing date range in a 5-day time step to analyze the kernel yield between cultivars. The model was able to simulate the phenology and productivity of four cultivars, capturing the evolution of each one during your cycle. Also, it was possible to prove the stability of potential kernel yield of the landrace maize cultivars in comparison with the hybrid.

Key-words: Modeling, local variety, production stability.

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

Figura 1 – Produtividade (kg ha^{-1}) de grãos de milho no Rio Grande do Sul nas safras de 1976/77 a 2012/13 (CONAB, 2014). Barras em vermelho demonstram as quebras de safra.....13

REVISÃO DE LITERATURA

Figura 2 – Imagem ilustrativa da espiga da cultivar ‘BRS Missões’ (A) e da cultivar híbrida ‘AS 1573PRO’ (B).....17

Figura 3 – Imagem ilustrativa de estatura de planta e espiga das cultivares crioulas de milho ‘Cinquentinha’ (A) e ‘Bico de Ouro’ (B).....19

ARTIGO

Figure 1. Map of the Rio Grande do Sul State, Brazil, with the locations of the meteorological stations used to run the CSM-Ceres-Maize model.....41

Figure 2. Observed VS. Simulated (A) days after sowing (DAS) for emergence (EM), silking (R1) and physiological maturity (R6), and (B) final leaf number (FLN) of maize cultivars ‘Cinquentinha’, ‘Bico de Ouro’, ‘BRS Missões’ and ‘AS 1573PRO’ using the CSM-Ceres-Maize, Santa Maria, RS, Brazil. Open symbols are the first sowing date (08/20/2013), black symbols are the third sowing date (02/03/2014) and grey symbols are the four sowing date (08/15/2014). RMSE= root mean square error, RMSE*= root mean square error excluding the TLN data at the end of the vegetative phase when leaf number was defined, NRMSE= normalized root mean square error, r= correlation coefficient, BIAS= BIAS index.....42

Figure 3. Observed vs. Simulated tip leaf number (TLN) of maize cultivars ‘Cinquentinha’ (A), ‘Bico de Ouro’ (B), ‘BRS Missões’ (C) and ‘AS 1573PRO’ (D) using the CSM-Ceres-Maize model, Santa Maria, RS, Brazil. O Open symbols are the first sowing date (08/20/2013), black symbols are the third sowing date (02/03/2014) and grey symbols are the four sowing date (08/15/2014). RMSE= root mean square error, RMSE*= root mean square error excluding the TLN data at the end of the vegetative phase when leaf number was defined, NRMSE= normalized root mean square error, r= correlation coefficient, BIAS= BIAS index.....43

Figure 4. Observed vs. Simulated kernel dry matter yield (TLN) of maize cultivars ‘Cinquentinha’ (A), ‘Bico de Ouro’ (B), ‘BRS Missões’ (C) and ‘AS 1573PRO’ (D) using the CSM-Ceres-Maize model, Santa Maria, RS, Brazil. Open symbols are the first sowing date (08/20/2013), black symbols are the third sowing date (02/03/2014) and grey symbols are the four sowing date (08/15/2014). RMSE= root mean square error, RMSE*= root mean square error excluding the TLN data at the end of the vegetative phase when leaf number was defined, NRMSE= normalized root mean square error, r= correlation coefficient, BIAS= BIAS index.....44

Figure 5. Kernel dry matter yield of maize cultivars ‘Cinquentinha’, ‘Bico de Ouro’, ‘BRS Missões’ and ‘AS 1573PRO’ as a function of sowing date (average of four growing seasons: 2010/11, 2011/12, 2012/13 and 2013/14) in Santa Maria, RS, Brazil, simulated with the CSM-Ceres-Maize model.....45

Figure 6. Kernel dry matter yield of maize cultivars ‘Cinquentinha’, ‘Bico de Ouro’, ‘BRS Missões’ and ‘AS 1573PRO’ as a function of sowing date in 15 locations across the Rio Grande do Sul State (Figure 1) during the 2013/14 growing season simulated with the CSM-Ceres-Maize model. In panel (K), observed data from the experiment in Santa Maria are also shown.....46

LISTA DE TABELAS

REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1 – Coeficientes genéticos no modelo CSM-Ceres-Maize.....	23
--	----

ARTIGO

Table 1. Calibrated parameters for the optimization procedure of the CSM-Ceres-Maize for two maize landrace, ‘Cinquentinha’ and ‘Bico de Ouro’, the improved open pollination variety ‘BRS Missões’ and the hybrid ‘AS 1573PRO’.....	39
--	----

Table 2. Root mean square error (RMSE) values of the simulation of emergence (EM), silking (R1), physiological maturity (R6), tip leaf number (TLN), final leaf number (FLN) and kernel yield (Yield) of four maize cultivars with the CSM-Ceres-Maize model, grown in Santa Maria, RS, Brazil in two sowing dates.....	40
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 A Cultura do Milho	15
2.2 Cultivares Crioulas de Milho	18
2.2.1 As cultivares crioulas ‘Cinquentinha’ e ‘Bico de Ouro’.....	19
2.3 Zoneamento Agroclimático da Cultura do Milho no Rio Grande do Sul	20
2.4 Modelos de Simulação das Culturas Agrícolas	21
2.5 O Modelo de Simulação da Cultura do Milho CSM-Ceres-Maize	22
3 ARTIGO - Simulating yield of landrace and improved maize cultivars with the CSM-Ceres-Maize model	24
Abstract.....	25
Resumo.....	26
Introduction.....	26
Material and Methods.....	28
Results and Discussion.....	30
Conclusions.....	34
References.....	34
4 DISCUSSÃO	47
5 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das três principais culturas agrícolas de verão no Rio Grande do Sul (as outras duas são soja e arroz), tendo papel importante na alimentação básica mundial, pois é o segundo alimento mais produzido no mundo (FAO, 2014). As cultivares crioulas de milho, do tipo polinização aberta (VPAs), têm ganhado importância em algumas comunidades de pequenos agricultores familiares no RS, pois são cultivares mais resistentes a fatores bióticos e abióticos (MACHADO et al., 2011), e possibilitam a produção de semente pelo próprio agricultor com redução dos custos da lavoura (ARAÚJO; NASS, 2002), o que é importante na sustentabilidade e na economia familiar destas comunidades.

No RS, o milho é cultivado em sistemas predominantemente sem irrigação suplementar, ou seja, com a demanda hídrica da cultura sendo atendida pela precipitação pluviométrica. Climatologicamente, no RS não há uma estação seca e uma estação chuvosa definida (BURIOL et al., 1977), mas há grande variabilidade interanual na precipitação, de modo que em alguns anos a precipitação é abaixo da normal e em outros anos é acima da normal. Esta variabilidade interanual da precipitação no RS tem efeitos diretos na produtividade das culturas agrícolas de verão como o milho (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Nos últimos 30 anos, houve três grandes quebras de safra de milho no RS, que ocorreram nos anos agrícolas 1990/1991, 2004/2005 e 2011/2012, quando a redução de produtividade foi de aproximadamente 50% em relação à produtividade em anos normais e sem deficiência hídrica (Figura 1). A causa destas três quedas na produtividade foi devido à deficiência hídrica no solo.

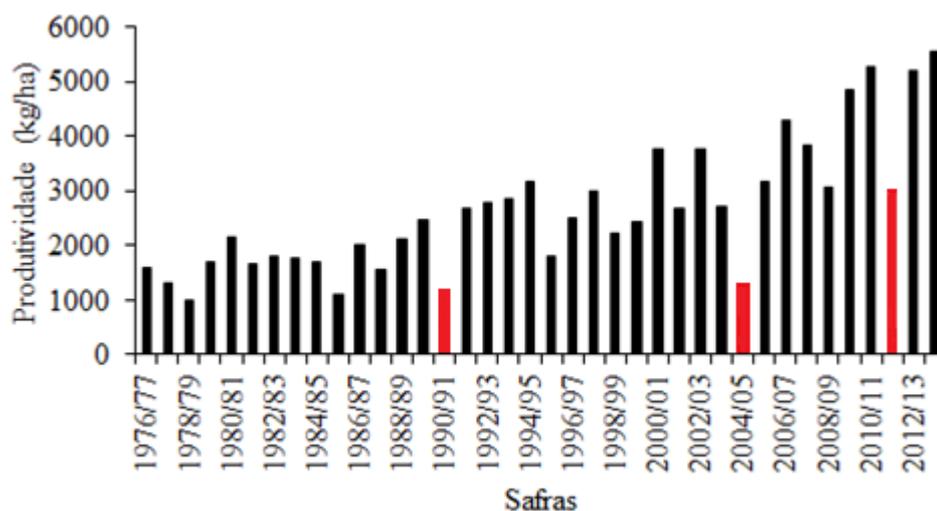


Figura 1 - Produtividade (kg ha^{-1}) de grãos de milho no Rio Grande do Sul nas safras de 1976/77 a 2012/13 (CONAB, 2014). Barras em vermelho demonstram as quebras de safra.

As cultivares crioulas de milho, por serem rústicas e apresentarem alta variabilidade genética, poderiam ser uma alternativa de cultivo em épocas e anos com deficiência hídrica do solo tendo, assim, maior estabilidade na produtividade do que os híbridos. No entanto, esta alternativa ainda é pouco frequente na agricultura do RS.

Como a realização de experimentos para estudos a respeito da resposta de cultivares requer investimento financeiro e humano, a modelagem agrícola seria uma alternativa para avaliar o desempenho agrônômico de cultivares agrícolas.

A modelagem agrícola é uma ferramenta que, através de equações matemáticas, descreve o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas. Quando devidamente calibrados e testados para as condições locais de estudo, os modelos agrícolas são ferramentas que auxiliam na tomada de decisão de práticas de manejo (STRECK et al., 2003,a,b), em estudos da resposta das culturas à variabilidade climática e de mudança climática (STRECK; ALBERTO, 2006a,b; STRECK et al., 2008; STRECK et al., 2011) e atualmente tem sido utilizado na previsão e acompanhamento de safras (SHIN et al., 2006; STRECK et al., 2013). Entre os modelos de simulação para a cultura do milho, o modelo CSM-Ceres-Maize é um dos mais conhecidos e usados em estudos numéricos. No entanto, não foi observado na literatura o uso deste modelo para cultivares de polinização aberta, sejam crioulas ou melhoradas, o que consistiu na motivação para realizar este trabalho.

