

## Notas Científicas

# Simulação estocástica de atributos do clima e da produtividade potencial de milho utilizando-se distribuição triangular

Janilson Pinheiro de Assis<sup>(1)</sup>, Durval Dourado Neto<sup>(2)</sup>, Luciano Lourenço Nass<sup>(3)</sup>, Paulo Augusto Manfron<sup>(4)</sup>,  
Reinaldo Antonio Garcia Bonnacarrère<sup>(2)</sup> e Thomas Newton Martin<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Dep. de Ciências Vegetais, BR 110, Km 47, CEP 59625-900 Mossoró, RN. E-mail: janilson@esam.br

<sup>(2)</sup>Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Dep. de Produção Vegetal, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mail: dourado@esalq.usp.br, rabonnec@esalq.usp.br, martin@esalq.usp.br <sup>(3)</sup>Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Caixa Postal 02372, CEP 70770-900 Brasília, DF. E-mail: lnass@cenargen.embrapa.br <sup>(4)</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Dep. de Fitotecnia, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: manfronp@smail.ufsm.br

**Resumo** – O objetivo deste trabalho foi simular a produtividade potencial da cultura de milho, pelo método de Monte Carlo, utilizando um modelo agrometeorológico estocástico. O experimento foi conduzido em Piracicaba, SP, a 22°42'30"S, 47°38'30"W, e altitude de 546 m, o clima da região é do tipo Cwa (tropical úmido). Foram utilizados os valores médios diários de temperatura (de 1917 a 2002) e radiação solar global (de 1978 a 2002). Para comparar os dados reais com os simulados, foram utilizados índices de desempenho estatístico. Observou-se que os modelos probabilísticos, desenvolvidos para a simulação de dados médios diários de temperatura e de radiação solar global, geraram valores semelhantes aos observados por meio da distribuição triangular, a qual pode ser utilizada em modelo estocástico, para previsão da produtividade potencial de milho, nas diferentes épocas de semeadura.

Termos para indexação: *Zea mays*, distribuição de probabilidade, método de Monte Carlo.

## Stochastic simulation of climate parameters and potential productivity of maize using triangular distribution

**Abstract** – The objective of this work was to simulate the potential productivity of maize, through Monte Carlo method, using an agrometeorological stochastic model. The experiment was conducted in Piracicaba, State of São Paulo, Brazil, at 22°42'30"S, 47°38'30"W, and 546 m altitude, the climate of the region is Cwa type, tropical humid. Daily average values of temperature (from 1917 to 2002) and global solar radiation (from 1978 to 2002) were used. Statistical performance index was used to compare observed and simulated data. The probabilistic models developed to simulate temperature and solar radiation averages produced similar values to observed data through triangular distribution, and it can be used in stochastic models to predict maize potential productivity in different dates of sowing.

Index terms: *Zea mays*, probability distribution, method of Monte Carlo.

O milho, em razão de seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, é um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo. Graças à sua multiplicidade de aplicações, quer na alimentação humana quer na alimentação animal, tem relevante papel socioeconômico, além de constituir-se em indispensável matéria-prima impulsionadora de complexos agroindustriais diversificados (Fancelli & Dourado Neto, 2003). A produtividade de uma cultura

(potencial genético de produção) é resultante do uso adequado de insumos tecnológicos de produção e de condições ambientais determinadas por fatores climáticos, durante o ciclo cultural. Entre os fatores do clima utilizados para se avaliar a viabilidade e a estação para a implantação das mais diversas atividades agrícolas, a temperatura, a radiação solar e a precipitação são os mais estudados (Fancelli & Dourado Neto, 2003).

O objetivo deste trabalho foi realizar a estimativa da produtividade potencial da cultura de milho em Piracicaba, em função dos valores médios diários de temperatura do ar e da radiação solar global, simulados pelo método de Monte Carlo, utilizando-se um modelo agrometeorológico estocástico.

