

ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE
MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

S586m
2019 Silva, Adelaide Cristielle Barbosa da, 1993-
Modelagem e validação do crescimento e produção de
milho / Adelaide Cristielle Barbosa da Silva. – Viçosa, MG,
2019.

ix, 56 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 45-53.

1. *Zea mays*. 2. Milho - Cultivo - Métodos de simulação.
3. Produtividade agrícola. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.15

ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE
MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de julho de 2019.



José Mauro Valente Paes



João Carlos Cardoso Galvão
(Coorientador)



Paulo Roberto Cecon
(Coorientador)



Rubens Alves de Oliveira
(Orientador)

*“Trabalhemos como se tudo dependesse de nós.
Confiemos como se tudo dependesse de Deus”.*

(São João Bosco)

Ao Deus da minha vida, aos meus pais Vânia e
José Amilton (*in memoriam*) e ao meu irmão
Luíz Fernando, dedico com todo amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu adorado Deus toda minha gratidão, minha rocha inabalável e meu baluarte.

À minha amada mãe Vânia por todo apoio, carinho, conselhos e compreensão.

Ao meu amado pai José Amilton, que não mediu forças para a formação acadêmica de seus filhos, até o momento em que sua presença era motivo de alegria em nossas vidas. Meus primeiros educadores!

Ao meu querido irmão Luíz Fernando por toda confiança, incentivo, inspiração.

A toda minha família pelo carinho, compreensão e incentivo.

Ao professor Rubens por todo tempo dedicado, ensinamentos, confiança e paciência durante toda a orientação.

Aos professores Paulo Roberto Cecon e João Carlos Galvão, pelos ensinamentos e pela disponibilidade de coorientação.

Ao pessoal do Vale da Agronomia, em especial ao Paulo Paiva, Eduardo e Max, pela boa vontade e disponibilidade.

Aos estagiários, Bruno e William e ao amigo Robson pela amizade e pelos conhecimentos compartilhados no Vale da Agronomia.

A todos os amigos do CRRH, em especial, Sávio, Jesiele, Joslanny, Arnaldo, Laura, Rafael, David, Jasmine e Maria Antônia (Fisiologia), que fizeram minha estadia aqui em Viçosa mais agradável.

As minhas amigas, Fernanda e Izabelle, por todo companheirismo, amizade e paciência.

As minhas amigas Tayane Cristiele, Sandrely e Filomena por toda amizade e carinho.

Aos professores da pós-graduação e à Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela colaboração para o aperfeiçoamento desse trabalho.

E a todos que acreditaram e torceram por mim. Meu muito obrigada!

BIOGRAFIA

ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA, filha de José Amilton Pereira da Silva (*in memoriam*) e Vanilda Barbosa de Oliveira Silva, nasceu em Jaíba, MG, no dia 04 de Julho de 1993.

Em março de 2012 iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Minas Gerais, concluindo em julho de 2017.

Em agosto de 2017 iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em julho de 2019.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Geral.....	4
2.2 Específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1 A cultura do Milho.....	5
3.1.1 O milho no agronegócio	7
3.2 Métodos de estimativas de produtividade.....	9
3.3 Modelos de simulação	10
3.3.1 Softwares de simulação	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1 Localização do experimento	16
4.2 Características da área experimental.....	16
4.3 Época de plantio e tratos culturais	17
4.4 Definição do modelo.....	19
4.5 Obtenção e processamento dos dados.....	19
4.6 Estrutura do modelo.....	19
4.6.1 Submodelo Balanço Hídrico.....	20
4.6.2 Submodelo Graus-dia	22
4.6.3 Submodelo Fotossíntese	23
4.6.4 Submodelo Partição da Biomassa	25
4.7 Características avaliadas em campo	26
4.8 Análise estatística	27
4.8.1 Comparação entre os modelos	28

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Análise do Balanço Hídrico.....	30
5.2 Graus-dia.....	35
5.3 Fotossíntese e Partição da biomassa	37
5.4 Comparação entre os modelos STELLA e experimental.....	38
5.5 Análise de Produtividade	41
6. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICES	54
APÊNDICE A	55
APÊNDICE B	56

RESUMO

SILVA, Adelaide Cristielle Barbosa da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Modelagem e validação do crescimento e produção de milho.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: João Carlos Cardoso Galvão e Paulo Roberto Cecon.

O planejamento é fundamental para o sucesso da atividade agrícola. Atualmente, diversos softwares são utilizados pelos agricultores em vários países para esta finalidade. O STELLA é uma ferramenta computacional utilizada para simulação de uma infinidade de sistemas dinâmicos, podendo ser empregado na modelagem de culturas. Entretanto, para que os modelos representem adequadamente a realidade que ocorre em um sistema físico é imprescindível a validação dos mesmos nas condições ambientais que estão sendo modelados. Partindo dessa premissa, o objetivo neste estudo foi avaliar o uso do software STELLA na modelagem da cultura do milho híbrido DKB 390 PRO3, cultivado na Zona da Mata Mineira. Os dados de entrada referentes às condições climáticas foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia. O experimento foi realizado na Universidade Federal de Viçosa, com semeadura no dia 15 de outubro de 2019, seguindo o delineamento inteiramente casualizado, cujos tratamentos foram as dez avaliações realizadas durante o ciclo da cultura, com 40 repetições, nas quais foram analisadas a biomassa seca dos constituintes da planta, o índice de área foliar e a fotossíntese líquida. Os dados simulados e observados foram comparados por meio do teste “t” e do índice d, para verificar a igualdade e concordância entre os modelos. O rendimento dos grãos foi determinado para 13% de umidade. Os valores modelados pelo STELLA foram estatisticamente iguais aos valores mensurados e houve concordância entre as técnicas estudadas. Para as características massa seca de grãos, massa seca de raízes e índice de área foliar foram obtidos os melhores índices de concordância. A produtividade obtida foi alta, com valor de 13.236 kg ha⁻¹, sendo esta semelhante à produtividade simulada de 12.012 kg ha⁻¹. A modelagem da cultura do milho utilizando o software STELLA foi eficiente na simulação das características da planta. O modelo desenvolvido por meio do software STELLA mostrou-se uma tecnologia adequada para previsão do crescimento e da produtividade do milho, cultivado na Zona da Mata Mineira.

ABSTRACT

SILVA, Adelaide Cristielle Barbosa da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Modeling and validation of growth and corn production.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: João Carlos Cardoso Galvão and Paulo Roberto Cecon.

Planning is critical to the success of agricultural activity. Currently, farmers in several countries use various software for this purpose. STELLA is a computational tool used to simulate a multitude of dynamic systems and can be used in modeling cultures. However, for models to adequately represent the reality that occurs in a physical system, it is essential to validate them in the environmental conditions that are being modeled. Based on this premise, the objective of this study was to evaluate the use of the STELLA software in the modeling of the hybrid corn crop DKB 390 PRO3, grown in Zona da Mata Mineira. The input data regarding the climatic conditions were obtained from the National Institute of Meteorology. The experiment was carried out at the Federal University of Viçosa, with sowing on October 15, 2019, following the completely randomized design, which were the ten evaluations carried out during the crop cycle, with 40 replicates, in which the dry biomass of plant constituents, leaf area index and liquid photosynthesis. The simulated and observed data were compared using the "t" test and the d index, to verify the equality and agreement between the models. Mineral yield was determined at 13% moisture. The values modeled by STELLA were statistically the same as the values measured and there was agreement between the techniques studied. For the characteristics of dry mass of grains, dry mass of roots and index of leaf area, obtained the best indices of agreement. The yield obtained was high, with a value of 13,236 kg ha⁻¹, which is similar to the simulated productivity of 12,012 kg ha⁻¹. Corn crop modeling using STELLA software was efficient in simulating plant characteristics. The model developed using the STELLA software proved to be a suitable technology to predict the growth and yield of maize grown in Zona da Mata Mineira.

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura de destaque na agricultura, principalmente quando se trata do fator segurança alimentar, sendo, o cereal mais cultivado no mundo em 2018/19 (FUMAGALLI et al., 2017; MORAIS et al., 2017; SHAHBANDEH, 2019).

Os Estados Unidos são o maior produtor mundial de milho, com produtividade de aproximadamente 12 toneladas por hectare. No Brasil, mesmo com aumento significativo nas últimas décadas, a produtividade de milho ainda é relativamente baixa, em torno de 5,2 toneladas por hectare (BOIAGO et al., 2017). De acordo com a Conab (2019) estima-se aumento de 13,6 % na produção agrícola brasileira para a safra 2018/19, podendo atingir uma produção de 94 milhões de toneladas referente a primeira e segunda safras, com produtividade estimada de 5.961 kg ha⁻¹.

Os fatores que exercem maior influência no crescimento e desenvolvimento das plantas são principalmente a radiação solar, o teor de água disponível no solo e a temperatura (MORAIS et al., 2017). Além disso, o manejo correto do solo, o fornecimento de nutrientes, a densidade populacional e as épocas adequadas para a semeadura, contribuem para elevar o rendimento da cultura do milho. A produtividade do milho depende de fatores externos e fatores fisiológicos. Como exemplo, tem-se o padrão de eretofilia do dossel que é um fator fisiológico que permite aumentar a densidade de plantio, conseqüentemente elevar a produtividade do milho (FUMAGALLI et al., 2017).

Para otimizar a produtividade, é imprescindível que se obtenha condições hídricas favoráveis ao desenvolvimento das plantas. Em especial no período vegetativo e nas fases de florescimento e enchimento dos grãos. A escassez hídrica nestes períodos provoca diminuição da área foliar e redução da biomassa (BERGAMASCHI et al., 2006).

Dependendo da região e da época do ano, a disponibilidade de água pode ser um fator limitante para irrigação. É importante melhorar a eficiência de seu uso na agricultura. De acordo com Marwein et al (2017), essa melhoria depende, dentre outros fatores, da determinação da necessidade hídrica das plantas. Mårtensson et al. (2017) mencionam que é importante conhecer os mecanismos fisiológicos das plantas em resposta à seca, pois é possível correlacionar a tolerância ao déficit hídrico à alta eficiência no uso da água.

Liu et al. (2017) estudaram o efeito de diferentes suprimentos de água na cultura do milho e observaram que a provisão hídrica referente a 40% da evapotranspiração da cultura resultou em queda de produtividade, devido ao menor enchimento de grãos. Corroborando com esse estudo, Marwein et al. (2017) observaram que o estresse hídrico no milho, além de provocar atraso no ciclo da cultura, resulta em abortamento de grãos.

O balanço hídrico é utilizado para calcular a disponibilidade de água para as culturas. Este método pode ser aplicado por meio da modelagem matemática, que é empregada também para a simulação de outros fatores relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

O uso de modelos para simulação do desenvolvimento da planta vem sendo amplamente difundido nas quatro últimas décadas. Os processos fisiológicos que ocorrem nas plantas podem ser representados por meio de simulação matemática durante o ciclo (BOOTE et al., 2013; LOOMIS; RABBINGE; NG, 1979; VANUYTRECHT; THORBURN, 2017). Os processos simulados caracterizam a dinâmica que ocorre no estande de plantas em resposta ao ambiente em que estão inseridas.

Os dados referentes às condições climáticas são utilizados em diversos modelos que estimam a produtividade. A maioria dos modelos computacionais é proveniente de modelos definidos por Doorenbos e Kassam (1979), que associam a resposta produtiva à suficiência hídrica no período de cultivo (ASSAD; MONTEIRO; AZEVEDO, 2010). Dentre as principais culturas simuladas destacam-se os modelos para o milho, soja, trigo, arroz, feijão e algodão.

De acordo com Amaral et al. (2017), a modelagem para a cultura do milho é eficaz para a estimativa da produção agrícola, pois a produção da cultura associada aos fatores dinâmicos, propicia a compreensão dos fatores abrangidos na simulação e a segregação de alguns dos processos resultantes no sistema de cultivo.

No mercado existem diversos softwares que realizam a simulação de processos dinâmicos. O STELLA 8.0 é um programa computacional desenvolvido pelo Isee Systems® utilizado na modelagem de diversos processos. O seu funcionamento é descrito pela dinâmica de sistemas (PONI; PALLIOTTI; BERNIZZONI, 2006). É caracterizado pela aplicação em modelos de séries temporais e na análise de

sensibilidade nos processos de simulação, em que esta última se refere ao estudo da variação dos dados de saída do modelo (DATAONE, 2019).

O modelo CERES-Maize foi utilizado na simulação do cultivo de milho em Sete Lagoas - MG. A partir de sua aplicação em espaçamentos distintos para a cultivar BRS 3060, em sequeiro, evidenciou-se que o rendimento da cultura aumenta quando se tem menores espaçamentos entre linhas de plantio com aumento do estande até 120 mil plantas por hectare. Porém, acima deste valor a produtividade é negativamente afetada; entretanto, não se validou o modelo para estas condições, sendo necessária a aplicação de atividades experimentais para analisar a relação desses fatores (ANDRADE et al., 2009).

A falta de dados experimentais representativos e a dificuldade de entendimento dos processos biofísicos que ocorrem no ciclo cultural, associados às condições ambientais e ao manejo a que a cultura está submetida, são as principais causas de oscilações na adequação dos modelos de cultura. Assim, a validação de um modelo para determinada área, nas condições ambientais em que a cultura está exposta, é importante para avaliar a adequação do sistema dinâmico à realidade. O ajuste adequado de parâmetros de campo possibilita obter uma previsão satisfatória da resposta produtiva das culturas (TAO et al., 2018).

Os modelos são caracterizados principalmente pela representação de um sistema físico por meio de equações matemáticas. Os processos que envolvem o crescimento e o desenvolvimento da planta podem ser quantificados. A partir da validação do modelo, este pode ser utilizado como instrumento para previsões agrícolas e para a gestão da produtividade (JAME; CUTFORTH, 1996).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver e validar um modelo utilizando o software STELLA 8.0, para caracterizar os processos dinâmicos que ocorrem durante o ciclo do milho, cultivado na Zona da Mata Mineira.

2.2 Específicos

- Desenvolver um modelo usando o software STELLA 8.0 para estimar o crescimento e a produtividade do milho (*Zea mays* L.) cultivado na Zona da Mata Mineira.
- Avaliar se o modelo matemático desenvolvido simula com exatidão o crescimento das plantas e a produtividade da cultura do milho.
- Avaliar se os valores da biomassa seca dos órgãos da planta são semelhantes aos valores modelados.
- Avaliar se os valores de fotossíntese medidos em campo diferem dos resultados simulados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A cultura do Milho

O milho é uma planta que é utilizada em diversas finalidades, sendo comum seu uso na alimentação humana e animal, nos países em desenvolvimento. Gramínea da família *Poaceae*, gênero *Zea* e espécie *Zea mays L.*, com a característica politépica da espécie que permite seu cultivo em quase todos os continentes (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2017; SAH; SINGH; SINGH, 2017).

O ciclo da cultura é dividido por estádios fenológicos, em resposta ao desenvolvimento de cada parte da planta em diferentes períodos. Este pode variar entre 110 a 160 dias, dependendo do genótipo da planta, sendo eles superprecoce, precoce e normal. As principais etapas de desenvolvimento da cultura são caracterizadas em germinação e emergência, crescimento vegetativo, florescimento, frutificação e maturação (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2017).

A época de semeadura é considerada um fator que altera a duração dos estádios fenológicos da planta e a produtividade. Segundo Sacks e Kucharik (2011), um maior período vegetativo devido a antecipação da época de plantio pode aumentar o rendimento da cultura, visto que com uma maior duração do estágio vegetativo, conseqüentemente se tem um período maior para enchimento dos grãos e aumento da área foliar, influenciando assim na velocidade de fixação de matéria seca.

O milho possui origem tropical, exigindo assim condições de temperatura e água favoráveis em todo o seu ciclo vegetativo. A temperatura é considerada um fator crítico no desenvolvimento fenológico das plantas. Para cada planta é estabelecida uma faixa de temperatura que influencia no seu crescimento, definindo assim, um valor superior, inferior e ótimo. Como exemplo, temperaturas superiores a 35°C afetam negativamente a produtividade do milho, uma vez que ocorre desidratação do pólen durante a polinização (HATFIELD et al., 2011; HATFIELD; DOLD, 2018).