Portanto, os objetivos desta dissertação foram:

- 1- Calibrar o modelo CSM-Ceres-Maize disponível na plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) para duas cultivares crioulas de milho ('Cinquentinha' e 'Bico de Ouro'), e duas melhoradas, uma variedade de polinização aberta ('BRS Missões') e um híbrido simples ('AS 1573PRO').
- 2- Aplicar o modelo CSM-Ceres-Maize no Rio Grande do Sul para simular a produtividade de grãos das quatro cultivares durante o período recomendado e comparar o desempenho agrônômico das cultivares de polinização aberta com o híbrido na condição sem restrição hídrica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do Milho

O milho (*Zea mays L.*) é um cereal originário do México e da Guatemala, onde o registro mais antigo da descoberta deste cereal data de 5.000 a.C (BUCKLER; STEVENS, 2005). Durante o descobrimento da América, o homem disseminou esta gramínea por todo o continente e, no final do século XV, já havia sido espalhado ao redor do mundo, sendo cultivado em diferentes regiões e climas (CIB, 2006). O milho pertence à família das Poaceae, sendo um cereal de importante qualidade nutricional devido à presença de carboidratos, proteínas e lipídeos (PAES, 2006).

É o terceiro cereal mais cultivado e de importância econômica no mundo devido à sua versatilidade de uso, que vai desde a alimentação humana, alimentação animal e na indústria tecnológica (principalmente na fabricação de etanol). O maior produtor de milho é os Estados Unidos, que na safra 2013/14 colheu aproximadamente 353,7 milhões de toneladas, em uma área plantada de 35,5 milhões de hectares (USDA, 2014). O Brasil está na terceira posição do ranking mundial na produção deste grão, e na última safra teve produtividade de aproximadamente 4 Mg ha⁻¹, em uma área plantada de 15,7 milhões de hectares (CONAB, 2014). Em nível nacional, a Região Centro-Oeste do país é a maior produtora do grão, seguido pela Região Sul. Na Região Sul, o estado do Rio Grande do Sul (RS) é o segundo maior produtor, sendo que na safra de 2013/14 teve uma produtividade de aproximadamente 5,5 Mg ha⁻¹ em uma área plantada de aproximadamente 1 milhão de hectares (CONAB, 2014).

Elementos meteorológicos como a radiação solar, temperatura do ar, precipitação e fotoperíodo influenciam diretamente no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade da cultura do milho, sendo a temperatura o elemento que mais afeta a fenologia da cultura do milho. A produtividade de milho é uma função da radiação solar, e neste caso, é considerada a faixa do espectro eletromagnético onde se encontra a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e da temperatura do ar (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). As temperaturas cardinais (temperatura basal inferior, temperatura ótima e temperatura basal superior) são bastante importantes, pois elas estabelecem limiares térmicos para a ocorrência do desenvolvimento e do crescimento da cultura do milho. Para a fenologia da cultura do milho, segundo CUTFORTH & SHAYKEWICH. (1990), foram determinados os seguintes valores

de temperaturas cardinais, a temperatura basal inferior em 8°C, a temperatura ótima em 28°C e a temperatura basal superior em 36°C. Para a emissão de folhas, as temperaturas cardinais para milho são 8°C, 31°C e 41°C (YAN; HUNT, 1999; WHITE, 2001; STRECK et al., 2009).

O milho é considerado uma planta fotoneutra, ou seja, não apresenta influência fotoperiódica. Porém, na literatura alguns trabalhos reportam que alguns genótipos de milho apresentam resposta ao fotoperíodo, sendo alguns materiais mais sensíveis do que outros. Como o milho é uma planta de dia curto, dias com maior valor de fotoperíodo fazem com que a fase vegetativa (emergência-pendoamento) seja alongada e conseqüentemente aumente o número de folhas, quando comparado a exposição a dias com menor valor de fotoperíodo (RUSSEL; STUBER, 1983; STRECK et al., 2009).

No RS, o milho é em sua maior parte cultivada em condições de sequeiro ou em terras altas, em que toda a demanda hídrica da cultura é fornecida pela precipitação pluvial. O regime pluviométrico do RS é uniforme ao longo do ano, com totais entre 1250 e 2000 mm, sem uma estação chuvosa definida (BURIOL et al, 1977; OLIVEIRA, 1986). A precipitação no Estado é fortemente influenciada por fenômenos como frentes frias (escala sinótica) e fenômenos como o ENOS (El Niño Oscilação Sul) (escala interanual). O ENOS tem duas fases, uma fase quente chamada 'El Nino', em que ocorre precipitação acima da normal climatológica no estado, e uma fase fria conhecida como 'La Niña', em que a precipitação apresenta padrões abaixo da normal climatológica no Estado, e essa influência na precipitação no RS ocorre principalmente na primavera (setembro-outubro-novembro) (GRIMM et al, 1998;. CERA; FERRAZ, 2010; FLACH; GRIMM, 2010). Assim, sendo o milho uma cultura sensível ao estresse hídrico, a variabilidade na precipitação pode causar algum dano à planta, como redução na área foliar e conseqüentemente, na fotossíntese, com potencial de comprometer consideravelmente a produtividade desta cultura (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Com relação aos grupos de milho, atualmente, a maior parte das lavouras de milho no RS e Brasil são cultivadas com cultivares híbridas tolerantes ao *glifosato* (tecnologia RR) e *Spodoptera frugiperda* (tecnologia Bt). Como são cultivares híbridas, a cada nova semeadura é necessário que os agricultores comprem novas sementes, e sendo cultivares transgênicas, o custo da semente é alto. Uma maneira para agricultores familiares contornarem o alto custo de sementes de milho é com o uso das cultivares crioulas de milho, que são variedades do tipo polinização aberta (VPA).

A cultivar 'BRS Missões' e o híbrido 'AS 1573PRO' são exemplos de cultivares melhoradas de milho utilizadas em várias lavouras comerciais no estado, onde a característica

principal que os difere é a cultivar ‘BRS Missões’ ser uma VPA. A cultivar ‘BRS Missões’ é uma cultivar precoce, sintética, do tipo polinização aberta, com grãos dentados e endosperma na cor amarela (Figura 1A), e com potencial produtivo de 7 Mg ha⁻¹. Além disso, possui resistência a acamamento e quebramento (moderada) (EMBRAPA, 2015). O híbrido ‘AS 1573PRO’ é de ciclo precoce, e possui como principal característica a tolerância a pragas do tipo lepidóptera e forte resistência ao acamamento. Seus grãos são semidentados e longos, com endosperma na cor amarela (Figura 1B), e apresenta alto potencial produtivo quando manejo tecnológico na lavoura for alto (AGROESTE, 2015).



Figura 2 – Imagem ilustrativa da espiga da cultivar ‘BRS Missões’ (A) e da cultivar híbrida ‘AS 1573PRO’ (B).

2.2 Cultivares Crioulas de Milho

No Brasil, a agricultura familiar tem importante papel na produção de milho. Cerca de 84,4% do total das áreas agriculturáveis no país são compostas pela agricultura familiar, que é responsável por uma produção de 38% do total bruto de milho do país, sendo o milho o terceiro alimento básico produzido nestas áreas. A agricultura familiar é um dos principais fornecedores de alimentos básicos para a população brasileira sendo, então, importante para a sustentabilidade e segurança alimentar do país. No Brasil, a Região Nordeste é a maior em número de estabelecimentos e em área com agricultura familiar, e a Região Sul compreende o quarto lugar (MDA, 2006). No RS, cerca de 86% dos estabelecimentos rurais são de agricultores familiares, ocupando 31% da área total com valor bruto de produção de 46% (MDA, 2006).

As cultivares crioulas de milho podem desempenhar um papel sócio-econômico importante na agricultura familiar no Brasil. As cultivares de milho utilizadas por comunidades familiares rurais podem ser classificadas de diferentes maneiras: cultivar local, cultivar tradicional e cultivar crioula. Uma cultivar local é assim denominada quando, em um período de pelo menos cinco anos, aquela população é manejada por agricultores com ciclos de cultivos e de seleção. Uma cultivar tradicional é assim chamada quando, por pelo menos três gerações familiares, a cultivar é manejada em um mesmo local. A terminologia cultivares crioulas é utilizada por países de língua espanhola para denominar cultivares tradicionais (MACHADO et al., 2008; BERG, 2009).

A utilização de cultivares crioulas de milho pelos agricultores familiares se destaca por apresentarem grande variabilidade genética e alta rusticidade, sendo bastante resistentes a fatores bióticos e abióticos, permitindo que o agricultor realize o seu cultivo com baixa tecnologia e mesmo assim obtenha produtividade rentável (PATERNIANI; NASS, 2000; ARAÚJO; NASS, 2002; SANDRI; TOFANELLI, 2008). Mesmo não produzindo no mesmo nível que um híbrido, outra vantagem para o agricultor é a possibilidade de produzir sua própria semente, reduzindo significativamente o custo a cada nova semeadura (MACHADO et al., 2011).

2.2.1 As cultivares crioulas ‘Cinquentinha’ e ‘Bico de Ouro’

Dentre as cultivares crioulas de milho utilizadas pela agricultura familiar no RS, destacam-se as cultivares ‘Cinquentinha’ e ‘Bico de Ouro’.

A cultivar ‘Cinquentinha’ apresenta ciclo precoce, plantas com estatura mediana (maior que 1,48 m e menor que 2,30 m), as espigas apresentam fileiras variando entre 8 a 16,5 fileiras, com espigas na forma cônica/cilíndricas, com endosperma na cor branca e grão com forma dentada (Figura 3A) (FRUET, 2014).

A cultivar ‘Bico de Ouro’ apresenta ciclo tardio, plantas com estatura alta (maior que 2,30 m e menor que 3,13 m), suas espigas apresentam fileiras variando entre 8 a 16 fileiras, com espigas na forma cônica/cilíndricas, com endosperma na cor amarela e grão com forma dentada (Figura 3B) (COCCO, 2014).