Os dados de temperatura média e radiação solar global diária, utilizados neste trabalho, foram fornecidos pela área de Agrometeorologia, do Departamento de Ciências Exatas, e provieram da Estação Agrometeorológica de Piracicaba (Campus da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz), Piracicaba, São Paulo. A estação fica a 22°42'30"S, 47°38'30"W, altitude de 546 m. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa (tropical úmido, com chuvas de verão, e seca no inverno). O total de chuvas, no mês mais seco, é de 26 mm e no mês mais chuvoso é de 217 mm, com média anual de 1.270 mm; os meses mais secos são junho, julho e agosto. A temperatura média do mês mais quente é de 24,6°C, do mês mais frio é de 17,3°C, com média anual de 21,5°C. A radiação solar global média anual é de 435 cal cm<sup>-2</sup> por dia (Villa Nova, 2003).

Os valores de temperatura média diária (°C) abrangeram um período de 86 anos (1º de janeiro de 1917 a 31 de dezembro de 2002) e de radiação solar global diária (cal cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), 25 anos (1º de janeiro de 1978 a 31 de dezembro de 2002). Os dados foram analisados individualmente, em cada dia do mês, para cada ano da série histórica estudada, por meio do SAS (SAS Institute, 1996).

A distribuição usada no processo de simulação foi a triangular, que é apropriada nos casos em que é possível determinar o valor mais provável da variável aleatória, o seu valor mínimo, o máximo, e quando uma função linear parece apropriada para a descrição da distribuição dos valores dos erros das variáveis. Nessas situações, admite-se que os dados têm uma distribuição triangular, que é um bom modelo entre a distribuição normal e a uniforme. A área sob a curva da distribuição normal, no intervalo média menos um desvio-padrão até a média mais um desvio-padrão, corresponde a 0,6827. As áreas sob as curvas das distribuições triangular e retangular (ou uniforme) são, respectivamente, 0,64983 e 0,57735, considerando o mesmo intervalo (Bressan, 2002). Segundo esse autor, essa distribuição da densidade de probabilidade é ainda usada, mais comumente, quando o objetivo é obter uma aproximação na ausência de dados, a qual permite ajustar uma distribuição mais

adequada, ou quando se conhece apenas os valores mais prováveis (m), mínimo (a) e máximo (b) da variável, mas não se conhece muito sobre a distribuição empírica dos dados. A função densidade de probabilidade é dada pela fórmula:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(X-a)}{(m-a)(b-a)} & \text{Se } a \leq X \leq m \\ \frac{2(b-X)}{(b-m)(b-a)} & \text{Se } m < X \leq b \\ 0 & \text{Se } X < a \text{ ou } X > b \end{cases} \quad (1)$$

Com o intuito de avaliar o desempenho do processo de simulação da temperatura e da radiação solar global diária, foram efetuadas mil simulações da ocorrência e quantidade dessas duas variáveis climatológicas, comparando-se a média dos valores simulados com a média dos valores observados, em cada período analisado. Para tanto, utilizaram-se a técnica de análise de regressão linear simples, cujo valor do coeficiente linear da reta (a) é considerado nulo (Bussab & Morettin, 2003), e os seguintes indicadores de desempenho estatístico: coeficiente de correlação de Pearson (r) (Bussab & Morettin, 2003); índice de concordância de Willmott (Id) (Willmott, 1981), em que os valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. Tal estratégia permite identificar o grau de precisão e de exatidão do processo de modelagem das variáveis (valores diários) temperatura e radiação solar global (Camargo & Sentelhas, 1997; Pereira, 1998; Sousa, 1999).

$$a = \bar{S} - b \bar{O} \quad (2)$$

$$b = \frac{n \left( \sum_{i=1}^n O_i S_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n O_i \right) \left( \sum_{i=1}^n S_i \right)}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n (O_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right]}} \quad (3)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (4)$$

$$\bar{O} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n} \quad (5)$$

$$r = \frac{n \left( \sum_{i=1}^n O_i S_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n O_i \right) \left( \sum_{i=1}^n S_i \right)}{\sqrt{\left[ \left( n \sum_{i=1}^n (O_i)^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right] \left[ \left( n \sum_{i=1}^n (S_i)^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n S_i \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

$$Id = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

em que  $r$  é o coeficiente de correlação linear simples de Pearson;  $Id$  é o índice de concordância de Willmott;  $S_i$  é o parâmetro simulado no  $i$ -ésimo período;  $O_i$  é o parâmetro observado na série histórica no  $i$ -ésimo período;  $\bar{O}$  é a média do parâmetro observado na série histórica; e  $n$  é o número de períodos avaliados.

