



MODELO DE SIMULAÇÃO FOTOSSINTÉTICA PARA ANÁLISE DA RESPOSTA DA CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.) EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E CO₂ ATMOSFÉRICO ELEVADOS

Natalia S. Renato¹, Gilberto G. Sedyama², João Batista L. da Silva³, Eduardo G. Pereira⁴

¹ Física, Profa. do Depto. de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Minas Gerais. Fone: (31) 3899-1900. E-mail: natalia.s.renato@gmail.com

² Eng. Agrônomo, Prof. do Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa

³ Eng. Agrícola, Prof. do Campos Bom Jesus, Universidade Federal do Piauí.

⁴ Biólogo, Prof. do Campus Florestal, Universidade Federal de Viçosa

Apresentado no XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 06 de Setembro de 2013 – Centro de Convenções e Eventos Benedito Silva Nunes, Universidade Federal do Para, Belém, PA.

RESUMO

Objetivou-se construir um modelo de simulação para estudar os efeitos das condições climáticas nas taxas fotossintéticas e na produtividade da cultura do milho. O modelo é fundamentado nas equações de fotossíntese propostas por Farquhar e adaptado por Yin e van Lar. A calibração do modelo foi feita utilizando os dados dos experimentos conduzidos em Viçosa, nos anos de 2008 e 2009. Os resultados das taxas fotossintéticas simuladas nas diferentes concentrações de CO₂ (380 e 700 ppm) foram semelhantes. Com relação à produtividade final de matéria seca, observou-se um acréscimo de 5% quando a simulação foi feita com 700 ppm. Quando o modelo foi testado em condições com acréscimos de temperatura (+1, 2, 3 e 5°C), observou-se que as taxas fotossintéticas aumentaram consideravelmente quando a temperatura subiu, chegando a um limite, não apresentando mais ganhos quando a temperatura aumentou 5°C. Na produtividade, os resultados foram positivos nas primeiras simulações com acréscimos de até 2°C. Entretanto, quando foi feita a simulação para o cenário com temperaturas mais elevadas (3 e 5°C acima da média), a planta respondeu negativamente, com queda na produção. Além de aumentar as taxas respiratórias, o rápido acúmulo dos graus-dia no ciclo de crescimento simulado diminuiu o ciclo da cultura do milho, o que conseqüentemente resultou em menor tempo de crescimento e desenvolvimento.

PALAVRAS-CHAVE: dióxido de carbono, fotossíntese, milho, temperatura do ar.

ABSTRACT

The objective of the present study was to construct a simulation model to study the effects of weather conditions on the photosynthetic rate and yield of maize. The model was built based on the equations proposed by Farquhar photosynthesis and adapted by Yin and van Lar. Model calibration was performed using data from experiments conducted in Viçosa, in the years 2008 and 2009. The results of the different photosynthetic rates simulated CO₂ concentrations (380 and 700 ppm) were similar. Regarding the final yield of dry matter, we observed an increase of 5% when the simulation was performed with 700 ppm. When the model was tested in conditions with increases in temperature (+1, 2, 3 and 5 °C), it was observed that photosynthetic rates increased considerably when the temperature rose, reaching a limit with no more gains when the temperature increased by 5 °C. Productivity, the results were positive in the first simulation with increases of up to 2 °C. However, when the





simulation was made for the scenario with higher temperatures (3 and 5 °C above average), the plant responded negatively, with a drop in production. Besides increasing respiratory rates, the rapid accumulation of degree-days in the cycle of simulated growth decreased cycle of maize, which consequently resulted in less time for growth and development.

KEYWORDS: carbon dioxide, photosynthesis, maize, temperature.