De acordo com Liu, Qin e Ge (2019), o aumento da temperatura do ar, resultado das mudanças climáticas, encurta o ciclo fenológico das plantas e acelera suas atividades metabólicas. Assim, o aumento da temperatura favorece a fotossíntese bruta, porém esse aumento também eleva as taxas respiratórias. Além disso, o milho é uma planta C₄, em temperaturas entre 30 a 40 °C é obtido maiores taxas fotossintéticas para essas plantas (RENATO et al., 2018).

O metabolismo C₄ do milho, além de conferir a planta maior eficiência no processo fotossintético, contribui na eficiência de conversão da energia luminosa em biomassa. De modo que, o rendimento da planta esteja inteiramente relacionado à radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e a eficiência dessa interceptação pelas folhas. Existem diversos fatores que podem interferir na eficiência do uso da radiação, como o índice de área foliar (IAF), arquitetura da planta, densidade de plantio, genótipos, época do ano entre outros (TRIPATHI et al., 2018).

A variação que ocorre entre genótipos em relação a arquitetura da planta afeta o coeficiente de extinção de luz do dossel, ocasionando diferenças na eficiência de interceptação para locais com mesmo IAF (DUARTE, 2018).

Assim como a temperatura, a água é um fator que influencia a produtividade. Conforme Sousa et al. (2015), dependendo do estágio fenológico da planta e da duração do déficit hídrico, este poderá afetar negativamente o rendimento de grãos. Macedo et al. (2001) afirmam que o período de maior necessidade hídrica das culturas é o período de enchimento dos grãos. Entretanto, os autores Borém, Galvão e Pimentel (2017) destacam a importância da suficiência hídrica também na emergência, florescimento e formação dos grãos.

A exigência hídrica do milho varia entre 400 a 600 mm de precipitação, sem a necessidade de irrigação durante o ciclo, com consumo médio diário recomendado no planejamento de 4,5 mm d⁻¹. Contudo, é fundamental contabilizar as perdas hídricas por meio da evapotranspiração, para assim estabelecer um balanço entre a precipitação e a evapotranspiração, obtendo informações necessárias ao planejamento da cultura (BORÉM; GALVÃO; PIMENTEL, 2017).

Outro fator climático que pode interferir no crescimento da cultura é a duração da insolação. O curto período de insolação pode promover o encurtamento do estágio vegetativo. Em contrapartida, a planta submetida a maiores períodos de insolação tem seu estágio de florescimento retardado (LIU et al., 2018; LIU; QIN; GE, 2019). Assim, Infante et al. (2018) afirmam que o milho cultivado em sistemas tropicais não interrompe o seu crescimento vegetativo para as condições de cultivo em dias longos, podendo acumular mais biomassa quando comparado ao milho de regiões temperadas.

A densidade de plantio é um fator relevante na produtividade do milho, visto que as plantas equidistantes competem por água, luminosidade, nutrientes entre outros fatores. Assim, pequenas alterações na densidade populacional resultam em grandes

mudanças no rendimento da cultura (BOIAGO et al., 2017; MENDES FAGHERAZZI et al., 2018). Segundo Balbinot Junior e Fleck (2005), a redução do espaçamento entre fileiras de plantas contribui para diminuir a ocorrência de plantas daninhas, uma vez que aumenta a interceptação de luz pelo dossel das plantas cultivadas e ao mesmo tempo, reduz a disponibilidade de luz para as plantas invasoras.

De acordo com Padilha et al. (2015), o potencial produtivo do milho é efetivamente expresso quando a cultura é submetida a condições favoráveis de temperatura, luminosidade, disponibilidade hídrica e fertilidade do solo. Segundo os mesmos autores, a prática do manejo da irrigação, o uso adequado de fertilizantes, maior densidade de plantio e controle fitossanitário contribuem para solucionar os desafios da agricultura sustentável, uma vez que a combinação de tais atividades maximiza o rendimento da cultura.

Portanto, vários fatores são responsáveis para o sucesso produtivo, de modo que o conjunto destes possibilita a formação de uma agricultura sustentável. O conhecimento das características da cultura, fenologia, necessidade hídrica, luminosa e nutricional constitui um componente importante nesse processo de maximização produtiva.

3.1.1 O milho no agronegócio

O milho é uma das commodities mais importantes no mercado global. O continente americano lidera a sua produção, seguido da Ásia, Europa e África (HATFIELD; DOLD, 2018; ZHONG et al., 2016). Mendes Fagherazzi et al. (2018) afirmam que a produção mundial de milho é superior a 900 milhões de toneladas em 175 milhões de hectares cultivados.

Dentre os maiores produtores mundiais de milho se destacam o Brasil, a Argentina e os Estados Unidos. Para facilitar o acesso ao mercado internacional esses países criaram uma organização não governamental, a The International Maize Alliance (Maizall). O Brasil se destaca entre os participantes da Maizall por sua produção em duas safras, embora os EUA assumam a primeira posição no Índice de Posição Relativa de Mercado (POS) nas pesquisas realizadas no período de 2005 a 2015, possuindo relevância no mercado internacional do milho (FERREIRA; CAPITANI, 2017).

O Brasil, antes considerado o quarto maior exportador mundial de milho, na safra de 2016/17 atingiu o segundo lugar nessa safra, quase metade das importações de milho da União Europeia foram de origem brasileira, totalizando 4,91 milhões de toneladas importadas (WORLEDGE, 2018).

De acordo com a Conab (2019), é estimada uma produção de 235,3 milhões de toneladas de grãos para a safra brasileira 2018/19, sendo soja, milho, arroz e algodão as principais culturas. As quatro correspondem a 94,4% da produção brasileira de grãos, com o milho representando 40% de toda produção de grãos do país.

As regiões brasileiras sul, centro-oeste e sudeste foram as que mais se destacaram na produtividade do milho para a safra 2018/19, respectivamente. Na região sudeste, o estado de Minas Gerais assumiu o primeiro lugar, com produtividade estimada de 6.107 kg ha⁻¹ para a primeira safra 2018/19. Entretanto, essa produtividade é baixa comparada à do estado Paraná, que se destacou na estimativa dessa safra com 8.714 kg ha⁻¹ (CONAB, 2019).

Segundo Lima et al. (2017), o Brasil destina 66,7% do milho produzido para o mercado interno. As projeções para as safras 2022/23 preveem um aumento de 0,3% no consumo interno, pressionando desta forma, um aumento da produção nacional para atender também a exportação.

Por possuir alto teor nutritivo, o milho apresenta elevado consumo animal com uma demanda de 49,703 milhões de toneladas em dezembro de 2018 (Tabela 1), com destaque no setor de aves de corte (ABIMILHO, 2019).

Tabela 1 - Demanda setORIZADA do milho no Brasil

Setor	Demanda (mil toneladas)	
	2018/19	
	Novembro	Dezembro
Consumo animal	49.384	49.703
Aves de corte	24.230	24.230
Aves de postura	4.309	4.309
Suinocultura	13.066	13.384
Bovinocultura	4.250	4.250
Outros animais	3.530	3.530
Consumo industrial	8.290	8.760

Setor	Demanda (mil toneladas)	
	2018/19	
	Novembro	Dezembro
Consumo humano	1.948	1.948
Outros usos	3.954	3.954
Perdas	2.077	1.958
Sementes	460	460
Exportação	34.000	30.000
Demanda total	100.112	96.782

Fonte: ABIMILHO, 2019.

Nesse contexto, é possível observar a relevância do milho no agronegócio. Assim, abordagens para a gestão da produtividade agrícola estão sendo cada vez mais utilizadas, com intuito de maximizar os lucros e reduzir os custos de produção.

3.2 Métodos de estimativas de produtividade

Atualmente, existem diversas metodologias para estimar a produtividade das culturas. Os métodos mais utilizados para essa estimativa são os modelos matemáticos, por meio da simulação de diversos fatores. Entretanto, tais estimativas podem ser realizadas a partir de outras metodologias, como por exemplo, o monitoramento por redes neurais artificiais (RNA), imagens de satélite, entre outras. As RNAs são capazes de reconhecer informações, gerando um modelo não-linear eficiente na análise espacial (SOARES et al., 2015), de modo que acabam se caracterizando como um tipo de modelagem.

Assim como as redes neurais, os modelos fuzzy descrevem sistemas complexos por meio de modelos não lineares. Os sistemas híbridos ou neuro fuzzy são descritos pela integração desses dois sistemas: redes neurais e fuzzy para obter eficiência na previsão, estimativa e capacidade de generalização, sendo comprovada sua eficiência na estimativa da produtividade do trigo (SILVA et al., 2014).

O monitoramento de culturas por satélite, utilizando o sensoriamento remoto por meio da análise de imagens é uma prática que também está sendo adotada, uma vez que caracteriza em escala regional, a divisão temporal dos estádios fenológicos para as culturas comerciais como milho e soja (ZENG et al., 2016).

Os atuais registros de satélites como o Landsat e MODIS (Espectrorradiômetro de imagem de resolução moderada), detectam a cobertura vegetal fotossintética, fornecendo dados consistentes e frequentes no longo prazo. Através dos registros fornecidos, é possível estimar a produtividade de culturas por meio do produto da produtividade primária bruta pelo índice de colheita empírico para cada cultura (HE et al., 2018).

Entretanto, os métodos usados para estimar a produtividade do milho ainda são restritos aos modelos matemáticos, na maioria dos casos. Como o rendimento da cultura é influenciado por diversos fatores, os modelos são capazes de simular os aspectos fisiológicos e fenológicos e as condições ambientais da região em que as plantas estão dispostas, relacionando-os (SOARES et al., 2015).

3.3 Modelos de simulação

O planejamento é fundamental para a efetivação e o sucesso de qualquer atividade. Segundo Monteiro et al. (2017), diversos modelos foram desenvolvidos contendo diferentes parâmetros para estimativa do rendimento cultural.

O desenvolvimento de modelos de simulação possibilita compreender a ótica de um sistema sob diversas situações, de modo que facilita a tomada de decisão a partir da representação da realidade. Em consequência disso, é possível simular uma infinidade de cenários estimando os impactos na produção para auxiliar no planejamento da atividade agrícola (PARIZI et al., 2016).

Segundo Van Bussel et al. (2015), é possível avaliar o impacto das mudanças climáticas na produtividade utilizando os modelos de simulação de culturas, de modo que a confiabilidade do modelo é dada em resposta à precisão da modelagem fenológica.

A modelagem de culturas é baseada na transformação de parte da energia solar absorvida pela radiação em matéria seca acumulada, tendo em vista as eficiências de interceptação e absorção da radiação solar incidente (MULLER; BERGAMASCHI, 2005), entre outros aspectos.

A partir dos modelos de simulação é possível estimar, além da produção de matéria seca, o índice de área foliar, empregando modelos que relacionam a temperatura média do ar com o acúmulo térmico caracterizado pelo somatório dos graus-dia (FRANÇA; BERGAMASCHI; ROSA, 1999).

De acordo com Muller e Bergamaschi (2005), existe uma infinidade de modelos considerando a estimativa do índice de área foliar na cultura do milho, havendo divergências nos dados que alimentam esses modelos, devido às diferenças nas condições ambientais, genotípicas e nos sistemas de manejo. Assim, esses autores destacam a importância da validação dos modelos para condições próximas às quais serão empregados.

A estimativa da produtividade nos modelos de simulação de culturas é fundamentada no cálculo da fotossíntese líquida e na partição dos carboidratos acumulados nos diferentes órgãos da planta, com base nos graus-dia acumulados. A variação dos coeficientes de partição está relacionada com o estágio fenológico da planta e, conseqüentemente, com o acúmulo de temperatura, uma vez que cada estágio fenológico possui determinada quantidade de graus-dia acumulados (RENATO et al., 2013).

Os modelos de cultura simulam dinamicamente a resposta do estande da cultura ao ambiente que estão inseridas, em intervalos de tempo diários ou horários. Podendo simular além da partição da biomassa, a fenologia da cultura desde do plantio até a maturidade, fornecendo informações do rendimento diário durante o ciclo modelado até atingir a produção final (BOOTE et al., 2013).

Wang, Bowling e Cherkauer (2016) estudaram o efeito da variabilidade climática no rendimento das culturas nos EUA, analisando a influência do déficit hídrico e do excesso de água sob essa ótica, a partir de modelos de simulação. Os autores observaram que o rendimento é negativamente afetado pelo estresse hídrico nos estádios reprodutivos inicial e médio, sendo considerado o principal responsável pela queda na produtividade do milho.

A utilização dos graus-dia na aplicação de modelos de simulação é uma prática bastante viável, substituindo o tempo cronológico pelo tempo térmico, como variável dinâmica. Pois, em consequência das mudanças climáticas, o uso de graus-dia se torna um índice do impacto climático, uma vez que facilita o planejamento e gerenciamento no cultivo agrícola (ANANDHI, 2016; DUARTE, 2018).

Segundo Anandhi (2016), é possível otimizar o uso da água durante os estádios críticos de desenvolvimento da cultura, a partir da combinação das respostas sobre os graus-dia e a disponibilidade hídrica.

A inadequação nos dados de entrada dos modelos, na estrutura e nos métodos de estimação dos parâmetros, provoca incertezas nas previsões. Muitos estudos foram desenvolvidos para melhorar e reduzir essas incertezas através da calibração dos modelos. A evapotranspiração potencial da cultura é um dos fatores estimados pelos modelos, cuja precisão em sua simulação é fundamental para obter estimativas eficazes da necessidade hídrica das plantas (LIU et al., 2016).

É sabido da existência de uma infinidade de modelos para a simulação do rendimento da produtividade do milho, dentre eles estão APSIM - maize (AM) (KEATING et al., 2003), CropSyst (CS) (STÖCKLE; DONATELLI; NELSON, 2003), Milho DSSAT-CERES (DC) (JONES; KINIRY, 1989), Milho EPIC (EM) (WILLIAMS et al., 1989) entre outros (BASSU et al., 2014).

Entretanto, Bassu et al. (2014) questionaram sobre a confiabilidade e precisão das simulações desses modelos, ou seja, se suas respostas são condizentes em relação as mudanças climáticas e aos fatores gerais como fenologia, crescimento e produtividade. Deste modo, os autores estudaram 23 modelos de simulação de culturas em quatro regiões climáticas distintas e observaram que os modelos individuais apresentavam diferenças em seus parâmetros para cada local analisado, não sabendo definir qual é mais preciso. Enquanto um conjunto de modelos, simulou com precisão o rendimento da cultura nos quatro locais.

3.3.1 Softwares de simulação

A simulação computacional possui a capacidade de testar hipóteses para solucionar problemas a partir dos cenários desenvolvidos, retratando o ambiente e a vida real, de modo que são empregados uma infinidade de softwares para esse propósito. A principal finalidade destes softwares é criar sistemas graficamente reais por meio de um ambiente computacional, se assemelhando à realidade (ZALUSKI; DANTAS, 2018).

Para a escolha do software, algumas características são importantes como a facilidade de uso, custo de aquisição, adequação às necessidades, minimização ou ausência de falhas no programa, reconhecimento no mercado de softwares, entre outros aspectos (CHWIF; MEDINA, 2010).

Zaluski e Dantas (2018) destacam que tais softwares podem ser aplicados para as mais diversas finalidades, abrangendo áreas distintas do conhecimento como engenharias, física, saúde, matemática e indústrias (Tabela 2).

