

ISSN 0104-1347

## Modelos para estimação de assimilação de dióxido de carbono, coeficiente de extinção de radiação solar e produtividade de grãos da cultura de milho

Models for estimating carbon dioxide assimilation, solar radiation extinction coefficient and maize crop grain productivity

Durval Dourado Neto<sup>1,6</sup>, Luís Gonzaga Medeiros de Figueredo Júnior<sup>2</sup>, Nilson Augusto Villa Nova<sup>3,6</sup>, Milcíades Gadelha de Lima<sup>4</sup>, Paulo Augusto Manfron<sup>5,6</sup> e Sandro Luis Petter Medeiros<sup>5</sup>

**Resumo** - Com o objetivo de estimar a assimilação de dióxido de carbono (a partir dos dados publicados por HEEMST, 1986), o coeficiente de extinção da radiação solar (a partir de dados experimentais relatados por DOORENBOS & KASSAM, 1994) e a produtividade da cultura de milho, foram propostos modelos baseados em variáveis agrometeorológicas e da cultura. A partir dos valores medidos de radiação solar e temperatura, foram estimados os valores de radiação solar fotossinteticamente ativa, assimilação de dióxido de carbono, índice de área foliar e duração do ciclo, considerando as correções quanto à respiração de manutenção e crescimento, duração do dia e índice de colheita e pode-se estimar a produtividade de grãos de milho. Os valores estimados de produtividades de grãos de milho foram comparados aos valores observados por LIMA (1995), GADIOLI (1999), FORSTHOFER (2002) e PIONEER (2002) em Piracicaba-SP, Taubaté-SP, Porto Alegre-RS, Tupaciguara-MG e Barreiras-BA, respectivamente. A assimilação de dióxido de carbono, durante a fotossíntese, é convertida em massa de carboidrato produzida. Para as simulações realizadas nesta avaliação, o modelo teve desempenho satisfatório.

**Palavras-chave:** modelagem, dióxido de carbono, coeficiente de extinção.

**Abstract** - With the purpose of estimating carbon dioxide assimilation using published data from HEEMST (1986), the extinction crop coefficient using DOORENBOS & KASSAM (1994) experimental data, and maize crop productivity, a model was proposed based on agroclimatic and crop variables. With the measured values of air temperature and solar radiation, the values of photosynthetically active solar radiation, leaf area index and crop cycle duration were estimated, considering the corrections for maintenance and growth respiration, extinction coefficient and harvest index, the corn grain productivity can be obtained. The estimated values of grain corn productivity were compared with observed values obtained by LIMA (1995), GADIOLI (1999), FORSTHOFER (2002) and PIONEER (2002) in Piracicaba-SP, Taubaté-SP, Porto Alegre-RS, Tupaciguara-MG and Barreiras-BA, respectively. The carbon dioxide assimilation can be converted in carbohydrate mass produced during the photosynthesis. The model had a satisfactory performance.

**Key words:** modeling, carbon dioxide, extinction coefficient.

<sup>1</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutor, Prof. do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP), Piracicaba, SP. E-mail: [dourado@esalq.usp.br](mailto:dourado@esalq.usp.br).

<sup>2</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP), Piracicaba, SP. Bolsista CAPES.

<sup>3</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutor, Prof. do Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP), Piracicaba, SP.

<sup>4</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutor, Prof. do Departamento de Engenharia Agrícola e Solos da Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI.

<sup>5</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutor, Prof. do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

<sup>6</sup>Bolsista CNPq.

## Introdução

A importância das condições climáticas, durante a estação de crescimento na produtividade da cultura de milho, é amplamente reconhecida por muitos pesquisadores. Por outro lado, as características agroclimáticas de várias localidades podem influenciar diferentemente a produtividade final da cultura. A quantificação da relação, entre produtividade da cultura e variáveis agrometeorológicas, permite que o impacto dessas variáveis na produtividade, durante o ciclo da cultura, seja avaliado.