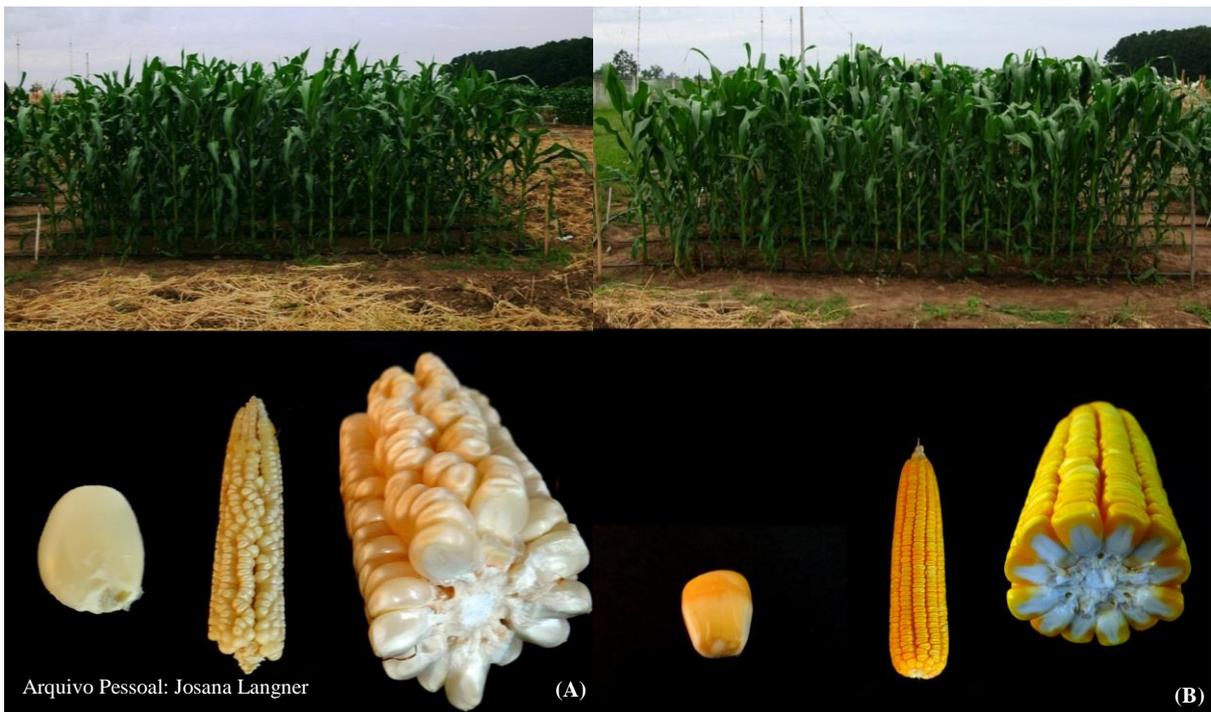


Figura 3 – Imagem ilustrativa de estatura de planta e espiga das cultivares crioulas de milho ‘Cinquentinha’ (A) e ‘Bico de Ouro’ (B).

2.3 Zoneamento Agroclimático da Cultura do Milho no Rio Grande do Sul

O Zoneamento Agroclimático é uma ferramenta importante no meio agrícola, principalmente para a decisão sobre a melhor época de semeadura, aquela em que o risco climático é mínimo, visando expor as plantas a condições ambientais próximas das ótimas para o seu crescimento e desenvolvimento. No Zoneamento Agroclimático para a cultura do milho no Estado do Rio Grande do Sul, para obter as melhores épocas de semeadura no Estado onde as condições para o desenvolvimento da cultura são as mais adequadas, os índices agroclimáticos utilizados foram a soma de graus-dia e a deficiência hídrica acumulada (MALUF et al., 2000). Com relação ao índice térmico, as regiões onde a soma térmica acumulada é menor que 650 graus-dia, não são recomendadas para o cultivo da cultura do milho, para semeaduras realizadas no primeiro dia do mês, de agosto a janeiro. Regiões com deficiência hídrica maior que 70 mm foram consideradas como não recomendada para o cultivo, para semeaduras realizadas no primeiro dia do mês, de agosto a janeiro.

As regiões do Estado que são mais favoráveis para o cultivo do milho são o Planalto, Alto Vale do Uruguai e Serra do Nordeste, pois estas regiões apresentam maior disponibilidade hídrica. Porém, a alta altitude destes locais faz com que as semeaduras sejam efetuadas mais tarde na primavera devido a temperaturas mais baixas. As regiões do Médio e Baixo Vales do Rio Uruguai, Missões, Depressão Central, Litoral Sul e Campanha também apresentam condições para o cultivo da cultura, porém há maior chance de ocorrência de déficit hídrico nestas regiões (MALUF et al., 2000).

Assim, o zoneamento agrícola para o milho no Estado do RS visa selecionar regiões e épocas de semeadura em que a planta de milho não seja exposta a estresse hídrico ou térmico durante fases críticas do seu ciclo de desenvolvimento. A iniciação floral, a floração e a fase de enchimentos de grãos são os períodos em que a planta de milho é mais sensível a deficiência hídrica do solo (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

2.4 Modelos de Simulação das Culturas Agrícolas

A modelagem agrícola é uma ferramenta utilizada mundialmente, em que equações matemáticas descrevem os mecanismos e/ou processos de crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas. Através de modelos agrícolas, é possível determinar o melhor manejo para as culturas (STRECK et al., 2003,a,b;), bem como pode-se estudar a resposta das culturas a cenários de mudança climática (STRECK et al., 2008; LAGO et al., 2008). Igualmente, são úteis no melhoramento genético (BANTERNG, 2006) e, atualmente, têm sido utilizadas para a previsão e acompanhamento de safra das culturas (JONES et al., 2000; SHIN et al., 2006; STRECK et al., 2013).

Os modelos agrícolas podem ser divididos em dois grupos: modelos empíricos/estatísticos e modelos dinâmicos mecanísticos. Os modelos agrícolas empíricos/estatísticos geralmente são obtidos através de técnicas de regressão linear ou múltipla e estabelecem uma relação entre o rendimento da cultura e os fatores que o afetam (clima, pragas), incluindo análise de probabilidades (SILVA; BERGAMASCO, 2001).

Modelos dinâmicos mecanísticos baseados em processos (*Process-based models*) são assim chamados porque as equações matemáticas envolvidas descrevem processos ecofisiológicos da planta ao longo do tempo (STRECK et al., 2013). BERGAMASCHI et al. (2013) utilizaram o modelo agrícola dinâmico Glam (Generated Large Area Model) para simular a produtividade de milho em uma região subtropical localizada no Sul do Brasil e constataram que o modelo pode ser bastante útil no auxílio de previsão e monitoramento da produtividade desta cultura. Outro modelo dinâmico da cultura do milho bastante utilizado é o modelo CSM-Ceres-Maize (JONES; KINIRY, 1986), a seguir apresentado.

2.5 O Modelo de Simulação da Cultura do Milho CSM-Ceres-Maize

O modelo CSM (Cropping System Models)-Ceres (Crop-Environment-Resource-Synthesis)-Maize foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - Serviço de Pesquisa Agrícola (USDA-ARS), Crop Systems Evaluation Unit, localizado em Grassland, Laboratório de Pesquisa de solo e água e colaboradores. É um modelo ecofisiológico dinâmico, determinístico, baseado em processos (*Process-based model*) bastante usado mundialmente (CARBERRY et al., 1989; LIU et al., 1989; ASADI; CLEMENTE, 2003; GEDANKEN et al., 2003). Com este modelo é possível simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho, considerando-se o efeito de cultivar, densidade de planta, clima, estresse hídrico e nutricional, efeito de pragas e doenças e eventos extremos do clima (JONES; KINIRY, 1986).

O modelo Ceres-Maize foi integrado ao modo CSM, no qual o ciclo da cultura do milho é dividido em várias fases, como por exemplo, germinação, emergência, fim do estágio juvenil, iniciação floral, 75% do florescimento feminino, iniciação de enchimento de grãos, maturidade fisiológica e colheita (JONES et al., 2003). O modelo CSM-Ceres-Maize está disponível na plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), uma plataforma que hospeda 26 modelos de diferentes culturas agrícolas (JONES et al., 2003, HOOGENBOOM et al., 2012). O modelo necessita de arquivos de entrada para realizar a simulação, referente a parâmetros agrícolas e parâmetros meteorológicos. Os parâmetros agrícolas são: informações sobre solo, irrigação e fertilização (os dois últimos podem ser setados na condição potencial), data de semeadura, densidade de plantas, profundidade de semeadura. Os parâmetros meteorológicos necessários são temperatura máxima e mínima do ar diária ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar ($\text{Mj m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm).

Como qualquer modelo agrícola, no Ceres-Maize existem coeficientes genéticos que necessitam de calibração, para poder representar a genética de cada cultivar. Os coeficientes genéticos no CSM-Ceres-Maize estão apresentados na Tabela 1. Os coeficientes P1, P2, P5 e PHINT são aqueles que governam a fenologia, enquanto G2 e G3 governam a produtividade de grãos da cultura do milho no modelo.

Tabela 1 - Coeficientes genéticos no modelo CSM-Ceres-Maize.

Coeficiente	Descrição
P1	Graus-dia da emergência até o fim do estágio juvenil ($T_b=8^{\circ}\text{C}$)
P2	Coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo
P5	Graus-dia do florescimento feminino até a maturidade fisiológica ($T_b=8^{\circ}\text{C}$)
G2	Número potencial de grãos por planta
G3	Taxa potencial de enchimento de grãos ($\text{mg grão}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)
PHINT	Filocrono ($^{\circ}\text{C dia}$)

Fonte: JONES et al. (2003)

A seguir, é apresentada a seção Desenvolvimento da dissertação na forma de artigo, segundo a MDT/UFSM, em inglês. A numeração das Figuras, também segundo a MDT/UFSM, neste formato é independente e, portanto, inicia-se em Figura 1 novamente. A formatação do texto segue as normas da revista Pesquisa Agropecuária Brasileira, para a qual o manuscrito será submetido.

3 ARTIGO

TRABALHO A SER ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO:

**Simulating yield of landrace and improved maize cultivars with the CSM-
Ceres-Maize model**

Simulating yield of landrace and improved maize cultivars with the CSM-Ceres-Maize model

Stefanía Dalmolin da Silva⁽¹⁾, Nereu Augusto Streck⁽¹⁾, Josana Andreia Langner⁽¹⁾, Isabel Lago⁽¹⁾, Lia Rejane Silveira Reiniger⁽¹⁾, Anderson Haas Poersch⁽¹⁾ and Genei Antônio Dalmago⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, nº1000, CEP 97150-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: tefa.ds@hotmail.com, nstreck2@yahoo.com.br, langnerja@gmail.com, isalago08@yahoo.com.br, liarsr@ufsm.br, andersonhpo@hotmail.com

⁽²⁾Embrapa Trigo, Caixa Postal 451, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. E-mail: genei.dalmago@embrapa.br

Abstract – The objective of this study was to calibrate and evaluate the CSM-Ceres-Maize model for two landrace maize (‘Cinquentinha’ and ‘Bico de Ouro’) and two improved maize cultivars [an open pollination variety (‘BRS Missões’) and a transgenic simple hybrid (‘AS 1573PRO’)] under no-water limiting conditions in the subtropical environment of Rio Grande do Sul State, Brazil. The model used in this study was the CSM-Ceres-Maize, available at the DSSAT v4.5 platform. Model calibration was with data from a field experiment sown on 11/04/2013 and evaluation was with independent data from three sowing dates 08/20/2013, 02/03/2014 and 08/15/2014. Simulations with the model in 15 locations across the Rio Grande do Sul State indicate more stability in potential kernel yield during the growing season for the landrace cultivars compared to the hybrid and to the ‘BRS Missões’.