Tabela 2 - Softwares para a simulação de diversos modelos

Softwares	Áreas de aplicação
Indústria, produção, <i>supplychain</i> e logística; Aplicações gerais	
AutoMod	Operações em indústrias; distribuição; automação e modelos logísticos
Arena Simulation	Soluções industriais: produção; alimentos e bebidas; logística; área da saúde etc.
Anylogic	<i>Supplychain</i> e logística; transporte e armazenagem; Portos e terminais; produção e manufatura.
FlexSim	Manufatura; manuseio de materiais; <i>Heralthcare</i> ; linha de embalagens; logística.
ProModel	Teste de validação dos investimentos; Balanceamento de Linhas; Projeto de Células & layout; Implantação de <i>LeanProduction</i> ; Otimização dos KPIs, Distribuição e <i>Supply Chain</i> ; etc.
Simul8	<i>Heralthcare</i> ; Fábrica; Negócios; Call centers; Setor público; <i>Supplychain</i> e logística; Justiça; e Setor automotivo
Simulações dinâmicas	
STELLA	Simulação de sistemas dinâmicos em: Negócios; Educação; Pesquisa; Governo; Energia; Saúde; Agricultura; Fábrica.
DynSim	Design, análise operacional, simulação dinâmica, melhoria de desempenho de plantas, melhorar gerenciamento de apoio às decisões etc.
VisSim	Análise no domínio da frequência; geração altamente eficiente de código ANSI C; Redes neurais; OPC; CAN; etc.
Específicos: Logística	
TransCAD	Planejamento de transportes; Redes de transportes; Otimização logística; construção de rotas e sistemas; simulação de tráfego.
SIMMOD	Modal aéreo: Dinâmica do aeródromo e reencaminhamento do espaço aéreo; operações de Rodagem complexos;

Softwares	Áreas de aplicação
	sequenciamento fila de saída; Veículos terrestres; Eventos perturbadores; Recursos humanos e atividades; Conceitos operacionais avançados.
Siemens PLM	Sistema logístico e fluxo de materiais; Planejamento de transportes.
SUMO 0.25	Simulação de mobilidade urbana.

Fonte: Adaptado de ZALUSKI e DANTAS (2018).

O STELLA é um software caracterizado por sua aplicação em simulações dinâmicas (Tabela 2). Segundo Guimarães (2007), a dinâmica de sistemas é uma técnica que utiliza simulações dinâmicas nos modelos desenvolvidos, objetivando a compreensão dos sistemas complexos. O autor também destaca como característica marcante da dinâmica de sistemas, o estudo do comportamento de um grupo de indivíduos com mesmas características, ao contrário da análise de um único indivíduo.

A dinâmica de sistemas é uma metodologia que foi estabelecida por Jay Forrester em 1960, cujo princípio é baseado na acumulação de estoque e controle de informações, com intuito de avaliar situações e sistemas organizacionais. Assim, é possível descrever situações complexas, relacionando informações por elementos e fluxos, admitindo a interação entre eles (DURAN-ENCALADA et al., 2017; FORRESTER, 1961).

A programação gráfica do STELLA é de fácil compreensão, a classificação de suas variáveis é simples e os resultados da associação dos ícones são eficientes para capturar o comportamento do sistema, de modo que o usuário compreenda o processo dinâmico envolvido (HANNON; RUTH, 2014).

As principais características dos sistemas dinâmicos construídos a partir do software STELLA são definidas por estoques (variáveis de estado), fluxos, variáveis auxiliares (demais relações algébricas e/ou gráficas) e setas de informação. Dessa forma, o programador define os ícones para cada estoque, conectando-os por fluxos de informações. E logo após caracteriza quais relações funcionais correspondem a tais fluxos, cujas relações podem ser matemáticas, lógicas, gráficas ou numéricas. É importante ressaltar que essas relações são matematicamente expressas por equações diferenciais (COSTANZA; VOINOV, 2001).

Tao et al. (2019) estudaram a simulação dinâmica do sistema de larvas Nymphalidae utilizando o software STELLA; entretanto, a limitação nos dados de entrada impediram análise detalhada de todos os processos envolvidos no sistema.

Ouyang et al. (2014) utilizaram o software STELLA para simulação da dinâmica de água e nitrogênio em uma cultura lenhosa e observaram que o modelo desenvolvido a partir do STELLA é útil na estimativa de plantios florestais. Outros estudos indicam a eficiência do modelo desenvolvido a partir do software, destacando sua utilidade na estimativa da fitorremediação de contaminantes nos ecossistemas solo-planta (OUYANG, 2008).

Além da modelagem de culturas, o STELLA também pode ser utilizado em outros processos dinâmicos de modelagem. Como exemplo, o software foi utilizado no estudo das inter-relações entre a pesca e o regime fluvial no rio Purus, para simular os efeitos atípicos no nível do rio (LOPES; SOUZA; INOMATA, 2017).

O maior entrave na modelagem de sistemas em relação à predição da produtividade de culturas é a validação do modelo, uma vez que muitos dos resultados estimados pelos modelos são incertos. Leary et al. (2015) destacaram a necessidade de dados experimentais para corrigir as discrepâncias nos modelos de rendimento de trigo, afetados pela alta concentração de CO₂ em ambiente semiárido, influenciados pela irrigação.

Portanto, a validação de um modelo fundamentado na dinâmica de sistema é parte crucial para se obter respostas satisfatórias para previsão agrícola, sendo útil, também, no planejamento e na gestão das atividades desse setor.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização do experimento

O experimento foi conduzido no Campo Experimental Prof. Diogo Alves de Melo, no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada na cidade de Viçosa, MG, durante o período de outubro de 2018 a abril de 2019. As coordenadas geográficas do local são 20°46'5.91"S e 42°52'12.54"W, com altitude média de 661 m.

4.2 Características da área experimental

A avaliação das características do solo foi necessária para simular o crescimento das plantas. Para análise textural foram coletadas amostras de solo da área experimental nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. As determinações da capacidade de campo, do ponto de murcha permanente e da densidade do solo foram feitas para cada uma das camadas de solo mencionadas anteriormente, as quais foram realizadas no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola. Já as análises químicas referentes ao pH, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, Cu, Fe, Mn, Zn, P-Rem e MO foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante, pertencente ao Departamento de Solos da UFV. Os resultados das análises químicas do solo estão apresentados no APÊNDICE A.

O experimento foi conduzido numa área de 2.886 m², conforme mostrado na Figura 1.

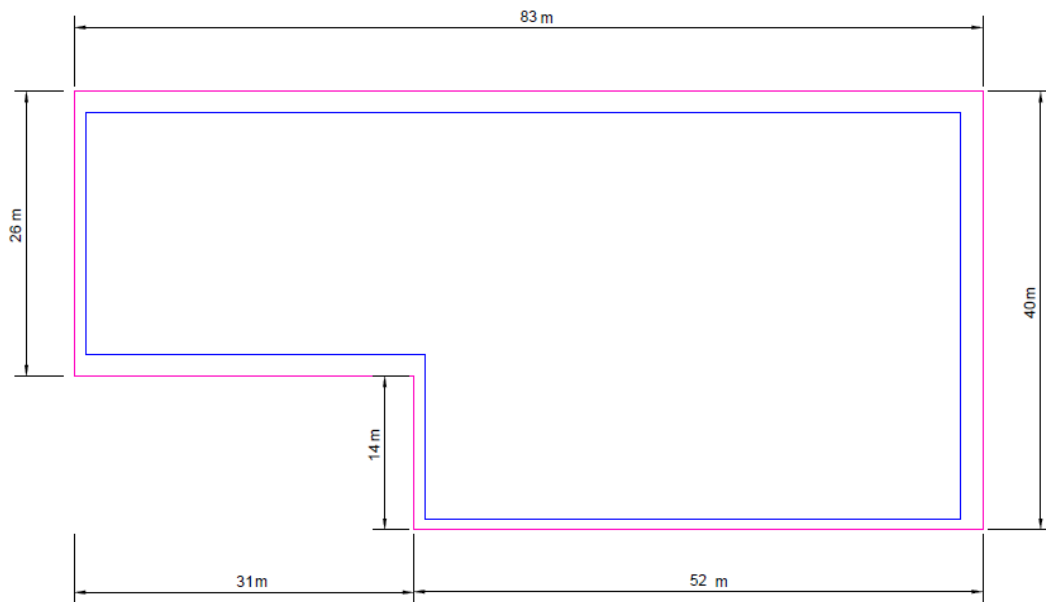
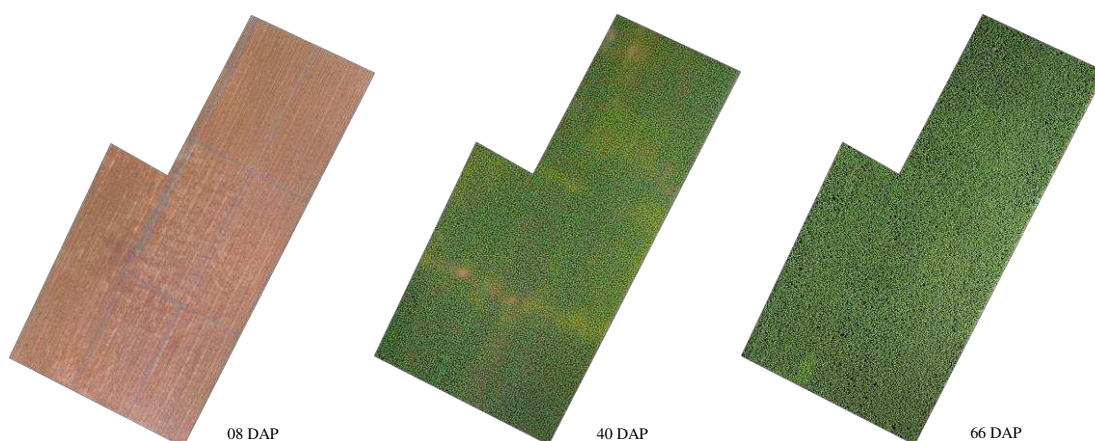


Figura 1 - Dimensões da área experimental.

4.3 Época de plantio e tratamentos culturais

No plantio do milho realizou-se uma aração seguida de gradagem. A adubação de plantio foi realizada com base nos resultados da análise química do solo, sendo utilizados 300 kg ha^{-1} do adubo NPK 8:28:16. O plantio foi feito com sementes de milho híbrido simples DKB 390 PRO 3, com o uso de semeadora tratorizada, equipada com sulcador de discos duplos. A semeadura foi realizada no dia 15 de outubro de 2018, de acordo com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura do milho de 1ª safra no Estado de Minas Gerais, ano-safra 2017/2018 (MAPA, 2018).

O plantio foi adensado, com 0,5 m entre fileiras de plantas e média de 3,5 sementes por metro linear de plantio, o que equivaleu a 70.000 plantas por hectare. Na Figura 2 é possível observar a imagem da área cultivada, para três diferentes datas após o plantio.



DAP - Dias após o plantio.

Figura 2 - Imagem aérea do experimento aos 8, 40 e 66 DAP.

O sistema de irrigação foi aspersão convencional, com turno de rega variável definido com base na demanda evapotranspirométrica da cultura e nos valores de k_c recomendados por Doorenbos e Kassan (1979).

Os demais tratos culturais foram o controle de plantas daninhas e adubação de cobertura. Desse modo, aplicou-se no dia 13 de novembro de 2018, uma dose de 3 L ha^{-1} de glifosato na área experimental (Figura 3). A adubação de cobertura foi realizada no estádio V6, com a aplicação de 140 kg ha^{-1} de N na forma de ureia (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999).



Figura 3 - Aplicação de glifosato no milho para controle de plantas daninhas.

4.4 Definição do modelo

O modelo foi desenvolvido a partir do software STELLA 8.0 (ISEE SYSTEMS, 2019) para caracterizar dinamicamente a entrada de dados e os processos relacionados às condições climáticas, crescimento cultural, solo, balanço de água no solo e produtividade do cultivar DKB 390 PRO 3. Isso possibilitou a modelagem fisiológica do milho, envolvendo a taxa de respiração, fotossíntese, crescimento, estádios fenológicos, partição e acumulação da biomassa, evapotranspiração e demanda hídrica.

4.5 Obtenção e processamento dos dados

Alguns dados do modelo foram referentes às condições ambientais ao longo do ciclo da cultura do milho, tais como: precipitação, radiação solar, temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Estes dados foram coletados diariamente da estação meteorológica automática A510 - VIÇOSA pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, localizada próxima a área experimental.

Na determinação dos coeficientes culturais considerou-se os valores estabelecidos por Doorenbos e Kassan (1979) para os diferentes estádios fenológicos definidos por meio do acúmulo de temperatura ou graus-dia, tomando como referência as mesmas temperaturas, base e máxima mencionadas por Romano (2005).

As informações referentes ao manejo da irrigação foram obtidas por meio do balanço de água no solo, considerando os valores de evapotranspiração da cultura e os dados de precipitação durante o período de cultivo.

4.6 Estrutura do modelo

A arquitetura do modelo consistiu de submodelos referentes ao Balanço Hídrico, Graus-dia, Fotossíntese e Partição da Biomassa, formando de maneira organizacional todo o sistema. No submodelo Balanço Hídrico considerou-se as condições do solo, do clima e da cultura.

No submodelo Graus-dia modelou-se o estágio fenológico da cultura baseado no acúmulo de temperatura, utilizando a equação definida por Arnold (1959). Nos submodelos Fotossíntese e Partição da Biomassa, a estimativa da produtividade foi

feita a partir do crescimento cultural, envolvendo o cálculo da fotossíntese bruta e líquida, respiração e partição dos componentes culturais.

4.6.1 Submodelo Balanço Hídrico

No desenvolvimento deste submodelo foram introduzidas as informações sobre o ponto de saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e profundidade radicular do milho. A entrada de água no solo foi dada pela infiltração e a saída foi representada pela percolação, pela evapotranspiração da cultura (ET_c) e pelo escoamento superficial, mostrados na Figura 4.

A ET_0 foi calculada por meio da equação proposta por Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

em que:

ET_0 - Evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ;

Rn é o saldo de radiação à superfície da cultura, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

G - densidade do fluxo de calor do solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

T - Temperatura do ar a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$;

u_2 - velocidade de vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;

e_s - pressão de vapor de saturação, kPa;

e_a - pressão parcial de vapor, kPa;

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ e

γ - coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

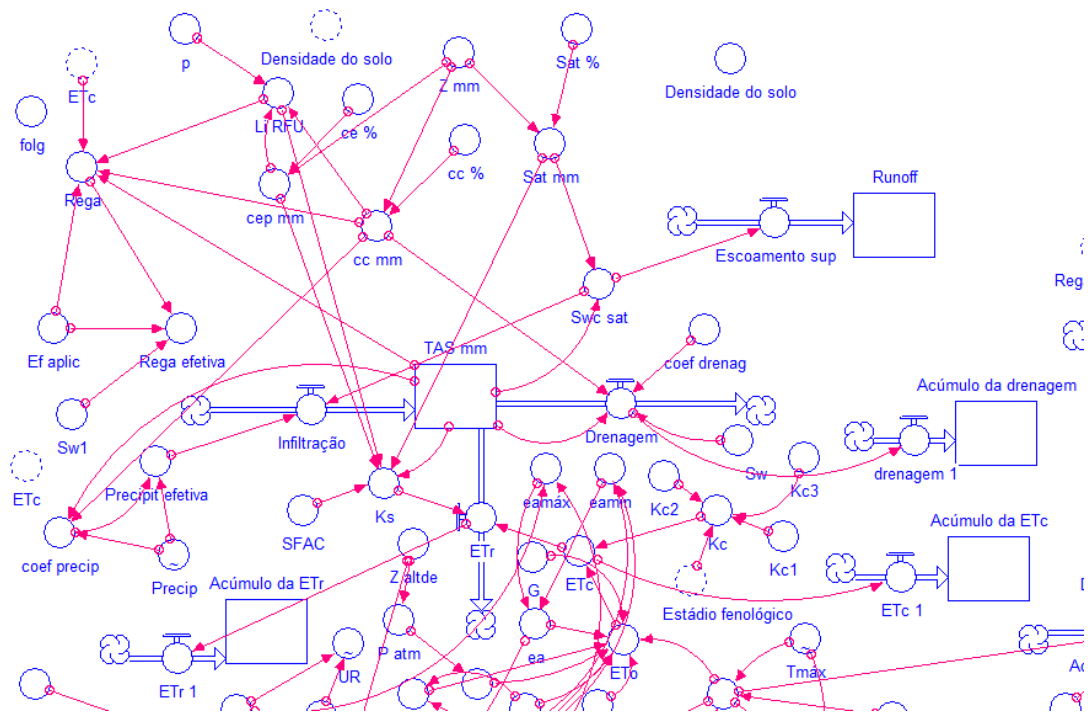


Figura 4 - Representação das variáveis do Balanço Hídrico (TAS - Teor de água no solo), no modelo STELLA.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada a partir da evapotranspiração de referência (ET_0) multiplicada pelo respectivo coeficiente de cultura (k_c) da fase em que a planta se encontrava. O k_c foi dividido entre as três fases fenológicas, sendo o k_{c1} e o k_{c3} valores fixos e o k_{c2} correspondeu a uma reta crescente representando a fase II, sendo este determinado pela Equação 2:

$$k_{c2} = k_{c1} + (k_{c3} - k_{c1}) \times \frac{T}{X_2} \quad (2)$$

em que:

k_{c2} - Coeficiente cultural da fase II;

k_{c1} - Coeficiente cultural da fase I;

k_{c3} - Coeficiente cultural da fase III;

T - Tempo a partir do início da fase II, dias e

X_2 - duração da fase II, dias.