Os modelos de simulação de crescimento e previsão de rendimento de culturas permitem fazer simulações em longo prazo, a um baixo custo, utilizando características do solo e práticas de manejo da cultura durante o período em que dados climatológicos históricos estejam disponíveis para um determinado local. De acordo com THORNLEY (1976), inúmeras vantagens podem ser conseguidas com o uso de modelos bem elaborados, considerando que os mesmos devem resumir, convenientemente, uma gama de informações, o que permite progressos no conhecimento da planta e suas interações com o ambiente, além de esclarecer pontos em que o conhecimento seja limitado.

Há anos vêm sendo desenvolvidos modelos de estimativa do rendimento da cultura de milho, com base em variáveis agrometeorológicas e outras derivadas do balanço hídrico, porém, com grandes limitações, devido principalmente, à complexidade dos processos envolvidos. Conforme LOZARDA & ANGELOCI (1999), a previsão de rendimento torna-se mais precisa quando os modelos de simulação são usados para estimar a produção em grandes áreas. Por outro lado, HOOGENBOOM (2000) afirma que as aplicações dos modelos, com fins de predição, podem ser feitas tanto previamente à semeadura, como durante o crescimento e desenvolvimento da cultura, e essa informação pode ser usada em nível de governo para planejamento de políticas agrícolas ou por propriedades agrícolas de pequeno porte.

Diversos trabalhos já foram e são realizados para desenvolver modelos de simulação de culturas que representem, adequadamente, determinado processo, como: o acúmulo de matéria seca nos diferentes componentes da planta, o rendimento potencial de culturas e a assimilação de dióxido de carbono (VAN KEULEN *et al.*, 1982; VAN KEULEN & WOLF, 1986; DOORENBOS & KASSAM, 1994,

FERRAUDO *et al.*, 1995). Entretanto, muitos modelos têm sua aplicação limitada pela grande quantidade de informações necessárias ou pelo desempenho insatisfatório em condições diferentes daquelas em que foram desenvolvidos.

Para que um modelo possa ser utilizado convenientemente em determinado local, é necessário avaliar seu desempenho e, por vezes, calibrar seus parâmetros ou até mesmo introduzir modificações na sua estrutura.

O presente trabalho tem por objetivo propor modelos para: (i) estimar assimilação de dióxido de carbono a partir dos dados publicados por HEEMST (1986); (ii) estimar o coeficiente de extinção da radiação solar a partir de dados experimentais relatados por DOORENBOS & KASSAM (1994); e (iii) estimar a produtividade de grãos de milho.

## Material e métodos

Com base nas relações entre variáveis agrometeorológicas e a conversão de energia solar em produção de matéria seca, elaborou-se o modelo para estimar a produtividade da cultura de milho.

Com base em dados experimentais obtidos por HEEMST (1986) para assimilação de CO<sub>2</sub> em plantas do grupo C4, propõe-se o seguinte modelo:

$$A_{dc} = \frac{a + b.q + c.q^2 + d.q^3 + e.ln(T)}{1 + f.q + g.q^2 + h.q^3 + i.ln(T) + j.ln(T)^2} \quad (1)$$

$$q = \frac{0,5.R_s.(1 - Pr_c)}{60.H} \quad (2)$$

em que  $A_{dc}$  se refere à assimilação de dióxido de carbono ( $\mu\text{L.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ );  $R_s$ , à densidade de fluxo de radiação solar global incidente ( $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ );  $H$ , à duração do dia (h);  $Pr_c$ , ao poder refletor da cultura ( $\text{cal.ca}^{-1}$ );  $q$ , à densidade de fluxo de radiação solar absorvida, ( $\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ );  $T$ , à temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) média do ciclo; e  $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$  aos parâmetros empíricos do modelo proposto determinados pela de análise de regressão múltipla ( $a = 1,56679239$ ;  $b = 53,5159093$ ;  $c = -221,80597$ ;  $d = 310,1914914$ ;  $e = -0,4919606$ ;  $f = -0,190506$ ;  $g = 0,37390976$ ;  $h = -0,08816626$ ;  $i = -0,5547284$ ;  $j = 0,080398437$ ).