A produtividade de milho foi estimada segundo a metodologia desenvolvida por Figueredo Júnior (2004), com base nas relações entre dados agroclimáticos e na conversão de energia solar que resulta em produção de massa de matéria seca. A produtividade foi simulada mil vezes, conforme um modelo teórico normal de distribuição da densidade de probabilidade, para valores de temperatura média diária e de radiação solar global.

Na Tabela 1, estão descritos os dados do desempenho estatístico nos períodos estudados, casos 1 e 2. O processo de simulação apresentou resultados bastante variáveis, o que se deve à maior heterogeneidade dos dados, além disso, pode ser observado, pelos valores dos coeficientes de correlação linear ( $r$ ) e pelo índice de Willmott ( $Id$ ), que houve razoável precisão e exatidão, pois os valores de  $r$  e de  $Id$  tiveram uma amplitude de variação, cuja magnitude para o caso 1 variou de 0,59 a 0,97 para  $r$ , e de 0,47 a 0,94 para  $Id$ , sendo que para o caso 2,  $r$  toma valores de 0,43 a 0,91, e  $Id$  de 0,66 a 0,94, indicando baixa e elevada precisão e exatidão, respectivamente. O processo apresentou desempenho melhor nas datas de semeadura até setembro para o caso 1, e até agosto para o caso 2. Isso se deve, provavelmente, a uma maior homogeneidade dos dados nesses períodos. Resultados semelhantes foram obtidos por Andrade Júnior et al. (2001).

Pode-se notar, ainda, que ocorreu variação, em dias, nos valores da duração do ciclo da cultura do milho, verificando-se que em seu desenvolvimento tal duração tem demonstrado inconsistência. Segundo Gadioli (1999), a duração de subperíodos e ciclos da planta estão associados à variação das condições ambientais e não ao número de dias dos meses. De forma generalizada, segundo esse autor, a temperatura apresenta-se como o fator climático mais importante para predição dos eventos fenológicos da cultura.

Observa-se no caso 1 que a dispersão dos pares de valores é baixa, conforme mostram os coeficientes de correlação que representam valores médios diários; conclui-se, assim, pela existência da tendência linear entre os valores comparados. Os coeficientes de regressão, bem como o teste  $F$  contido nas análises, indicam que os dados simulados representam satisfatoriamente os dados históricos. No caso 2, percebe-se maior dispersão dos valores. Isso demonstra que, para os períodos estudados, o emprego da distribuição triangular no processo de simulação deve ser recomendável nos casos 1 e 2, em que variam, diariamente, tanto a temperatura média quanto a radiação solar, respectivamente. A maior variabilidade dos dados no caso 2, apenas em algumas datas de semeadura, se deve ao fato de que ao se adotar um modelo triangular de distribuição de probabilidade, em que apenas a temperatura ou a radiação solar global diária varia, pode-se estar subestimando ou superestimando os valores dessa variável. No entanto, nas outras datas em que isso não ocorreu, pode-se utilizar a distribuição triangular, para representar essas duas variáveis no desenvolvimento e produção da cultura do milho.

A variabilidade média da produtividade potencial de milho apresentou valores elevados no início do ano, que diminuíram entre março e abril e se tornaram máximos no final do ano. Isto se deve à combinação de valores adequados de temperatura e radiação solar, que proporcionaram a maior produtividade. Esse fato pode ser visualizado na Tabela 1, onde se nota produtividade relativamente diferente nos dois casos, sendo que os menores índices de produtividade ocorreram para o caso 1, durante todo o ano. Nas datas de semeadura desses períodos, ocorreram condições desfavoráveis de temperatura e radiação solar global, o que resultou em menor produtividade.