A determinação do k_s , para fins de conversão da ET_c em ET_r foi baseada na relação proposta por Pierce, que concluiu que a ET_r se manterá acima de 90% da ET_c

enquanto a umidade do solo estiver acima de, aproximadamente, um terço da água disponível; depois cairá mais rapidamente na forma exponencial, até a umidade do solo atingir o ponto de murcha permanente (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A disponibilidade de água no solo foi estabelecida pela diferença entre o balanço de entradas e saídas.

4.6.2 Submodelo Graus-dia

O cálculo dos graus-dia foi baseado na Equação 3 proposta por Arnold (1959):

$$GD = \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} - T_b \quad (3)$$

em que:

GD - Graus-dia, °C d⁻¹;

T_{max} - Temperatura máxima, °C;

T_{min} - Temperatura mínima, °C e

T_b - Temperatura base, °C.

Cada estágio fenológico do milho foi definido pela diferenciação dos graus-dia, para dinamizar o modelo, considerando as condições do local em que a planta estava sendo cultivada (Figura 5). Assim, para o cálculo dos graus-dia foi estabelecido o valor da temperatura base e da temperatura máxima de 10°C e 32°C, respectivamente (ROMANO, 2005).

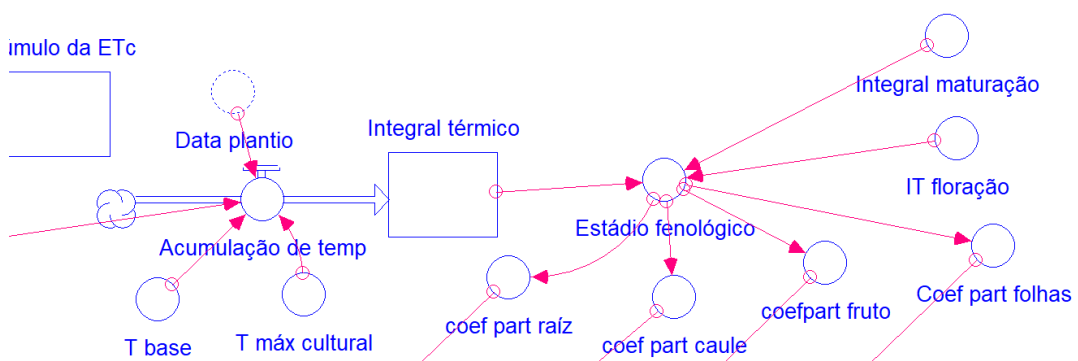


Figura 5 - Variáveis do submodelo Graus-dia representadas no STELLA.

4.6.3 Submodelo Fotossíntese

O desenvolvimento deste submodelo foi estabelecido por meio da fotossíntese líquida diária, obtida pela diferença entre a fotossíntese bruta e a respiração. As variáveis utilizadas neste submodelo são mostradas na Figura 6.

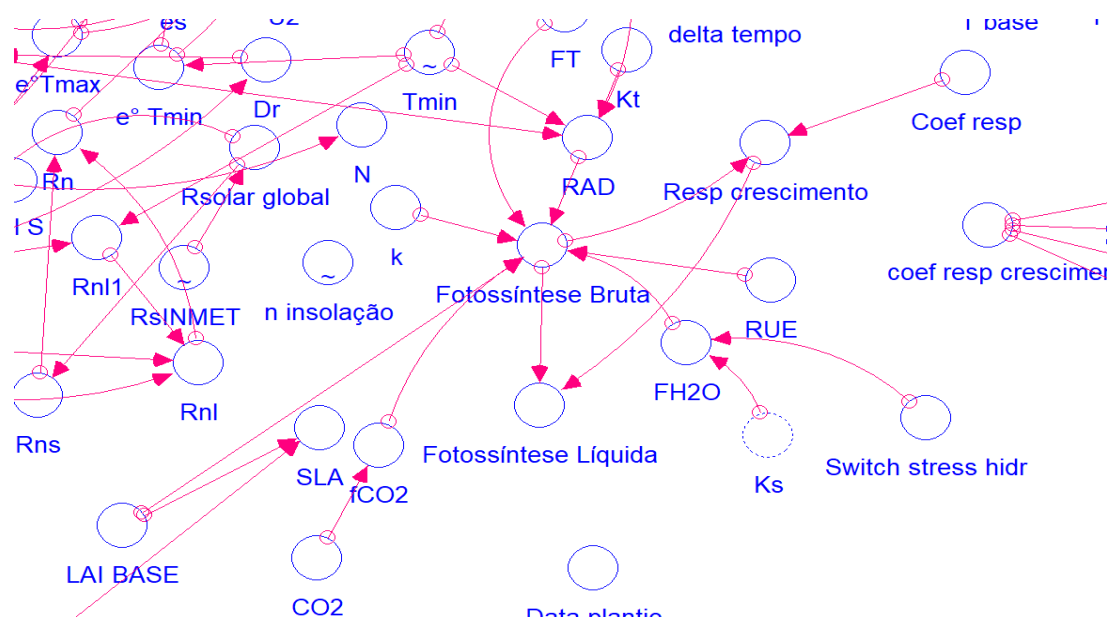


Figura 6 - Variáveis do submodelo Fotossíntese Líquida representadas no STELLA.

A fotossíntese bruta foi calculada por meio da equação proposta por Charles-Edwards (1982).

$$F_b = RUE \times RAD \times [(1 - \exp(-k \times IAF))] \times FT \times FH_2O \quad (4)$$

em que:

F_b - Fotossíntese bruta, $g\ CO_2\ m^{-2}\ d^{-1}$;

RUE - Eficiência no uso da radiação, $g\ MJ^{-1}$;

RAD - Radiação solar incidente, $MJ\ m^{-2}$;

k - Coeficiente de extinção da luz do dossel;

IAF - Índice de área foliar;

FT - Fator temperatura e

FH_2O - Fator disponibilidade hídrica.

A eficiência no uso da radiação (RUE) foi ajustada no modelo por meio da calibração dos dados de fotossíntese líquida. O coeficiente de extinção da luz do dossel foi baseado no valor descrito por Muller e Bergamaschi (2005).

O fator temperatura (FT) foi variável entre 0 e 1. Os valores de FT foram determinados com base no gráfico FT versus $T_{méd}$ que representa o crescimento e desenvolvimento da planta nos intervalos de temperatura: 2 a 25 °C (aumento linear de FT), 25 a 30 °C (FT = 1) e 30 a 45 °C (decréscimo linear de FT). De acordo com Bórem, Galvão e Pimentel (2017), as temperaturas entre 25 °C a 30 °C são consideradas favoráveis para o cultivo do milho.

A disponibilidade de água no solo afeta o processo fotossintético, influenciando o desenvolvimento da planta. Para a umidade do solo na capacidade de campo, o valor de FH_2O foi igual a 1. Na ocorrência de déficit hídrico, o valor de FH_2O foi igual ao coeficiente de estresse hídrico (k_s).

A fotossíntese líquida foi calculada por meio da aplicação da Equação 5 (LAKSO, A. N.; JOHNSON, 1990).

$$F_l = F_b - R_c \quad (5)$$

em que:

F_l - Fotossíntese líquida, $g\ CO_2\ m^{-2}\ d^{-1}$;

F_b - Fotossíntese bruta, $g\ CO_2\ m^{-2}\ d^{-1}$ e

R_c - Respiração de crescimento, $g\ CO_2\ m^{-2}\ d^{-1}$.

A respiração de crescimento foi obtida com aplicação da Equação 6:

$$R_c = F_b \times c_r \quad (6)$$

em que:

c_r - Coeficiente de respiração.

O coeficiente de respiração adotado foi 0,03, conforme Costa e Barros (2001).

4.6.4 Submodelo Partição da Biomassa

Este submodelo considerou a biomassa seca dos constituintes da planta. Para cada órgão da planta foi adotado um coeficiente de partição relativo a cada estágio fenológico.

O crescimento de cada órgão da planta foi obtido multiplicando-se o coeficiente de partição pelo valor da fotossíntese líquida.

As entradas do submodelo foram a biomassa inicial do órgão e o crescimento do órgão, ambos expressos em base seca, e a saída foi dada pela respiração de manutenção (Figura 7). Os valores desta variável foram obtidos multiplicando-se o peso do órgão considerado pelo coeficiente de respiração e pelo fator temperatura.

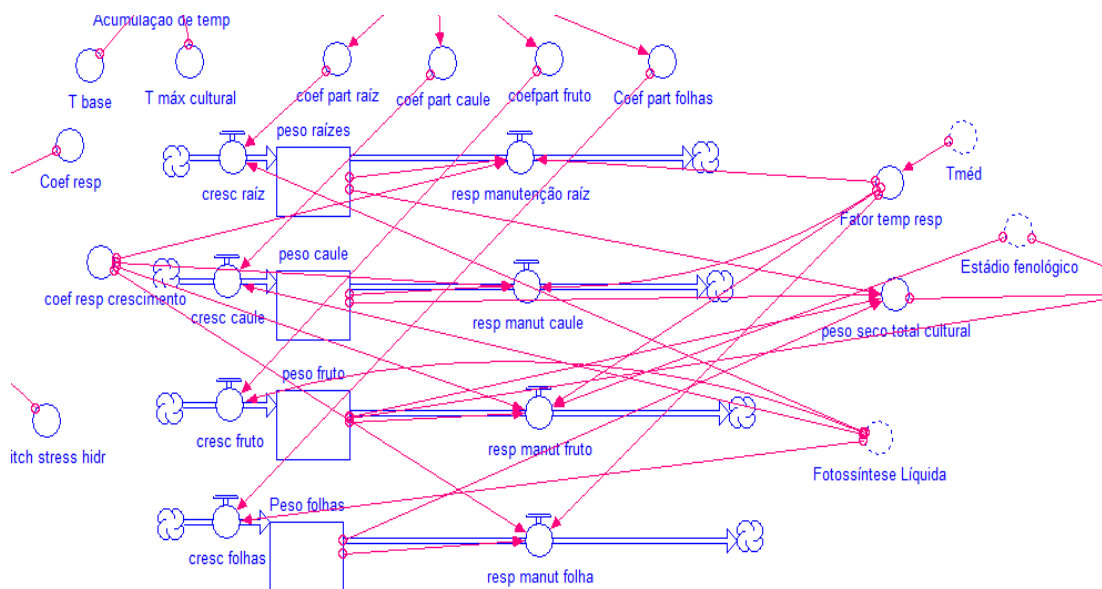


Figura 7 - Variáveis do submodelo Partição da Biomassa representadas no STELLA.

A biomassa dos órgãos da planta está diretamente relacionado com seu crescimento e desenvolvimento dentro do ciclo, assumindo valores distintos conforme o órgão da planta. A partição da biomassa caracteriza esse processo de diferenciação no crescimento, visto que esta é determinada por coeficientes que variam de acordo com o período fenológico. Assim, os coeficientes de partição foram ajustados com base nos valores da biomassa seca da planta medidos em campo (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores atribuídos no STELLA para os coeficientes de partição dos órgãos da planta.

Órgãos da planta	Coeficientes de partição	
	Floração	Maturação
Raiz	0,10	0,01
Caule	0,60	0,06
Grãos	0,00	0,90
Folha	0,30	0,03

4.7 Características avaliadas em campo

Na caracterização do desenvolvimento da cultura de acordo os parâmetros estabelecidos no modelo, foram avaliados em campo a área foliar (cm²), a medição da fotossíntese líquida e a biomassa seca da parte aérea e das raízes.

Para a análise de crescimento foram realizadas amostragens a partir de colheitas destrutivas, de maneira a caracterizar os estádios vegetativos, reprodutivo e de maturação, tendo sido usadas 40 plantas.

Os intervalos de amostragem foram a cada sete dias, com início aos 53 até os 115 dias após o plantio (DAP), para as análises da biomassa seca e IAF. Para a fotossíntese líquida foram realizadas medições aos 60, 87, 94, 101, 108 e 120 dias após o plantio.

Para a medição da fotossíntese líquida utilizou-se o equipamento Infrared Gas Analyser - IRGA, Li-COR modelo LI-6400XT. Nas análises de biomassa seca foram separados os órgãos constituintes da parte aérea (folhas, caule, pendão, espiga e grãos), juntamente com as raízes de cada planta.

O material colhido foi armazenado em sacos de papel e colocado na estufa à 75 °C, durante 72 horas, para secagem, à exceção das espigas, cujo tempo foi de 96 horas. Após a secagem completa dos constituintes das plantas, estes foram pesados para quantificação da matéria seca.

Deste modo, a biomassa seca total foi dada pelo somatório da biomassa seca de todos os órgãos da planta.

A área foliar (AF) foi determinada utilizando-se o equipamento da LI-COR, modelo LI-3100C (Figura 8).

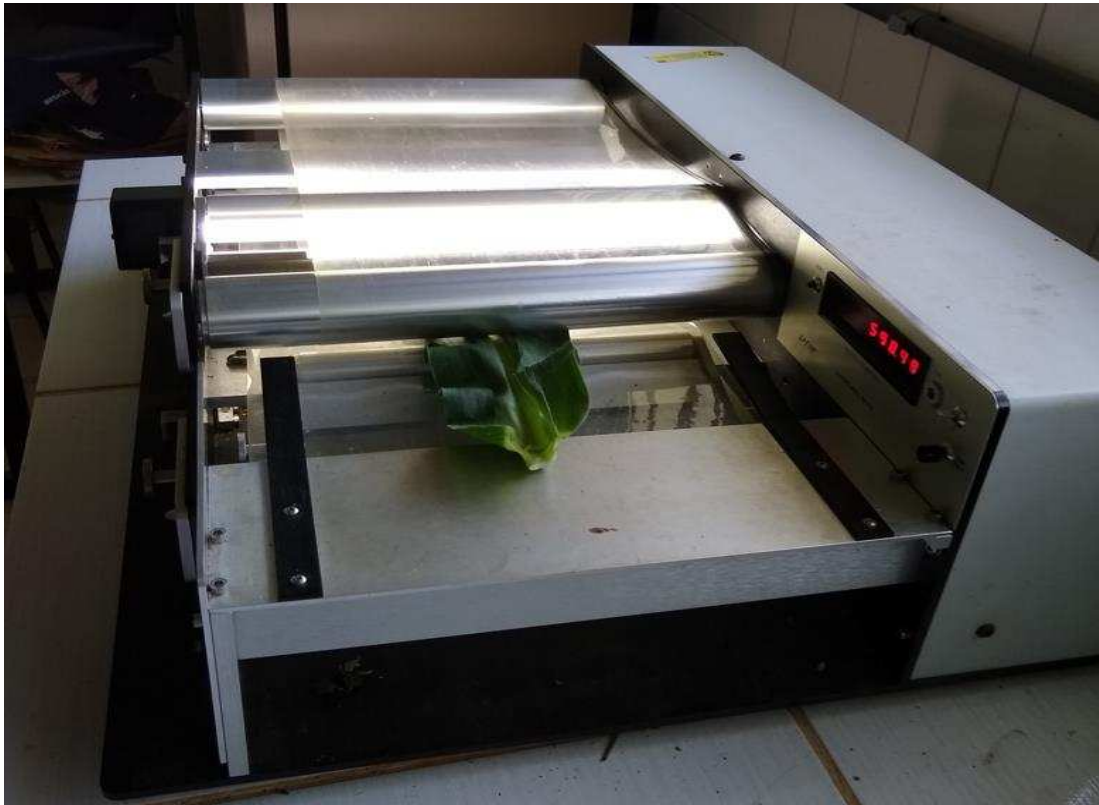


Figura 8 - Obtenção da área foliar utilizando o equipamento LI-3100C, LI-COR.