Sendo as massas moleculares de  $\text{CO}_2 = 44\text{g.mol}^{-1}$  e de  $\text{CH}_2\text{O} = 30\text{g.mol}^{-1}$ , a assimilação de dióxido de carbono ( $\mu\text{L.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) pode ser convertida em massa bruta de carboidrato produzido ( $M_{\text{CH}_2\text{O}}$ ,  $\text{g.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$  de folha), a partir da equação geral dos gases ( $P.V = n.RT$ ) e de dados climáticos. Considerando-se a duração do ciclo da cultura ( $D_c$ , dias), pode-se estimar o rendimento de carboidrato total ( $M_{\text{CH}_2\text{O}}$ ,  $\text{kg.ha}^{-1}$ ) pelas seguintes equações:

$$M_{\text{CH}_2\text{O}} = \frac{36,585.P.Adc.IAF_m.D_c.H}{T + 273} \quad (3)$$

em que  $T$  se refere à temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) média do ar;  $P$  à pressão absoluta (atm);  $H$ , à duração do dia (h);  $Z$ , à altitude local (m);  $IAF_m$ , ao índice de área foliar médio ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ), o qual corresponde a, aproximadamente, 60% do índice de área foliar máximo, que normalmente, ocorre no estágio de florescimento da cultura.

Com base no conceito de DE WIT (1965), concebido para estimar rendimento potencial de uma cultura através da energia disponível no local considerado, chegou-se às correções necessárias para estimar o rendimento potencial da cultura de milho. Essas correções referem-se à interceptação de radiação solar ( $CR_s$ ) e à respiração de manutenção e de crescimento ( $CR_{MC}$ ).

$$CR_s = 1 - e^{-k.IAF_m} \quad (4)$$

$$k = a + b.IAF_m + c.e^{IAF_m} + \frac{d}{(IAF_m)^{1,5}} \quad (5)$$

em que  $k$  se refere ao coeficiente de extinção da radiação solar e  $a, b, c, d$  aos parâmetros empíricos do modelo proposto determinados em análise de regressão ( $a = 0,14723596$ ;  $b = 0,0019494165$ ;  $c = -0,00044532022$ ;  $d = 0,075124603$ ) a partir de dados experimentais relatados por DOORENBOS & KASSAM (1994).

$$CR_{MC} = a + b.T + c.e^T + d.\ln(T)^2 + \frac{e.\ln(T)}{T} \quad (6)$$

em que  $a, b, c, d, e$  se referem aos parâmetros empíricos determinados em análise de regressão ( $a = -64,99114$ ;  $b = -9,9595765$ ;  $c = 0,021803509$ ;  $d = -$

$0,0010608735$ ;  $e = 36,985813$ ) a partir de dados experimentais relatados por DOORENBOS & KASSAM (1994).

A fitomassa seca total (FS) pode então ser estimada pela da seguinte equação:

$$FS = M_{\text{CH}_2\text{O}}.CR_{MC}.CR_s \quad (7)$$

Para estimativa da produtividade de grãos (DOORENBOS & KASSAM, 1994), multiplica-se o valor de FS obtido pelo índice de colheita (IC), que se refere à parte colhida em relação à matéria seca total produzida, ou seja:

$$P_{(\text{grãos})} = \frac{FS.IC}{(1-u)} \quad (8)$$

em que  $u$  se refere à umidade do grão.