O comportamento da produtividade, observado neste trabalho, é explicado, em parte, pelo fato de que todas

as plantas requerem um fornecimento adequado de água, temperatura adequada (tanto a temperatura diurna quanto a noturna) e radiação solar abundante, para que possam otimizar o potencial de produtividade. Verifica-se que os valores obtidos no caso 2 sempre são maiores que no caso 1. No entanto, nos meses de junho e julho, observa-se que os índices de produtividade são muito próximos nos dois casos, o que pode ser explicado pelo fato de não ter havido efeito significativo nas variações, na série de temperatura (caso 1), nem tampouco na série de radiação solar (caso 2), pois, conforme Fancelli & Dourado Neto (2003), o aumento da temperatura, principalmente noturna, além de incrementar o processo respiratório, contribui para a aceleração da acumulação de graus-dia, favorece o encurtamento do ciclo da cultura e reduz o aparato fotossintético e, conseqüentemente, a radiação interceptada, bem como o efetivo potencial de produção.

Fancelli & Dourado Neto (2003) citam que temperaturas elevadas prevaletentes no período noturno (supe-

rior a 24°C), promovem um consumo energético demasiado, em função do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados, com conseqüente queda no rendimento da cultura. Entretanto, de acordo com Villa Nova et al. (1972), a maioria dos genótipos atuais não se desenvolve em temperaturas inferiores a 10°C, considerada a temperatura basal para a espécie.

Temperaturas superiores a 30–34°C resultam em maior dificuldade de desenvolvimento de plantas de milho, bem como em relação não linear entre taxa de desenvolvimento e temperatura (Fancelli & Dourado Neto, 2003). A temperatura também regula a emissão das folhas de milho, durante todo o seu ciclo vital.

É importante ressaltar que esses índices elevados de produtividade são potenciais, pois são aqueles que devem ser obtidos quando a cultura está totalmente adaptada à condição da região do plantio, e todas as práticas culturais que viabilizem a cultura são realizadas de modo satisfatório. Índices de produtividade

**Tabela 1.** Desempenho estatístico de mil simulações de temperatura média diária (°C), radiação solar global diária (cal cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e produtividade média de milho (kg ha<sup>-1</sup>), em 24 datas de semeadura, com índices de coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância de Willmott (Id), além do coeficiente angular de regressão simples (b), duração do ciclo da cultura (Dc) e valores calculados de F (Fc), para um valor tabelado de F (F = 3,92), a 5% de probabilidade.