A partir disso, foi obtido o índice de área foliar (IAF) pela razão entre a área foliar e a área ocupada pela planta.

Para as avaliações de produtividade, foram selecionadas 40 amostras em áreas de 2 m², escolhidas aleatoriamente na área cultivada. Cada amostra constitui-se em uma repetição, em que foram avaliados o número de plantas, número de espigas por planta, altura de inserção da espiga, diâmetro da espiga, número de grãos da espiga, número de fileiras de grãos, peso de mil grãos e peso total.

O teor de umidade dos grãos foi avaliado periodicamente usando-se o medidor de umidade GEHAKA AGRI, modelo G600, até se obter umidade média de 17%, quando se realizou a colheita. O rendimento foi obtido pela pesagem dos grãos debulhados de cada área amostral, cujo a massa foi corrigida para a umidade de 13% e convertida em kg ha⁻¹.

4.8 Análise estatística

O experimento foi conduzido seguindo o delineamento inteiramente casualizado, com dez avaliações e 40 repetições durante o ciclo da cultura.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, tendo sido utilizado o teste de Student (teste “t”) com nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação (r^2) e no comportamento do fenômeno em estudo.

4.8.1 Comparação entre os modelos

Para comparar os modelos ajustados ao modelo do STELLA foi utilizado o teste “t”, para testar as hipóteses: $H_0: \beta_1 = 1$ versus $H_a: \beta_1 \neq 1$ para o modelo a seguir:

$$Y_i = \beta_1 X_i + e_i \quad (7)$$

Nas comparações entre o modelo teórico (STELLA) e o modelo experimental (EXP), os valores de massa seca das folhas ($MSF_{(EXP)}$), massa seca do caule ($MSC_{(EXP)}$), massa seca dos grãos ($MSG_{(EXP)}$), massa seca de raízes ($MSR_{(EXP)}$), fotossíntese líquida ($FL_{(EXP)}$) e índice de área foliar ($IAF_{(EXP)}$) assumiram a condição de variável dependente (Y_i), enquanto que os valores de $MSF_{(STELLA)}$, $MSC_{(STELLA)}$, $MSG_{(STELLA)}$, $MSR_{(STELLA)}$, $FL_{(STELLA)}$ e $IAF_{(STELLA)}$ assumiram a condição de variável independente (X_i).

A estatística do teste t para analisar a concordância entre estes modelos foi dada pela equação abaixo:

$$t_{cal} = \frac{\hat{\beta}_1 - 1}{\sqrt{\frac{Q.M.R}{\sum_i^n X_i^2}}} \sim t_{(n-1)} \quad (8)$$

em que:

t_{cal} - segue a distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade;

$\hat{\beta}_1$ - é a estimativa do coeficiente angular da regressão linear simples;

Q.M.R - é o quadrado médio do resíduo da análise de variância da regressão;

n - é o número de observações;

Desta forma, para a condição do resultado não significativo do teste é observada concordância entre os modelos de regressão. No caso de rejeição da

hipótese de nulidade (H_0) é previsto que a resposta entre os dois modelos de regressão seja diferente.

Outra metodologia utilizada para comparação dos modelos foi o índice d (WILLMOTT et al., 1985), descrito por índice de concordância ou ajuste entre modelos (Equação 9).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{X}|) + (|X_i - \bar{X}|)]^2} \quad (9)$$

Em que Y_i e X_i , assumiram os valores previstos nos modelos de regressão que foram comparados.

O valor do índice d varia entre 0 e 1. Para d igual a 1, os modelos são concordantes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do Balanço Hídrico

Na Figura 9 estão apresentados os dados de temperatura durante o período de cultivo do milho.

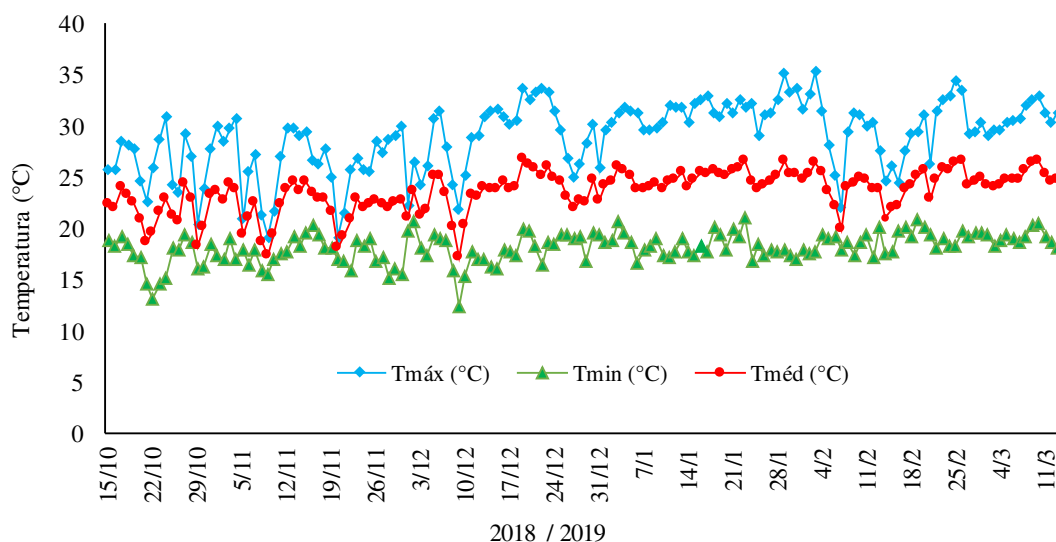


Figura 9 - Variação das temperaturas mínima, média e máxima durante o ciclo da cultura.

A temperatura do ar variou entre 12,4 e 35,3 °C, com média de 23,5 °C durante o ciclo da cultura do milho. Cruz et al. (2010) mencionam que o crescimento da cultura é quase nulo, quando a temperatura do ar se mantém abaixo de 10 °C por longos períodos. Por outro lado, Singletary, Banisadr e Keeling (1994) observaram que temperaturas superiores a 32 °C provocam decréscimo na taxa de crescimento dos grãos. Portanto, na maioria dos dias a temperatura do ar se manteve dentro do intervalo de 10 a 32 °C.

De acordo com Shioga e Gerage (2010), a temperatura influencia os estádios de desenvolvimento da cultura do milho, podendo encurtá-los ou prolongá-los. Segundo Harrison et al. (2011), em culturas como o milho, cuja fenologia é predominantemente regulada pela temperatura, as temperaturas mais altas aceleram o crescimento da planta.

Kappes (2011) afirma que temperaturas médias superiores a 20 °C durante a fase de crescimento, resultam em ciclos de 110 a 140 dias para os genótipos de ciclo

médio. No caso de temperaturas inferiores a 20 °C, a cada 5 °C de diminuição na temperatura, ocorre prolongamento do ciclo cultural de 10 a 20 dias, dependendo das características do híbrido.

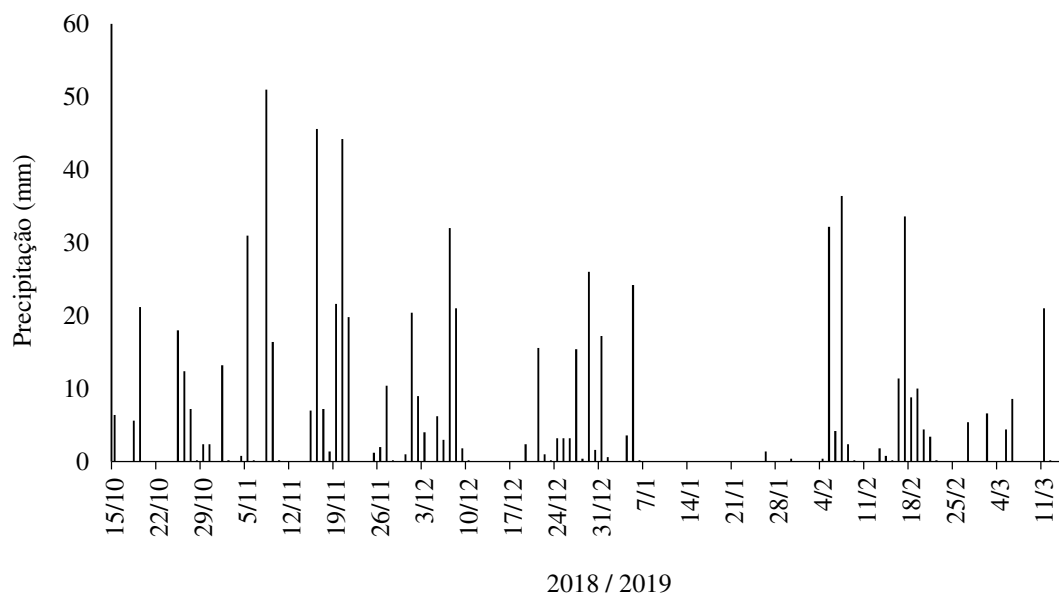
Ferreira et al. (2011) afirmam que as temperaturas ideais para o desenvolvimento do milho estão compreendidas entre 25 e 30 °C. No entanto, Cruz et al (2010) relatam que ao comparar as temperaturas médias diurnas de 18, 21 e 25 °C, obteve-se maior produção de matéria seca e maior rendimento de grãos de milho na temperatura de 21 °C.

Segundo Lobell et al. (2013), a temperatura se torna importante na modelagem do estresse hídrico, quando se considera os impactos das tendências climáticas. Os autores observaram que o estresse hídrico não resultou apenas da baixa umidade do solo pela falta de precipitação, mas também pela ocorrência de altas temperaturas com elevação da demanda de água pela cultura do milho. Com o aumento da temperatura de + 2 °C e uma redução de - 20% na precipitação, o impacto no rendimento foi de - 13% e - 5,6%, respectivamente. Assim, nessa modelagem constatou-se que o rendimento da cultura do milho foi mais afetado negativamente pelo aumento na temperatura do que devido à redução na precipitação.

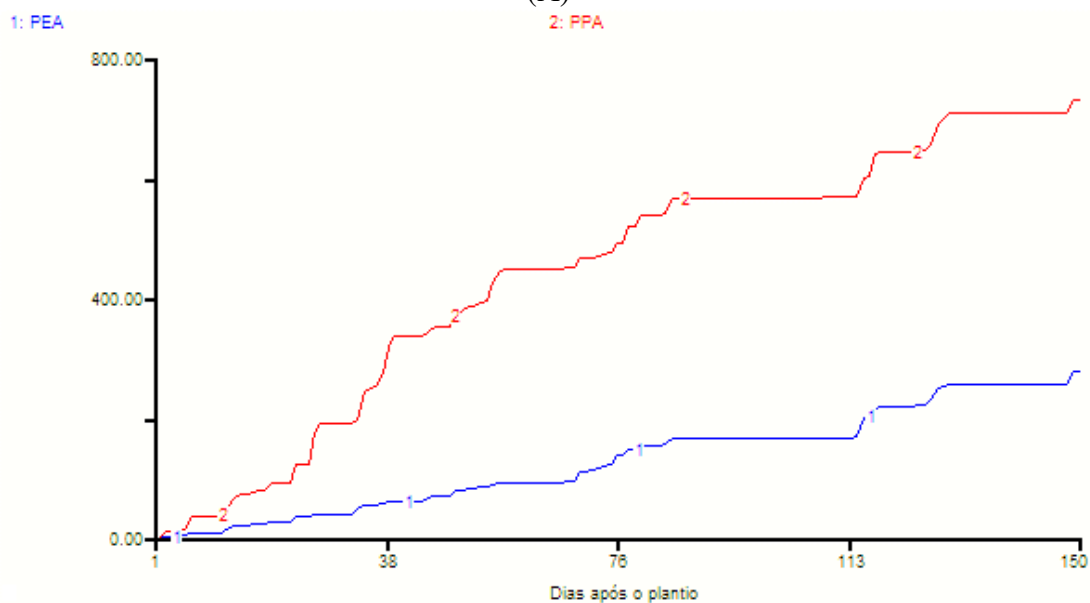
Observa-se na Figura 10A que a precipitação pluvial durante o período experimental foi bem distribuída, com exceção do mês de janeiro. Os valores de precipitação total e de precipitação efetiva acumulada foram de 710,2 e 242,7 mm, respectivamente (Figura 10B).

De acordo com Fancelli e Dourado Neto (2000), a cultura do milho necessita de 350 a 500 mm de precipitação para que produza satisfatoriamente. Contudo, Fancelli (2001) afirma que os máximos rendimentos de grãos são observados para o consumo de água de 500 a 800 mm, durante o ciclo cultural.

Xiao e Tao (2016) estudaram o rendimento do milho em resposta às mudanças climáticas no Norte da China no período de 1981 a 2009 e observaram que a redução da radiação solar e o aumento de temperatura provocaram redução no rendimento do milho, enquanto que a mudança na precipitação teve um efeito mínimo na redução do rendimento.



(A)



(B)

1: PEA (Precipitação efetiva acumulada, mm)
 2: PPA (Precipitação pluvial acumulada, mm)

Figura 10 - Precipitação pluvial (A) e precipitação acumulada (B) durante o período de cultivo do milho, com imagem capturada do modelo STELLA.

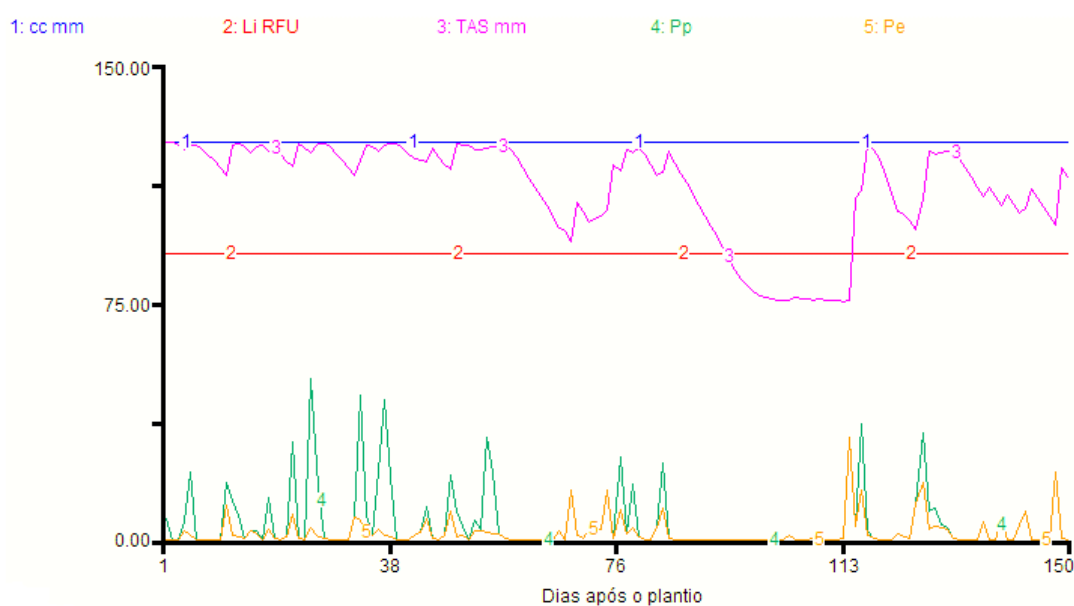
A disponibilidade hídrica além de estar associada à precipitação pluvial, também considera as características do solo, visto que solos com maiores capacidades de armazenamento de água, como exemplo os solos argilosos, necessitam de frequências menores de precipitação, se comparados aos solos arenosos.

O solo da área cultivada foi caracterizado como solo argiloso, tendo alta capacidade de armazenamento de água (Tabela 4).