Index Terms: local varieties, corn, production stability, modeling.

Simulação do rendimento de cultivares crioulas e melhoradas de milho com o modelo

CSM-Ceres-Maize

Resumo – O objetivo deste estudo foi calibrar e testar o modelo CSM-Ceres-Maize, para duas cultivares crioulas de milho (‘Cinquentinha’ e ‘Bico de Ouro’), e duas cultivares melhoradas de milho [uma do tipo polinização aberta (VPA) (‘BRS Missões’) e um híbrido simples (‘AS1573PRO’)] na condição sem limitação hídrica na região subtropical do Rio Grande do Sul, Brasil. O modelo utilizado neste estudo foi o modelo CSM-Ceres-Maize, disponível na plataforma DSSAT v4.5. A calibração do modelo foi realizada com dados de um experimento com semeadura em 04/11/2013 e teste com dados independentes de três datas de semeaduras, 20/08/2013, 03/02/2014 e 15/08/2014. Simulações com o modelo para 15 locais no Rio Grande do Sul indicam maior estabilidade na produtividade potencial de grãos durante a estação de crescimento na cultivares crioulas do que no híbrido e na VPA ‘BRS Missões’.

Termos para Indexação: variedades locais, milho, estabilidade de produção, modelagem.

Introduction

Maize (*Zea mays L.*) is one of the main agricultural crops grown worldwide. In the 2013/2014 growing season, the area cultivated with maize in the world was 178.03 million hectares with a production of approximately 984.37 million tons (USDA, 2014). Brazil is the world's third largest producer of maize, with around 15.2 million hectares cultivated and a production of 78.5 million tons in the 2013/2014 growing season (USDA, 2014). The South Region of Brazil is the second largest region in production. Paraná State is the largest producer in the South Region, followed by Rio Grande do Sul State (RS) (CONAB, 2014). In RS, during the 2013/2014 growing season, about 1.1 million hectares were cultivated with maize, with a total production of 5.7 million tons (CONAB, 2014).

Most of maize currently grown in RS and in Brazil is with single and double hybrids tolerant to glyphosate and *Spodoptera frugiperda* (RR and Bt technologies, respectively). When using hybrid maize cultivars, farmers need to purchase new seeds for every new

cultivation and, when they are transgenic, the cost of seeds is high. An alternative for small farmers to get round the high cost of maize seed is to use open pollination varieties (OPV), from which farmers can produce their own seeds. Among OPV's, landrace varieties play an important role as they are composed by a pool of genes that allows them more yield stability during the growing season (Araújo & Nass, 2002; Balbinot et al., 2005; Sandri & Tofanelli, 2008; Machado et al., 2011).

Crops simulation models are important tools in different areas, such as for research, for education, for extensionists and for insurance companies. Decision makers can use crop simulation models to assess field operations such as the best sowing time and for crop management practices. In the United States and Europe, crop models have also been used for yield forecasting (Cantelaube & Terres., 2005; Shin et al., 2006; Shin et al., 2009).

The CSM (*Cropping System Models*)-Ceres-Maize (*Crop-Environment-Resource-Synthesis*) model is a widely used dynamic deterministic process-based model that simulates growth, development and kernel yield of maize. The model is suitable for use in research and in applications related to the effects of climate and management practices (fertilization, irrigation) on growth and yield of maize (Jones & Kiniry, 1986). The CSM-Ceres-Maize model is available at the DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) platform (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2012).

The CSM-Ceres-Maize model has been calibrated and used with hybrid maize (Dogan et al., 2006; Pereira et al., 2010; Liu et al., 2011) but no reports of using this model for landrace and other OPV maize cultivars were found. Many coefficients of CSM-Ceres-Maize are genotype or cultivar-specific, which implies that a calibration of such coefficients for OPVs is needed, which constituted the rationale for this study.

The objective of this study was to calibrate and evaluate the CSM-Ceres-Maize model, for two landrace maize ('Cinquentinha' and 'Bico de Ouro') and two improved maize

cultivars [an open pollination variety ('BRS Missões') and a transgenic simple hybrid ('AS 1573PRO')] under no-water limiting conditions in the subtropical environment of Rio Grande do Sul State, Brazil.

Materials and Methods

A field experiment was conducted during two growing seasons (2013/14 and 2014/2015) in Santa Maria, RS, Brazil (29°43'S, 53°43'W, and 95m altitude) (Figure 1). According to the Köppen system, the climate is Cfa, with mean annual temperature of 18.8°C and total annual rainfall of 1.686,1 mm. Soil type at the experimental site is a Rhodic Paleudalf - Argissolo Bruno-Acinzentado alítico típico (Embrapa, 2006).

Soil tillage was performed with plowing and disking. Soil acidity was corrected with limestone to reach a pH of 6.0. Fertilizer was applied at sowing with NPK 5-20-20 based on soil test at a rate of 750 kg ha⁻¹ (30 kg of N, 105 kg of P₂O₅ and 150 kg of K₂O) and nitrogen was side-dressed based on an expected yield of 8.0 Mg ha⁻¹ with ureia at the V4 and V8 stages, totaling 239.1 kg of N as a side dressing (CQFS-RS/SC, 2004). Supplementary irrigation was performed by a drip irrigation system to prevent water stress (no-water limiting conditions).

The experiment was a two-factor in a randomized complete block design with four replication. Factor A was [two landrace maize cultivars: 'Cinquentinha' (early maturity) and 'Bico de Ouro' (late maturity); one open pollination maize cultivar: 'BRS Missões' (early maturity); and a transgenic simple hybrid 'AS 1573PRO' (early maturity)] and Factor B was four sowing (MM/DD/YYYY) dates (08/20/2013, 11/04/2013, 02/03/2014 and 08/15/2015). Each replication was a 5.0x4.5 m plot (22.5 m²) with five rows. Plant spacing was 0.9 m among rows and 0.2 m among plants within rows (a plant density of 5.5 pl m⁻²). Emergence date was considered when 50% of the plants were visible above the surface. In the landrace

maize cultivars, a total of 45 plants per plot were tagged, and in the improved cultivars, 15 plants per plot were tagged. The following variables were evaluated on the tagged plants: tip leaf number (TLN) on a weekly basis, final leaf number (FLN) after tasseling (VT), silking (R1) date, physiological maturity (R6) date and kernel yield components (number of ears per plant, number of kernels per ears and dry matter (g) of 100 kernels). The R1 and R6 dates were considered when 50% of the tagged plants reached these developmental stages.

The model used in this study was the CSM-Ceres-Maize, available at the DSSAT v4.5 platform. The inputs necessary to run the model were sowing date, plant density (pl m^{-2}), daily weather data [maximum and minimum air temperature ($^{\circ}\text{C}$), solar radiation (MJ m^{-2} per day) and rainfall (mm)] and latitude. Weather data were from an automatic station of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) located at about 100 meters from the experiment.

The CSM-Ceres-Maize model was calibrated using observed data from the 11/04/2013 sowing date. The model coefficients that control crop development (P1, P2, P5 and PHINT) and the coefficients that control crop growth (G2, G3 and RUE) were calibrated either from variables measured in the experiment (PHINT, G2) or adjusting the phenology (P1, P2, P5) and yield (G2, G3, RUE), using the trial-and-error approach (Gabriel et al., 2014). Model evaluation was with observed data of TLN, R1 and R6 dates and kernel yield (on a dry matter basis) from the 08/20/2013, 02/03/2014 and 08/15/2015 sowing dates, which are independent data. Cardinal temperatures (T_b = base temperature and T_{op} = optimal temperature) used for calibrating P1, P5 and PHINT were 8°C and 28°C (Streck et al., 2009) for the landrace and ‘BRS Missões’ cultivars, and 8°C and 34°C for the hybrid (Jones et al., 2003).

The evaluation of the performance of the CSM-Ceres-Maize model was with the statistics Root Mean Square Error (RMSE) (Streck et al., 2008), Normalized RMSE (Loague & Green, 1991), Pearson Correlation (Willmott, 1981), and BIAS (Wallach, 2006):

$$\text{RMSE} = \left[\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE} = \text{RMSE} * \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\left\{ \left[\sum (O_i - \bar{O})^2 \right] \left[\sum (S_i - \bar{S})^2 \right] \right\}^{0.5}} \quad (3)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum S_i - \sum O_i}{\sum O_i} \quad (4)$$

where S_i is the simulated values, \bar{S} is the mean of the simulated values, O_i is the observed values, \bar{O} is the mean of the simulated values, and n is the number of observations.

As an application of the model for the Rio Grande do Sul State, we run the calibrated CSM-Ceres-Maize model for the four cultivars in the 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 and 2013/2014 growing season in Santa Maria at a 5-day interval sowing dates starting on August 1st and ending on March 4th. Furthermore, the calibrated CSM-Ceres-Maize model was run for the four cultivars in the 2013/2014 growing season at a 5-day interval sowing dates starting on August 1st and ending on March 4th, for 15 locations across the Rio Grande do Sul State (Figure 1). The goal of these runs was to simulate the potential kernel yield of these four cultivars during the recommended sowing period for the whole State and to test the hypothesis that landrace maize cultivars are more stable throughout the growing season compared to improved maize cultivars, mainly hybrids.

Results and Discussion

The calibrated parameters of the CSM-Ceres-Maize for the four genotypes used in this study are in Table 1. The calibrated RUE varied from 2.89 to 4.0 g MJ⁻¹ PAR, RUE is inversely proportional to the parameter G2 (maximum kernel number per plant), indicating that the hybrid and the ‘BRS Missões’ cultivars are more efficient in partitioning dry matter to kernels than the landrace cultivars.

The observed vs. simulated days after sowing (DAS) for emergence (EM), silking (R1) and physiological maturity (R6) (A), and final leaf number (FLN) (B) for the four cultivars are in Figure 2. Overall, the RMSE was 5.48 days and other statistics indicated good performance of the model in predicting the phenology of all cultivars (Figure 2A). Among sowing dates, RMSE varied from zero to 2 days for emergence date, zero to 14 days for R1 and 1 to 10 days for R6 (Table 2). Phenology was better simulated in the late sowing date (02/03/2014) than in the early sowing dates (08/20/2013 and 08/15/2014). Among the landrace cultivars, predictions after R1 and R6 were better for ‘Bico de Ouro’ than ‘Cinquentinha’ in the early sowing dates (Table 2).