Data	Dc	Temperatura média diária				Radiação solar global diária				Produtividade <sup>(1)</sup>	
		r	Id	b	Fc	r	Id	b	Fc	Caso 1	Caso 2
1 <sup>a</sup> de jan	123	0,94	0,88	0,96	366,70	0,78	0,86	0,99	313,13	15.408	16.196
15 de jan	131	0,96	0,93	0,96	628,43	0,84	0,91	0,99	454,15	14.432	15.358
1 <sup>a</sup> de fev	146	0,97	0,95	0,96	941,97	0,90	0,94	0,99	824,15	12.998	14.055
15 de fev	160	0,97	0,95	0,95	1.025,35	0,91	0,94	0,99	925,07	11.770	12.918
1 <sup>a</sup> de mar	170	0,96	0,94	0,95	830,43	0,86	0,92	0,98	662,14	10.787	12.017
15 de mar	177	0,94	0,91	0,95	657,04	0,83	0,90	0,99	592,10	10.417	11.610
1 <sup>a</sup> de abr	182	0,91	0,87	0,95	492,85	0,84	0,90	0,98	617,27	10.705	11.812
15 de abr	183	0,90	0,86	0,94	501,29	0,86	0,92	0,98	691,62	11.455	12.380
1 <sup>a</sup> de mai	181	0,92	0,89	0,94	604,36	0,87	0,93	0,98	726,07	12.525	13.184
15 de mai	178	0,93	0,91	0,95	738,80	0,88	0,93	0,98	815,97	13.405	13.924
1 <sup>a</sup> de jun	172	0,95	0,93	0,96	884,38	0,90	0,94	0,98	885,03	14.325	14.675
15 de jun	166	0,95	0,94	0,96	943,00	0,90	0,94	0,97	821,69	14.939	15.200
1 <sup>a</sup> de jul	159	0,95	0,94	0,96	970,64	0,88	0,93	0,98	660,18	15.572	15.784
15 de jul	152	0,94	0,94	0,96	860,79	0,84	0,91	0,98	491,71	15.987	16.170
1 <sup>a</sup> de ago	144	0,92	0,92	0,96	612,38	0,77	0,87	0,98	329,84	16.335	16.596
15 de ago	139	0,90	0,90	0,97	487,74	0,73	0,84	0,98	268,42	16.591	16.975
1 <sup>a</sup> de set	133	0,86	0,88	0,97	360,44	0,70	0,82	0,98	229,74	16.798	17.291
15 de set	129	0,81	0,84	0,97	274,62	0,63	0,78	0,98	195,79	16.913	17.544
1 <sup>a</sup> de out	125	0,72	0,75	0,97	174,03	0,50	0,69	0,98	149,40	16.927	17.701
15 de out	123	0,66	0,69	0,97	156,98	0,43	0,66	0,98	127,32	16.948	17.773
1 <sup>a</sup> de nov	120	0,65	0,63	0,97	155,07	0,50	0,70	0,99	139,41	16.916	17.719
15 de nov	119	0,59	0,54	0,96	143,27	0,57	0,75	0,99	162,51	16.844	17.610
1 <sup>a</sup> de dez	118	0,59	0,47	0,96	138,03	0,61	0,76	1,00	182,09	16.579	17.307
15 de dez	119	0,74	0,64	0,96	164,87	0,67	0,78	0,99	215,26	16.220	16.912

<sup>(1)</sup>Caso 1: temperatura média diária varia e a radiação solar global diária permanece igual à média histórica; Caso 2: temperatura média diária igual à média histórica e a radiação solar global diária varia.

potenciais, dessa magnitude, já foram alcançados em condição de campo, no Brasil, e estão descritas em Coelho et al. (2003).

Os modelos probabilísticos, com base na distribuição triangular, desenvolvidos para simular valores diários de temperatura e de radiação solar global, geram dados semelhantes aos reais, de maneira que os simulados podem perfeitamente representar esses elementos climáticos em Piracicaba, SP.

## Referências

- ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; FRIZZONE, J.A.; SENTELHAS, P.C. Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p.271-278, 2001.
- BRESSAN, G. **Modelagem e simulação de sistemas computacionais**: abordagem sistemática de modelagem e análise de desempenho de sistemas. São Paulo: Larc-PCS/Epusp, 2002. 12p.
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 5.ed. São Paulo: Saraiva, 2003. 526p.
- CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.
- COELHO, A.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Rendimento do milho no Brasil: chegamos ao máximo? **Informações Agronômicas**, v.101, p.1-12, 2003. Encarte técnico.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Milho**: estratégias de manejo para alta produtividade. Piracicaba: Esalq/USP/LPV, 2003. 208p.
- FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M. **Modelo para estimativa de produtividade da cultura de milho no Estado de São Paulo**. 2004. 100p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- GADIOLI, J.L. **Estimativa de produtividade de grãos e caracterização fitotécnica da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 86p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- PEREIRA, F.A.C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em relação a um lisímetro de pesagem**. 1998. 87p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **QC software**: usage and reference: release 6.02. Cary, 1996. 823p.
- SOUSA, S.A.V. **Programa computacional para simulação da ocorrência de veranicos e queda de produção**. 1999. 124p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- VILLA NOVA, N.A. **Dados meteorológicos do Município de Piracicaba**. Piracicaba: Esalq/Departamento de Ciências Exatas, 2003. 2p.
- VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. Estimativa de graus-dia acumulado acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Caderno de Ciências da Terra**, v.30, p.1-7, 1972.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.

---

Recebido em 20 de outubro de 2004 e aprovado em 16 de abril de 2005