Tabela 4 - Características físico-hídricas do solo da área experimental

Camada (cm)	Capacidade de campo (% em volume)	Ponto de murcha permanente (% em volume)	Densidade do solo (g cm ⁻³)
0 - 20	31,73	18,01	1,21
20 - 40	32,21	19,61	1,19
Média	31,47	18,81	1,20

A capacidade de armazenamento de água desse solo foi de 12,66 %, equivalendo a 50,64 mm para uma profundidade efetiva das raízes de 40 cm. Os valores médios de capacidade de campo e ponto de murcha permanente foram inseridos no modelo, juntamente com o valor de densidade do solo, para o cálculo do balanço hídrico (Figura 11).



- 1: cc mm (Lâmina de água na capacidade de campo, mm);
- 2: LiRFU (Limite da reserva facilmente utilizável, ou seja, lâmina de água na umidade crítica, mm);
- 3: TAS (Teor de água no solo, mm);
- 4: Pe (Precipitação efetiva, mm);
- 5: Pp (Precipitação pluvial, mm).

Figura 11 - Balanço de água no solo durante o período de cultivo, apresentado pelo STELLA.

As lâminas de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e no limite da reserva facilmente utilizável (fator *f*) foram de 125,88; 75,24 e 90,43 mm, respectivamente.

Observa-se na Figura 11 que o teor de água no solo decresceu abaixo do LiRFU entre 93 e 113 dias após o plantio. Isso ocorreu devido à ausência de precipitação pluvial nesse intervalo, compreendendo o período de 15 de janeiro a 04 de fevereiro de 2019.

É importante destacar que o consumo hídrico da planta está relacionado com a evapotranspiração, sendo esta influenciada principalmente pelo período sazonal, devido às mudanças que ocorrem no clima.

Na Figura 12 estão apresentados os gráficos de evapotranspiração de referência e da cultura, com a variação de k_c ao longo do ciclo.

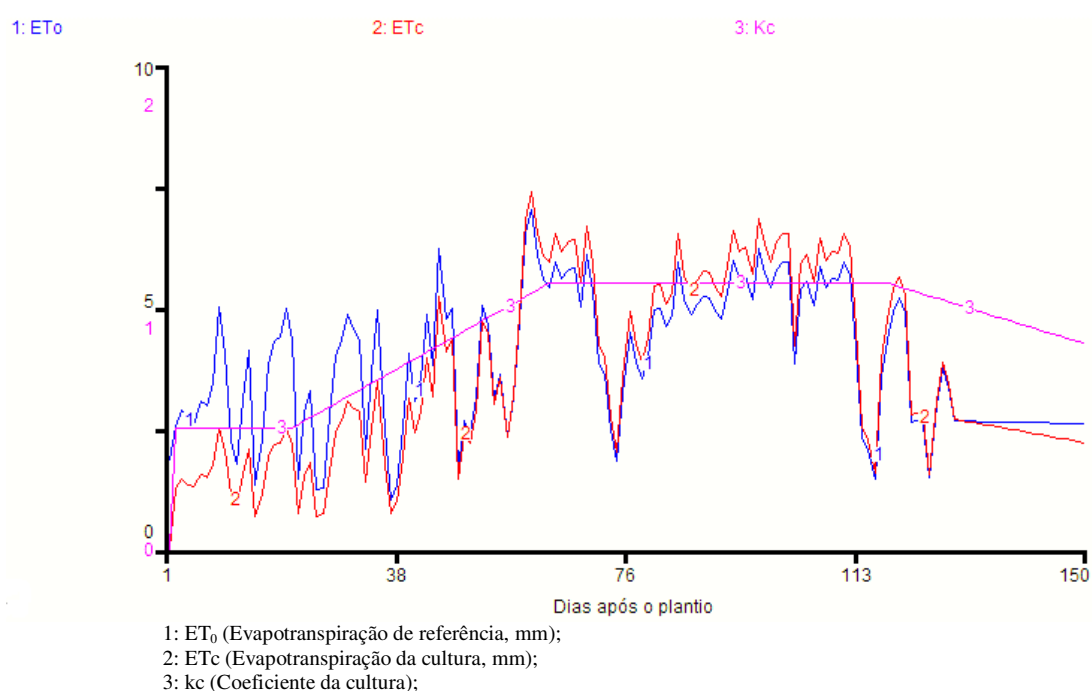


Figura 12 - Evapotranspiração de referência, da cultura e o coeficiente cultural, submodelo Balanço Hídrico, STELLA.

No estágio inicial (k_{c1}), a evapotranspiração da cultura (ET_c) variou entre 0,67 e 2,50 mm d⁻¹, com média de 1,53 mm d⁻¹. A ET_c do período relativo ao segundo estágio de desenvolvimento (k_{c2}) variou entre 0,74 e 7,41 mm d⁻¹, com média de 3,67 mm d⁻¹. No período do florescimento (k_{c3}), a variação da ET_c foi de 1,57 a 6,83 mm d⁻¹, com média de 5,21 mm d⁻¹. No estágio final (k_{c4}), a ET_c variou entre 1,54 a 3,85 mm d⁻¹, com média de 2,55 mm d⁻¹.

Os valores médios da ET_c nos estágios de desenvolvimento do milho foram semelhantes aos valores encontrados por Murga-Orrillo et al.(2016). Os autores avaliaram o consumo hídrico do milho em um solo com e sem cobertura morta e

evidenciaram que a média da evapotranspiração da cultura em solo sem cobertura (ET_{csc}) foi de 1,4, 3,8, 5,3 e 3,2 mm d^{-1} , para os respectivos estádios de desenvolvimento I, II, III e IV.

No período cultivado, a ET_c acumulada foi de 545 mm. Howell et al. (2008) obtiveram 481 mm e 671 mm de evapotranspiração cultural acumulada para o milho no ano de 2006 e 2007, respectivamente, em Bushland, Texas. Alencar et al. (2012), analisando a demanda evapotranspirativa do milho de primeira safra, em Viçosa durante os anos de 1968 a 2008, encontraram uma ET_c média de 529 mm por ciclo cultural.

O coeficiente de déficit hídrico (k_s) é utilizado para expressar a quantidade de água consumida pela planta em relação ao que ela iria consumir se estivesse em condições favoráveis de umidade, tendo sido considerado no cálculo do balanço hídrico.

Os valores de k_s variaram entre 0,42 a 0,92, com período de menor disponibilidade hídrica para a cultura no mês de janeiro de 2019. A baixa umidade do solo nesse período não provocou prejuízos significativos na produtividade do milho, uma vez que a cultura estava na fase de grãos formados, iniciando a formação de dentes e o endurecimento dos grãos.

5.2 Graus-dia

O acúmulo de temperatura durante o ciclo da cultura foi estabelecido a partir dos valores de temperatura máxima e mínima inseridos no modelo, considerando como limite inferior, a temperatura basal e o limite superior, a temperatura máxima.

Na Figura 13 observa-se a divisão entre os principais estádios fenológicos com base na temperatura acumulada, de modo que a resposta da planta foi dinâmica às mudanças de temperatura.

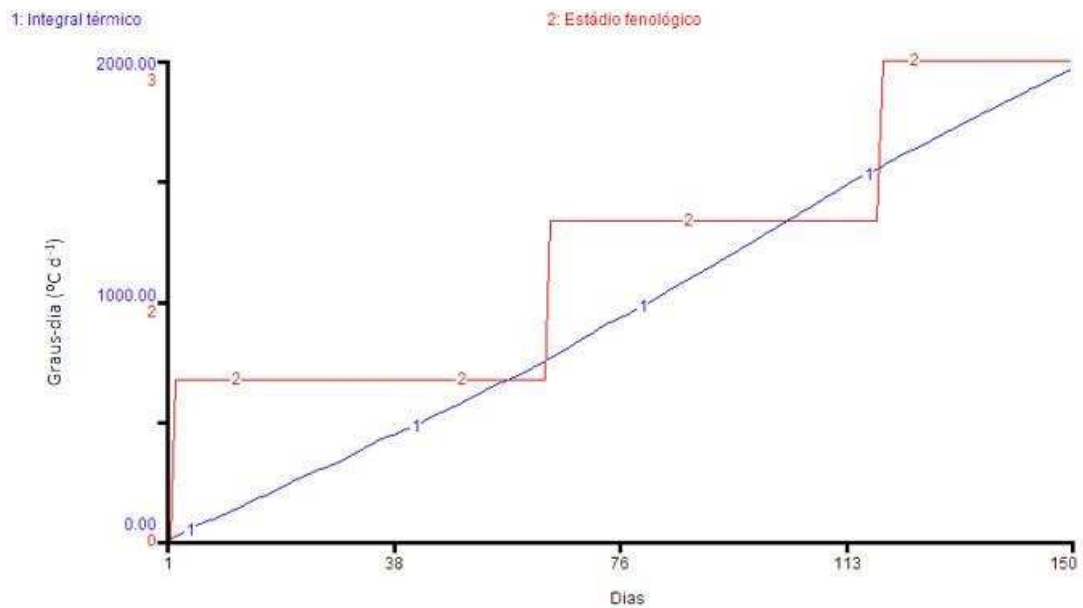


Figura 13 - Representação da temperatura acumulada no submodelo Graus-dia, STELLA.

Os estádios fenológicos considerados foram: inicial, florescimento e maturação. A temperatura acumulada até o início do florescimento foi de 750 °C d⁻¹, equivalente a 63 dias após o plantio e 1.550 °C d⁻¹ para o período de maturação. Esses valores foram estabelecidos conforme a observação da planta no campo (Tabela 5).

Tabela 5 - Duração (dias) e graus-dia acumulados - GDA (°C d⁻¹) entre os estádios de desenvolvimento do milho híbrido DKB 390 PRO3, no período cultivado.

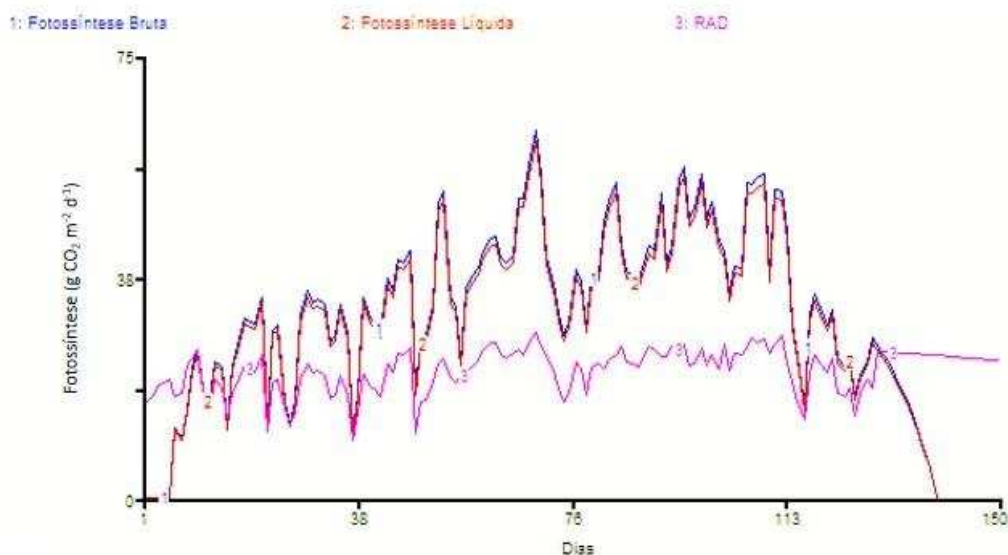
Estádio fenológico	Duração	
	GDA (°C d ⁻¹)	Dias após o plantio
Plantio - Emergência	63,95	6
Florescimento	750,00	63
Plantio - Maturação fisiológica	1.550,00	118

De acordo com Ferreira et al.(2011), os genótipos precoces necessitam de até 780 GD para florescerem, já os genótipos de ciclo normal requerem valores superiores a 860 GD para atingir o florescimento.

Duarte et al. (2003), estudando cinco variedades de milho, observaram que o acúmulo de temperatura até o florescimento foi de 763 °C d⁻¹ para o de híbrido DKB 212.

5.3 Fotossíntese e Partição da biomassa

O submodelo Fotossíntese simulou o crescimento da planta. É possível observar o aumento da taxa fotossintética com o incremento da incidência luminosa (Figura 14).



3: RAD (Radiação solar incidente, MJ m⁻² d⁻¹).

Figura 14 - Variação da fotossíntese e da radiação solar no submodelo Fotossíntese, STELLA.

Observa-se na Figura 14 que os maiores valores de fotossíntese coincidiram com os dias de maior incidência luminosa, evidenciando a importância desta no ciclo da cultura.

Segundo Shioga e Gerage (2010), a luz tem relevância no desenvolvimento do milho, uma vez que este é pertencente ao grupo de plantas C₄. Os autores também afirmam que a diminuição da radiação, entre 10 a 15 dias após o florescimento tem como consequência a redução da densidade de grãos.

Santos et al. (2018) relacionam a alta radiação solar à maior condutância estomática, que por sua vez resulta em maiores taxas fotossintéticas.

A partir da fotossíntese líquida foram determinados a biomassa seca dos constituintes da planta, de acordo com o submodelo Partição da Biomassa (Figura 15).

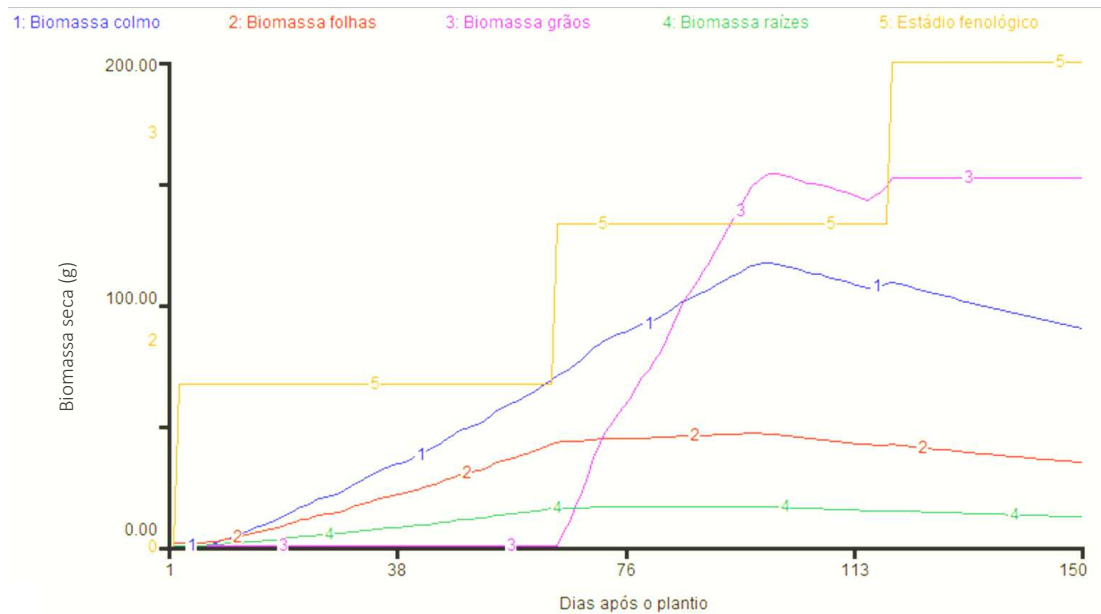


Figura 15 - Biomassa seca dos constituintes da planta (g), STELLA.

Na Figura 15 observa-se que o acúmulo máximo da biomassa seca no colmo foi aos 98 DAP, ou seja, aos 35 dias após o florescimento. Com o desenvolvimento da espiga, a biomassa seca do colmo foi diminuindo, devido a transferência de assimilados para os grãos. Sangoi et al. (2002) encontraram os maiores valores acumulados de matéria seca do colmo, aos 33 e 35 dias após o florescimento para os híbridos de milho P32R21 e C333B, respectivamente.

A biomassa seca das folhas também foi reduzida, devido a translocação dos assimilados para os grãos em formação. De acordo com Sangoi et al. (2002), para densidades de plantas superiores a 25.000 plantas ha⁻¹ ocorre decréscimos contínuos na matéria seca das folhas ao longo do período de enchimento dos grãos.

5.4 Comparação entre os modelos STELLA e experimental

Na Tabela 6 estão apresentados a estatística “t”, os valores de $\hat{\beta}_1$ dos modelos ajustados e o índice d de Willmott et al. (1985) para cada combinação entre os modelos.