For the variable final leaf number, the overall RMSE was 1.97 leaves and the model slightly overestimated (BIAS=0.02), but other statistics (r and NRMSE) indicate that the performance of the model was good (Figure 2B). In the first sowing date, the model underestimated the FLN of ‘Cinquentinha’ and ‘AS 1573PRO’ (RMSE=4.1; RMSE=0.6) and overestimated for ‘Bico de Ouro’ e ‘BRS Missões’ (RMSE=0.9) (Table 2). In the third sowing date, the model overestimated the FLN of ‘Bico de Ouro’, ‘BRS Missões’ and ‘AS1573PRO’ (RMSE=2.6; RMSE=1.5; RMSE=2.0) and for ‘Cinquentinha’ the model was excellent (RMSE= 0.3) (Table 2). In the fourth sowing date, the model overestimated for the four cultivar, in 1.8 leaves for ‘Cinquentinha’, 1.9 for ‘Bico de Ouro’, 2.3 for ‘BRS Missões’ and in 1.6 for ‘AS 1573PRO’.

The performance of the CSM-Ceres-Maize model in simulating leaf development (Figure 3 and Table 2) indicates that the model captured the leaf development dynamics in both sowing dates quite well, with a slight underestimation in ‘Cinquentinha’ (BIAS=-0.02) (Figure 3A), and a slight overestimation for ‘Bico de Ouro’ (BIAS=0.048) (Figure 3B), for ‘BRS Missões’ (BIAS=0.12) (Figure 3C), and for ‘AS 1573PRO’ (BIAS=0.06) (Figure 3D).

Kernel yield had an overall RMSE of 1.01 Mg ha⁻¹ (Figure 4), varying from 0.3 to 0.7 Mg ha⁻¹ in the first sowing date, from 0.4 to 1.3 Mg ha⁻¹ in the third sowing date and from 0.1 to 2.1 Mg ha⁻¹ in the fourth sowing dates (Table 2). The model slightly overestimated kernel yield (BIAS=-0.03) and the performance of the model was good ($r=0.867$; NRMSE=14.5%). The range of the observed yield data was from 4.7 to 10.5 Mg ha⁻¹, while the simulated yield varied from 3.8 to 10.2 Mg ha⁻¹.

The Normalized RMSE (NRMSE) of 7.6% for the phenology (Figure 2A) is similar to the value of NRMSE reported by Pereira et al. (2010) (NRMSE \leq 6.8%) and Soler et al. (2007) (NRMSE=0.7%). The RMSE and NRMSE of 1.01 and 14.5%, respectively, for yield (Figure 4) are similar to the value of RMSE reported by Kiniry et al. (1997) (RMSE=1.0 Mg ha⁻¹), Fraisse et al. (2001) (RMSE=0.8 Mg ha⁻¹), Xie et al. (2001) (RMSE=0.83 Mg ha⁻¹), Soler et al. (2007) (NRMSE<10%), Yang et al. (2009) (RMSE=0.783 Mg ha⁻¹), Pereira et al. (2010) (NRMSE<20%), Landry & Lobell. (2012) (NRMSE= 15 to 25%) and Liu et al. (2012) (NRMSE=14.6%). These results indicate that the calibrated parameters of the CSM-Ceres-Maize (Table 1) are suitable for the landrace and for the two improved maize cultivars ‘BRS Missões’ and the transgenic simple hybrid ‘AS 1573PRO’.

The simulated kernel yield of the four maize cultivars as a function of sowing date (at a 5-day interval), average of four growing seasons (2010/11, 2011/12, 2012/13 and 2013/14) in Santa Maria (Figure 5) indicates higher potential yield for the hybrid ‘AS 1573PRO’ and for the ‘BRS Missões’ than for the two landrace maize cultivars for sowings from August 1st to about December 25th, whereas for the sowings from about January 1st to about January 30th the potential yield of the landrace cultivars is as high as the hybrid. Kernel yield of all cultivars dropped steadily for sowing dates later than February 1st, with the landrace cultivar ‘Cinquentinha’ showing the highest yield. The drop in kernel yield for late sowing date is

typical of the 'Safrinha' season in Rio Grande do Sul, because of low temperature and solar radiation during Fall in the subtropics.

The kernel yield simulated for the 15 locations across the Rio Grande do Sul State as a function of sowing date during the 2013/2014 growing season (Figure 6). Shows similarity in the trend of kernel yield of the four maize cultivars as a function of sowing date in all regions of Rio Grande do Sul. The locations further North in the State had the highest yields (Figure 6A, 6B, 6C, 6D, 6E, 6F, 6G, 6H and 6I), especially the landrace maize cultivars, because in these regions daily minimum temperatures were lower, so that nighttime respiration is lower and consequently daily net assimilation is greater. In all locations, except São José dos Ausentes (Figure 6G), higher potential yield is for 'BRS Missões' and the hybrid 'AS 1573PRO' for sowing dates from August 1st to December 25th, and from January 1st to about January 30th the higher potential yield is for the landrace maize cultivars following the same trend shown in Figure 5. Among the landrace cultivars, the yield of the cultivar 'Cinquentinha' was greater than the yield of 'Bico de Ouro' for sowing dates later than January 1st in most of the locations (Figure 6).

The results of the numerical study (Figures 5 and 6) tested the hypothesis that landrace maize cultivars are more stable in terms of potential kernel yield during the growing season. While kernel yield of the hybrid was greater (about 10-14 Mg ha⁻¹) for sowings from early August to late December with a sharp drop in yield was simulated for sowings after January 1st, kernel yield of the landrace maize cultivars was kept at about 6-10 Mg ha⁻¹ from early August to late January, i.e potential yield of the landrace cultivars lasted at least one month more than the hybrid, indicating more stability of yield in the farmer compared to the latter.

The ability of the CSM-Ceres-Maize model to describe the genotype x environment interaction in hybrid maize cultivars has been largely tested (Pereira et al., 2010; Liu et al., 2011). This study extends the applicability of the model to landrace maize cultivars and the

‘BRS Missões’, an improved open pollination variety grown in southern Brazil. The mechanistic nature of Ceres-Maize (Jones & Kiniry, 1986) is a major feature of this model and constitutes a powerful tool for research and other applications.

A major challenge in crop simulations models is that their genotype-specific coefficients need to be constantly calibrated as new cultivars are released every year. For landrace and other open pollination maize cultivars this challenge maybe less difficult to accomplish than for the maize hybrids as farmers can use OVP’s for years or even decades without losing potential yield. Therefore, efforts for calibrating crop simulation models for landrace maize cultivars should be more frequent in research proposals.

Conclusions

1. The CSM-Ceres-Maize model is calibrated for two landrace and for two improved maize cultivars.
2. Potential kernel yield of landrace maize is more stable during the growing season than the hybrid cultivars.

References

- ARAÚJO, P.M.; NASS, L.L. Caracterização e avaliação de populações de milho crioulo. **Scientia Agricola**, v.59, n.3, p.589-593, 2002.
- BALBINOT, J.R.; ALVADI, A.; BACKES, R.L.; ALVES, A.C.; OGLIARI, J.B.; FONSECA, J.A. Contribuição de componentes de rendimento na produtividade de grãos em variedades de polinização aberta de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.11. n.2. p.161- 166, 2005.
- CANTELAUBE, P.; TERRES, J.M. Seasonal weather forecasts for crop yield modeling in Europe. **Tellus A**, v.57, p.476-487, 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E DE FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS/NRS, 2004.

CONAB [Companhia Nacional de Abastecimento]. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 20 Setembro 2014.

DOGAN, E.; CLARK, G.A.; ROGERS, D.H.; MARTIN, V.; VANDERLIP, R.L. On-farm scheduling studies and Ceres-Maize simulation of irrigated corn. **Applied Engineering in Agriculture**, v.24, p. 509-516, 2006.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

FRAISSE, C.W.; SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R. Calibration of the Ceres-Maize model for simulating site-specific crop development and yield on claypan soils. **Applied Engineering in Agriculture**, v.17, n.4, p.547-556, 2001.

GABRIEL, L.F.; STRECK, N.A.; ROBERTI, D.R.; CHIELLE, Z.G.; UHLMANN, L.O.; SILVA, M.R.; SILVA, S.D. Simulating Cassava Growth and Yield under Potential Conditions in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, v.106, p.1-19, 2014.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; HUNT, L.A.; SINGH, U.; LIZASO, J.L.; WHITE, J.W.; URYASEV, O.; ROYCE, F.S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A.J.; TSUJI, G.Y.; KOO, J. 2012. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. Ceres-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, Texas, 1986. 94p.

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

KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; VANDERLIP, R.L.; ATWOOD, J.D.; REICOSKY, D.C.; MULLIKEN, J.; COX, W.J.; MASCAGNI, H.J.; HOLLINGER, S.E., WIEBOLD, W.J. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. **Agronomy Journal**, v.89, p.421-426, 1997.

LANDRY, G.M.; LOBELL, D.B. Evaluating the Contribution of Weather to Maize and Wheat Yield Trends in 12 U.S. Counties. **Agronomy Journal**, v.104, p.301-311, 2012.

LIU, H.L.; YANG, J.Y.; DRURY, C.F.; REYNOLDS, W.D.; TAN, C.S.; BAI, Y.L.; HE, P.; JIN, J.; HOOGENBOOM, G. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.89, p.313-328, 2011.

LIU, H.L.; YANG, J.Y.; HE, P.; BAI, Y.L.; JIN, J.; DRURY, C.F.; ZHU, Y.; YANG, X.; LI, W.; XIE, J.; YANG, J.; HOOGENBOOM, G. Optimizing parameters of CSM-CERES-Maize model to improve simulation performance of maize growth and nitrogen uptake in Northeast China. **Journal of Interactive Agriculture**, v.11, p.1898-1913, 2012.

LOAGUE, K., GREEN, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.7, p.51-73, 1991.

MACHADO, A. T.; MACHADO, C. T. T.; NASS, L. L. Manejo da diversidade genética e melhoramento participativo de milho em sistemas agroecológicos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.6, n.1, p.127-136, 2011.

PEREIRA, A.M.A.R.; VON PINHO, R.G.; PAGLIS, C.M.; PEREIRA, J.L.A.R.; ALTOÉ, T.F. Eficiência do modelo Ceres-Maize na simulação do desempenho de híbridos de milho¹. **Revista Ceres**, v.57, n.4, p.486-493, 2010.

SHIN, D.W.; BELLOW, J.G.; LAROW, T.E.; COCKE, S.; O'BRIEN, J.J. The role of an Advanced Land Model in Seasonal Dynamical Downscaling for Crop Model Application.

Journal Applied Meteorology and Climatology, v.45, p.686-701, 2006.