INTRODUÇÃO

Atualmente, mudanças nas temperaturas e na concentração de CO₂ da atmosfera tem sido motivo de grande preocupação mundial. Alterações no clima poderão encurtar o ciclo das culturas e representar antecipação nas épocas de semeadura e colheita, entre outros fatores (Agostinetto et al., 2002). Uma das culturas que podem ser prejudicadas é a cultura do milho (*Zea mays* L.), que tem grande importância social e econômica para o Brasil, o terceiro maior produtor mundial. O milho, por ser do grupo das plantas C₄, obtém suas maiores taxas fotossintéticas com temperatura mais elevadas, e deve apresentar pouco ou nenhum crescimento adicional em resposta às elevadas concentrações de CO₂ (Ghannoum et al., 2000). Segundo Rudorff et al. (1996), não foram observados acréscimos na produtividade do milho cultivado em ambiente com concentração de CO₂ próximo a 500 ppm. Entretanto, no trabalho de Leakey et al. (2004) os experimentos com milho e elevada concentração de CO₂ atmosférico (549 ppm) apresentou incremento médio de 10% na assimilação de CO₂. Apesar de já existirem modelos de simulação de crescimento de cultura em cenários climáticos futuros, essas ferramentas não exploram detalhes importantes do sistema fotossintético das plantas em frente à variação da concentração de CO₂ do ambiente. Embora a alta concentração de CO₂ influencie indiretamente vários processos da planta, os efeitos diretos ocorrem nas enzimas bioquímicas, que se manifestam em nível foliar por meio da fotossíntese (Taiz e Zieger, 2010). As equações mecanicistas apresentados por Farquhar et al. (1980) e adaptados por Yin e van Laar (2005) derivam do conhecimento das relações entre vários tipos de moléculas envolvidas nos processos bioquímicos da fotossíntese. Neste trabalho, objetivou-se em construir um modelo para analisar a influência das mudanças climáticas nos processos fotossintéticos e na produtividade para a cultura do milho.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados experimentais

Os dados experimentais utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, foram obtidos a partir de um experimento conduzido na Infraestrutura de Pesquisa do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa-MG. O experimento citado foi conduzido por Silva (2010) no período de 28 de outubro de 2008 a 06 de março de 2009. Estes dados foram usados para calibração do modelo.

Desenvolvimento do modelo

Para a construção do modelo foi utilizado o aplicativo Model Maker. O modelo de fotossíntese foi desenvolvido baseado nas equações de Farquhar et al. (1980), adaptadas por Yin e van Laar (2005), no qual simula a fotossíntese em função da energia absorvida, temperatura foliar, capacidade da enzima Rubisco e concentração de CO₂ (Equação 1).

$$P_p = 44 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{\tau}{C_c} \right) \min(V_c, V_j) \quad (1)$$





Em que: P_p : fotossíntese bruta ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$); V_c : taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$); V_j : taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétron ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$); τ : ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa ($\mu\text{mol mol}^{-1}$); C_c : concentração de CO_2 no sítio da Rubisco ($\mu\text{mol mol}^{-1}$). A respiração de manutenção representa a quantidade de energia necessária para a manutenção dos processos fisiológicos da cultura. Para o cálculo da respiração de manutenção (R_m) foi utilizada a equação de McCree (1974) como função tanto do peso seco acumulado da cultura (W_{acum}) quanto da variação de temperatura (equação 2).

$$R_m = r_m \times W_{\text{acum}} \times Q_{10}^{\frac{(T_m - t_b)}{10}} \quad (2)$$

Em que: R_m : respiração de manutenção ($\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); r_m : coeficiente da respiração de manutenção ($\text{gCO}_2 \text{ gMS}^{-1} \text{ d}^{-1}$); Q_{10} : fator de incremento da manutenção. Os coeficientes de respiração de manutenção foram diferentes para cada órgão da planta, de acordo com Costa et al. (2009). Para o estudo do desenvolvimento da cultura, foi utilizada a metodologia do cálculo dos graus-dia, de acordo com a equação proposta por Ometto (1981).

As áreas foliares das culturas foram acumuladas ao longo de seu crescimento. O índice de área foliar (IAF) foi calculado considerando a área foliar específica (AFE) e a partição de matéria seca para as folhas (PF), que varia ao longo do estágio de desenvolvimento da planta (3).

$$IAF = AFE \times PF \quad (3)$$

Em que: AFE: área foliar específica ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$); e PF: partição da matéria seca para as folhas (g m^{-2}).

As simulações foram feitas utilizando dados meteorológicos diários coletados durante o experimento. As variáveis utilizadas foram temperatura do ar e concentração de CO_2 . A sub-rotina desenvolvida partiu dos dados de temperatura máxima e mínima observados durante o experimento, sendo que em cada valor diário observado foram somados números aleatórios entre 0 e 2°C (primeira série), 0 e 4°C (segunda série), 0 e 6°C (terceira série) e 0 e 10°C (quarta série). A geração aleatória foi feita no programa Excel, de maneira que os aumentos nas médias das temperaturas para as séries foram de 1, 2, 3 e 5°C , respectivamente. As simulações com acréscimos de CO_2 foram feitas aumentando de 380 para 700ppm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resposta da cultura do milho ao incremento na concentração de CO_2 atmosférico

Foi observado com as simulações, valores diários das taxas de fotossintéticas próximas nas duas diferentes concentrações de CO_2 atmosférico, de 350 e 700 ppm. Esses resultados estão de acordo com Taiz e Zeiger (2010). Os autores citados relataram que devido ao mecanismo de concentração de CO_2 existente nas plantas do tipo C_4 os valores atuais de concentração de CO_2 na atmosfera, já são suficientes para a saturação da fotossíntese, não apresentando acréscimos na carboxilação com o aumento da concentração de CO_2 ambiente. Para a previsão da matéria seca total, foi testado o modelo completo, no qual foram considerados o resultado total da fotossíntese e o gasto energético com a respiração da planta. Os valores simulados no modelo encontraram um acréscimo de 5% na matéria seca final nas condições de 700 ppm.