O resultado não significativo do teste “t” indica que a hipótese de nulidade não é rejeitada, em que $H_0: \beta_1 = 1$. Logo, os valores estimados de $\hat{\beta}_1$ foram iguais a 1 estatisticamente, evidenciando que os modelos confrontados são estatisticamente valores iguais.

Os resultados do índice d comprovam a concordância entre os modelos, sendo estes considerados satisfatórios e com alto nível de concordância, visto que houve uma

variação de 0,84 a 0,99, com alguns valores muito próximos da concordância perfeita ($d = 1$). Pereira et al. (2010) estudaram a eficiência do modelo Ceres-Maize na simulação da produtividade de híbridos de milho e encontraram uma faixa de valores de d entre 0,82 e 0,93, que consideraram elevada.

Tabela 6 - Estimativa dos valores da estatística, “ t ”, coeficientes de regressão e d de Willmott das combinações entre os modelos para as respectivas variáveis

Combinações entre os modelos	t_{cal}	$\hat{\beta}_1$	d
$BMSF_{(EXP)} \times BMSF_{(STELLA)}$	0,05	1,00 ^{ns}	0,90
$BMSC_{(EXP)} \times BMSC_{(STELLA)}$	-0,65	0,96 ^{ns}	0,84
$BMSR_{(EXP)} \times BMSR_{(STELLA)}$	-0,24	1,00 ^{ns}	0,99
$BMSG_{(EXP)} \times BMSG_{(STELLA)}$	-0,55	0,98 ^{ns}	0,99
$IAF_{(EXP)} \times IAF_{(STELLA)}$	1,26	1,02 ^{ns}	0,96
$FL_{(EXP)} \times FL_{(STELLA)}$	-1,07	0,96 ^{ns}	0,86

BMSF - Biomassa seca das folhas; BMSC - Biomassa seca do caule; BMSR - Biomassa seca de raízes, BMSG - Biomassa seca de grãos; IAF - Índice de área foliar e FL - Fotossíntese líquida.

ns - não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “ t ”.

Os modelos referentes a BMSR e BMSG obtiveram os melhores coeficientes de regressão e as melhores concordâncias. Os valores do índice d para BMSR e BMSG foram de 0,99, comprovando o ótimo desempenho do modelo na simulação.

Os valores de BMSF, BMSC, BMSR e BMSG foram verificados no próprio STELLA, obtendo-se assim os valores de biomassa seca para as datas nas quais foram feitas as análises de campo. As equações do modelo experimental referentes aos parâmetros: BMSF, BMSC, BMSR, BMSG, IAF e FL estão apresentadas no Apêndice B.

Na Figura 16, estão apresentados os gráficos das características estudadas para os dois modelos, durante o ciclo da cultura.

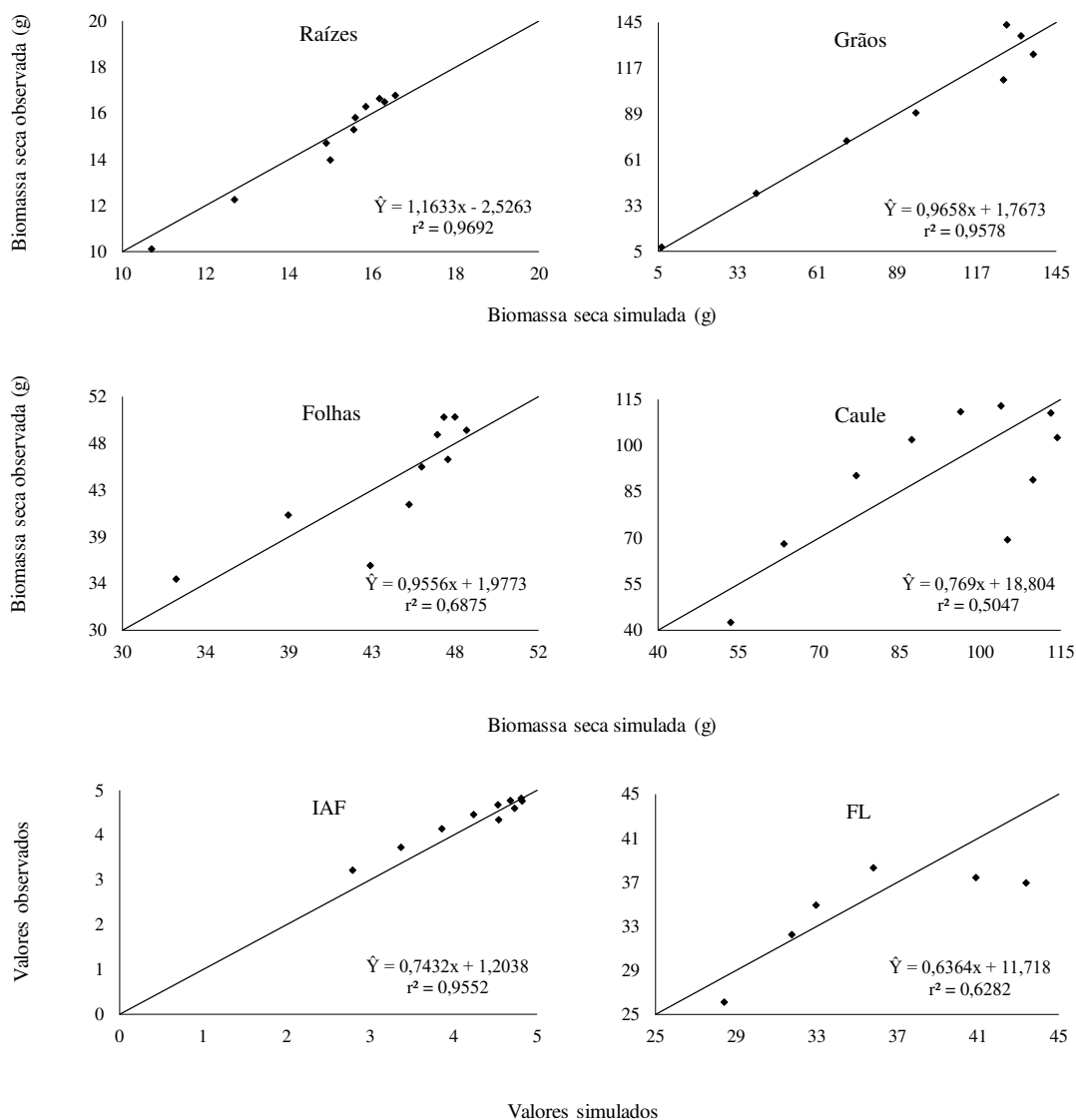


Figura 16 - Comparação entre os modelos STELLA e Experimental.

Observa-se que as comparações entre os modelos estudados para as características biomassa seca de raízes, biomassa seca de grãos e índice de área foliar foram os que apresentaram menores diferenças entre os valores observados e simulados, visto que os desvios dos valores em relação à reta da função identidade foram pequenos. Além disso, os valores de r^2 foram próximos de 1.

O IAF experimental obtido aos 74 DAP foi de 4,82, sendo este superior aos valores encontrados por Sangoi et al. (2005) para os híbridos AG 303 e Speed, analisados no período próximo ao espigamento. Os autores obtiveram valores de IAF inferiores a 3,5 para uma população de até 75.000 plantas ha^{-1} , para os dois híbridos. Brito et al. (2011) encontraram um índice de área foliar de 5,53 para o híbrido simples NB7253.

Hosseini et al. (2015) também encontraram valores de IAF semelhantes a este estudo. Os autores avaliaram a estimativa do IAF para o milho e a soja por meio de imagem de radar e obtiveram valores entre 0,04 e 4,79 até o período de floração.

Na comparação entre os modelos, a BMSC foi a que apresentou maior dispersão, com r^2 de 0,5047. Entretanto, a estatística de $\hat{\beta}_1$ para esse modelo foi de 0,96, com efeito não significativo, indicando que os modelos são estatisticamente iguais.

O rendimento simulado da biomassa seca do caule e da biomassa seca das folhas foi de 6.284 e 2.397 kg ha⁻¹, respectivamente. Estes valores foram semelhantes aos valores encontrados por Santos et al. (2018), que obtiveram valores médios de 6.928 e 2.479 kg ha⁻¹ para esses respectivos rendimentos, na semeadura do dia 15 de fevereiro de 2015, para o híbrido DKB 390 VT PRO. Os autores também observaram diminuição na massa seca do caule com incremento da população de plantas, ou seja, quando esta ultrapassou 70.000 plantas ha⁻¹.

Aos 67 DAP, a BMSR encontrada no modelo experimental foi de 13,98 g por planta. Esse valor foi semelhante ao valor encontrado por Carvalho et al. (2011), que obtiveram 13,29 g de biomassa seca de raízes para o híbrido DKB 390 YG, aos 60 dias após a emergência.

Os valores de biomassa de raízes aos 74 DAP foram de 15,6 e 15,3 g para BMSR simuladas e observadas, respectivamente. Estes valores foram semelhantes aos valores encontrados por Jordan-Meille et al. (2018), avaliando a biomassa de raízes do milho com diferentes fornecimentos de potássio sob as condições de suficiência e deficiência hídrica aos 65 DAE. Os autores obtiveram, em média, 16 g de raízes para as condições recomendadas de potássio e água no solo.

No modelo experimental, a BMSG foi de 143,4 g por espiga, que corrobora com o valor encontrado por Pariz et al. (2011). Os autores obtiveram o rendimento médio de 144,8 g para a biomassa seca de grãos por espiga, para o híbrido simples AG2040.

5.5 Análise de Produtividade

Os dados de produtividade para o híbrido de milho DKB 390 PRO 3 estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores médios das características avaliadas para a produtividade do híbrido simples, DKB 390 PRO 3

NPA	NEA	NFG	NGE	AIE (m)	DE (mm)	PMG (g)	PTG (g)	PROD	
								(t ha ⁻¹)	
								Obs	Sim
13,93	13,95	16,59	546,64	1,66	53,67	349,84	2647,28	13,23	12,01

NPA e NEA - Número de plantas e número de espigas na área de 2 m², respectivamente; NFG - Número de fileiras de grãos, NGE - Número de grãos por espiga; AIE - Altura de inserção da espiga; DE - Diâmetro da espiga; PMG - Peso de mil grãos; PTG - Peso total de grãos na área de 2 m² e PROD Obs - Produtividade observada e PROD Sim - Produtividade Simulada.

Na Tabela 7, observa-se que os valores de NPA e NEA foram muito próximos, indicando que cada planta produziu aproximadamente uma espiga. O número médio de grãos por espiga foi de 546,64 e o peso médio de mil grãos foi de 349,84 g, considerados relativamente satisfatórios se comparados com os resultados encontrados por Santos et al. (2018). Os autores analisaram a produtividade de milho híbrido DKB 390 VT PRO, em quatro épocas de semeadura e com diferentes populações de plantas e observaram que para a população de 70.000 plantas ha⁻¹, o número de grãos por espiga e o peso de 100 grãos foram de 379,86 e 29,54 g, respectivamente.

O número de grãos por espigas obtido nesse estudo também foi superior ao encontrado por Sangoi et al. (2005), em que estes obtiveram 343,5 e 409,9 grãos por espigas para os respectivos híbridos, AG303 e Speed.

A altura de inserção da espiga, o diâmetro da espiga e o número de fileiras de grãos por espiga foram superiores aos valores obtidos por Ferreira (2012), visto que o autor encontrou em média 1,40 m, 51,05 mm e 16,32, respectivamente, obtidas para o milho híbrido DKB 390.

A partir dos valores apresentados na Tabela 7, obteve-se a produtividade do milho observada de 13.236,39 kg ha⁻¹, considerada relativamente alta se comparada à média da região sudeste, de 6.465 kg ha⁻¹ para a safra de 2017/18 (CONAB, 2019).

Kopper et al. (2017) analisaram a produtividade do milho híbrido Balu 280PRO, sob diferentes velocidades de semeadura para duas populações de plantas (60.000 e 70.000 plantas ha⁻¹). Na população de 70.000 plantas ha⁻¹, os autores obtiveram a média de 466,43 grãos por espiga, 15,2 fileiras de grãos por espiga e 387,03 g em mil grãos, resultando na produtividade de 8.004,52 kg ha⁻¹, sendo estes valores inferiores aos obtidos neste estudo, com exceção do peso de mil grãos.

Bodnár, Mousavi e Nagy (2018) avaliaram o acúmulo de matéria seca para os híbridos de milho Armagnac FAO 490, Loupiac FAO 380 e Sushi FAO 340. Os

autores obtiveram 35, 45 e 45 mm para o diâmetro da espiga; 17, 16 e 15 fileiras de grãos por espiga; 429, 578 e 572 grãos por espiga e produtividade de 12,16, 12,09 e 10,98 t ha⁻¹, determinada a 14% de umidade, respectivamente.

Um dos fatores responsáveis pela alta produtividade atingida neste estudo foi a época de semeadura, visto que esta foi realizada na época recomendada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a região de Viçosa. Corroborando com essa afirmação, Sans e Guimarães (2006) mencionam que o sucesso da produtividade está relacionado ao planejamento agrícola seguindo a recomendação da época de semeadura adequada para cada região.

Paixão et al. (2016) modelaram a produtividade do milho DKB 390 PRO, em vinte municípios do estado de Minas Gerais, para diferentes épocas de plantio, em regime de sequeiro e com o uso da irrigação. Segundo os autores, na simulação da produtividade do milho utilizando o modelo CMS-Ceres-Maize, para o município de Viçosa, considerando um solo com capacidade de retenção de água de 40 e 60 mm, a produtividade máxima atingida, sem uso da irrigação foi de 8.493 e 9.330 kg ha⁻¹, respectivamente. A produtividade potencial simulada, ou seja, considerando o suprimento hídrico pela irrigação, foi de 10.417 kg ha⁻¹, para a mesma localidade.

Dessa forma, a produtividade obtida neste estudo foi superior aos rendimentos máximos simulados para os dois cenários, considerando somente os eventos climáticos e com a utilização de irrigação, de acordo com Paixão et al. (PAIXÃO et al., 2016).

6. CONCLUSÕES

A modelagem da cultura do milho utilizando o software STELLA foi eficiente na simulação das características da planta.

A simulação da biomassa seca dos componentes da planta, do índice de área de foliar e da fotossíntese líquida atendeu aos pressupostos do modelo.

O modelo desenvolvido por meio do software STELLA mostrou-se uma tecnologia adequada para previsão do crescimento e da produtividade do milho, cultivado na Zona da Mata Mineira.

REFERÊNCIAS

- ABIMILHO. **Associação Brasileira das Indústrias do Milho. Estatísticas.** Disponível em: <<http://www.abimilho.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 1 maio. 2019.
- ALENCAR, L. P. DE et al. Tendências recentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa - MG. **Engenharia Agrícola**, 2012.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. In: **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. p. 300.
- AMARAL, T. A. et al. A modeling approach to establish strategies for maize silage production in the micro-region of Pelotas, Brazil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 536–555, 2017.
- ANANDHI, A. Growing degree days - Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on corn growth stages in Kansas. **Ecological Indicators**, v. 61, p. 149–158, 2016.
- ANDRADE, C. DE L. T. DE et al. Modelagem do Crescimento de Culturas : Aplicações à Cultura do Milho. **Embrapa Milho e Sorgo**, p. 65, 2009.
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, n. 1, p. 430–445, 1959.
- ASSAD, E. D.; MONTEIRO, J. E. B. DE A.; AZEVEDO, L. DA C. Validação de modelos de estimativa de produtividade de milho, feijão, arroz e trigo no Brasil. **Embrapa Informática Agropecuária**, p. 108, 2010.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; FLECK, N. G. Manejo de plantas daninhas na cultura de milho em função do arranjo espacial de plantas e características dos genótipos. **Ciência Rural**, v. 35, n. 1, p. 245–252, 2005.
- BASSU, S. et al. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2301–2320, 2014.
- BERGAMASCHI, H. et al. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243–249, 2006.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006.
- BODNÁR, K. B.; NASIR MOUSAVI, S. M.; NAGY, J. Evaluation of dry matter accumulation of maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Acta Agraria Debreceniensis**, n. 74, p. 35–41, 2018.
- BOIAGO, R. G. F. S. R. et al. Combinação de espaçamento entrelinhas e densidade populacional no aumento da produtividade em milho. **Revista Brasileira de Milho e**

Sorgo, v. 16, n. 3, p. 440–448, 2017.