SHIN, D.W.; BAIGORRIA, G.A.; LIM, Y.K., COCKE, S.; LAROW, T.E.; O'BRIEN, J.J.; JONES, J.W. Assessing Maize and Peanut Yield Simulations with Various Seasonal Climate

Data in the Southeastern United States. **Journal Applied Meteorology and Climatology**, v.49, p.592-603, 2009.

SANDRI, C.A.; TOFANELLI, M.B.D. Milho Crioulo: Uma alternativa de rentabilidade no campo¹. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, n.1, p.59-61, 2008.

SOLER, C.M.T.; SENTELHAS, P.C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy**, v.27, p.165-177, 2007.

STRECK, N.A.; LAGO, I.; GABRIEL, L.F.; SAMBORANHA, F.K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.4, p.449-455, 2008.

USDA [United States Department Agriculture]. Disponível em <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/>>. Acesso em: 20 Setembro 2014.

XIE, Y.; KINIRY, J.R.; NEDBALEK, V.; ROSENTHAL, W.D. Maize and Sorghum Simulations with CERES-Maize, SORKAM, and ALMANAC under Water-Limiting Conditions. **Agronomy Journal**, v.93, p.1148-1155, 2001.

YANG, Z.; WILKERSON, G.G.; BUOL, G.S.; BOWMAN, D.T.; HEINIGER, R.W. Estimating Genetic Coefficients for the CSM-CERES-Maize Model in North Carolina Environments. **Agronomy Journal**, v.101, p.1276-1285, 2009.

WALLACH, D. **Evaluating crop models**. p. 11–50. *In* D. Wallach et al. (ed.) Working with dynamic crop models: Evaluation, analysis, parameterization, and applications. Elsevier, Amsterdam. 2006.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**. v.2, p.184-194, 1981.

Table 1. Calibrated parameters for the optimization procedure of the CSM-Ceres-Maize for two maize landrace, ‘Cinquentinha’ and ‘Bico de Ouro’, and two improved cultivars, open pollination variety ‘BRS Missões’ and a transgenic simple hybrid ‘AS 1573PRO’.

Cultivar	Parameters						
	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT	RUE
‘Cinquentinha’	225.0	0.800	896.0	500.0	8.0	45.45	4.0
‘Bico de Ouro’	360.0	0.000	824.0	400.0	10.0	43.47	3.7
‘BRS Missões’	300.0	0.000	639.6	700.0	17.0	41.66	3.0
‘AS 1573PRO’	290.0	0.500	773.8	900.0	21.0	45.45	2.89

P1=Thermal time from seedling emergence to the end of the juvenile phase (°C day), P2=Extent to which development is delayed for each hour increase in photoperiod above the longest photoperiod at which development proceeds at a maximum rate (which is considered to be 12.5 hours) (day), P5=Thermal time from silking to physiological maturity (°C day), G2=Maximum possible number of kernels per plant (number), G3=Kernel filling rate during the linear grain filling stage and under optimum conditions (mg/day), PHINT=Phylochron interval; the interval in thermal time between successive leaf tip appearances (°C day), RUE=Radiation use efficiency (g plant dry matter/MJ PAR).

Table 2. Root mean square error (RMSE) values of the simulation of emergence (EM), silking (R1), physiological maturity (R6), tip leaf number (TLN), final leaf number (FLN) and kernel yield (Yield) of two landrace maize ‘Bico de Ouro’ e ‘Cinquentinha’, and of two improved maize cultivars, one OPV ‘BRS Missões’ and a transgenic simple hybrid ‘AS 1573PRO’ with the CSM-Ceres-Maize model, grown in Santa Maria, RS, Brazil in two sowing dates.

Cultivar	EM	R1	R6	TLN	FLN	Yield
		Days		Leaves plant ⁻¹		Mg ha ⁻¹
Sowing Date: 08/20/2013						
‘Cinquentinha’	1	12	10	1.8	4.1	0.7
‘Bico de Ouro’	1	2	6	0.7	0.9	0.6
‘BRS Missões’	1	4	3	1.4	0.9	0.3
‘AS 1573PRO’	1	3	6	0.8	0.6	0.3
Sowing Date: 02/03/2014						
‘Cinquentinha’	0	1	-	0.5	0.09	1.1
‘Bico de Ouro’	0	6	-	1.0	2.6	1.3
‘BRS Missões’	0	0	-	1.0	1.5	0.4
‘AS 1573PRO’	1	1	-	1.1	2.0	0.7
Sowing Date: 08/15/2014						
‘Cinquentinha’	2	14	9	1.8	2.7	0.9
‘Bico de Ouro’	2	7	3	1.9	1.5	1.6
‘BRS Missões’	1	7	5	2.3	2.2	0.1
‘AS 1573PRO’	2	9	1	1.6	0.7	2.1

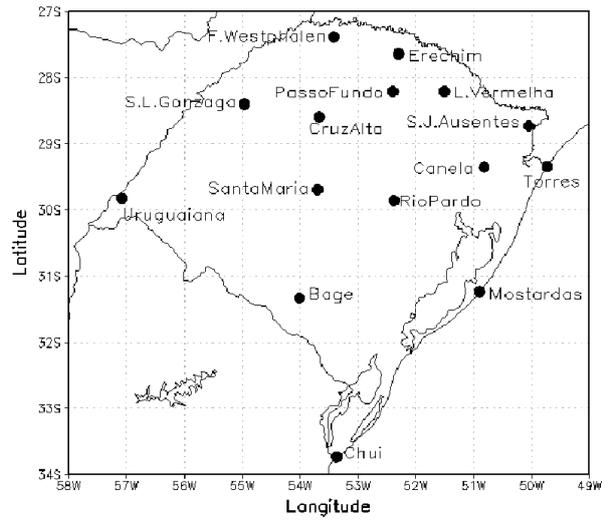


Figure 1. Map of the Rio Grande do Sul State, Brazil, with the location used to calibrate and evaluate the CSM-Ceres-Maize model (Santa Maria) and the locations of the meteorological stations used to run the CSM-Ceres-Maize model.

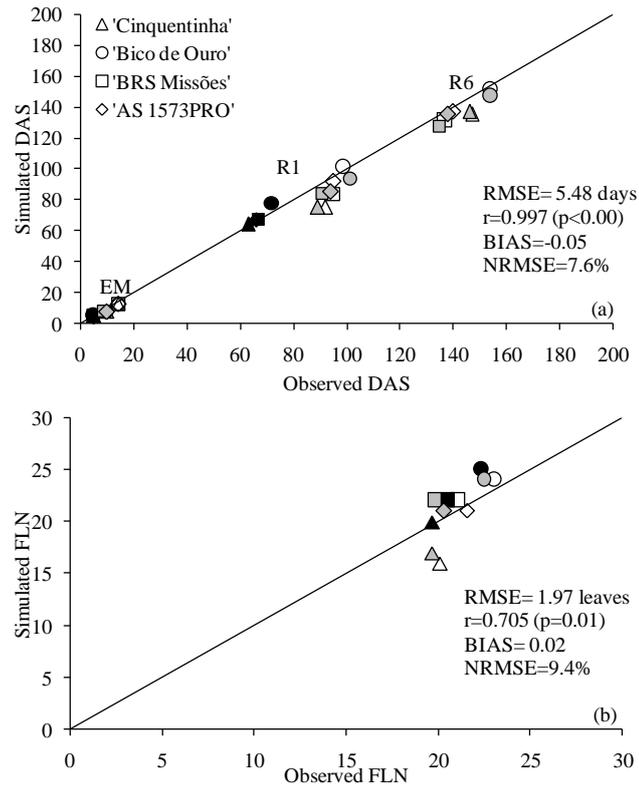


Figure 2. Observed vs. Simulated (A) days after sowing (DAS) for emergence (EM), silking (R1) and physiological maturity (R6), and (B) final leaf number (FLN) of two landrace maize ‘Cinquentinha’ and ‘Bico de Ouro’, and of two improved maize cultivars ‘BRS Missões’ and ‘AS 1573PRO’ using the CSM-Ceres-Maize, Santa Maria, RS, Brazil. Open symbols are the first sowing date (08/20/2013), black symbols are the third sowing date (02/03/2014) and grey symbols are the four sowing date (08/15/2014). RMSE= root mean square error, RMSE*= root mean square error excluding the TLN data at the end of the vegetative phase when leaf number was defined, NRMSE= normalized root mean square error, r = correlation coefficient, BIAS= BIAS index.

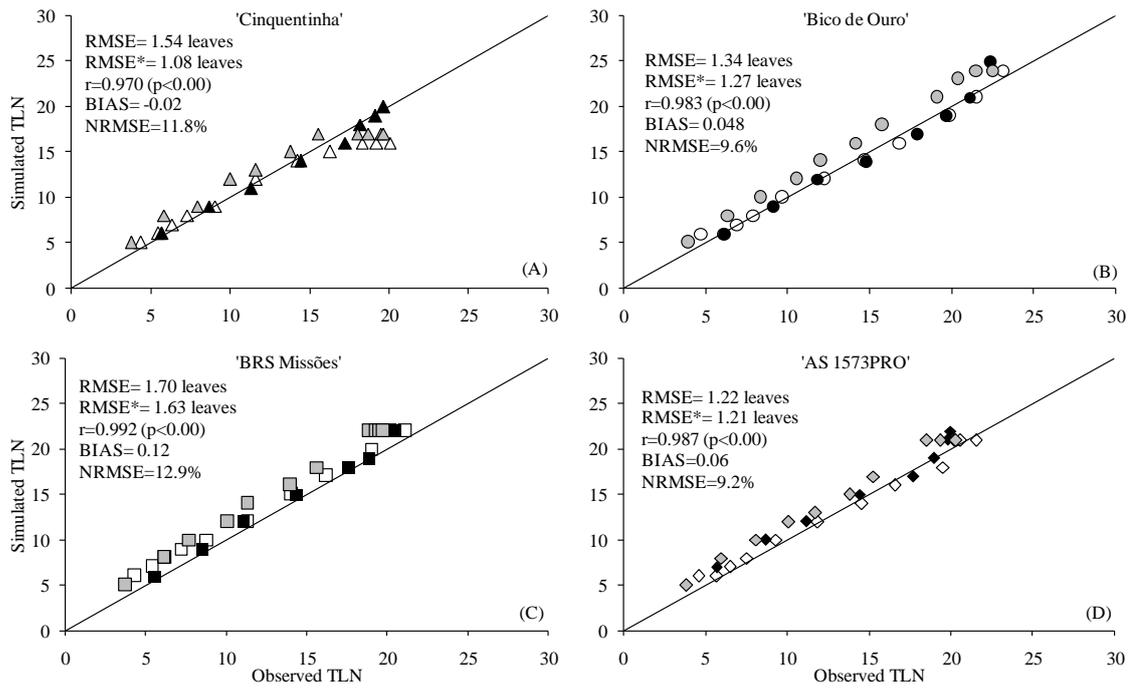


Figure 3. Observed vs. Simulated tip leaf number (TLN) of two landrace maize 'Cinquentinha' (A) and 'Bico de Ouro' (B), and of two improved maize cultivars 'BRS Missões' (C) and 'AS 1573PRO' (D) using the CSM-Ceres-Maize model, Santa Maria, RS, Brazil. Open symbols are the first sowing date (08/20/2013), black symbols are the third sowing date (02/03/2014) and grey symbols are the four sowing date (08/15/2014). RMSE= root mean square error, RMSE*= root mean square error excluding the TLN data at the end of the vegetative phase when leaf number was defined, NRMSE= normalized root mean square error, r= correlation coefficient, BIAS= BIAS index.