Para calibração do modelo proposto, foram utilizados dados obtidos por quatro autores: LIMA (1995), que objetivou validar e calibrar o modelo CERES-MAIZE para condições tropicais; e GADIOLI (1999), que teve por objetivo estudar a influência de fatores ambientais sobre a fenologia e rendimento de milho, além dos trabalhos da PIONEER (2002) e FORSTHOFER (2002). Os ensaios experimentais foram desenvolvidos em Piracicaba e Taubaté (SP), Porto Alegre (RS), Tupaciguara (MG) e Barreiras (BA), respectivamente.

Nos experimentos avaliados em Piracicaba e Taubaté (SP), em cada trabalho, três genótipos (genótipos XL-520, XL-380 e XL-678 em Piracicaba; e C-901, C-333B e C-806 em Taubaté) de milho com diferentes exigências calóricas para o florescimento (XL-520:  $776^{\circ}\text{C.dia}$  - superprecoce, XL-380:  $820^{\circ}\text{C.dia}$  - médio, XL-678:  $847^{\circ}\text{C.dia}$  - tardio; C-901:  $778^{\circ}\text{C.dia}$  - superprecoce, C-333B:  $880^{\circ}\text{C.dia}$  - tardio - e C-806:  $793^{\circ}\text{C.dia}$  - superprecoce) foram utilizados, e semeados em duas épocas distintas (14 de outubro de 1993 e 27 de agosto de 1994 em Piracicaba-SP; e 18 de setembro de 1997 e 20 de outubro de 1997 em Taubaté-SP) (Tabela 1).

Para estimativa de produtividade de milho, segundo o procedimento descrito, desenvolveu-se um programa em linguagem de programação Visual BASIC para ambiente Windows.

## Resultados e discussão

O resumo que relata os valores observados e estimados de produtividade de grãos de milho nos experimentos realizados por LIMA (1995), GADIOLI (1999), FORSTHOFER (2002) e PIONEER (2002) podem ser observados na Tabela 1 e na Figura 1. A comparação dos rendimentos é possível, porque tanto os valores estimados quanto os valores observados referem-se ao rendimento potencial (DE WIT, 1965) da cultura de milho, em condições de adequado suprimento de água e nutrientes e sem sofrer injúrias por pragas e doenças, e sem competição por água e nutrientes com plantas daninhas.

De acordo as simulações realizadas, pode-se observar que os erros de estimativa ultrapassaram 10% apenas em duas situações (Tabela 1), indicando que o modelo teve desempenho satisfatório nesta avaliação. Os resultados indicam que as produtividades estimadas pelo modelo proposto apresentaram ajuste satisfatório aos dados utilizados (Figura 1). Para calibração do modelo, foram utilizadas produtividades de grãos de milho (valores observados) variando **de 5023 a 11.961 Kg ha<sup>-1</sup>**, em cinco diferentes localidades, nos quais os desvios variaram de -13% (subestimativa) em Taubaté-SP a 9,55% (superestimativa) em Piracicaba-SP (Tabela 1).

## Conclusões

De acordo com as estimativas obtidas para Piracicaba-SP e Taubaté-SP, pode-se concluir que o modelo proposto é utilizável para definir a ordem de grandeza de produtividade de grãos de milho a partir do conhecimento de variáveis agrometeorológicas e da cultura.

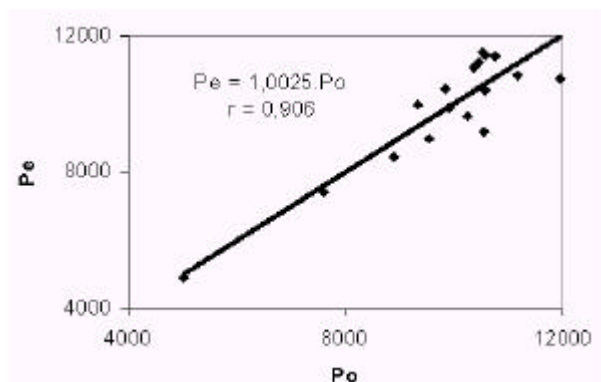
## Referências bibliográficas

- DE WIT, C.T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57 p (Agriculture Research Report 663).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H. et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- FERRAUDO, A.S.; ANDRÉ, R.G.B.; PINHO, S.Z. Modelo agrometeorológico para estimar rendimento de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 93-96, 1995.
- FORSTHOFER, E.L. et al. Fenologia, crescimento e desenvolvimento de híbridos de milho em três épocas **de semeadura**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. 24., 2002. Florianópolis, **Resumos expandidos...**, Florianópolis: ABMS/Embrapa Milho e Sorgo/Epagri. 2002. (CD-ROM).