BOOTE, K. J. et al. Putting mechanisms into crop production models. **Plant, Cell and Environment**, v. 36, n. 9, p. 1658–1672, 2013.

BORÉM, A.; GALVÃO, J. C. C.; PIMENTEL, M. A. **Milho: do plantio à colheita**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017.

BRITO, C. H. DE et al. Redução de área foliar em milho em região tropical no Brasil e os efeitos em caracteres agrônomicos. **Interciência**, v. 36, n. 4, p. 291–295, 2011.

CARVALHO, F. P. ET AL. Alocação de matéria seca e capacidade competitiva de cultivares de milho com plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 373–382, 2011.

CHARLES-EDWARDS, D. A. **Physiological determinants of crop growth**. Sydney: Academic Press, 1982.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 3. ed. São Paulo: O Autor, 2010.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira grãos, v. 6 Safra 2018/19 - Sétimo levantamento**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 1, p. 75–82, 2001.

COSTANZA, R.; VOINOV, A. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III. **Ecological Modelling**, v. 143, n. 1–2, p. 1–7, 2001.

CRUZ, J. C. et al. **Cultivo do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/27037/1/Plantio.pdf>>. Acesso em: 5 maio. 2019.

DATAONE. **Data Observation Network for Earth**. Disponível em: <www.dataone.org/software-tools/stella-systems-thinking-education-and-research>. Acesso em: 15 abr. 2019.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO: 193 p. (Irrigation and drainage paper, 33), 1979.

DUARTE, A. P. et al. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho originárias de clima tropical e introduzidas de clima temperado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 3, p. 1–20, 2003.

DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho: uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. 2018. 197 p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia de Sistemas Agrícolas). Universidade de São Paulo, Escola Superior de

Agricultura 'Luiz de Queiroz', Piracicaba, 2018.

DURAN-ENCALADA, J. A. et al. The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. **European Journal of Operational Research**, v. 256, n. 2, p. 567–581, 2017.

FANCELLI, A. L. Ecofisiologia de plantas de lavouras. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. (Ed.). . **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: [s.n.]. p. 59–71.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000.

FERREIRA, B.; CAPITANI, D. H. D. Competitividade do milho brasileiro no mercado internacional. **Revista de Política Agrícola**, n. 2, p. 86–99, 2017.

FERREIRA, J. P. **Características agronômicas do milho sob diferentes arranjos espaciais e densidades**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2012.

FERREIRA, W. P. M. et al. Clima, época de plantio e zoneamento agrícola. In: CRUZ, J. C.; MAGALHAES, P. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; MOREIRA, J. A. A. (Ed.). . **Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 19–26.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 59–66, 1999.

FUMAGALLI, M. et al. Desempenho produtivo do milho híbrido simples em função de espaçamentos entre fileiras e populações de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 426–439, 2017.

GUIMARÃES, V. P. **Modelagem de uma unidade de produção para caprinos leiteiros utilizando a dinâmica de sistemas**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2007.

HANNON, B.; RUTH, M. Modeling Dynamic Biological Systems. In: **Modeling Dynamic Biological Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 3–28.

HARRISON, L. et al. Effects of temperature changes on maize production in Mozambique. **Climate Research**, v. 46, n. 3, p. 211–222, 2011.

HATFIELD, J. L. et al. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 351–370, 2011.

HATFIELD, J. L.; DOLD, C. Climate Change Impacts on Corn Phenology and Productivity. In: **Corn - Production and Human Health in Changing Climate**.

IntechOpen, 2018. p. 95–114.

HE, M. et al. Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused landsat-MODIS data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 3, p. 1–21, 2018.

HOSSEINI, M. et al. Estimation of Leaf Area Index (LAI) in corn and soybeans using multi-polarization C- and L-band radar data. **Remote Sensing of Environment**, v. 170, p. 77–89, 2015.

HOWELL, T. A. et al. Evapotranspiration of Corn and Forage Sorghum for Silage. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2008 Ahupua'a**. 2008. p. 1-14.

INFANTE, P. A. et al. Phenology and Biomass Production of Adapted and Non-Adapted Tropical Corn Populations in Central Iowa. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 1, p. 1–12, 2018.

ISEE SYSTEMS. **Systems Thinking in Education**. Disponível em: <<https://www.iseesystems.com>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 76, n. 1, p. 9–19, 1996.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development**. Texas: College Station, 1989.

JORDAN-MEILLE, L. et al. How Does Water-Stressed Corn Respond to Potassium Nutrition? A Shoot-Root Scale Approach Study under Controlled Conditions. **Agriculture**, v. 8, n. 11, p. 180, 2018.

KAPPES, C. et al. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, v. 70, n. 2, p. 334–343, 2011.

KEATING, B. A. et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 2003.

KOPPER, C. V. et al. Produtividade de milho segunda safra em função de diferentes velocidades de semeadura e densidade de plantas. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 22, p. 1–6, 2017.

LAKSO, A. N.; JOHNSON, R. S. A simplified dry matter production model for apple using automatic programming simulation software. **Acta Horticulturae**, n. 276, p. 141–148, 1990.

LEARY, G. J. O. et al. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO₂ under a Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2670–2686, 2015.

LIMA, J. G. DE et al. Startups no agronegócio brasileiro: uma revisão sobre as potencialidades do setor. **Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE**, v.

3, n. 1, p. 107–121, 2017.

LIU, H. et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 144–157, 2017.

LIU, W. et al. Global investigation of impacts of PET methods on simulating crop-water relations for maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 221, p. 164–175, 2016.

LIU, Y. et al. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 518–526, 2018.

LIU, Y.; QIN, Y.; GE, Q. Spatiotemporal differentiation of changes in maize phenology in China from 1981 to 2010. **Journal of Geographical Sciences**, v. 29, n. 3, p. 351–362, 2019.

LOBELL, D. B. et al. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 497–501, 2013.

LOOMIS, R. S.; RABBINGE, R.; NG, E. Explanatory models in crop physiology. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 30, p. 339–367, 1979.

LOPES, G. C. DOS S.; SOUZA, L. A. DE; INOMATA, S. O. Modelagem das inter-relações entre a pesca e o regime fluvial no rio Purus, AM. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 10, n. 2, p. 94–112, 2017.

MACEDO, M. A. DE et al. Avaliação de métodos para espacialização de índices de necessidade hídrica das culturas e sua aplicação em zoneamento agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 581–587, 2001.

MAPA. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/portarias/safra-vigente/minas-gerais/word>>. Acesso em: 5 maio. 2018.

MÅRTENSSON, L. M. et al. Water use efficiency and shoot biomass production under water limitation is negatively correlated to the discrimination against ^{13}C in the C3 grasses *Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea* and *Phalaris arundinacea*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 113, p. 1–5, 2017.

MARWEIN, M. A. et al. Response of water deficit regime and soil amelioration on evapotranspiration loss and water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in subtropical northeastern Himalayas. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 5, p. 845–855, 2017.

MENDES FAGHERAZZI, M. et al. Phenological Sensitivity of Two Maize Cultivars to Trinexapac-Ethyl. **Planta Daninha**, v. 36, n. 0, p. 1–10, 2018.

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, 2017.

MORAIS, R. B. G. et al. Crescimento e produtividade de milho em diferentes épocas de plantio, nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 1, p. 109–119, 2017.

MULLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 27–33, 2005.

MURGA-ORRILLO, H.; ARAÚJO, W. F.; POLO-VARGAS, M. B. E. A. N. A. R. *Zea mays*. p. 352–364, 2016.

OUYANG, Y. Modeling the mechanisms for uptake and translocation of dioxane in a soil-plant ecosystem with STELLA. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 95, n. 1–2, p. 17–29, 2008.

OUYANG, Y. et al. A STELLA Model to Estimate Water and Nitrogen Dynamics in a Short-Rotation Woody Crop Plantation. **Journal of Environment Quality**, v. 44, n. 1, p. 200, 2014.

PADILHA, F. A. et al. Produtividade de híbridos de milho sob dois níveis de tecnologia na região Central de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p. 207–218, 2015.

PAIXÃO, J. S. et al. Aptidão e Potencial de Produção de Milho em Municípios de Minas Gerais. **Embrapa Milho e Sorgo**, n. 1, 2016.

PARIZ, C. M. et al. Produtividade de grãos de milho e massa seca de braquiárias em consórcio no sistema de integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, v. 41, n. 5, p. 875–882, 2011.

PARIZI, A. R. C. et al. Corn yield under various simulated irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 503–514, 2016.

PEREIRA, A. M. A. R. et al. Eficiência do modelo Ceres-Maize na simulação do desempenho de. **Revista Ceres**, v. 57, n. 4, p. 486–493, 2010.

PONI, S.; PALLIOTTI, A.; BERNIZZONI, F. Calibration and evaluation of a STELLA software-based daily CO₂ balance model in *Vitis vinifera* L. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 131, n. 2, p. 273–283, 2006.

RENATO, N. DOS S. et al. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 382–388, 2013.

RENATO, N. S. et al. Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO₂ elevados. **Revista de Ciências Agrárias**,

v. 41, n. 4, p. 1067–1074, 2018.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (EDS.). **Recomendações para o uso de corretivo e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

ROMANO, M. R. **Desempenho fisiológico da cultura de milho com plantas de arquitetura contrastante: parâmetros para modelos de crescimento**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2005.

SACKS, W. J.; KUCHARIK, C. J. Crop management and phenology trends in the U.S. Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 7, p. 882–894, 2011.

SAH, S.; SINGH, N.; SINGH, R. Iron acquisition in maize (*Zea mays* L.) using *Pseudomonas siderophore*. **3 Biotech**, v. 7, n. 2, p. 1–7, 2017.

SANGOI, L. et al. Acúmulo de matéria seca em híbridos de milho sob diferentes relações entre fonte e dreno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 259–267, 2002.

SANGOI, L. et al. Rendimento de grãos, produção e distribuição de massa seca de híbridos de milho em função do aumento da densidade de plantas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 11, n. 1, p. 25–31, 2005.

SANS, L. M. A.; GUIMARÃES, D. P. Circular Técnica 82 - Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos Para a Cultura do Milho. **Circular Técnica 82**, p. 1–5, 2006.

SANTOS, A. L. F. DOS et al. Eficiência Fotossintética E Produtiva De Milho Safrinha Em Função De Épocas De Semeadura E Populações De Plantas. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 52–60, 2018.

SHAHBANDEH, M. **STATISTA**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>>. Acesso em: 1 ago. 2019.

SHIOGA, P. S.; GERAGE, A. C. Influência da época de plantio no desempenho do milho safrinha no estado do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 9, n. 3, p. 236–253, 2010.

SILVA, A. A. V. DA et al. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 180–187, 2014.

SINGLETERY, G.; BANISADR, R.; KEELING, P. Heat Stress During Grain Filling in Maize: Effects on Carbohydrate Storage and Metabolism. **Australian Journal of Plant e Physiology**, v. 21, n. 6, p. 829–841, 1994.

SOARES, F. C. et al. Predição da produtividade da cultura do milho utilizando rede neural artificial. **Ciência Rural**, v. 45, n. 11, p. 1987–1993, 2015.

- SOUSA, R. S. DE et al. Performance of maize genotypes under water deficit. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 1, p. 49–60, 2015.
- SOUZA, T. C. DE et al. Corn root morphoanatomy at different development stages and yield under water stress. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 4, p. 330–339, 2016.
- STÖCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 289–307, 2003.
- TAO, F. et al. Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertainty in climate change impact assessments. **Global Change Biology**, v. 24, n. 3, p. 1291–1307, 2018.
- TAO, S. et al. Dynamic Simulation of the System of the Nymphalidae Larvae Based on STELLA. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1168, p. 052052, 2019.
- TRIPATHI, A. M. et al. The evaluation of radiation use efficiency and leaf area index development for the estimation of biomass accumulation in short rotation poplar and annual field crops. **Forests**, v. 9, n. 168, p. 1–16, 2018.
- VAN BUSSEL, L. G. J. et al. Simulation of the phenological development of wheat and maize at the global scale. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, n. 9, p. 1018–1029, 2015.
- VANUYTRECHT, E.; THORBURN, P. J. Responses to atmospheric CO₂ concentrations in crop simulation models: a review of current simple and semicomplex representations and options for model development. **Global Change Biology**, v. 23, n. 5, p. 1806–1820, 2017.
- WANG, R.; BOWLING, L. C.; CHERKAUER, K. A. Estimation of the effects of climate variability on crop yield in the Midwest USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 216, p. 141–156, 2016.
- WILLIAMS, J. R. et al. The EPIC Crop Growth Model. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 497–511, 1989.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995–9005, 1985.
- WORLEDGE, T. **Brazil domestic corn prices surge as export pull depletes stock**. Disponível em: <<https://www.agricensus.com/Article/Brazil-domestic-corn-prices-surge-as-export-pull-depletes-stock-893.html>>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- XIAO, D.; TAO, F. Contributions of cultivar shift , management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981 – 2009. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, p. 1111–1122, 2016.
- ZALUSKI, P. R. DA S.; DANTAS, M. J. P. Aplicação de softwares de simulação na educação em engenharia: um relato de experiências internacionais exitosas em cursos

de modelagem e simulação de sistemas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 1, p. 170–181, 2018.

ZENG, L. et al. A hybrid approach for detecting corn and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 181, p. 237–250, 2016.

ZHONG, L. et al. Automated mapping of soybean and corn using phenology. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 119, p. 151–164, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1 - Resultado da análise química do solo

Nº Laboratório	Referência do Cliente	pH H ₂ O	pH KCl	pH CaCl ₂	P	K	Na	Ca ²⁺
					mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	cmol _c /dm ³
7548	Amostra única	6,05	-	-	26,6	97	-	3,63
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nº Laboratório	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	ISNa	MO	P-Rem
	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	%	%	%	dag/kg	mg/L
7548	0,91	0,00	2,1	4,79	4,79	6,89	69,5	0,0	-	2,13	23,2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nº Laboratório	S	B	N	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
	mg/dm ³	mg/dm ³	dag/kg	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
7548	-	0,10	-	5,09	96,4	88,8	9,13	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

pH em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5

P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Cd - Pb - Ni - Cr - Extrator Mehlich-1

H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0

t - Capacidade de Troca Catiónica Efetiva

V = Índice de Saturação por Bases

ISNa - Índice de Saturação por Sódio

P-rem = Fósforo Remanescente

B - Extrator água quente

pH em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5

Ca²⁺ - Mg²⁺ - Al³⁺ - Extrator: KCl - 1 mol/L

SB = Soma de Bases Trocáveis

T - Capacidade de Troca Catiónica a pH 7,0

m = Índice de Saturação por Alumínio

MO (Mat. Orgânica) = C.Org x 1,724 -Walkley-Black

S - Extrator - Fosfato monocalcico em ácido acético

N - N total - Digestão sulfúrica - Destilação Kjeldhal

APÊNDICE B

Tabela 8 - Equações do modelo experimental para as respectivas variáveis

	Equações do modelo experimental	r^2
BMSF	$y = -0,0153x^2 + 2,591x - 59,529$	$r^2 = 0,8079$
BMSR	$y = -0,0042x^2 + 0,7797x - 19,407$	$r^2 = 0,9404$
BMSC	$y = -0,0584x^2 + 10,244x - 336,31$	$r^2 = 0,8778$
BMSG	$y = -0,0455x^2 + 11,112x - 532,76$	$r^2 = 0,9152$
IAF	$y = -0,001x^2 + 0,1398x - 0,0621$	$r^2 = 0,9603$
FL	$y = -0,0067x^2 + 1,0175x + 0,505$	$r^2 = 0,9523$

BMSF - Biomassa seca das folhas; BMSC - Biomassa seca do caule; BMSR - Biomassa seca de raízes, BMSG - Biomassa seca de grãos; IAF - Índice de área foliar e FL - Fotossíntese líquida.