A resposta da cultura do milho ao incremento de temperatura do ar



Com aumento da temperatura média em 1°C, o valor da taxa fotossintética aumentou consideravelmente. Já, quando a temperatura média é majorada em 5°C, não houve ganhos consideráveis. As plantas C₄ são favorecidas com o aumento de temperatura pelo fato dessas plantas suprimirem a fotorrespiração. Segundo Taiz e Zieger (2010), a planta C₄ requer uma temperatura maior. Em geral, as maiores taxas fotossintéticas são obtidas entre 30 e 40°C. A medida que a temperatura subiu, aumentaram-se também as taxas respiratórias; não apresentando ganho de matéria seca (MS) para tal cultura. Tal fato pode ser facilmente observado nas diferentes curvas do incremento de matéria seca total, representada na Figura 1. Quando a temperatura foi simulada com um aumento médio de 1 e 2°C, a planta respondeu de forma positiva, com um acréscimo no ganho de MS total e de MS dos grãos (Figura 2). Com um aumento médio de 3°C, houve o início da resposta negativa. A taxa fotossintética não é compensada pelo aumento na taxa respiratória e pelo encurtamento no ciclo da cultura com o acúmulo dos graus-dia. Na simulação feita com acréscimo de 5°C, observou-se uma queda na produtividade ainda maior, na ordem de 75% (Figura 2). Nessas condições, o incremento na taxa fotossintética não foi suficiente para compensar os outros fatores envolvidos no processo para a produção de matéria seca nas condições testadas.

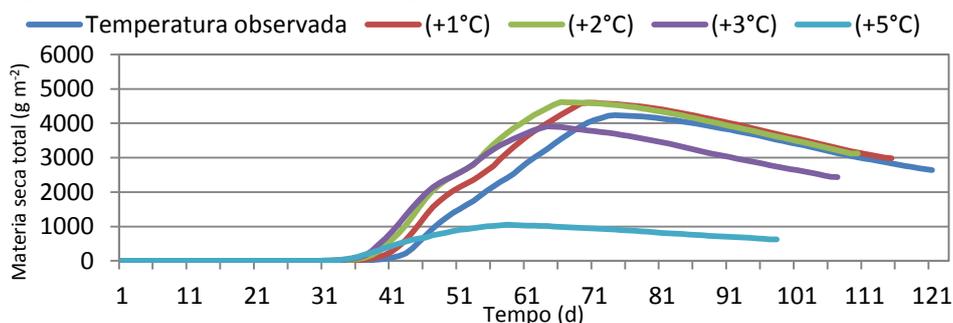


Figura 1: Perfil do desenvolvimento da matéria seca simulados com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas simuladas.

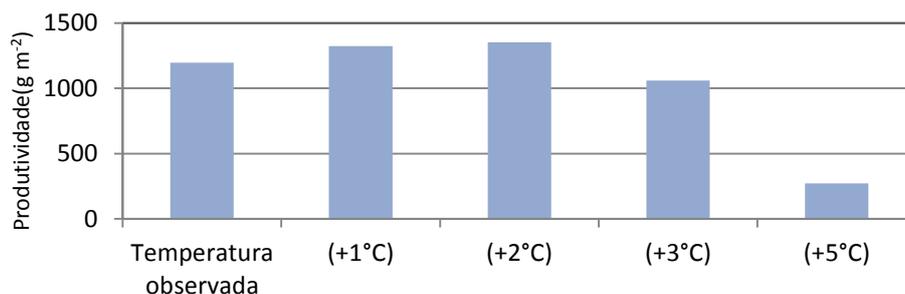


Figura 2: Produtividade final gerada pelo modelo de simulação com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas aumentadas.

Esse resultados são semelhantes aos de Siqueira et al. (2001). Foram observadas reduções na produtividade entre 14 a 33%, com encurtamento de ciclos entre 33 a 21% devido ao aumento de temperatura e também à redução da precipitação. Streck et al. (2005) também observaram uma redução no rendimento dos grãos de milho quando se consideraram incrementos na temperatura.