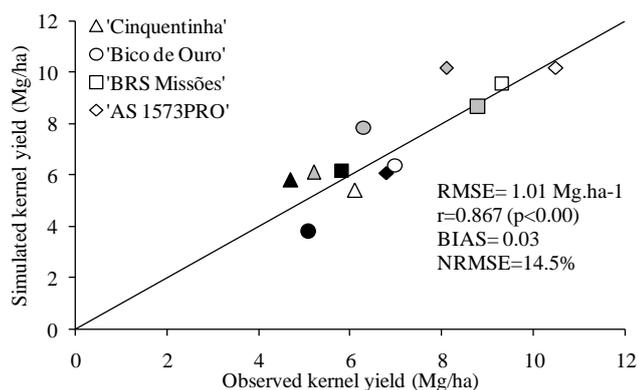


Figure 4. Observed vs. Simulated kernel dry matter yield (TLN) of two landrace maize ‘Cinquentinha’ (A) and ‘Bico de Ouro’ (B), and of two improved maize cultivars ‘BRS Missões’ (C) and ‘AS 1573PRO’ (D) using the CSM-Ceres-Maize model, Santa Maria, RS, Brazil. Open symbols are the first sowing date (08/20/2013), black symbols are the third sowing date (02/03/2014) and grey symbols are the four sowing date (08/15/2014). RMSE= root mean square error, RMSE*= root mean square error excluding the TLN data at the end of the vegetative phase when leaf number was defined, NRMSE= normalized root mean square error, r= correlation coefficient, BIAS= BIAS index.

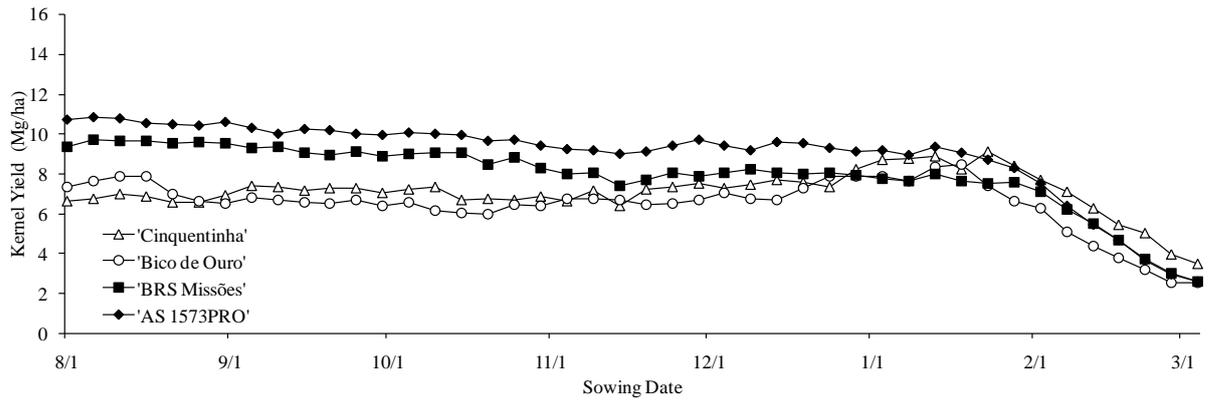


Figure 5. Kernel dry matter yield of maize cultivars ‘Cinquentinha’, ‘Bico de Ouro’, ‘BRS Missões’ and ‘AS 1573PRO’ as a function of sowing date (average of four growing seasons: 2010/11, 2011/12, 2012/13 and 2013/14) in Santa Maria, RS, Brazil, simulated with the CSM-Ceres-Maize model.

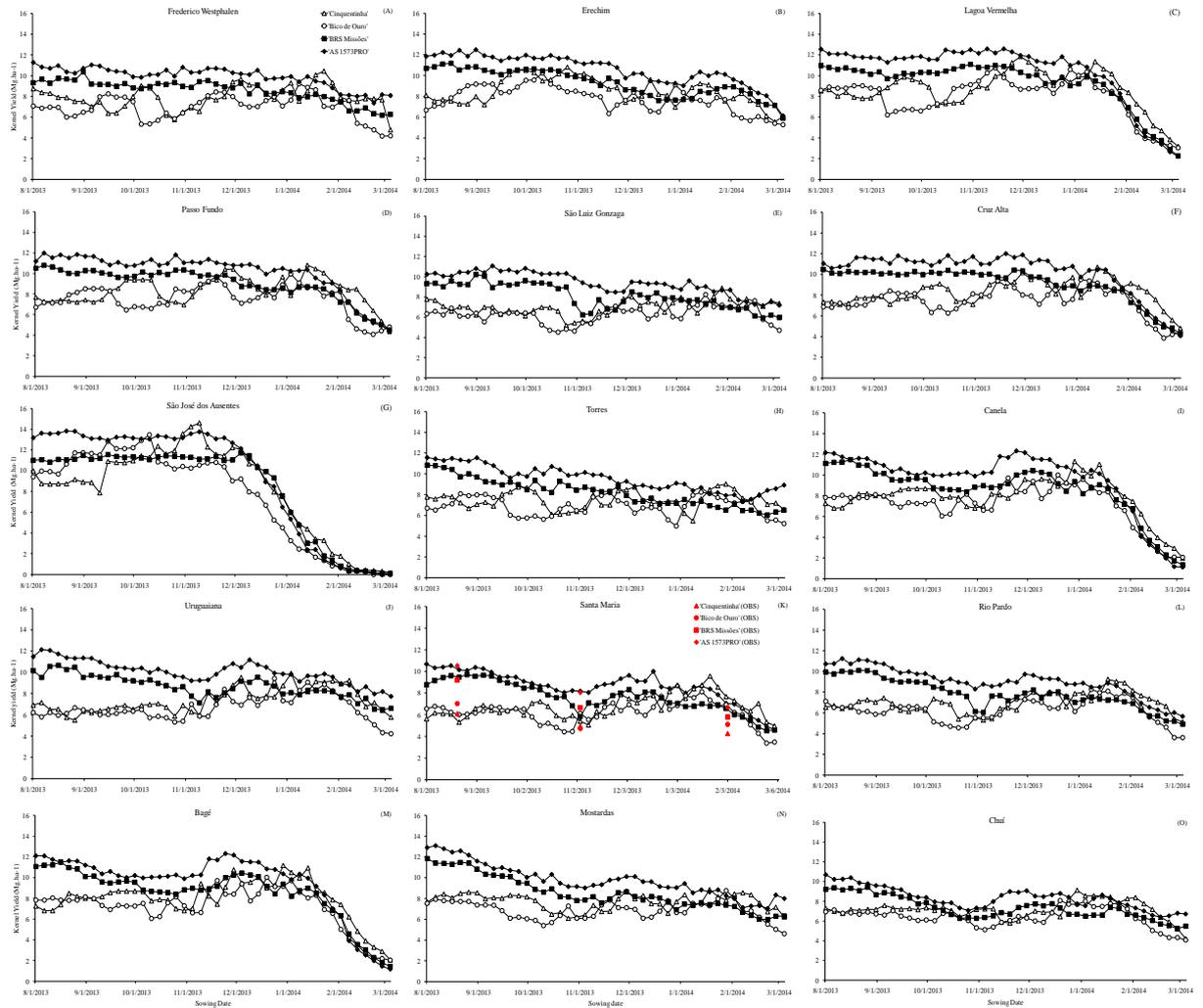


Figure 6. Kernel dry matter yield of maize cultivars ‘Cinquentinha’, ‘Bico de Ouro’, ‘BRS Missões’ and ‘AS 1573PRO’ as a function of sowing date in 15 locations across the Rio Grande do Sul State (Figure 1) during the 2013/14 growing season simulated with the CSM-Ceres-Maize model. In panel (K), observed data from the experiment in Santa Maria are also shown.

4 DISCUSSÃO

O uso de modelos matemáticos de simulação das culturas tem aumentado nas últimas duas décadas, especialmente em países fora do bloco econômico principal, incluindo-se o Brasil. Este aumento está associado a dois fatores principais. Primeiro, as ferramentas computacionais tem se tornado mais amigáveis e a capacidade de processamento dos computadores pessoais tem aumentado substancialmente. Segundo, o acúmulo de conhecimento em áreas como ecofisiologia, melhoramento vegetal e manejo das culturas agrícolas propiciou a melhoria na descrição dos processos de crescimento e desenvolvimento vegetal nos código-fonte dos modelos agrícolas.

Entre os modelos agrícolas, os chamados modelos baseados em processos (*process – based models*) são os que tiveram a maior expansão de uso pois, diferentemente de modelos empíricos, “abrigam” em sua estrutura mecanismos e processos que são responsáveis pela interação genótipo x ambiente das culturas em condições de campo. Esta estrutura permite uma maior possibilidade do modelo funcionar agronomicamente em condições locais e em locais diferentes em que o modelo foi desenvolvido. O modelo usado nesta dissertação é um exemplo desta abordagem. Das várias dezenas de parâmetros que são necessários para rodar o modelo CSM-Ceres-Maize, a calibração de apenas sete parâmetros (Tabela 1 do artigo desta dissertação) foi suficiente para calibrar o modelo para três cultivares de polinização aberta, sendo duas delas cultivares crioulas de milho.