**Tabela 1.** Produtividades de grãos de milho observada ( $P_o$ ) e estimada ( $P_e$ ) e os respectivos desvios ( $d$ , %).

Fonte	Local	$P_o$ (kg.ha <sup>-1</sup> )	$P_e$ (kg.ha <sup>-1</sup> )	$d^1$
LIMA (1995)	Piracicaba-SP	11157	10873	-2.55
LIMA (1995)	Piracicaba-SP	10765	11413	6.02
LIMA (1995)	Piracicaba-SP	10577	11458	8.33
LIMA (1995)	Piracicaba-SP	11961	10762	-10.02
LIMA (1995)	Piracicaba-SP	10470	11222	7.18
LIMA (1995)	Piracicaba-SP	10508	11511	9.55
GADIOLI (1999)	Taubaté-SP	10553	9181	-13.00
GADIOLI (1999)	Taubaté-SP	9859	10470	6.20
GADIOLI (1999)	Taubaté-SP	10258	9662	-5.81
GADIOLI (1999)	Taubaté-SP	10570	10413	-1.49
GADIOLI (1999)	Taubaté-SP	9321	10019	7.49
GADIOLI (1999)	Taubaté-SP	9551	8985	-5.93
FORSTHOFER (2002)	Porto Alegre-RS	7610	7446	-2.16
FORSTHOFER (2002)	Porto Alegre-RS	10380	11100	6.94
FORSTHOFER (2002)	Porto Alegre-RS	5023	4900	-2.45
PIONEER (2002)	Tapacigura-MG	8900	8500	-4.49
PIONEER (2002)	Barreiras-BA	9900	9908	0.08

$$^1 d(\%) = \frac{P_e - P_o}{P_o} \times 100$$



**Figura 1.** Comparação entre produtividades de grãos de milho observadas ( $P_o$ ,  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (LIMA, 1995; GADIOLI, 1999; PIONEER, 2002; FORSTHOFER, 2002) e estimada ( $P_e$ ,  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) pelo modelo proposto (valor crítico do coeficiente de correlação ao nível de significância de 1%:  $r_{0,01}=0,590$ ).

GADIOLI, J.L. **Estimativa de rendimento de grãos e caracterização fitotécnica da cultura de milho (*Zea mays* L).** Piracicaba: ESALQ, 1999. 86 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

HEEMST, H.D.J. van. Physiological principles. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. **Modeling of agricultural production:** Weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, 1986. p. 13-26.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application.

**Agricultural and Forest Meteorology,** Davis, USA, n. 103, p. 137-157, 2000.

LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo cereia-maize em condições tropicais do Brasil.** Piracicaba, 1995. 119 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

LOZARDA, B.I.; ANGELOCI, L.R. Efeito da temperatura do ar e da disponibilidade hídrica do solo na duração de subperíodos e na produtividade de um híbrido de milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 37-43, 1999.

PIONEER. **Resultados Milho:** safra 2001/2002. Santa Cruz do Sul: Pioneer Sementes Ltda, 2002. 20 p.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology:** a quantitative approach to problems in plant crop physiology. London: Academic Press, 1976. 318 p.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; DRESS, E.M. A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H. H. (Ed). **Simulation of plant growth and crop production.** Wageningen: Pudoc, 1982. p. 87-97.

VAN KEULEN, H.; WOLF, J. **Modeling of agricultural production:** Weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, 1986. 463 p.