Resposta da cultura do milho ao incremento da concentração de CO₂ e temperatura

Na Tabela 1, pode-se observar além dos dados coletado no experimento, os resultados das simulações com o incremento de CO₂ e o incremento simultâneo da concentração CO₂ e temperatura. Os resultados simulados ficaram próximos dos valores observados quando apenas o aumento da temperatura foi simulado(Figura 2).

Tabela 1. Matéria seca dos grãos do milho observados no experimento e simulados pelo modelo em diferentes condições.

Simulação	Matéria seca grãos (g m ⁻²)
CO ₂ (380) ppm	1194
CO ₂ (700) ppm	1253
CO ₂ (700 ppm) + Temperatura (1°C)	1388
CO ₂ (700 ppm) + Temperatura (2°C)	1418
CO ₂ (700 ppm) + Temperatura (3°C)	1059
Experimento	
CO ₂ (380 ppm)	1208
CO ₂ (700 ppm)	1137

Os resultados encontrados podem ser atribuídos ao fato de que a planta C₄ tem um mecanismo em que possui a enzima PEP que armazena uma reserva de CO₂. Esse CO₂ é utilizado pela enzima Rubisco na realização da função carboxilaze. Já o aumento na temperatura representou um ganho nas taxas fotossintéticas. Ressalta-se que o CO₂ elevado, apesar de não favorecer, também não atrapalha o desenvolvimento da planta do milho. Os resultados aqui obtidos são similares aos reportados por Streck e Alberto (2006). Com um acréscimo de 3°C, o efeito da temperatura anulou o pequeno efeito positivo do aumento de CO₂ na produtividade. Já com elevações de 4°C, houve redução na produtividade simulada.

CONCLUSÕES

O modelo estudado mostra-se como uma ferramenta importante para o entendimento dos processos de desenvolvimento da cultura do milho. O milho em condições de aumento de CO₂ não apresentou ganhos nas taxas fotossintéticas e nem na produtividade. Já no estudo com o aumento da temperatura, as taxas fotossintéticas aumentaram. A planta foi favorecida apenas com o aumento de até 2°C. Quando a cultura do milho foi simulada com acréscimos de 3°C e 5°C a produtividade diminuiu devido, principalmente, ao aumento das taxas fotossintéticas e a redução do ciclo da cultura.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT JR. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n° 6, p. 1073 – 1081, 2002.
- COSTA, L. C., JUSTINO, F. B., OLIVEIRA, L. J. C., SEDIYAMA, G. C., FERREIRA, W. P. M. & LEMOS, C. F.. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, V. 4, p.1-10, 2009.
- FARQUHAR, G.D., von CAEMMERES, S., BERRY, J.A., A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta** 149, p. 78-90, 1980.





XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – XVIII CBA
2013 e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia
Belém - PA, Brasil, 02 a 06 de Setembro 2013
**Cenários de Mudanças Climáticas e a Sustentabilidade
Socioambiental e do Agronegócio na Amazônia**



- LEAKEY, A. D. B.; BERNACCHI, C. J.; DOHLEMAN, F. G.; ORT, D. R.; LONG, S. P. Will photosynthesis of maize (*Zea mays*) in the US Corn Belt increase in future [CO₂] rich atmospheres? An analyses of diurnal courses of CO₂ uptake under free-air concentration enrichment (FACE). **Global Change Biology**, v.10, p. 951 - 962, 2004
- McCREE, K. J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v.14, p.509-514, 1974.
- OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres 1981. 440p.
- RUDORFF, B. F. T.; MULCHI, C. L.; LEE, E. H.; ROWLAND, R.; PAUSCH, R. Effects of enhanced O₃ and CO₂ enrichment on plant characteristics in wheat and corn. **Environmental Pollution**, v. 94, nº 1, p. 53 - 60, 1996
- SILVA, J. B. L. **Respostas das culturas de feijão submetido ao estresse hídrico e de milho em atmosfera enriquecida com CO₂**. Tese, UFV, Viçosa, MG, 2010.
- SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. **Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas**: Embrapa Meio Ambiente,. p.33-63, 2001.
- STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, vol. 35, nº 3, p. 730 – 740, 2005.
- STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. **Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, vol. 41, nº 9, p. 1351 – 1359, set. 2006.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Plant physiology. 5.ed. Sunderland Sinauer Associates, 782 p, 2010.
- YIN, X., van LAAR. H. H, **Crop Systems Dynamics an ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions**, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 2005.