Após a calibração e avaliação do desempenho, o modelo foi usado para testar a hipótese de maior estabilidade de produtividade nas cultivares crioulas em comparação com duas cultivares melhoradas, uma variedade de polinização aberta e um híbrido simples transgênico. Ainda que a estabilidade tenha sido testada na condição sem restrição hídrica e, portanto, foi excluído um dos fatores principais que causam redução na produtividade de milho ao redor do mundo, existem outros fatores ambientais que causam estresse na planta de milho, notadamente a temperatura e a radiação solar em regiões extra-tropicais, o que foi demonstrado no estudo numérico realizado para 15 locais do Rio Grande do Sul durante o ano agrícola 2013/2014 (Figura 6 do artigo desta dissertação). Este é mais um exemplo de como modelos de simulação das culturas agrícolas com bases ecofisiológicas consistentes podem ajudar diversos setores da sociedade (acadêmicos, pesquisadores, extensionistas e tomadores de decisão) a entender melhor a dinâmica da interação genótipo x ambiente em agroecossistemas.

Por fim, a calibração e a avaliação do desempenho de modelos agrícolas ainda é uma atividade laboriosa e que necessita pessoal altamente especializado, dedicado e com persistência. Esta é uma característica de modelos matemáticos de culturas agrícolas, pois mesmo modelos dinâmicos baseados em processos, que “auto-resolvem” muitos dos processos matemáticos no código-fonte, necessitam (e sempre necessitarão) de calibração dos parâmetros genéticos da cultura, pois novas cultivares são lançadas anualmente. Isto mostra a importância da obtenção dos códigos-fonte para a constante melhoria de processos ecofisiológicos e calibração de parâmetros genéticos. Grupos de pesquisa nas universidades, Institutos e empresas públicas e privadas que buscam nos modelos agrícolas uma ferramenta de trabalho continuarão a ter estes desafios futuros, o que implica em construção de propostas de pesquisas de longo prazo e de financiamento permanente.

5 CONCLUSÃO

- Com a realização deste trabalho foi possível calibrar e avaliar o desempenho do modelo CSM-Ceres-Maize para cultivares crioulas e melhoradas de milho e também realizar uma análise de sensibilidade do modelo para diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul. Em geral, o modelo teve um bom desempenho em simular os diferentes processos fenológicos e de crescimento da cultura do milho, captando as diferenças genotípicas e, em especial, de produtividade nas diferentes épocas de semeadura.

- Como o modelo CSM-Ceres-Maize utilizado neste trabalho estava hospedado na plataforma DSSAT, não foi possível obter o código fonte com as equações matemáticas, por isso não foi possível entender com clareza como eram calculados muitos processos (soma térmica, por exemplo). Assim, destaca-se a importância de abrir os códigos-fonte de modelos agrícolas para a comunidade científica interessada em seu uso.

REFERÊNCIAS

AGROESTE. Disponível em: < <http://www.agroeste.com.br/hibridos-de-milho/1/safrinha-2015/5/as-1573>> Acesso em 26 de Abril de 2015.

ARAÚJO, P. M.; NASS, L. L. Caracterização e Avaliação de populações de milho crioulo. **Scientia Agricola**, v.59, p. 589-593, 2002.

ASADI, M. E.; CLEMENTE, R. S. Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. **Food, Agriculture and Environment**, v.1, p. 270-276, 2003.

BANTERNG, P. et al. Yield stability evaluation of peanut lines: a comparison of an experimental versus a simulation approach. **Field Crops Research**, v.96, p.168-175, 2006.

BERG, T. Landraces and folk varieties: a conceptual reappraisal of terminology. **Euphytica**, n. 166, p.423–430, 2009.

BERGAMASCHI, H., COSTA, S. M. S. D., WHEELER, T. R., CHALLINOR, A. J. Simulating maize yield in sub-tropical conditions of southern Brazil using Glam model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 132-140, 2013.

BERGAMASCHI, H., MATZENAUER, R. **O Milho e o Clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84p. il.

BUCKLER, E. S.; STEVENS, N. M. **Maize origins, domestication, and selection**. In: MOTLEY, T. J.; ZEREGA, N.; CROSS, H. (Ed.). Darwin's harvest. New York: Columbia University Press, 2005. p. 67-90.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; FERREIRA, M. Cartas mensais e anual das chuvas do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.7, p.55-82, 1977.

CARBERRY, P. S.; MUCHOW, R. C.; McCOWN, R. L. Testing the CERES-Maize Simulation model in a Semi-Arid Tropical Environment, **Field Crops Research**, v.20, p. 297-315, 1989.

CERA, J. C., FERRAZ, S. E. T. Variações Climáticas na Precipitação do Rio Grande do Sul. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, PA. **Anais...** Belém, < http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/340_80886.pdf>.

CIB, Conselho de Informações sobre Biotecnologia. 2006. Guia do milho: tecnologia do campo à mesa. Disponível em: < http://www.cib.org.br/pdf/guia_do_milho_CIB.pdf> . Acesso em 07 Outubro 2014.

COCCO, D.T. **Descritores morfoagronômicos em cultivares crioulas de milho conservadas on farm em Imabara - RS**. 2014. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CONAB [Companhia Nacional do Abastecimento]. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>> Acesso em 07 de Outubro de 2014.

CUTFORTH, H.W.; SHAYKEWICH, C.F. A temperature response function for corn development. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.50, p.159–171, 1990.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-produtos-processos-e-servicos/-/produtoservico/383/milho--brs-missoes>> Acesso em 26 de Abril de 2015.

FAO. Food And Agriculture Organization Of The United Nations. **Boletín de Agricultura familiar de América Latina y el Caribe, Julio-Septiembre, 2012**. Online. Disponível na Internet: http://www.rlc.fao.org/uploads/media/baf_201209.pdf. Acessado em: 07 de Outubro de 2014.

FLACH, R.; GRIMM, A. M. Eventos extremos e totais mensais de precipitação na América do Sul durante ENOS e condições normais no clima presente e em cenários futuros. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém, **Anais...**Belém: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2010.

FRUET, S. F. T. **Estudo de descritores morfoagronômicos em cinco cultivares crioulas de milho conservadas in situ on farm em Imabara - RS**. 2014. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

GEDANKEN, A.; MANTOVANI, E.C.; MANTOVANI, B.H.M.; COSTA, L.C.; SANS, L.M.A.; FREITAS, P.S.L. Utilização do modelo Ceres-Maize na avaliação de estratégias de irrigação na cultura do milho em duas regiões do Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.25, p. 439-447, 2003.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863-2880, 1998.

HOOGENBOOM, G., J.W. JONES, P.W. WILKENS, C.H. PORTER, K.J. BOOTE, L.A. HUNT, U. SINGH, J.L. LIZASO, J.W. WHITE, O. URYASEV, F.S. ROYCE, R. OGOSHI, A.J. GIJSMAN, G.Y. TSUJI, AND J. KOO. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2012

JONES, J.W.; HANSEN, J.W.; ROYCE, F.S.; MESSINA, C.D. Potential benefits of climate forecasting to agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.82, p. 169-184, 2000.

JONES et al. The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3, p. 235-265, 2003.

LAGO, I.; STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M.; OLIVEIRA, F.B.; PAULA, G.M. de. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red Rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1441-1448, 2008.

LIU, W.T.H.; BOTNER, D.M.; SAKAMOTO, C.M. Application of Ceres-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.45, p. 299-312, 1989.

MACHADO, A. T.; SANTILLI, J.; MAGALHÃES, R. A agrobiodiversidade com enfoque agroecológico: implicações conceituais e jurídicas. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, DF. 2008.

MACHADO, A.T.; MACHADO, C.T.T.; NASS, L.L. Manejo da diversidade genética e melhoramento participativo de milho em sistemas agroecológicos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz Alta, RS, v.6, n.1, p. 127-136, 2011.

MDA. **Agricultura familiar no Brasil e o Censo Agropecuário 2006**. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO, 2009. Online. Disponível na Internet: <http://portal.mda.gov.br/plano-safra/arquivos/view/censo_agropecuário.pdf. Acessado em: 07 de Outubro de 2014.

MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; CAIAFFO, M.R. Zoneamento Agroclimático da cultura de milho por épocas de semeadura, no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.6, n.1, p. 39-54, 2000.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

PAES, M. C. D. **Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. (Circular técnica, 75).

PATERNIANI, E.; NASS, L. L.; SANTOS, M. D.; UDRY, C. W.; DUARTE, W. O valor dos recursos genéticos de milho para o Brasil: uma abordagem histórica da utilização do germoplasma. **Uma história brasileira do milho: o valor dos recursos genéticos**. Brasília: Paralelo, v. 15, p. 11-41, 2000.

RUSSEL, W.K.; STUBER, C.W. Effects of Photoperiod and Temperatures on the Duration of Vegetative Growth in Maize. *Crop Science*, v.23, n. 5, p. 847-850, 1983.

SANDRI, C.A.; TOFANELLI, M.B.D. Milho Crioulo: uma alternativa para rentabilidade no campo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, n.1, p. 59-61, 2008.

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

SHIN, D. W.; BELLOW, J. G.; LAROW, T. E.; COCKE, S.; O'BRIEN, J. J. The role of an advanced land model in seasonal dynamical downscaling for crop model application. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, p. 686-701, 2006

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, S. Incorporating a chronology response into prediction of leaf appearance rate in winter wheat, **Annals of Botany**, v. 92, p. 181-190, 2003a.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, S. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, p. 139-150, 2003b.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 424-433, 2006a.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1351-1359, 2006b.

STRECK, N. A. ; LAGO, I. ; GABRIEL, L. F. ; SAMBORANHA, F. K. Simulating maize

phenology as a function of air temperature with a linear and a non-linear model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.449-455, 2008.

STRECK, N. A. ; GABRIEL, L. F. ; SAMBORANHA, F. K. ; LAGO, I. ; SCHWANTES, A. P. ; SCHONS, A. Comparing two versions of a non-linear model for simulating leaf number and developmental stages in maize based on air temperature. *Ciência Rural*, v.39, p.642-648, 2009.

STRECK., N.A.; SILVA, S.D.; LAGNER, J.A. Assessing the response of maize phenology under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p. 1-12, 2011.

STRECK, N.A.; SILVA, M.R.; ROSA, H.T.; WALTER, L.C.; BENEDETTI, R.P.; CARLI, C.; CHARÃO, A.S.; MARCOLIN, E.; FERRAZ, S.E.T.; MARCHESAN, E. Acompanhamento da safra 2012/2013 de arroz irrigado no Rio Grande do Sul por modelagem numérica. **Ciência e Natura**, Edição Especial, p. 368-372, 2013.

USDA [United States Department Agriculture]. Disponível em <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/>>. Acesso em 09 de Maio de 2013. 2013.

WHITE, J.W. Modeling temperature response in wheat and maize. El Batán, Mexico: CIMMYT - International Maize and Wheat Improvement Center, 2001. 60p. (Series 03-01).

YAN, W.; HUNT, L.A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany*, v.84, p.607-614, 1999.